République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd
Faculté de Technologie
Département d'Hydraulique

Thèse

Présentée pour l'obtention du diplôme de :

Doctorat Ès Sciences

Option : Hydraulique

Sous le Thème :

Flux azoté : Origine et devenir dans les eaux souterraines cas de la région de Zana, Est algérien

Présentée par :

ATHAMENA Ali
(Ingénieur d'Etat en Hydraulique, Magistère en Hydraulique)

Devant le jury composé de :

M. TIRI Ammar	MCA	Université de Batna 2	Président
M. MENANI Mohamed Redha	Prof.	Université de Batna 2	Rapporteur
M. CHABOUR Nabil	Prof.	Université de Constantine	Examinateur
M. GOUAIDIA Layachi	Prof.	Université de Tébessa	Examinateur

- 2018 –

Table des matières

Table des matières
Liste des figures
Liste des tableaux
Avant-propos
Résumé
Abstract
Résumé en Arabe
Introduction Générale P01

Chapitre I : Cadre Physique

Introduction P04
I.1 Situation sur le plan régional P04
I.2 Situation administratif P06
I.3 Situation sociodémographique P06
I.4 Situation Socio-économique P06
I.5 Couvert végétal P08
I.6 Hydrographique P08
I.7 Ensembles morpho-structuraux P09
I.7.1 Les massifs carbonatés du Crétacé et du Jurassique P10
I.7.2 La plaine P11
I.8 Conclusion P11

Chapitre II : Contexte Géologique

Introduction P12
II.1 Cadre géologique global p12
II.2 Disposition générale dans la chaîne alpine P14
II.3 Disposition particulière en Algérie P15
II.3.1 Zones internes et médianes P17
II.3.1.1 Le socle de la petite Kabylie P17
II.3.1.2 Dorsale Kabyle P17

II.3.1.3 Domaine des flyschs P17
II.3.2 Zones externes P17
II.3.2.1 Massif d'Edough P18
II.3.2.2 Nappes telliennes P18
II.3.2.2.1 Les unités méridionales à Nummulites P18
II.3.2.2.2 Nappes telliennes P18
II.3.2.3 Série néritique constantinoise P18
II.3.2.4 L'ensemble sud-setifien P19
II.3.2.5 La Chebka du Sellaoua P20
II.3.3 L'ensemble autochtone d'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens (les monts de N'memcha et les Aurès) P20
II.3.3.1 Secteur Oriental ou algéro-tunisien P20
II.3.3.2 Secteur central P20
II.3.3.3 Secteur occidental P21
II.4 Géologie locale P21
II.4.1 Aperçu litho-stratigraphique P21
II.4.1.1 Formation peu ou pas tectonisées P22
II.4.1.1.1 Quaternaire P22
II.4.1.1.2 Mio-Pliocène P23
II.4.2 Formation de l'ensemble Sud-setifien P23
II.4.2.1 Crétacé inferieur P23
II.4.2.2 Jurassique supérieur P24
II.4.2.3 Trias P24
II.5 Tectonique P26
II.6 Aperçu structural P26
II.6.1 Phases tecto-orogéniques P29
II.6.2 Phase Atlasique P29
II.6.3 Phase Alpine P29
II.7 Conclusion P29

Chapitre III : Cadre Géophysique

Introduction P31
III.1 Principe de la prospection électrique P31
III.1.1 Polarisation spontanée P31
III.1.2 Méthode électrique des résistivités P31
III.1.3 Le profil de résistivité ou traînée électrique P33

III.2 Compagne de prospection électrique de la plaine de Zana P33
III.2.1 Etalonnage des mesures P35
III.2.1.1 Forage F55 de Zana (S.E Q7) P35
III.2.1.2 Forage (S.E D2 et J7, plaine de Gadaïne) P35
III.2.1.3 Echelle des résistivités P35
III.2.2 Difficultés d'interprétation P36
III.3 Examen des résultats P37
III.3.1 Etude du Substratum P38
III.3.1.1 Carte de résistivité en ligne AB = 3000 m P38
III.3.1.2 Coupes géo-électriques P38
III.3.1.3 Carte du substratum P38
III.3.2 Etude du recouvrement P41
III.3.2.1 Carte de résistivité en ligne AB = 1000m P41
III.3.2.2 Carte de recouvrement P42
III.3.2.3 Coupes géo-électriques P43
III.4 Conclusion P45

Chapitre IV : Contexte Climatique

Introduction P47
IV.1 Généralité sur le climat méditerrané P47
IV.1.1 Aperçu général sur le climat de la région P48
IV.2 Paramètres climatiques P49
IV.2.1 Précipitations P49
IV.2.2 Températures P51
IV.3 Caractérisation du climat P53
IV.3.1 Indice d'aridité de De Martonne P54
IV.3.2 Diagramme de L. Emberger P56
IV.3.3 Le quotient pluviométrique annuel de Moral P58
IV.3.4 Comparaison des indices climatiques P58
IV.4 Estimation des paramètres du bilan hydrologique P59
IV.4.1 Evapotranspiration potentielle (ETP) P60
IV.4.1.1 Méthode de Thornthwaite P60
IV.4.2 Evapotranspiration réelle P61
IV.4.2.1 Méthode de Turc P61
IV.4.2.2 Méthode de Verdeil P61

IV.5 Bilan hydrologique P63
IV.5.1 Bilan hydrologique de Thornthwaite P63
IV.5.2 Interprétation du bilan hydrologique P66
IV.6 Calcul du ruissellement P66
IV.7 Calcul de l'infiltration P67
IV.8 Conclusion P68

Chapitre V : Aperçu Hydrogéologique

Introduction P69
V.1 Les formations aquifères P69
V.1.1 Aquifère superficiel P70
V.1.2 Aquifère profond P70
V.2 Etude des aquifères P71
V.2.1 Aquifère superficiel P71
V.2.1.1 Inventaire des points d'eau P71
V.2.1.2 Piézométrie P71
V.2.1.3 Evolution de la piézométrie P72
V.2.1.4 Carte piézométrique mars 2008 P73
V.2.1.5 Carte piézométrique Septembre 2008 P73
V.2.1.6 Carte piézométrique mars 2015 P74
V.2.1.7 Carte piézométrique septembre 2015 P75
V.2.1.8 Carte piézométrique mars 2016 P75
V.2.1.9 Carte piézométrique septembre 2016 P76
V.2.1.10 Gradient hydraulique moyen P76
V.2.1.11 Battement moyen de la nappe P77
V.2.2 Aquifère profond P78
V.2.2.1 karst du Jurassique supérieur P78
V.2.2.2 karst du Crétacé Inférieur P79
V.2.2.3 Géométrie de l'aquifère karstique P79
V.3 Interactions entre les aquifères P81
V.4 Conclusion P81

Chapitre VI : Hydrochimie

Introduction P83

VI.1 Echantillonnage et acquisition des données P83

VI.1.1 Réseau d'échantillonnage P83

VI.1.2 Stratégie de prélèvement P85

VI.1.3 Représentativité de l'échantillonnage P85

VI.2 Etude analytique des paramètres physiques P86

VI.2.1 Température P86

VI.2.2 Le potentiel hydrogène (pH) P87

VI.2.3 Conductivité P88

VI.2.4 Charge totale dissoute TDS P90

VI.3 Etude analytique des éléments majeurs P91

VI.3.1 Le calcium P91

VI.3.2 Le magnésium P92

VI.3.3 Le sodium P94

VI.3.4 Le potassium P95

VI.3.5 Les chlorure P95

VI.3.6 Les sulfate P97

VI.3.7 Les bicarbonates P98

VI.4 Faciès chimiques des eaux P98

VI.4.1 Représentation graphique P98

VI.4.2 Faciès caractéristiques P100

VI.5 Etude des rapports caractéristiques et origine des éléments dominants P101

VI.5.1 Rapports et diagrammes caractéristiques P102

VI.5.1.1 Rapport r(Mg^{2+}/Ca^{2+}) P102

VI.5.1.2 Rapport r(r Cl^{-}/SO_4^{2-}) P102

VI.5.1.3 Rapport r(Ca^{2+}/SO_4^{2-}+HCO_3^{-}) P103

VI.5.1.4 Rapport r(Ca^{2+} + Mg^{2+}/SO_4^{2-}+HCO_3^{-}) P103

VI.5.1.5 Rapport r(Mg^{2+}+ Ca^{2+}) vs HCO_3^{-} P104

VI.5.1.6 Rapport r(Ca^{2+}/ Mg^{2+} vs Cl^{-}) P104

VI.5.1.7 Rapport r(Cl^{-}+SO_4^{2+}) vs (Ca^{2+}+Mg^{2+}) P105

VI.5.1.8 Rapport r(SO_4^{2+} vs Ca^{2+}) P106

VI.5.1.9 Rapport r(Na^{+} vs Cl^{-}) P106

VI.5.1.10 Diagramme (Conductivité Vs HCO_3^{-}/cl^{-} + SO_4^{2-}) P108

VI.5.2 Modélisation géochimique P108
VI.5.3 Analyse en composantes principales P115
VI.5.3.1 Projection des variables P116
VI.5.4 Analyse ascendante hiérarchique (CAH) P118
VI.6 Aptitude de l'eau à l'irrigation P119
VI.6.1 Salinité P119
VI.6.2 Eaux peu salées P120
VI.6.3 Eaux à forte teneur en sodium P120
VI.6.4 Classification de l'eau d'irrigation selon le diagramme de WILCOX P121
VI.7 Conclusion P126

Chapitre VII : Pollution des eaux

Introduction P127
VII.1 Principales sources de pollution dans la plaine de zana P127
V II.1.1 Pollution urbaine P128
V II.1.1.1 Evaluation de la population P128
V II.1.1.2 Estimation des besoins en eau potable P129
V II.1.1.3 Calcul de l'effluent au rejet des eaux usées P129
VII.1.2 Pollution agricole P130
VII.2 Impact de l'activité agricole dans la région de Zana P131
VII.2.1 Production des nutriments P132
VII.2.2 Elevage P133
VII.2.3 Activité agricole P134
VII.2.3.1 Engrais azotés P134
VII.2.3.2 Fumier P134
VII.3 Effluents urbains P135
VII.4 Etude de l'évolution de teneurs des nitrates P136
VII.4.1 Origine des nitrates P142
VII.4.2 Relation nitrate-Oxygène dissout / Profondeur P143
VII.5 Evaluation et cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines de la plaine de Zana à la pollution P144
VII.5.1 Historique du concept de la vulnérabilité des eaux souterraines P144
VII.5.2 Concept de vulnérabilité P147
VII.5.2.1 Evaluation de la vulnérabilité intrinsèque P148

VII.5.2.1.1 Paramètres d'importance primaire P149
VII.5.2.1.2 Paramètres d'importance secondaire P151
VII.5.2.2 Elaboration de la carte de vulnérabilité P151
VII.5.2.2.1 Elaboration de la carte de vulnérabilité avec la méthode DRASTIC P153
VII.5.3 Etablissement de la carte de vulnérabilité de la nappe superficielle de Zana P154
VII.5.3.1 Méthodologie de travail P154
VII.5.3.2 Etablissement des cartes thématiques P155
VII.5.3.2.1 Carte de la profondeur de l'eau (D) P155
VII.5.3.2.2 Carte de recharge (R) P156
VII.5.3.2.3 Carte des faciès géologiques de la zone saturée (A) P157
VII.5.3.2.4 Carte des sols (S) P157
VII.5.3.2.5 Carte des pentes (T) P158
VII.5.3.2.6 Carte de la lithologie de la zone Non saturée (I) P159
VII.5.3.2.7 Carte des perméabilités de la nappe (C) P161
VII.5.3.3 Interprétation de la carte de vulnérabilité P161
VII.6 Devenir des nitrates P163
VII.6.1 Migration vers les nappes en profondeur P163
VII.6.2 La migration dans la nappe P164
VII.7 Conclusion P166
Conclusion Générale et Perspective P167
1 Conclusion générale P167
2 Perspectives P169
Références Bibliographiques P170
Annexes P178

Liste des figures

Chapitre I : Cadre Physique

Fig. 1.1 : Carte de situation du bassin versant de la plaine de Zana P04
Fig. 1.2 : Carte des bassins versants algériens P05
Fig. 1.3 : Histogramme de la croissance de la population P06
Fig. 1.4 : Carte de répartition générale des cultures, saison 2015-2016 P07
Fig. 1.5 : Carte du réseau Hydrographique de la plaine de Zana P09
Fig. 1.6 : Carte Hypsométrique de la plaine de Zana P10
Fig. 1.7 : Carte géomorphologique de la plaine de Zana-El-Beïdha (Modèle numérique) P11

Chapitre II : Contexte Géologique

Fig. 2.1 : Plan de position simplifié des formations sud-setifiennes P13
Fig. 2.2 : Les grands ensembles structuraux de l'Afrique du Nord P14
Fig. 2.3 : Esquisse structurale du Nord-Est Algérien P15
Fig. 2.4 : Rapport structuraux entre les différentes unités de la chaîne des Maghrébides P16
Fig. 2.5 : Coupe générale des Maghrébides dans l'Est Algérien P16
Fig. 2.6 : Situation actuelle de la plateforme setifienne par rapport aux domaines des zones externes de la chaîne alpine d'Algérie nord-orientale P19
Fig. 2.7 : Extrait des cartes géologiques de Bourhzel et Merouana P25
Fig. 2.8 : Schéma structural simplifié de la plaine de Zana P27
Fig. 2.9 : Coupe géologique interprétative P28

Chapitre III : Cadre Géophysique

Fig. 3.1 : Carte de position des sondages électriques P34
Fig. 3.2 : Courbe d'étalonnage au niveau du forage F55 de Zana P36
Fig. 3.3 : Courbe d'étalonnage au niveau du forage D12 et J7, plaine de Gadaïne P37
Fig. 3.4 : Carte des résistivités en ligne AB = 3000 m P39
Fig. 3.5 : Carte du substratum d'une échelle 1/50 000 P40
Fig. 3.6 : Carte des résistivités en ligne AB = 1000 m P41
Fig. 3.7 : Carte de recouvrement P42
Fig. 3.8 : Coupes géo-électriques P43-45

Chapitre IV : Contexte Climatique

Fig. 4.1 : Carte des précipitations annuelles moyennes de l'Est algérien P48
Fig. 4.2 : Carte de situation des stations météorologique et pluviométrique P50
Fig. 4.3 : Variation des précipitations moyennes mensuelles interannuelles P51
Fig. 4.4 : Variation des températures moyennes P53
Fig. 4.5 : Carte simplifiée des zones bioclimatiques de l'Est algérien P54
Fig. 4.6 : Abaque d'indice d'aridité de De Martonne P55
Fig. 4.7 : Climato-gramme d'Emberger P57
Fig. 4.8 : Zones d'évapotranspiration potentielle annuelle moyenne de l'Est algérien P59
Fig. 4.9 : Abaque de Verdeil P62
Fig. 4.10 Variation mensuelle des éléments du bilan hydrique, Station A. S-Aéroport P64
Fig. 4.11 Variation mensuelle des éléments du bilan hydrique, Station Ain Djasser P65

Chapitre V : Aperçu Hydrogéologique

Fig. 5.1 : Carte d'inventaire des forages de la nappe superficielle de Zana P72
Fig. 5.2 : Carte piézométrique de la nappe superficielle de Zana (Mars 2008) P73
Fig. 5.3 : Carte piézométrique de la nappe superficielle de Zana (Septembre 2008) P74
Fig. 5.4 : Carte piézométrique de la nappe superficielle de Zana (Mars 2015) P74
Fig. 5.5 : Carte piézométrique de la nappe superficielle de Zana (Septembre 2015) P75
Fig. 5.6 : Carte piézométrique de la nappe superficielle de Zana (Mars 2016) P75
Fig. 5.7 : Carte piézométrique de la nappe superficielle de Zana (Septembre 2016) P76
Fig. 5.8 : Carte de battement de de la nappe superficielle de Zana (2008- 2016) P77
Fig. 5.9 : Coupe hydrogéologique interprétative P80
Fig. 5.10 : Logs stratigraphiques des forages dans la région P80
Fig. 5.11 : Coupe en 3D du complexe aquifère de la plaine de Zana P81

Chapitre VI : Hydrochimie

Fig. 6.1 : Position des points d'eau échantillonnés pour analyses chimiques P84
Fig. 6.2 : Répartition spatiale du pH dans les eaux de la nappe superficielle de Zana P87
Fig. 6.3 : Variation spatiale du pH des eaux souterraines de la nappe superficielle de Zana P88
Fig. 6.4 : Variation Temporelle de la C.E dans les eaux de la nappe superficielle de Zana P89
Fig. 6.5 : Répartition spatiale de la C.E dans les eaux de la nappe superficielle de Zana P89
Fig. 6.6 : Variation spatiale de la C. E dans les eaux de la nappe superficielle de Zana P90

Fig. 6.7 : Corrélation entre la TDS et la conductivité P90
Fig. 6.8 : Répartition spatio-temporelle de la TDS (g/l) P91
Fig. 6.9 : Répartition spatio-temporelle du calcium (mg/l) P92
Fig. 6.10 : Répartition spatio-temporelle du magnésium (mg/l) P93
Fig. 6.11 : Répartition spatio-temporelle du sodium (mg/l) P94
Fig. 6.12 : Répartition spatio-temporelle du potassium (mg/l) P95
Fig. 6.13 : Répartition spatio-temporelle des chlorures (mg/l) P96
Fig. 6.14 : Répartition spatio-temporelle des sulfates (mg/l) P97
Fig. 6.15 : Répartition spatio-temporelle des bicarbonates (mg/l) P98
Fig. 6.16 : Diagrammes de Piper illustrant les faciès chimique des eaux de la nappe de Zana P99
Fig. 6.17 : Répartition générale des faciès chimique des eaux de la nappe superficielle de Zana P100
Fig. 6.18 : Evolution et distribution des faciès chimiques P101
Fig. 6.19: Diagramme Mg^{2+} vs Ca^{2+} P102
Fig. 6.20: Diagramme Conductivité vs Cl^-/SO_4^{2-} P103
Fig. 6.21: Diagramme $HCO_3^-+SO_4^{2-}$ vs Ca^{2+} P103
Fig. 6.22: Diagramme $HCO_3^- + SO_4^{2-}$ vs $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ P104
Fig. 6.23: Diagramme HCO_3^- vs $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ P104
Fig. 6.24: Diagramme Ca^{2+}/ Mg^{2+} vs Cl^- P105
Fig. 6.25: Diagramme $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ vs $Cl^- + SO_4^{2-}$ P105
Fig. 6.26: Diagramme Ca^{2+} vs SO_4^{2-} P106
Fig. 6.27: Diagramme Cl^- vs Na^+ P107
Fig. 6.28: Diagramme Na^+/Cl^- vs $Ca^{2+}/(HCO_3^- +SO_4^{2-})$ P107
Fig. 6.29 : Origine de la salinité P108
Fig. 6.30 : Evolution de l'indice de saturation. P113
Fig. 6.31 : Diagramme ISC vs ISD des eaux souterraines de la nappe superficielle de Zana P114
Fig. 6.32 : Cercle de corrélation, plan F1-F2 et F1-F3 P117
Fig. 6.33 : Dendrogram des variables des eaux souterraines de la nappe superficielle de Zana P119
Fig. 6.34 : Diagramme du S.A.R P122
Fig. 6.35 : Diagramme du S.A.R P123
Fig. 6.36 : Diagramme de Wilcox P124
Fig. 6.37 : Diagramme de Wilcox P125

Chapitre VII : Pollution des eaux

Fig. 7.1 : Distribution générale des terres de la commune de Zana P130
Fig. 7.2 : Principaux processus de transformation des formes d'azote contenu dans les effluents et déchets P136
Fig. 7.3 : Chaine de transformation des Nitrates dans l'organisme P137
Fig. 7.4 : variation temporelle de la répartition des nitrates dans les eaux souterraines de la nappe de Zana P139
Fig. 7.5 : variation temporelle de la répartition des nitrites dans les eaux souterraines de la nappe de Zana P140
Fig. 7.6 : variation temporelle de la répartition d'ammoniac dans les eaux souterraines de la nappe de Zana P141
Fig. 7.7 : Relation NO_3^-/Cl^- vs Cl^- P143
Fig. 7.8 : Evolution des nitrates en fonction de l'oxygène dissout P144
Fig. 7.9 : Evolution des nitrates en fonction du niveau statique de la nappe p144
Fig. 7.10 : Carte de la répartition des profondeurs P155
Fig. 7.11 : Carte de la recharge de la nappe superficielle P156
Fig. 7.12 : Carte de répartition des faciès géologiques de la zone saturée de la nappe P157
Fig. 7.13 : Carte des textures des sols P158
Fig. 7.14 : Carte de répartition des pentes P159
Fig. 7.15 : Carte de la lithologie de la zone non saturée de la nappe superficielle P160
Fig. 7.16 : Carte des perméabilités de la nappe superficielle P161
Fig. 7.17 : Carte de la vulnérabilité de la nappe superficielle de Zana P162
Fig. 7.18 : Profil des teneurs moyennes annuelles des nitrates (mg/l) P164
Fig. 7.19 : Carte de synthèse de la répartition spatio-temporelle des nitrates-vulnérabilité de la nappe superficielle de Zana P165

Liste des tableaux

Chapitre III : Cadre Géophysique

Tableau 3.1 : Caractéristiques électriques des roches P32
Tableau 3.2 : Echelle des résistivités P35

Chapitre IV : Contexte Climatique

Tableau 4.1 : Caractéristiques des stations pluviométriques P49
Tableau 4.2 : Précipitations moyennes mensuelles interannuelles et saisonnières en mm P51
Tableau 4.3 : Températures moyennes mensuelles interannuelles en °C P52
Tableau 4.4 : Indice d'aridité de De Martonne. P55
Tableau 4.5 : Indice d'aridité mensuelle de De Martonne P56
Tableau 4.6 : Quotient pluviométrique annuel de Moral P58
Tableau 4.7 : Valeurs de l'ETR selon la méthode de Turc P61
Tableau 4.8 : Valeurs de l'ETR selon la méthode de Verdeil P62
Tableau 4.9 : Bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite Station Ain Skhouna-Aéroport P64
Tableau 4.10 : Bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite Station Ain Djasser P65
Tableau 4.11 : Ruissellement selon la méthode de Tixeront et Berkaloff P67
Tableau 4.12 : Différents paramètres du bilan hydrologique P67

Chapitre VI : Hydrochimie

Tableau 6.1 : Paramètres mesurés in situ et appareillage utilisé P85
Tableau 6.2 : Statistiques descriptive des résultats d'analyse physico-chimique P86
Tableau 6.3 : Indices de saturation des eaux souterraines du Zana (2013) P110
Tableau 6.4 : Indices de saturation des eaux souterraines du Zana (2014) P111
Tableau 6.5 : Indices de saturation des eaux souterraines du Zana (2015) P111
Tableau 6.6 : Indices de saturation des eaux souterraines du Zana (2016) P112
Tableau 6.7 : Matrice de corrélation des variables P116
Tableau 6.8 : Corrélation facteurs-variables P117
Tableau 6.9 : Baisse de rendements de certaines cultures en relation avec la salinité de l'eau d'irrigation P120

Chapitre VII : Pollution des eaux

Tableau 7.1 : Evaluation de la population P129

Tableau 7.2 : Besoins domestiques moyens P129

Tableau 7.3 : Effluent au rejet des eaux usées P130

Tableau 7.4 : Répartition générale des terres de la commune de Zana P131

Tableau 7.5 : Occupation des sols pour l'année 2015-2016 P131

Tableau 7.6 : Répartition de l'élevage année 2015-2016 P132

Tableau 7.7 : Teneurs en composés azotés dans les eaux souterraines de Zana P133

Tableau 7.8 : Estimation de l'apport annuel en azote à partir de l'élevage P133

Tableau 7.9 : Estimation de l'apport annuel en nitrates provenant des eaux usées domestiques P135

Tableau 7.10 : Corrélation des nitrates avec calcium et magnésium P143

Tableau 7.11 : Notion et poids des paramètres de la méthode DRASTIC P153

Tableau 7.12 : Plage d'estimation des paramètres P154

Avant-propos

Avant-propos

Au terme de la rédaction de ce manuscrit, il m'est très agréable d'exprimer ma gratitude envers toutes personnes ayant rendu ce travail possible.

Je souhaite d'abord, remercier tout particulièrement mon directeur de thèse Monsieur ***MENANI Mohamed Redha****, Professeur à l'Université de Batna 2 qui m'a permis de réaliser cette thèse dans les meilleures conditions. Je tiens encore à le remercier pour ses riches conseils et son suivi de près avec sa rigueur scientifique et ses précieux conseils, pour sa disponibilité permanente, pour sa franchise à toute épreuve et pour toutes les discussions enrichissantes que nous avons pu avoir. Je le remercie également pour la confiance et la compréhension qu'il a toujours révélée à mon égard. Si ce travail est mené à terme, c'est grâce à son aide et son soutien. Qu'il soit assuré de ma profonde estime et qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude*

Mes sincères remerciements s'adressent également aux membres du jury qui ont accepté de lire et de juger ce travail :

Monsieur ***TIRI Ammar****, Maître de conférences à l'Université de Batna qui m'a fait l'honneur de présider le jury.*

Monsieur ***CHABOUR Nabil****, Professeur à l'Université de Constantine 1 de bien vouloir accepter d'examiner mon travail et apporter son avis et ses critiques.*

Monsieur ***GOUAIDIA Layachi****, Professeur à l'Université de Tébessa d'avoir bien voulu consacrer son temps à donner ses remarques quant au manuscrit soumis à son jugement.*

Qu'il me soit permis d'exprimer ma profonde reconnaissance à monsieur ***BELHADDAD Salim****, ambassade d'Algérie en Bulgarie et* ***Dr DJAIZ Fouad****, enseignant à l'Université de Batna pour leurs encouragements et leurs sympathies.*

Mes remerciements les plus vifs à toutes les personnes qui m'ont facilité la tâche pour acquérir les documents nécessaires à la réalisation de ce travail et qui m'ont accueilli et assisté aux sièges de :

- ✓ *CRNA ; centre de recherche nucléaire d'Alger, particulièrement le directeur* ***Dr MELLAH Abdelhamid*** *et monsieur* ***CHERCHALI Hocine****, chercheur au laboratoire des radio-isotopes ;*
- ✓ *CRNB ; centre de recherche nucléaire de Birine, spécialement monsieur* ***BOUZIDI Abdelkader*** *et monsieur* ***BARADAI Mustapha****, chercheurs au laboratoire des radio-isotopes ;*
- ✓ *ONM ; office national de la météorologie de Constantine, notamment le directeur monsieur* ***AÏCHI Salim*** *;*
- ✓ *ANRH ; l'agence nationale des ressources hydriques Constantine*

Ma reconnaissance à tous les propriétaires des points d'eau qui m'ont autorisé à utiliser leurs puits et forages pour effectuer les prélèvements d'eau et les mesures physico-chimiques in-situ.

Enfin, comment terminer cet avant-propos sans associer ma famille pour son encouragement, son soutien et sa patience. Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à toutes les personnes qui m'ont permis de mener à bien ce modeste travail.

Résumé

Résumé

Nous avons essayé, d'apporter une contribution à l'étude de l'aquifère superficielle de la plaine de Zana et de déterminer l'origine et le devenir du flux azoté. La plaine de Zana fait partie du bassin versant des hauts plateaux constantinois et plus précisément du sous bassin versant Merdja Zana (07-02), caractérisée par un relief modéré et une pente douce.

L'étude géologique en corrélation avec les données de la prospection géophysique met en évidence l'existence de deux formations. La première de surface d'âge Mio-Plio-Quaternaire est formée par des niveaux sableux, de graviers, de calcaire lacustre et des intercalations argileuses. La deuxième formation est carbonatée et formée essentiellement par des calcaires du Crétacé inférieur et du Jurassique supérieur. Le recouvrement de surface atteint dans certains endroits les 200 m d'épaisseur notamment au milieu de la plaine et une faible épaisseur en bordures de la plaine et au voisinage des massifs.

L'étude climatologique a montré que la région de Zana à un climat semi-aride, caractérisé par une abondance pluviale relative automnale, hivernale et printanière, d'une part et par une saison sèche fortement prononcée favorisant l'agressivité climatique.

L'étude hydrogéologique de la plaine montre que les formations superficielles du Mio-Plio-Quaternaire peuvent offrir des possibilités aquifères très intéressantes. La piézométrie dévoile une convergence des écoulements des eaux souterraines vers le centre de la nappe.

L'étude hydro-chimique a permis d'attribuer l'origine évaporitique aux éléments Na^+, Mg^{2+}, K^+, Cl^-, SO_4^{2-}, quant à l'élément HCO_3^-, il est issu des formations carbonatées. Par ailleurs, la caractérisation hydrogéochimique des eaux souterraines en utilisant une combinaison de méthodes géochimiques et statistiques montre que la distribution spatiale de la minéralisation évolue dans le sens d'écoulements convergent des eaux, ce qui confirme le contrôle des conditions hydrogéologiques sur le chimisme de l'eau. Le faciès chimique le plus représentatif est le faciès sulfaté-chloruré et magnésien. La qualité chimique de l'eau est médiocre, résultant d'une forte salinité influencée par la lithologie de l'aquifère, les facteurs climatiques (précipitations et températures) et par la présence des nitrates, tirant leurs origines des activités agricoles principalement.

Enfin, l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution de la nappe superficielle de Zana par la méthode DRASTIC révèle que cette dernière présente une vulnérabilité élevée au centre de la plaine (zone des Chott et Merdja). Cette vulnérabilité devint modérée et s'atténue lorsqu'on s'éloigne du centre de la plaine.

Mots clés : Zana, Merdja, Chott Saboun, Hydrogéologie, Hydrogéochimie, Faciès chimique, Pollution, DRASTIC, Nitrates.

Abstract

We tried to make a contribution to the study of the superficial aquifer of the Zana plain and to determine the origin and become of nitrogen flux. The plain of Zana belongs to the catchment area of the high plateaus Constantinois and more precisely of under area catchment Merdja Zana (07-02), characterized by a moderate relief and a slight slope.

The geological study in correlation with the data of the geophysical prospection highlights the existence of two formations. The first surface of Mio-Plio-Quaternary age is formed by levels of sand, gravel, water limestone and argillaceous intercalations. The second formation, it is carbonated and formed primarily by limestones of the lower Cretaceous and Jurassic superior. The surface covering reaches in some places the 200 m thick especially in the middle of the plain and a small thickness in borders of the plain and in the vicinity of the massifs.

The climatological study has shown that the Zana region has a semi-arid climate, characterized by a relative rainfall abundance of autumn, winter and spring, on the one hand and a strongly pronounced dry season favoring climatic aggressiveness.

The hydrogeological study of the plain shows that the superficial formations of the Mio-Plio-Quaternary can offer very interesting aquifer possibilities. Piezometry reveals a convergence of groundwater flows towards the center of the aquifer.

The hydro-chemical study allowed attributing the evaporitic origin to the elements Na^+, Mg^{2+}, K^+, Cl^-, SO_4^{2-}, as for the element HCO_3^-, it comes from carbonate formations. In addition, the hydro-geochemical characterization of groundwater using a combination of geochemical and statistical methods shows that the spatial distribution of mineralization evolves in the direction of convergent flows of water, which confirms the control of hydrogeological conditions on the chemistry of the water. The most representative chemical facies is sulphate-chlorinated and magnesium facies. The chemical quality of the water is poor, resulting from high salinity influenced by the lithology of the aquifer, climatic factors (precipitation and temperatures) and by the presence of nitrates, originating mainly in agricultural activities.

Finally, the evaluation of the Zana surface water pollution vulnerability by the DRASTIC method reveals that the latter has a high vulnerability in the center of the plain (Chott and Merdja zone). This vulnerability became moderate and diminished when one moved away from the center of the plain.

Key words: Zana, Merdja, Chott Saboun, Hydrogeology, Hydrogeochemistry, Chemical facies, Pollution, DRASTIC, Nitrates.

ملخص

حاولنا المساهمة في دراسة طبقة المياه الجوفية السطحية لسهل زانة وتحديد منشأ النيتروجين ومصيره. ينتمي سهل زانة إلى الحوض المصب الهضاب العليا القسنطينية، وعلى نحو أدق حوض مرجة زانة (07-02)، الذي يتميز بتضاريس معتدلة ومنحدر طفيف.

تساهم الدراسة الجيولوجية في الارتباط مع بيانات التنقيب الجيوفيزيائي في إبراز وجود تكوينين. يتكون السطح الأول من العصر Mio-Plio-Quaternary Age من مستويات الرمل والحصى والحجر الجيري للمياه وترسبات الطين. التشكيل الثاني، هو كربوني ويتكون في المقام الأول من الحجر الجيري من أدنى العصر الطباشيري والجوراسي العلوي. تصل سماكة التكوين السطحي في بعض الأماكن الى 200 م، لا سيما في منتصف السهل وسماكة منخفضة عند أطراف السهل وفي محيط الكتل الصخرية.

وقد أظهرت الدراسة المناخية أن منطقة زانا تتمتع بمناخ شبه جاف يتسم بوفرة غزيرة نسبيًا في الخريف والشتاء والربيع من جهة وموسم جاف واضح المعالم يؤيد العدوانية المناخية.

وتبين الدراسة الهيدروجيولوجية للسهل أن التكوينات السطحية للـ Mio-Plio-Quaternary يمكن أن تقدم إمكانيات جوفية مهمة للغاية. يكشف بيزومتري عن تقارب تدفق المياه الجوفية نحو وسط طبقة المياه الجوفية.

سمحت الدراسة الهيدروكيميائية بإسناد أصل التبخر إلى العناصر Na^+ و Mg^{2+} و K^+و Cl^-و SO_4^{2-}، بينما العنصر HCO_3^- يأتي من تكوينات كربونية. بالإضافة إلى ذلك، فإن التوصيف الهيدروكيميائي للمياه الجوفية باستخدام مزيج من الأساليب الجيوكيميائية والإحصائية يظهر أن التوزيع المكاني للتمعدن يتطور في اتجاه التدفقات المتقاربة للماء، مما يؤكد التحكم في الظروف الهيدروجيولوجية في كيمياء الماء. والواجهة الكيميائية الأكثر تمثيلاً هي السلفات الكبريتية والمغنيسيوم. إن الجودة الكيميائية للمياه رديئة، ناتجة عن ارتفاع الملوحة المتأثرة بصخور طبقة المياه الجوفية، والعوامل المناخية (هطول الأمطار ودرجات الحرارة) وبوجود النترات، التي تنشأ أساساً في الأنشطة الزراعية.

وأخيرًا، فإن تقييم مدى قابلية تأثرطبقة المياه الجوفية السطحية لسهل زانة بالتلوث بواسطة طريقة DRASTIC يكشف أن هذا الأخير لديه قابلية عالية للتأثر في وسط السهل (منطقة Chottو Merdja). هذه الثغرة تصبح معتدلة تنحسر كلما ابتعدنا عن وسط السهل.

الكلمات المفتاحية: زانة، مرجة، شط صابون، جيولوجيا المياه، الكيمياء الهيدروجيولوجية، الوجوه الكيميائية، التلوث، دراستيك، النترات

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

L'eau est un élément indispensable à la vie et revêt d'une importance capitale pour d'infinies activités humaines. Malheureusement, sa disponibilité limitée pose un problème épineux qui entrave le développement socio–économique dans nombreuses régions du monde, à l'exemple de la rive sud de la méditerranée, où les effets du changement climatique sont fortement ressentis. En Algérie où la sécheresse persiste depuis plusieurs décennies, un déficit hydrique alarmant et sans précédent est enregistré. A ce phénomène, vient s'additionner le problème de l'altération qualitative des réserves en eau disponibles, conduisant ainsi à des situations de plus en plus complexes et difficiles à gérer face à une demande sans cesse grandissante. A cet effet, la gestion intégrée des ressources en eau est devenue une nécessité absolue et ce dans la perspective d'harmoniser le développement socio-économique et la préservation de la qualité des ressources en eaux. Ceci est loin d'être accomplis en Algérie, particulièrement dans le contexte actuel où le volet socio–économique a pris le dessus sur les exigences qualitatives.

Le choix pour l'altération qualitative des eaux par les nitrates est motivé par le fait que ces substances malgré leur intérêt dans l'amélioration des rendements agricoles, deviennent, selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS, 2004), au-delà de 50 mg/l, nuisibles pour la santé humaine et l'environnement. Plusieurs études ont montré que la pollution des eaux souterraines par les nitrates a atteint un stade alarmant à l'instar du programme de surveillance des eaux souterraines réalisé par le laboratoire de chimie des eaux de l'ANRH (1994), a montré l'existence depuis 1994 d'une forte concentration en nitrates dans les eaux des nappes souterraines, avec une teneur dépassant largement la dose maximale de 50 mg/l dans plusieurs régions du pays. Rappelons que pour se parer de la dangerosité des nitrates la plupart des pays, dont l'Algérie (JORA, 2006), ont également opté pour cette limite (50 mg/l) comme teneur maximale en nitrates dans l'eau destinée à la consommation humaine.

Dans le présent travail de recherche, nous menons une étude sur une des importantes strates rurales de la partie septentrionale de la wilaya de Batna, le sous bassin versant de Zana Chott Saboun (07-02), qui fait partie du grand bassin hydrographique des hauts plateaux constantinois. Cette région est caractérisée dans son ensemble par un climat semi–aride, où interfère une aridité intense particulièrement en été et une grande variabilité spatiotemporelle des précipitations et à la suite de fortes averses de courte durée. Depuis le début des années 1990, la région en question a connu un grand essor économique axé sur le développement agro–pastoral et une importante poussée démographique, ce qui implique une forte augmentation de

la demande en eau. La région d'étude a connu, durant ces dernières années, une certaine expansion économique et particulièrement agricole, et ce après l'application du Programme National de Développement de l'Agriculture (PNDA) en 2000 et celui du Fond National pour la Régulation du Développement Agricole (FNRDA) en 2001. Ceci a augmenté la demande en eau et a exposé la ressource à différentes pollutions résultant des activités agricoles.

Bien que la région considérée ait fait l'objet de peu d'études, traitant principalement des aspects hydrogéologique (CHABOUR, 1993, ATHAMENA, 2008, etc.), aucune étude n'a pu être réalisée pour cerner l'origine et le devenir des nitrates dans les eaux souterraines de la région. Dans cette optique, les principaux objectifs recherchés à travers cette étude visent à une meilleure compréhension du complexe aquifère du bassin de Zana et une meilleure connaissance du problème de la contamination par les nitrates. Les résultats souhaités de cette étude sont :

- ✓ maitriser les phénomènes hydrogéologiques ;
- ✓ évaluer les caractéristiques physico-chimiques des ressources en eau souterraine ;
- ✓ évaluer le flux azoté dans les eaux souterraine de la région ;
- ✓ identifier les zones les plus vulnérables à la pollution azotée ;
- ✓ détecter l'origine de la contamination par le flux azotée.

Afin d'aboutir aux objectifs susvisés, nous avons jugé utile de structurer cette thèse autour de deux parties subdivisée en sept chapitres précédés par une introduction générale qui décrit la problématique du sujet et les objectifs visés. Une conclusion générale et des perspectives achèveront cette thèse.

La première partie concerne l'étude des caractéristiques physiques de la plaine de Zana. Elle comprend cinq chapitres :

Le premier chapitre de cette thèse sera consacré au cadre physique et la description générale du sous bassin versant de Zana pour bien comprendre les mécanismes hydrologiques et morpho-métrique qui le caractérisent.

Le deuxième chapitre sera réservé à l'étude géologique de la région, nous développerons l'aspect litho-stratigraphique et structural, en mettant l'accent sur les formations susceptibles d'être un aquifère.

Le troisième chapitre sera réservé à l'étude géophysique de la région pour détailler la géométrie et l'extension de l'aquifère ainsi que sa composition lithologique (qui influe sur le chimisme de la nappe). Cette partie est basée sur la prospection électrique réalisée par la C.G.G l'an 1969.

Le quatrième chapitre regroupe une étude des différents paramètres climatiques, tels que le type de climat, l'évolution des précipitations, l'évolution des températures, l'estimation de l'évaporation et le calcul du bilan hydrologique.

La seconde partie a été consacrée aux caractéristiques hydrogéologiques (conditions aux limites, piézométrie etc.), à l'évolution et à la répartition des éléments chimiques, ainsi qu'à la détermination de la vulnérabilité de la nappe et la quantification de la pollution azotée. Cette partie a été développée dans trois chapitres.

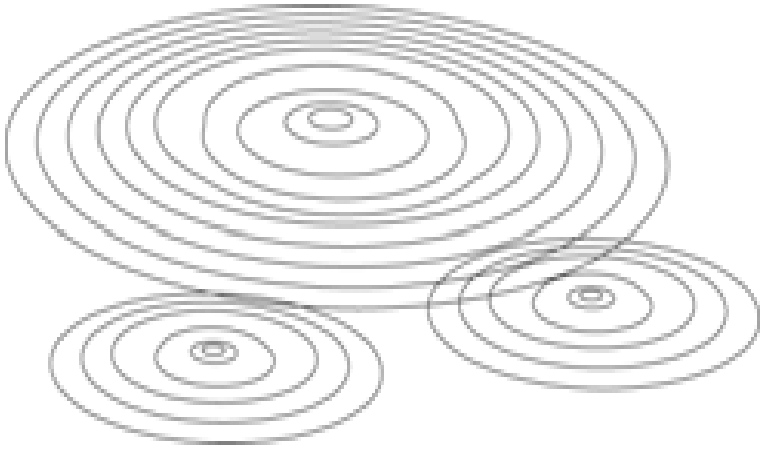
Le cinquième chapitre traite de l'hydrogéologie de la nappe, où nous avons abordé les conditions aux limites et la piézométrie.

Le sixième chapitre présente l'évolution des paramètres chimiques dans le temps et dans l'espace en abordant les mécanismes de l'acquisition de la minéralisation des eaux souterraines. Cette étude est basée sur différentes méthodes hydro-chimiques et des techniques d'analyse statistique (ACP et AC). Enfin, une évaluation de la qualité est menée pour déterminer l'aptitude des eaux souterraine de Zana à l'irrigation.

Le septième chapitre est consacré à l'étude de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution en ciblant particulièrement la pollution nutritive et en déterminant les principaux processus de la détérioration de la qualité des eaux. Cette caractérisation sera couplée d'une évaluation et de la cartographie des zones vulnérables à la pollution des nappes aquifères par l'application de la méthode DRASTIC.

Chapitre 1 :

Cadre Physique



Chapitre I : Cadre Physique

Introduction

L'analyse et l'étude des caractéristiques morpho-métriques d'un bassin versant constituent une plateforme pour la compréhension du comportement du bassin versant. L'activité anthropique, la forme, la superficie, le relief et les pentes influent sur l'infiltration et le ruissellement superficiel dans un bassin versant.

La conjonction des facteurs géographiques et climatiques ont donnée naissance à un écoulement endoréique ; l'eau s'écoule à l'intérieur de la plaine vers le Chott et les Merdjas qui constituent le principal exutoire.

I.1 Situation sur le plan régional

Situé dans la partie septentrionale de la wilaya de Batna et fait partie de sa strate rurale. Zana-El-Beïdha, qu'on va appeler le long de ce travail plaine de Zana, Fig. 1.1, promue au rang de chef-lieu de commune l'an 1984 par décret N° 84-365 du 01/12/1984(JORADP N° 67 du 19/12/1984, p. 1483). Durant la période coloniale et après l'indépendance du pays, jusqu'en 1984 la commune de Zana-El-Beïda, faisait partie de la commune d'Ain Djasser, qui elle-même étant gérée administrativement par la daïra de Merouana. A la suite du découpage territorial de l'an 1984, Zana-El-Beïdha a été reliée administrativement à la daïra de Seriana, nouvellement érigée en chef-lieu de daïra.

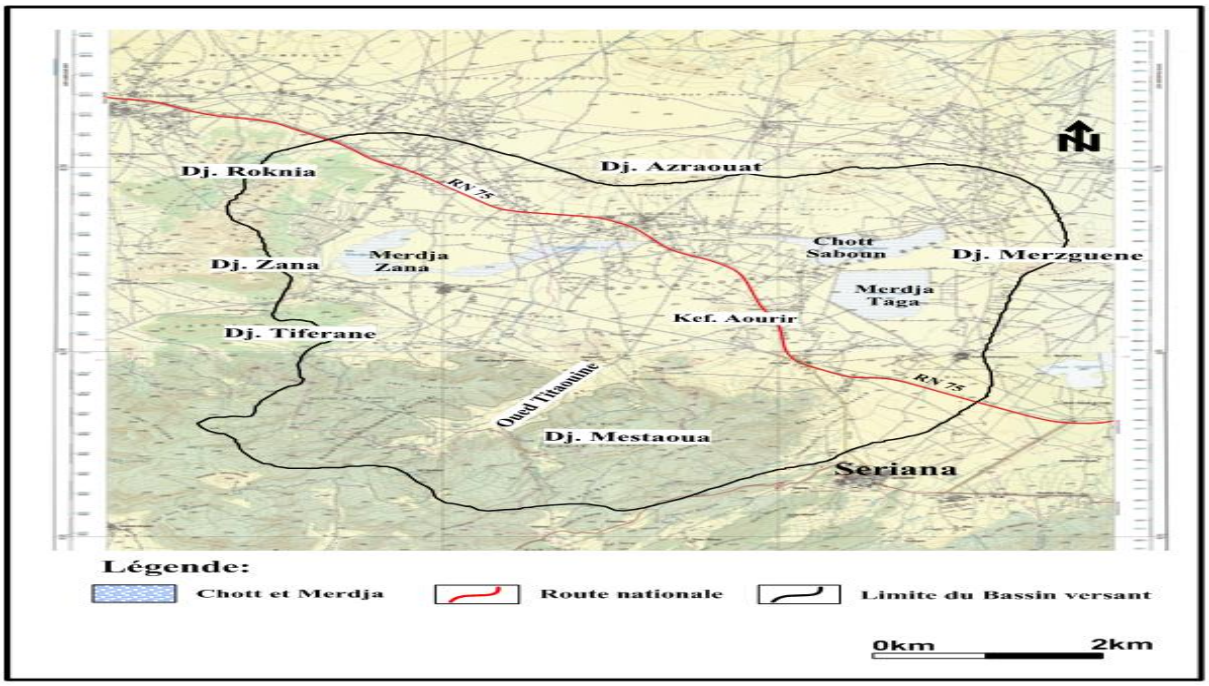


Fig. 1.1 : Carte de situation du bassin versant de la plaine de Zana (Extrait des cartes topographiques assemblées de Batna et Souk Naâmane d'une échelle 1/50.000)

Distante de 50 Km du chef-lieu de wilaya Batna et 15 Km de Seriana. Reliée à son chef-lieu de wilaya par la R.N 75 qui traverse son agglomération chef-lieu et la toute la commune de bout en bout du Nord-Ouest vers Sud-Est pour aboutir à un échangeur Batna-Constantine-Sétif sur la R.N 3 au lieu-dit Ain Skhouna.

Faisant partie du bassin versant des hauts plateaux Constantinois et plus précisément du sous bassin versant Merdja Zana, Fig.1.2. La plaine de Zana et plus précisément Zana-Chott Saboun est délimitée par les méridiens 6°.00' E et 6°.12'E et par les parallèles 35°.70' N et 35°.88' N dans le système WGS 84. Elle est délimitée topographiquement comme suit :

- ✓ Au Nord par Djebel Azraouat Nord et Sud culminant respectivement à 951 m et 952 m ;
- ✓ Au Sud par Djebel Mestaoua culminant à 1596 m ;
- ✓ A l'Est par Djebel Merzeguene et Tizourite culminant respectivement à 822 m et 1048 m ;
- ✓ A l'Ouest par Djebels Roknia et Zana culminant respectivement à 1241 m et 1280 m.

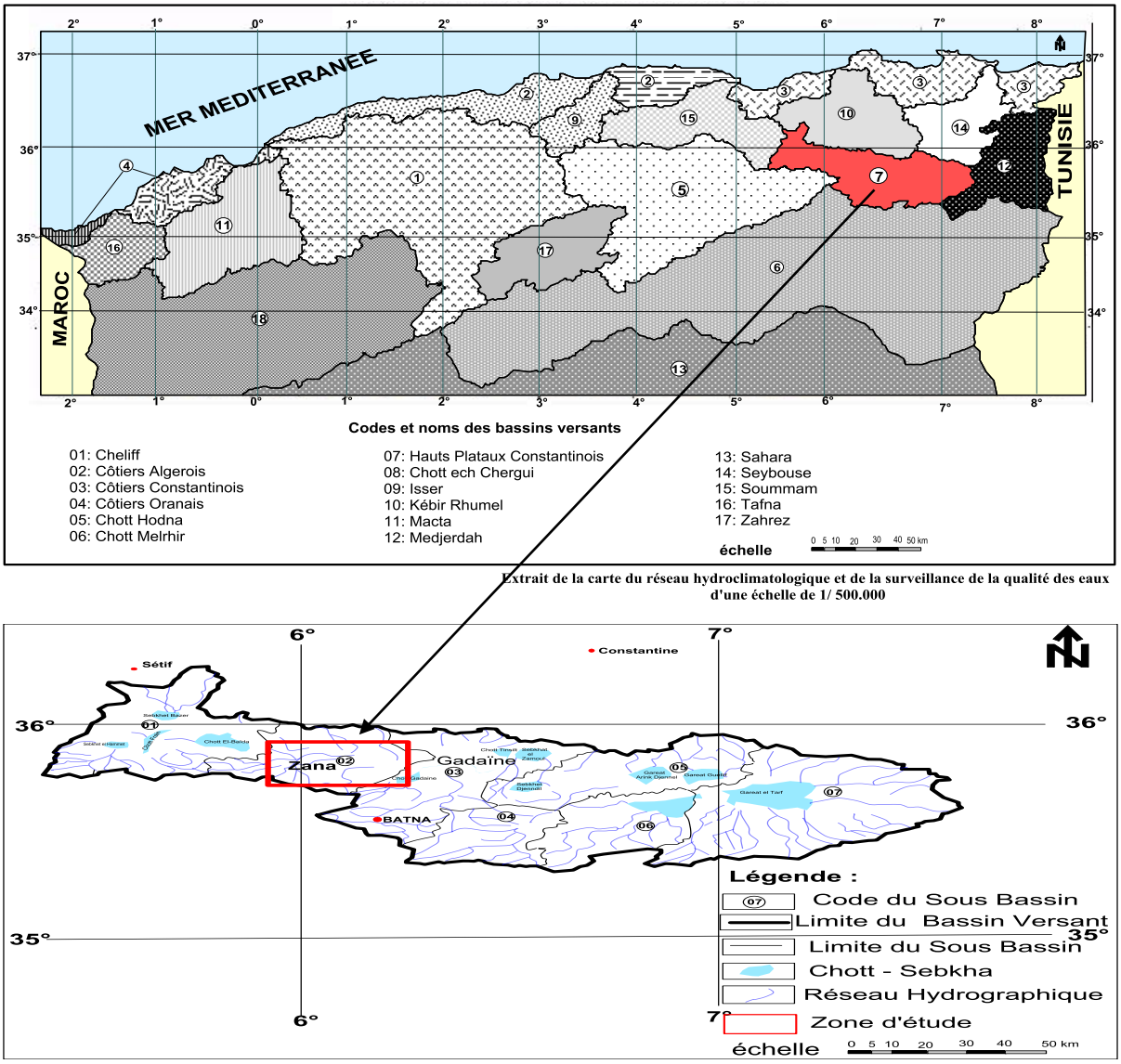


Fig. 1.2 : Carte des bassins versants algériens

I.2 Situation administratif

La commune de Zana-el-Beïdha est limitée administrativement comme suit :

- ✓ Au Nord-Est par la commune de Bir Chouhada (ex Levasseur) ;
- ✓ Au Nord par la commune de Ouled Khelouf, wilaya de Mila ;
- ✓ Au Sud par la commune d'Oued-El-Ma ;
- ✓ A l'Est par les communes de Seriana et Lazrou ;
- ✓ A l'Ouest par les communes d'Ain Djasser et El-Hassi.

I.3 Situation sociodémographique

La commune de Zana-El-Beïda s'étend sur une superficie de 213.95 Km² (PDAU), avec une population totale de 10564 hab. selon le dernier RGPH soit une densité de 49 Hab. /Km². Elle Englobe en plus du centre Zana-El-Beïdha deux agglomérations secondaires à savoir Zana Ouled Sbaâ et Theniet Sedra et onze localités éparses.

La répartition spatiale de la population à l'échelle communale démontre clairement le caractère de l'activité agricole de la région car sur 10564 habitants recensés l'an 2008, 6024 sont dispersé sur l'ensemble des mechtas parsemées dans la plaine soit plus de la moitié de la population et seulement 1963 habitants sont concentrés dans le chef-lieu de la commune, 1959 dans l'agglomération secondaire Zana Ouled Sbaâ et 618 dans l'agglomération secondaire Theniet Sedra (DPAT Batna), Fig. 1.3.

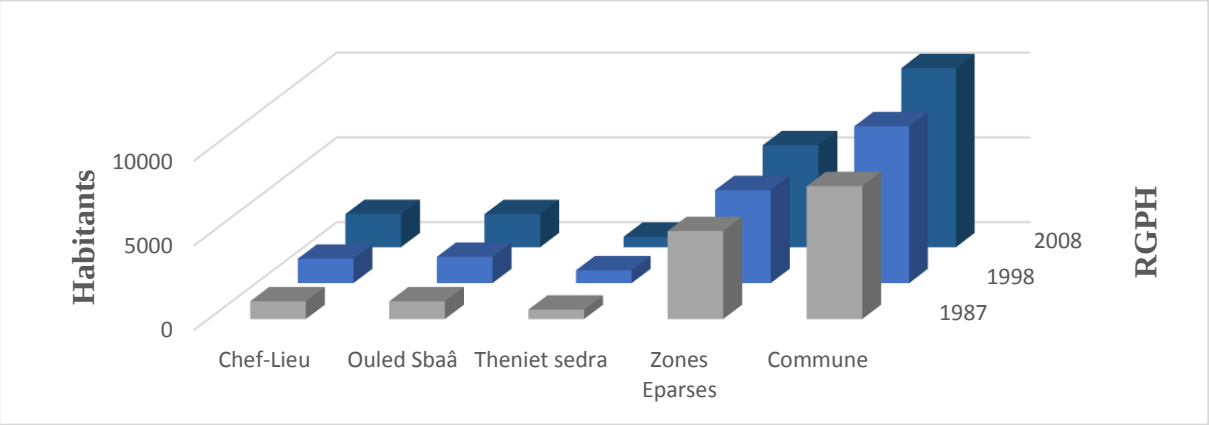


Fig. 1.3 : Histogramme de la croissance de la population

I.4 Situation Socio-économique

La plaine de Zana apparait comme une plateforme à vocation agricole céréalière et dispose de richesses agricoles importantes, d'une surface agricole totale estimée à 13637 ha. La surface agricole utile (SAU) représente 12137 ha, dont 6660 ha sont irrigués (Direction des services agricoles de la wilaya de Batna). L'assolement biennal céréale-jachère, légumes et élevage bovins, ovins, caprins et production avicole sont les pratiques culturales dominantes

dans la région. La prédominance des cultures céréalière est nettement visible, pratiquée en extensive au niveau de la plaine et occupe 5700 hectares, seulement la taille des exploitations reste dominée par les petites superficies de 01 à 06 hectares qui sont irrigués par des forages. La culture des fourrages vient en seconde position et occupe une surface de 3100 hectares. La filière des maraichages s'étend sur une superficie de 840 hectares et l'arboriculture commence à se développée, on enregistre 150 hectares utilisés par ce genre de culture sur tout le territoire de la plaine, Fig. 1.4. L'élevage ovin, bovin, caprin et production avicole bien pratiqué et bien développé dans cette région constitue un support à l'agriculture et un moyen de revenu aux habitants. En enregistre 09 batteries destinés à l'élevage du poulet de chair d'une capacité totale de 46500 unités, 42 batteries de poules pondeuses d'une capacité totale de 210400 unités, 02 hangars destinés à l'élevage de la dinde d'une capacité totale de 7000 unités, 3600 vaches, 32000 ovins et 11500 caprins (Direction des services agricoles de la wilaya de Batna).

Cette activité agricole n'est rendue possible que grâce aux formations du sous-sol qui offrent des possibilités aquifères très intéressantes de même que la formation superficielle, elle présente des potentialités aquifères non négligeables. L'agriculture est un enjeu de développement et d'aménagement de la région, qui ne peut être promue et développé que par une exploitation bien étudiée de la ressource en eau, avec une amélioration des techniques de production, selon le type de sols et une adaptation des cultures adéquates.

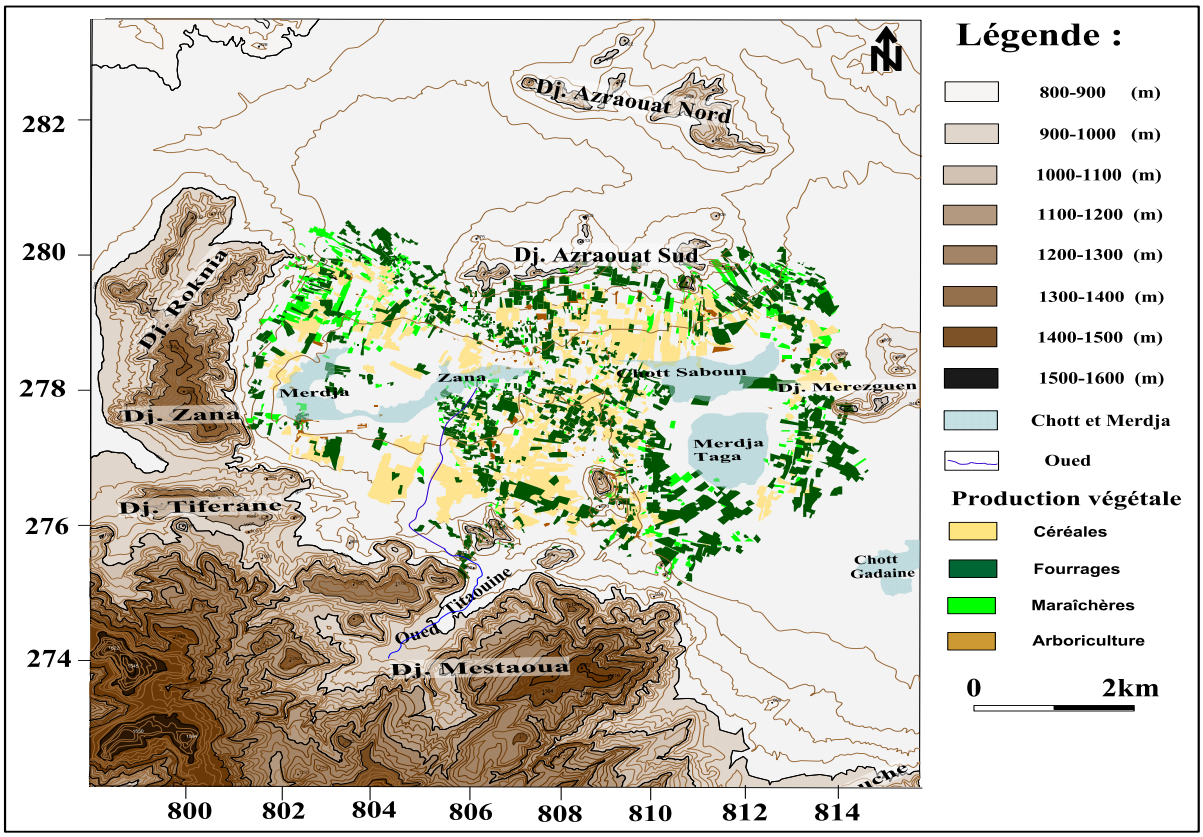


Fig. 1.4 : Carte de répartition générale des cultures, saison 2015-2016

I.5 Couvert végétal

La plaine de Zana relève de la zone physique des hautes plaines telliennes septentrionales de la wilaya. Les reliefs carbonatés situés au nord, sud et à l'Est sont pratiquement nus et présente une rare couverture végétal steppiques et halophytes. La couverture forestière est la dominante et occupe une surface d'environ 6193 Ha qui se répartie entre genévriers, chêne vert et de pin d'Alep dans le Mestaoua au sud et Djebel Zana et Roknia à l'Ouest. Les glacis sont recouverts d'une maigre steppe à armoise (Chih et halophyte), diss, atriplex, touffes des salsolacées et alfa, tandis que la plaine est cultivée en majorité.

Ce couvert végétal est dû à la présence du Chott, à la salinité et à la faible pluviométrie.

I.6 Hydrographique

Le réseau hydrographique généralement lié à l'organisation du relief peut prendre une multitude de formes, la différenciation du réseau hydrographique d'un bassin est due à quatre facteurs principaux :

- ✓ La géologie ; par sa plus ou moins grande sensibilité à l'érosion ;
- ✓ Le climat : le réseau hydrographique est dense dans les régions montagneuses humides et tend à disparaître dans les régions désertiques ;
- ✓ La pente du terrain, détermine si les cours d'eau sont en phase érosive ou sédimentaire ;
- ✓ La présence humaine : le drainage des terres agricoles, la construction de barrages, l'endiguement, la protection des berges et la correction des cours d'eau modifient continuellement le tracé originel du réseau hydrographique.

Dans les régions où toute l'hydrographie superficielle converge vers les zones basses et prend un cheminement plutôt radial, représentant une hydrographie endoréique.

L'étude des nouvelles cartes topographiques assemblées de Souk Naâmane et Batna à une échelle 1/50000 (Edition N° 01, 2 T 2004), révèle un réseau hydrographique endoréique faible drainée par un ensemble de cours d'eau temporaires de différentes importances et un seul oued principal (Oued Titaouine).

A part l'Oued Titaouine qui prend naissance à Djebel Mestaoua est coule sur une longueur de 20 Km environ avant de se déversé dans la Merdja de Zana son exutoire naturel, les autres cours d'eau sont temporaires et ne coulent qu'en période de forte pluie et chute de neige et dont les débits sont nul en période d'étiage, Fig. 1.5. Ces cours d'eaux présentent des pertes d'eaux par infiltration aux niveaux de leurs lit ; comme l'Oued Tizourite et les cours d'eaux de Azraouat et autres massifs.

L'empreinte d'endoréisme est bien visible, les dépressions (Chott et Merdja) constituent les zones de drainage des Oueds.

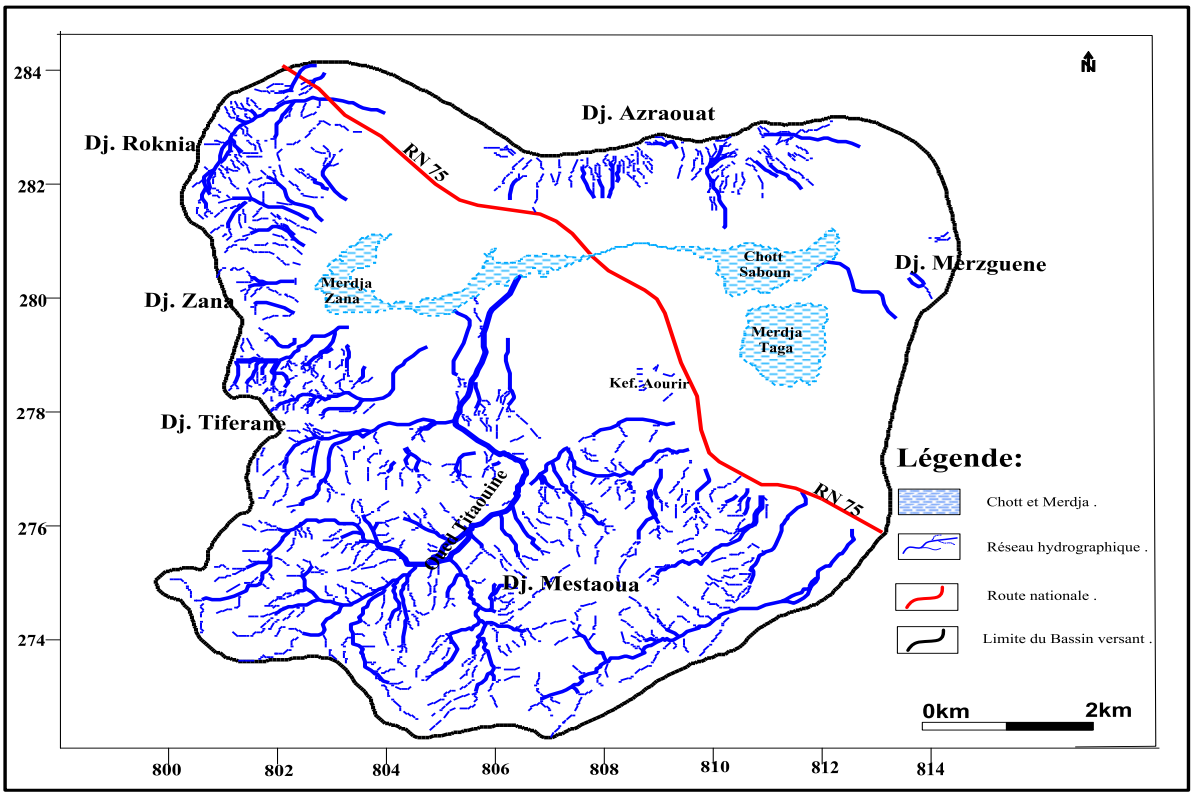


Fig. 1.5 : Carte du réseau Hydrographique de la plaine de Zana

I.7 Ensembles morpho-structuraux

La plaine de Zana présente l'aspect typique des Hautes Plaines Septentrionale de l'Est algérien, caractérisée par un relief diversifie constitué en grande majorité par des plaines et reliefs abrupts, isolés comme des iles au milieu de vastes étendues plates et souvent marécageuses à l'exception du Mestaoua. Le point le plus culminant du bassin de Zana est le Mestaoua avec 1596 m, et le plus bas correspond au Chott avec 800 m d'altitude.

La répartition des éléments physiques qui composent le relief est comme suit Fig. 1.6 :

- ✓ Les plaines occupent plus de 70% de la superficie ;
- ✓ Les massifs représentent 12% de la superficie ;
- ✓ Les collines et piémonts occupent 12% de la superficie ;
- ✓ Le reste représente les aires de contraintes (Oueds ; Talwegs ; Merdjas, Chott).

Généralement la morphologie de la plaine présente deux éléments principaux;

- ❖ les massifs carbonatés crétacé et jurassique ;
- ❖ les formations du recouvrement Mio-Plio-Quaternaire

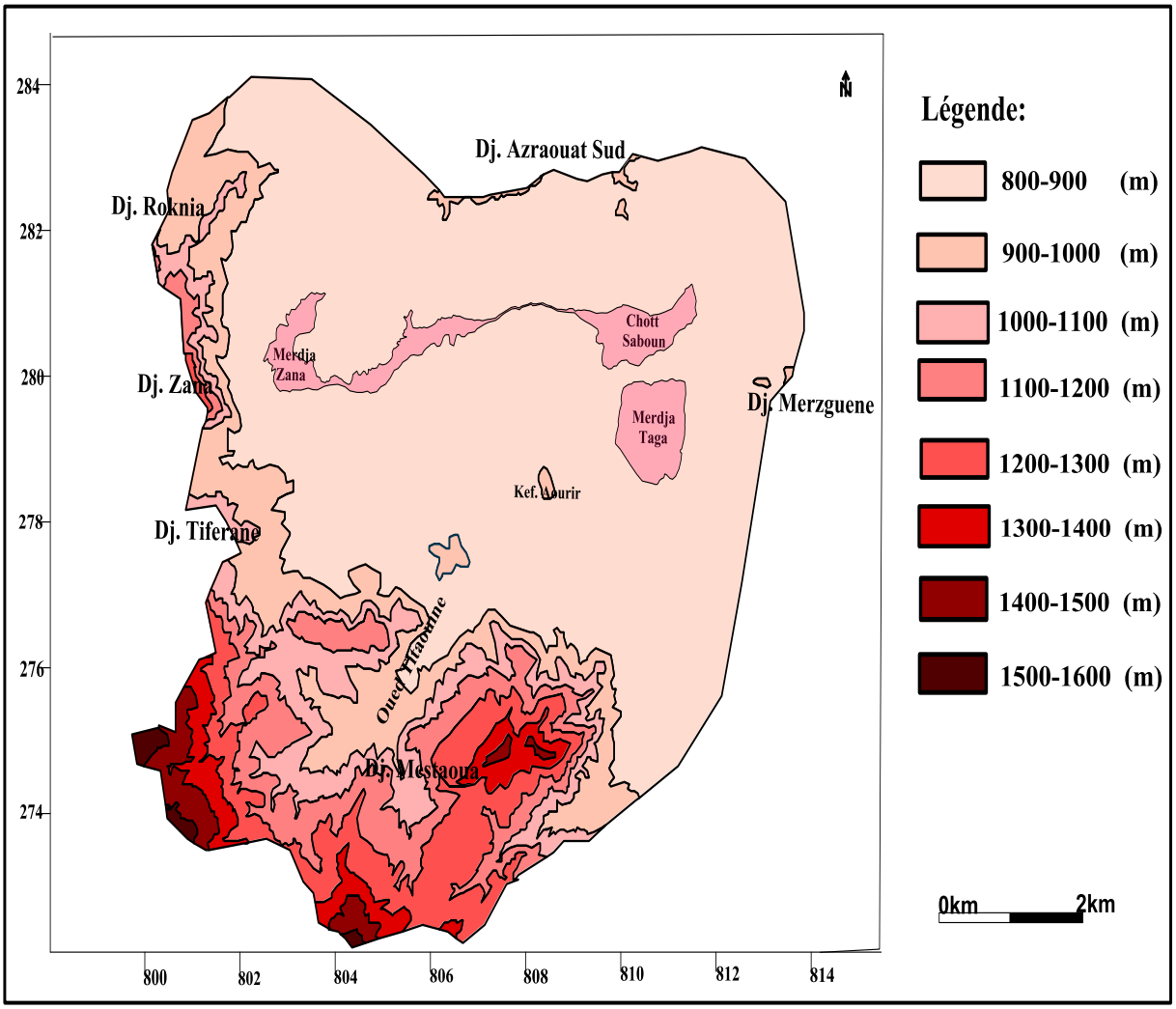


Fig. 1.6 : Carte hypsométrique de la plaine de Zana

I.7.1 Les massifs carbonatés du Crétacé et du Jurassique

A part l'importante surface du massif de Mestaoua et l'ensemble Zana-Roknia, le reste des massifs semble émerger comme des ilots à la surface de la plaine. Ce sont de vastes entablements calcaires subhorizontaux et dénudés, inclinés en pente douce vers le Nord où leur formation disparait progressivement sous le recouvrement de la plaine.

Les versants montagneux sont affectés par un important ravinement résultant d'une ancienne déforestation. Ces massifs sont :

- ✓ Le groupe montagneux Zana-Roknia culminant respectivement à 1280 et 1241 m et qui représente le prolongement septentrional du Mestaoua ;

Le groupe Azraouat sud et nord avec une altitude respective de 952 m et 822 m ;

- ✓ L'ensemble montagneux de Mestaoua et Djebel Tiferene culminant à 1596 m et à 1061 m respectivement ;
- ✓ Le massif Merzeguene et Tizourite culminant respectivement à 822m et à 1048 m ;

I.7.2 La plaine

Constitué essentiellement part les dépôts du Mio-Plio-Quaternaire. La plaine est reliée aux massifs par des glacis et des éboulis. Les glacis sont très ravineaux en période de pluie et achemine les eaux de pluie vers la plaine. Le centre de la plaine est formée par des Merdjas et un Chott formés par une zone de remblaiement argilo-limoneux avec des passages d'éléments grossiers et calcaires lacustres qui sont le siège d'importantes sources. Les glacis sont dénudés à pente longue et douce. Les plaines décrites ci-dessus sont de vastes étendues, de faibles pentes qui varient entre 0 % et 5 %, Fig.1.7.

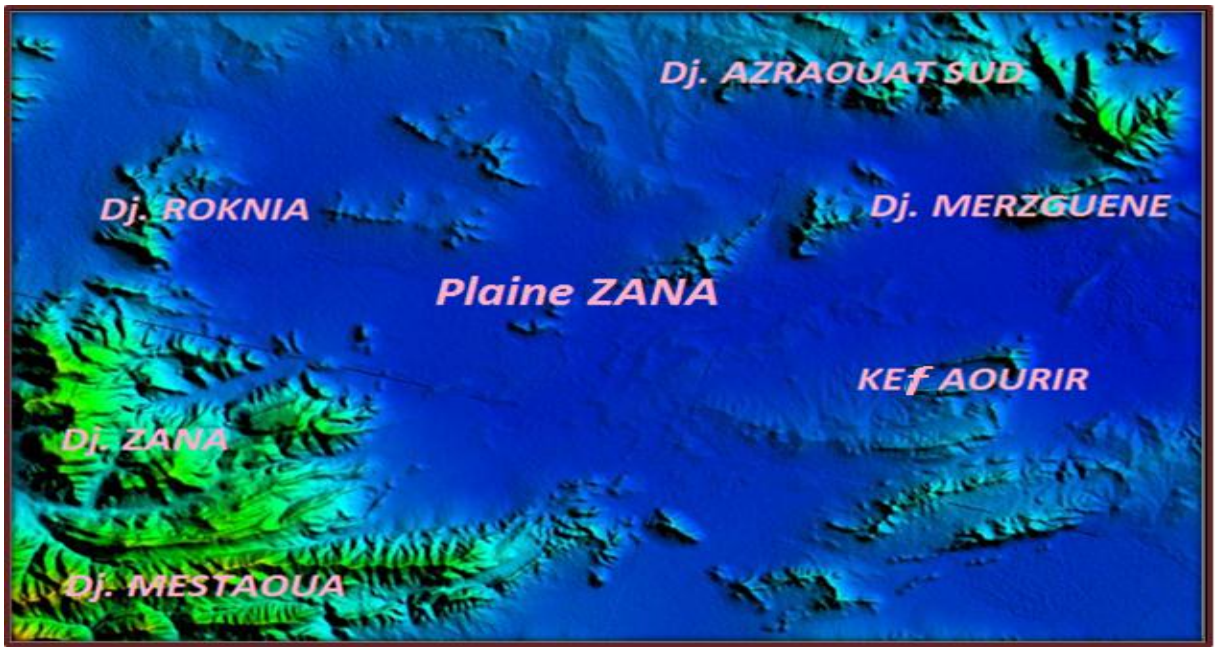


Fig. 1.7 : Carte géomorphologique de la plaine de Zana (Modèle numérique).

I.8 Conclusion

La plaine de Zana fait partie des plaine septentrionale de la wilaya de Batna. Elle est caractérisée par un relief diversifié formé de massifs et de piedmonts, de plaine et des Merdjas et Chott avec un réseau hydrographique endoréique non développé et une pente faible à douce. Généralement le couvert végétal est maigre, et laisse l'écoulement superficiel converger vers les zones basses (Merdja et le Chott) avec un apport peu important en débit solide lors des averses importantes. Cette morphologie à faible altitude dans la plaine est accentuée pour les massifs, donne l'impression que la plaine est une dépression plane fermée par ces massifs. On distingue deux ensembles structuraux, le secteur des massifs qui présente des caractéristiques morpho-métriques favorables à la genèse et à la propagation des crues ; et le secteur de plaine qui est le siège d'une accumulation des dépôts détritiques et l'infiltration des eaux ruisselées.

Chapitre 2 :

Contexte Géologique

Chapitre II Contexte Géologique

Introduction

L'histoire géologique de l'Algérie s'inscrit dans le processus de la géodynamique globale de la tectonique des plaques qui a structuré l'Algérie en deux unités tectoniques majeures séparées par la flexure sud-atlasique (flexure saharienne) :

- ✓ Le Nord de l'Algérie portant l'empreinte de la tectonique alpine ;
- ✓ La plate-forme saharienne, relativement stable, où la tectonique existante est très ancienne (cadomienne, calédonienne et panafricaine).

Le nord de l'Algérie est constitué de reliefs jeunes, modelés au cours du Tertiaire par les mouvements alpins (Vila 1980, SONATRACH, Division Exploration) et délimité par les éléments suivants :

- ✓ Au sud, l'Atlas saharien, une chaîne de montagnes d'origine alpine ;
- ✓ Au centre, des plateformes comme l'ensemble sud setifien et le môle néritique constantinois à l'Est du pays ;
- ✓ Dans la partie septentrionale, l'Atlas tellien est une zone complexe constituée de nappes mises en place au Miocène inférieur.

La région de Zana, sujet du présent travail, appartient à la chaîne Alpine qui constitue l'ossature des reliefs de toute l'Algérie septentrionale au Nord de la flexure saharienne. Cet orogène n'est lui-même qu'une partie des chaînes qui ceinturent la méditerranée occidentale (Demdoum, 2010).

II.1 Cadre géologique global

Le sud setifien se rattache aux zones les plus externes des Maghrébides d'Algérie nord-orientale. Les formations allochtones sud-setifiennes (Fig. 2.1), s'étalent entre le méridien d'Aïn Taghrout à l'Ouest et celui d'Aïn M'lila à l'Est en déterminant d'Ouest en Est et du Nord au Sud des alignements de petits reliefs carbonatés de la Koudiat Della, des Djebels Zdim, Youssef, Braou et Tnoutit, puis plus au Sud des Djebels Sekrine, Kalaoun, Tella, Tafourer, Hammam, Agmerouel, Azraouat nord et Azraouat sud, Tizourit, Guedmane, Hanouda et enfin au Sud l'ensemble montagneux des djebels Messaouda, Roknia, Zana et Mestaoua (Vila, 1980).

L'ensemble de ses séries est un groupe homogène nommé les séries sud-setifiennes typiques. A sa périphérique se développent des séries à caractères intermédiaires, soit avec l'autochtone méridional comme la série inférieur du djebel Kalaoun au Sud, soit avec les séries néritiques constantinoises comme l'ensemble Guedmane-Tizourit et le djebel Hanouda à l'Est. Ces deux dernières constituent la lame sud-setifiennes orientale (VILA, 1980). Selon J.M Vila (1980), à l'exception des Djebels Guergour et Anini, qui apparaissent en fenêtres sous

les nappes telliennes, ces formations constituent un vaste paquet d'écailles développées, cet auteur leur a attribué le caractère d'allochtonie

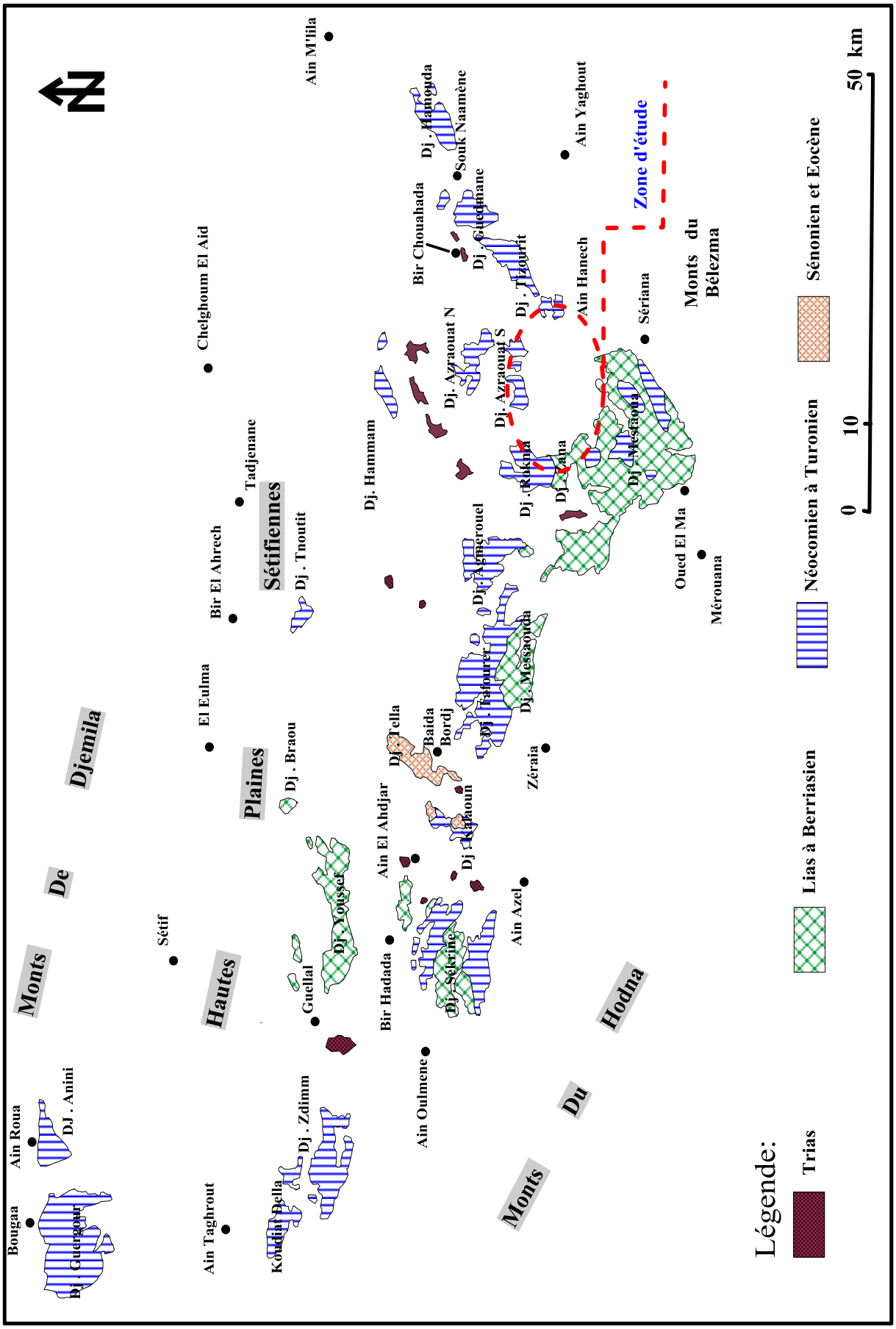


Fig. 2.1 : Plan de position simplifié des formations sud-setifiennes. (J.M Vila 1980)

II.2 Disposition générale dans la chaîne alpine

La chaîne alpine d'Afrique du Nord ou chaîne des Maghrébides fait partie de l'orogène alpin péri–méditerranéen (Durand–Delga, 1969) d'âge Tertiaire qui s'étend de l'Ouest à l'Est sur 2000 km depuis l'Espagne du Sud à l'arc calabro-sicilien (Fig. 2.2). Dans ce domaine en forme d'anneau très aplati, Si nous considérons une coupe transversale, nous distinguons clairement la distribution suivante :

- ✓ les zones internes, situées à l'intérieur de l'anneau caractérisées par la prédominance des affleurements métamorphiques et représentées aujourd'hui par différents massifs, dispersés le long de la côte méditerranéenne ;
- ✓ les séries sédimentaires du Secondaire et du Tertiaire qui constituent la chaîne calcaire sous forme de bande étroite et discontinue ;
- ✓ les zones externes situées à sa périphérie.

Le domaine de la chaîne des Maghrébides a connu des phases de déformations méso–cénozoïques aboutissant à la mise en place de nappes de charriages. C'est le domaine des nappes ou domaine allochtone. A l'extérieur, ce seront les domaines parautochtones et autochtones, tel la Mesetas Ibériques et Marocaines auxquelles on peut rattacher en Algérie, l'ensemble Atlasique.

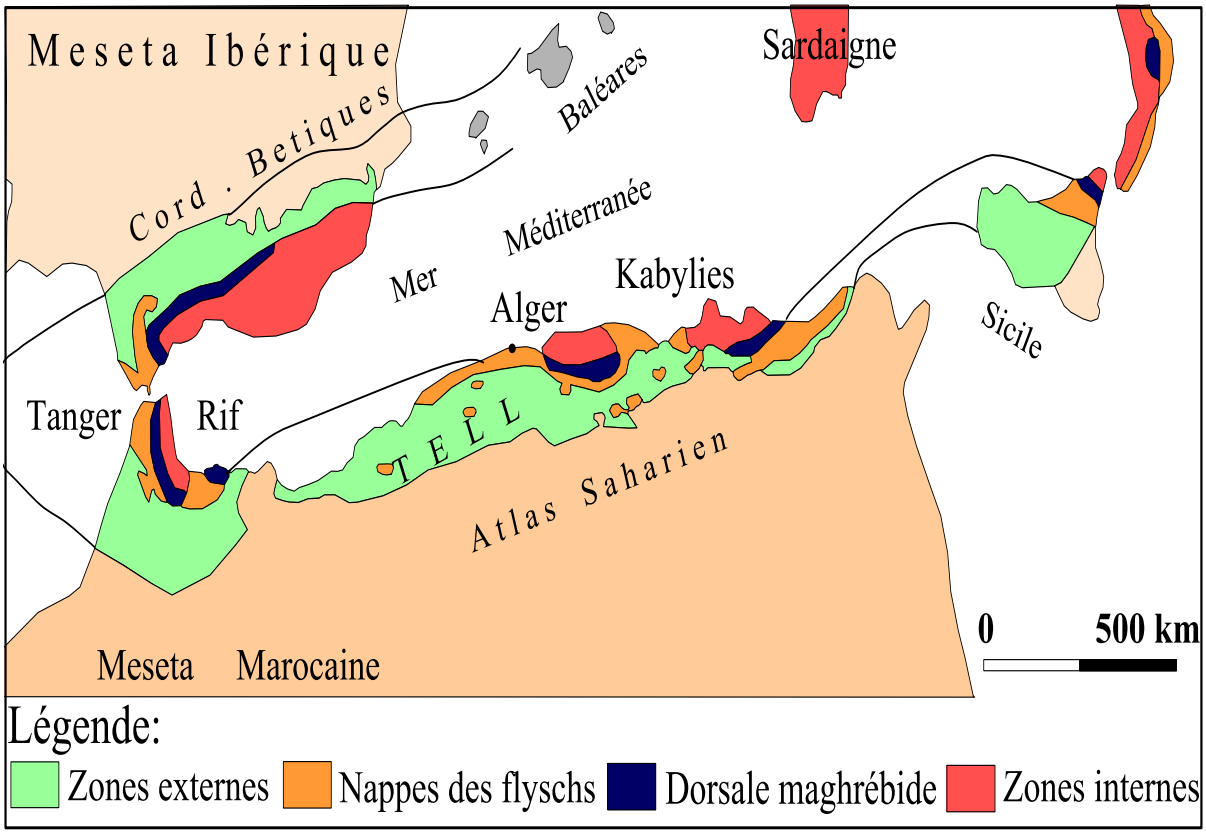


Fig. 2.2 : Les grands ensembles structuraux de l'Afrique du Nord

(Réf. Origène alpin péri–méditerranéen, Durand-Delga, 1969)

II.3 Disposition particulière en Algérie

La structure Alpine de l'Algérie septentrionale est subdivisée en trois grands domaines (Wildi, 1983) du Nord au Sud (Fig. 2.3) :

- ✓ Zone interne : qui présente les zones internes, constitué par des formations métamorphiques paléozoïques et par la couverture sédimentaire. Ces zones sont marquées par les massifs primaires de petite et grande Kabylie, le socle Kabyle métamorphique et la dorsale Kabyle sédimentaire. Les zones internes, issues du domaine Alkapeca (Alboran-Kabylies-Péloritain-Calabre) ou domaine méso-méditerranéen, représentent un terrain éclaté d'origine européen ou adriatique)
- ✓ Zone médiane : c'est le domaine des flyschs, divisé en trois séries Mauritanienne, Massylienne et Numidienne. Les flyschs correspondant à la couverture sédimentaire de l'ancien océan Téthys.
- ✓ Zone externe : Les zones externes à matériel marneux et calcaire partiellement chevauchés par la zone interne à matériel cristallophyllien par l'intermédiaire des flyschs Crétacé Paléogènes et Miocènes (Delga, 1955, Bouillin, 1977 et 1983).

Ces domaines, comporte du Nord vers le Sud, l'ensemble Tellien et l'ensemble de l'avant pays.

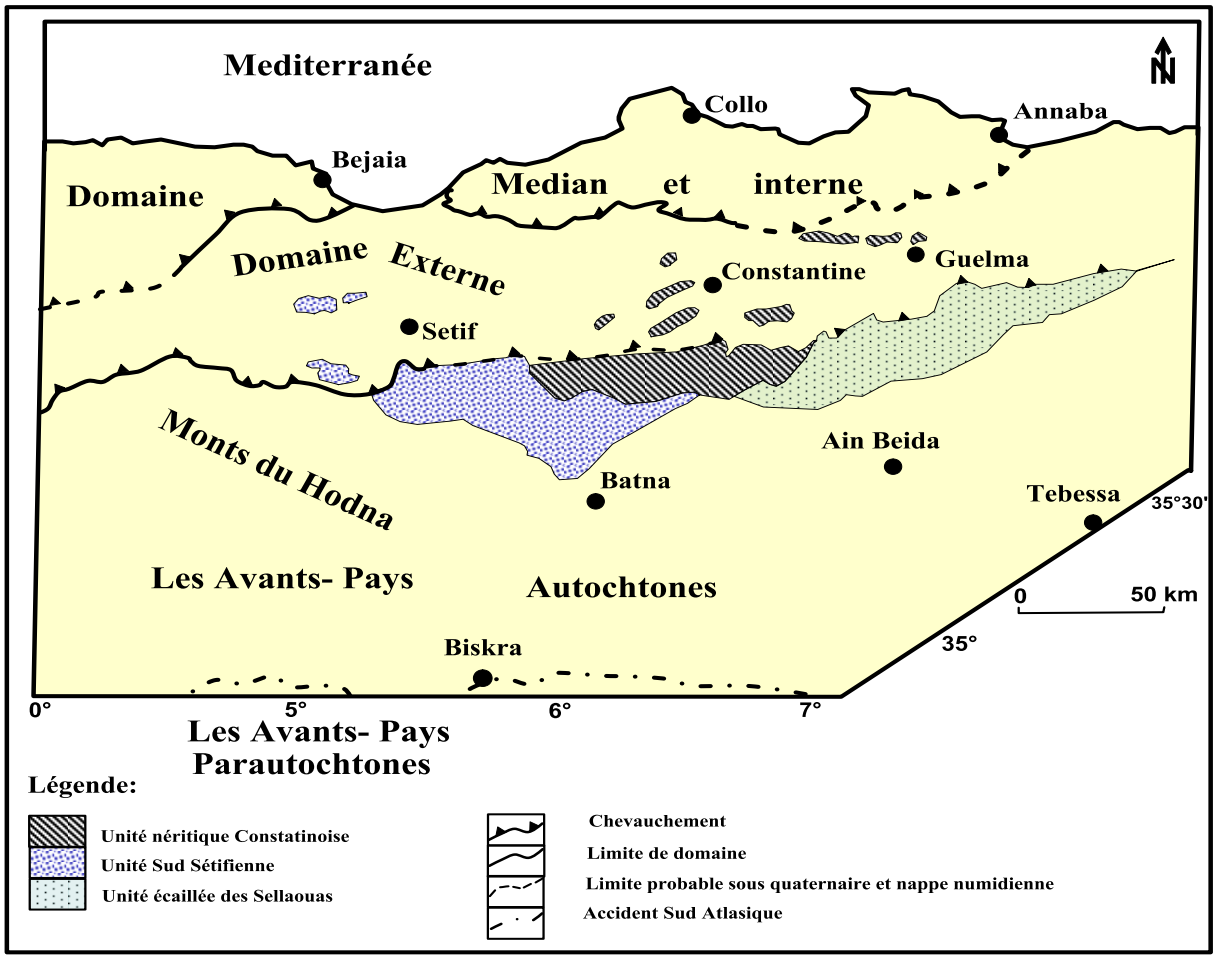


Fig.2.3 : Esquisse structurale du Nord-Est Algérien (W. Wildi, 1983)

A l'échelle de l'Algérie du Nord-Est, une zonation plus fine montre du Nord au Sud les domaines définies à la fois par leurs caractères sédimentaires et structuraux qu'on va examiner succinctement (Fig. 2.4 et 2.5).

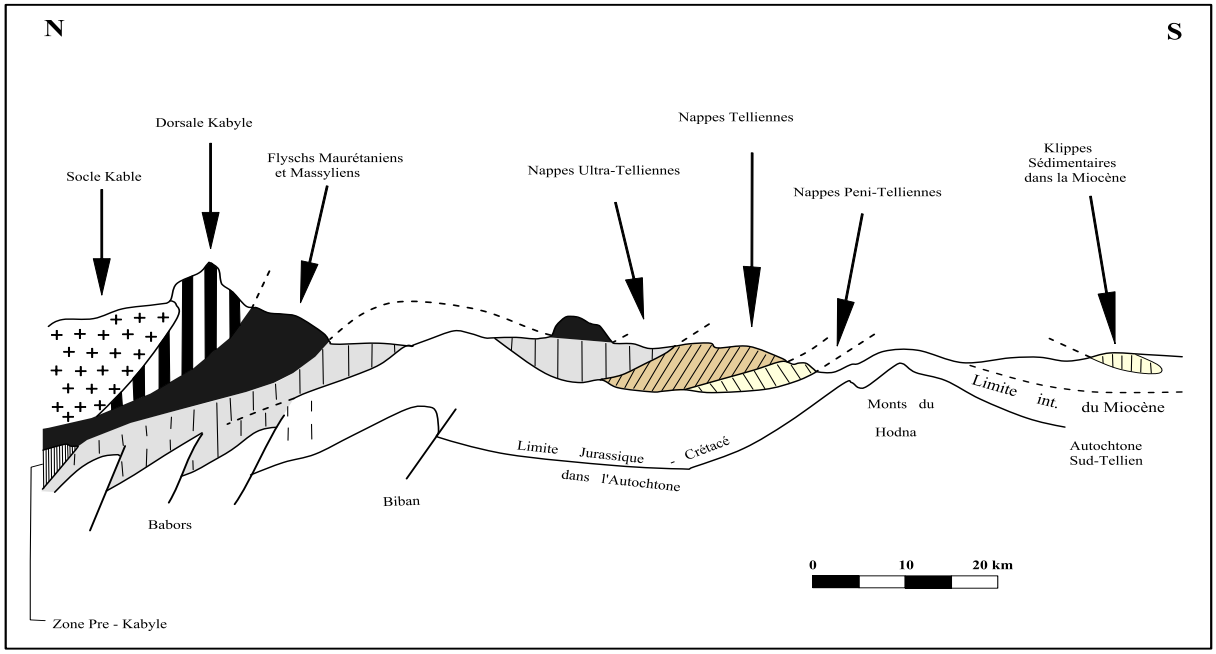


Fig. 2.4 : Rapport structuraux entre les différentes unités de la chaîne des Maghrébides (Modifiés d'après Durand – Delga, 1969, les Bibans et les Babors qui étaient considérés comme étant de l'Autochtone font également partie des nappes telliennes)

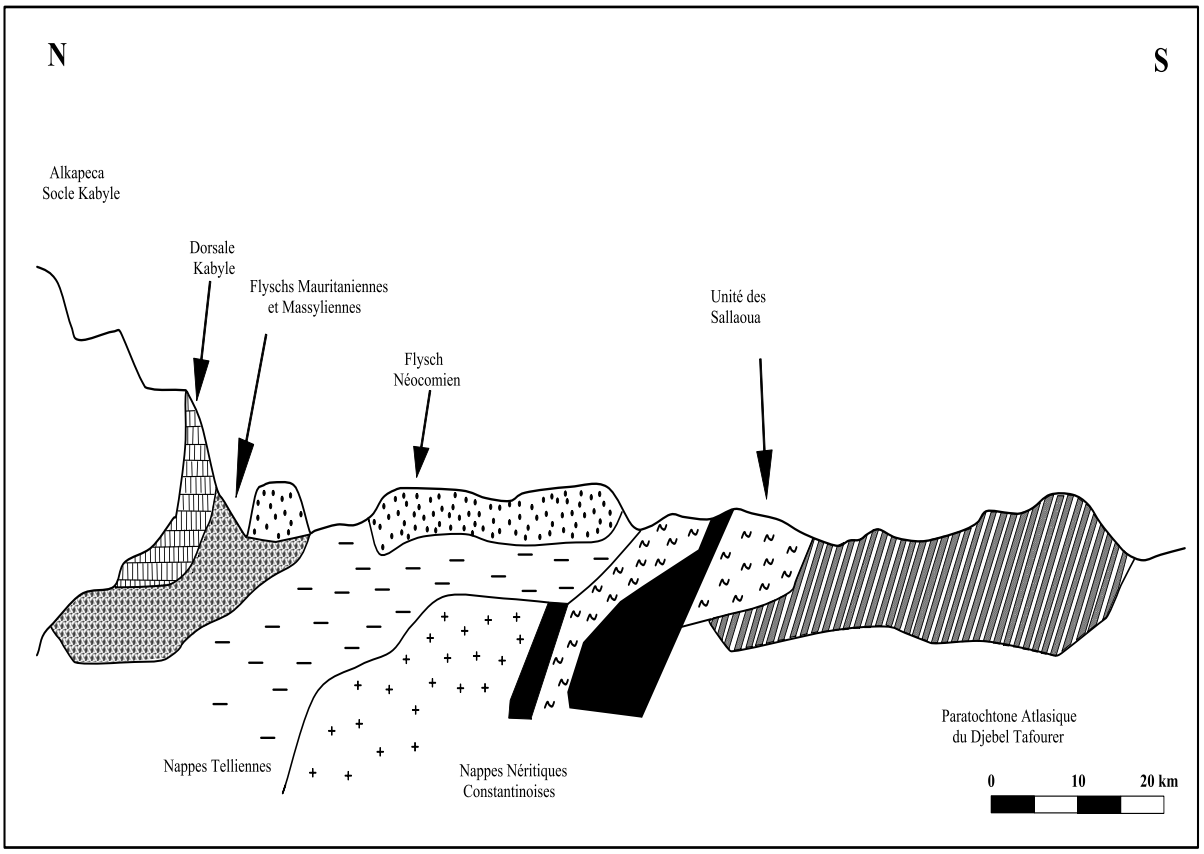


Fig. 2.5 : Coupe générale des Maghrébides dans l'Est Algérien (J.M VILLA ,1980)

II.3.1 Zones internes et médianes

Les séries internes montrent une succession presque complète du Permo-Trias jusqu'au Néocomien.

Les séries médianes comprennent du Permo-Trias, du Lias calcaire et un Crétacé inférieur micritique pouvant atteindre le Barrémien. Elles sont constituées par des terrains cristallophylliens localisés au niveau des régions de Collo, Skikda, El-Milia, Larbâa Nath Iraathene et Ain-El-Hammam.

II.3.1.1 Le socle de la petite Kabylie

Constitué par un ensemble de roches cristallophylliennes charriées sur les terrains mésozoïques et paléogènes : cas de Fil Fila, Safia (Durand Delga et al. 1967 et Bouillin-1979).

Cet ensemble métamorphique et peu métamorphique comporte les unités suivantes :

- ✓ Unité inférieure : composée de gneiss et de schistes.
- ✓ Unité supérieure : composée de phyllades recouverts en certains endroits par les sédiments du Méso-Cénozoïque.

II.3.1.2 Dorsale Kabyle

Elle est aussi appelée chaîne liasique (Ficheur-1903), chaîne calcaire (Glangeaud-1932). L'appellation de Dorsale Kabyle a été introduite par Durand-Delga en 1969.

La série comporte des terrains d'âge Silurien à Carbonifère puis une succession très variable de formations allant du Permo-Trias au Lutétien supérieur.

II.3.1.3 Domaine des flyschs

Deux grands types de séries ont été distingués avec au Nord le flysch de type mauritanien (Gelard, 1969) et au Sud le flysch de type massylien (Raoult 1969, 1972).

1) Le flysch maurétanien (schisto-gréseux)montre dans ses séries médianes.

2) Le flysch massylien(schisto-quartzeux) débute par un flysch Crétacé inférieur argilo-quartzitique dont les bancs sont d'une épaisseur décimétrique. Le Cénomanien est constitué par des phtanites blanches et noires typiques.

3) Le Crétacé supérieur est caractérisé par des argiles alternant avec des microbrèches tendres en petits bancs.

II.3.2 Zones externes

Les séries externes sont caractérisées par un Lias à Rhynchonelles et à Arnioceras et par un Crétacé et un Eocène détritiques

II.3.2.1 Massif d'Edough

Ce massif constitue une particularité paléogéographique du fait qu'il présente les mêmes particularités pétrographiques et tectoniques que le Hoggar. Pour certains spécialistes il constitue le prolongement du substratum Eburnéen (2 milliards d'années) de la plateforme saharienne vers le Nord, il est totalement différent du socle Kabyle.

Le massif de l'Edough constitue le témoin le plus oriental des massifs cristallophylliens du littoral algérien. La position structurale de ce massif dans l'édifice orogénique alpin reste diversement appréhendée. Pour certains auteurs (Hilly, 1962 ; Bouillin, 1977 ; Durand Delga, 1980), le massif est considéré comme le prolongement oriental des massifs internes de Grande et Petite Kabylie ; alors que pour d'autres (Vila, 1970. Latouche et al, 1978 ; D.E Aissa, 1985), il serait au contraire un massif à caractère africain.

II.3.2.2 Nappes telliennes

Du domaine néritique constantinois et des unités allochtones sud setifiennes, on passe vers le Nord aux unités telliennes, en commençant par l'intermédiaire des unités méridionales à Nummulites.

II.3.2.2.1 Les unités méridionales à Nummulites

Cet ensemble méridional se singularise par ses faciès néritiques prépondérants du Crétacé supérieur à l'Eocène. Les séries de cet ensemble montre de grandes affinités avec celles de leurs avant-pays méridionaux, les unités sud setifiennes et l'unité néritique constantinoise.

II.3.2.2.2 Nappes telliennes

Elles forment un ensemble structural cohérent comportant de bas en haut, la nappe de Djemila, les unités à matériel Eocène et les unités septentrionales. J.M. Vila (1980) les a définies par l'absence d'influences néritiques dominantes et l'absence des faciès clairs ultra-telliens.

II.3.2.3 Série néritique constantinoise

La série néritique constantinoise est considérée pendant longtemps comme autochtone (autochtone néritique constantinois). Elle est caractérisée par des formations carbonatées épaisses allant du Trias jusqu'au Turonien et ne montre pratiquement aucune intercalation de grès. Les formations de cette unité englobent les reliefs calcaires des Monts de Tadjenanet, d'Oued Athmania, de Constantine et d'Ain M'lila. Elles chevauchent pour Vila (1980), les écailles de Sellaoua et les unités sud setifiennes (Fig. 2.6). Cette unité possède une

caractéristique très particulière ; car pendant les phases tectoniques alpines elle s'est comportée en un seul bloc résistant qui a subi un déplacement vers le sud, ses déformations se limitant à des cassures et à des plis à grand rayon de courbure.

II.3.2.4 L'ensemble sud-setifien

L'ensemble sud-setifien est défini comme un ensemble d'écailles développées entre les méridiens d'Ain Taghrout à l'ouest et Ain M'lila à l'Est, limité par des accidents cisaillant une structure plissée antérieurement. Il englobe les massifs des Djebels Guergour et Anini au NW de Sétif, de la Koudiat Della, des Djebel Zdim, Youcef, Braou et Tnoutit au sud de Sétif, des Djebels Sekrine, Kalaoun, Tella, Tafourer à la bordure Nord des Monts du Hodna, des Djebels Agmerouel, Zana, Mestaoua, Azraouat (nord et sud), Tizourit, Guedmane et Hamouda au Nord des Monts du Bellezma.

Cet ensemble orienté NW-SE entre la nappe néritique constantinoise à l'Est et le domaine autochtone hodnéen à l'Ouest et au Sud, est caractérisé par l'importance des dépôts marneux et argileux au Crétacé inférieur et la persistance des intercalations gréseuses.

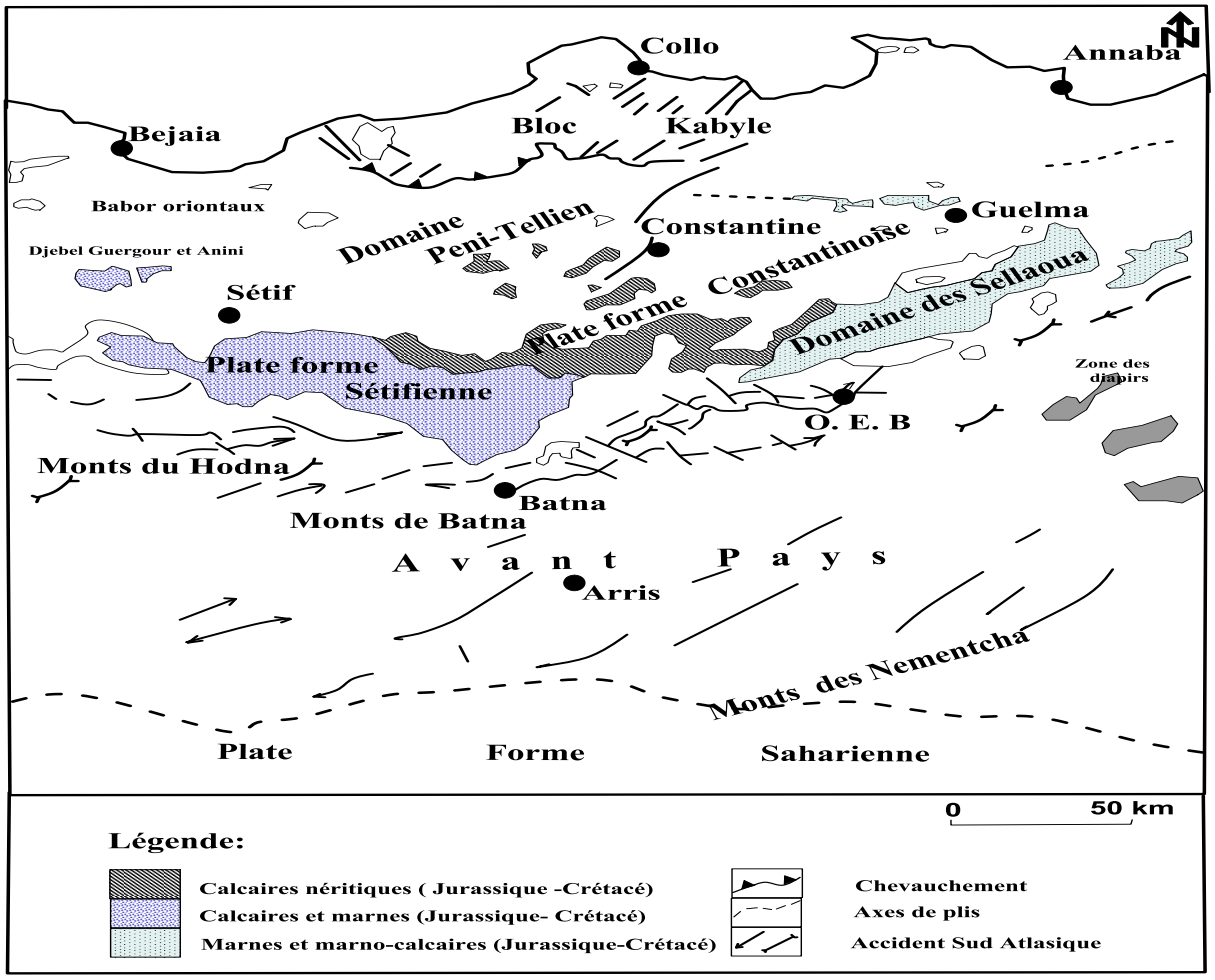


Fig. 2.6 : Situation actuelle de la plateforme setifiennes par rapport aux domaines des zones externes de la chaîne alpine d'Algérie Nord-orientale (VILA, 1980)

II.3.2.5 La Chebka du Sellaoua

Les formations allochtones de type Sellaoua sont développées dans les régions d'Ain M'lila, d'Ain Fakroun, d'Ain Babouche, puis elles s'étalent largement dans la haute vallée de l'Oued Charef, les monts de Sedrata et de Souk Ahras. C'est une zone d'écailles caractérisée par les faciès bordiers du sillon atlasique.

Le style de plissement est analogue à celui de l'Atlas Tellien. D'importantes masses triasiques sont associées aux contacts de base des écailles. Les plissements se sont formés à l'Eocène supérieur, les écailles et les chevauchements au cours du Tortonien (Vila,1980).

Les séries de type Sellaoua sont caractérisées par une large dominance argileuse et marneuse pendant tout le Crétacé et l'Eocène.

II.3.3 L'ensemble autochtone d'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens (les monts de N'memcha et les Aurès)

C'est un ensemble de structures plissées à séries sédimentaires mésozoïques épaisses s'étendant de la zone des diapirs à l'est jusqu'aux Monts du Hodna à l'Ouest en passant respectivement par les hautes plaines d'Ain Beida, Oum El Bouaghi, des Aurès et les monts de Batna-Bellezma. Cet ensemble structural s'organise en trois secteurs d'Est en ouest :

II.3.3.1 Secteur Oriental (algéro-tunisien)

Englobant les monts de Morsott dans la wilaya de Tébessa et de Mellegue. Il s'agit d'une large zone d'anticlinaux et synclinaux orientés SW-NE pénétrés par des diapirs d'évaporites triasiques. Ces diapirs qui auraient débutés dès le Barrémien ont déterminé la formation des masses récifales et de minéralisations péri-diapiriques. La forme des affleurements diapiriques vue en plan varie assez rapidement du Sud vers le Nord : forme d'ellipse aplatie pour les diapirs les plus septentrionaux de Mesloula-Oued-Kebarit et d'Ouenza, forme d'ellipse régulière pour le diapir le plus méridional (Boukhadra-Metloug).

II.3.3.2 Secteur central

Dans le secteur central, s'opposent de part et d'autres de la ligne Batna-Khenchela, deux zones structurales. Au Sud de la dite ligne se succèdent d'ouest en Est des anticlinaux et des synclinaux très réguliers d'axe N 50° à 60° E. Ce sont des plis réguliers, analogues à ceux des confins algéro-tunisiens. Au Nord de cette ligne Batna-Khenchela, c'est un domaine des plis où apparaissent trois grands axes anticlinaux orientés NE-SW au dessin cartographique très complexe et présentant de nombreuses complications tectoniques et séparés par des zones synclinales recouvertes par le Quaternaire. La premier axe situé au Nord, est formé par les

Djebels de Toumbait, Hanout Kébir, Marhsal, Oum Kechrid et Sidi R'gheiss. Le deuxième axe situé au centre est formé par les Djebels Bou Arif, Fedjouj et Taref. Le troisième axe situé au sud est formé par Djebel Amrane.

II.3.3.3 Secteur occidental

Le squelette de ce secteur est constitué par les monts du Hodna. Ces plis ne présentent aucune direction atlasique typique en dehors des Ouled Tebban et de l'ensemble Guetiane-Boutaleb et aux environs d'Ain Oulmene. La déformation des plis est analogue à celle des secteurs les plus orientaux. Le domaine autochtone possède des structures plissées anciennes bien organisées en alignement régulier de direction N 50°E. Ces plis perdent d'autant leur organisation qu'ils sont plus proches du front de l'allochtone.

II.4 Géologie locale

La région de Zana se présente comme une vaste dépression constituée essentiellement de formations sédimentaires d'âge Mio-Plio-Quaternaire entourée par des massifs carbonatés appartenant à l'ensemble allochtone sud setifien. Il s'agit de l'ensemble Jurassico-Crétacé constituant les nappes de charriages de l'Est Algérien septentrionale, venant buter contre l'Autochtone aurésien. Cet ensemble est composé par les écailles Jurassiques et Crétacé en position anticlinale et formée par un remplissage Mio-Plio-Quaternaire, probablement le résultat de l'érosion de ces écailles.

Les écailles abruptes, isolées qui cernent la vaste étendue plate sont :

- ✓ Au Nord Djebel Azraouat Nord et Sud ;
- ✓ A l'Ouest Djebels Roknia et Zana ;

Ces massifs font partis de l'ensemble Sud-setifien constitués par des formations calcaires d'âge Crétacé.

- ✓ A l'Est Djebel Merzeguene ;
- ✓ Au Sud Djebel Mestaoua.

Ces massifs constitués par des formations calcaires d'âge jurassique

II.4.1 Aperçu litho-stratigraphique :

D'après les cartes géologiques et leurs notices au 1/50 000 de Bourhzel (145), Merouana (172)et au 1/200 000 de Sétif (N° 03 ;04) rédigées par M^{er} J. M. VILA en 1977, on peut établir un aperçu stratigraphique de la région d'étude. Les formations du Mio-Plio-Quaternaire reposent sur des structures d'ère secondaire montrant une variation lithologique (Fig. 2.7). On distingue dans l'ordre chronologique du bas en haut :

- ✓ Les formations carbonatées du secondaire de l'ensemble sud setifien et le Trias ;
- ✓ Les formations du Mio-Pliocènes continentales formées essentiellement de conglomérats ;
- ✓ Les formations Quaternaires qui occupent en grande partie la plaine de Zana.

II.4.1.1 Formation peu ou pas tectonisées

II.4.1.1.1 Quaternaire

- **Eboulis à blocs (e)**

Le caractère abrupt de la plupart des reliefs cernant la plaine de Zana explique la relative abondance des éboulis tant à bloc, qu'à gangue marneuse. Ces formations se situent en deux endroits à l'extrême Sud- Ouest et l'Ouest de la plaine de Zana. Les seuls éboulis importants constituent deux vastes cônes sur le versant Est du Djebel Zana, remis en mouvement à chaque gros orage.

- **Sebkha (s)**

Ce sont des sols salés dépourvus de toute végétation (une croute de sel les recouvre pendant la période sèche). Il s'agit de la zone marécageuse de la Merdja de Zana et du Chott Saboun alimentées en permanence par l'exsurgence d'Ain Zana.

- **Sols salés (Q^s)**

La partie Sud Est de la plaine (Merdja Taga, Drâa Melel et Ain El-Ksar) et bled El Merdja présente de vastes zones incultes qui sont remplie par des limons salés à sols hydromorphes très mal drainés. Ces zones sont caractérisées par une végétation de grosses touffes d'Atriplex ou de Salsolacées,

- **Terres arables, alluvions anciennes et Quaternaire indéterminé (Q)**

Ils correspondent à des sols bruns, parfois à traces d'hydromorphie, installés sur des limons et des graviers sombres, ils sont localisés surtout dans la partie Sud de la région à partir de la M^{ta} Feltane et au Nord entre le massif de Roknia et Azraouat. Ces formations se répartissent presque sur toute la plaine.

- **Glacis polygéniques nappant les reliefs (Q^t)**

Ils correspondent à des surfaces très faiblement pentées près des plaines et dont la pente augmente progressivement vers la montagne et butent sur un Knick très prononcés. Ils sont recouverts d'un matériel clastique faiblement calibré et très fragmenté vers le bas devenant très anguleux et grossier. En profondeur les traces d'encroûtement sont fréquentes et présentent un aspect de croûte feuilletée, leur genèse est donc récente. Ces zones sont caractérisées par une

végétation de type naturelle telle l'Armoise et à alfa. Ces formations ceinturent la base de tous les massifs cernant la plaine de Zana.

- **Villafranchien (Q^C)**

Au Sud- Est de la plaine on trouve les villafranchiens avec un prolongement vers le Sud, ce sont des croûtes calcaires, peu développées.

- **Dunes (lunettes) (Q^d)**

Ces formations sont une accumulation de petits débris et de sables fins actuellement érodée, à la surface de la sebkha.

II.4.1.1.2 Mio-Pliocène

- **Mio-Pliocène continental (mp)**

Quelques affleurements de conglomérats roussâtres males consolidés sont visibles au Nord de Ain Merzeguene et au sud de Bled-El-Merdja. La série débute par des conglomérats qui remanient essentiellement des niveaux calcaires et gréseux de la série Azraouat, elle se poursuit par des argiles grises à lentilles conglomératiques et à intercalation de calcaire lacustre blancs ou roses. L'ensemble n'excède pas les 300 m de puissance visible et n'est pas daté.

II.4.2 Formation de l'ensemble Sud-setifien

II.4.2.1 Crétacé inferieur

- **Aptien (n^{5b})**

L'Aptien n'est visible qu'au Djebel Azraouat nord où affleurent à la base 15 à 20 m de calcaires massifs en gros bancs suivis de 100 m environ de calcaires fins bien lités en dalles de 30 à 60 cm avec de rares niveaux dolomitisés ou recristallisés.

- **Barrémo-Aptien (n^{4-5})**

C'est une barre massive épaisse de 60 à 70 m de calcaires fins en gros bancs. L'aspect en surface est roux.

- **Barrémien supérieur (n^{4b})**

Cette formation a été distinguée au Djebel Roknia, une partie de Djebel Zana et Azraouat Sud, il s'agit de 120 à 150 m d'alternances rythmiques de bancs de grés roux, de calcaire gréseux, de calcaires oolithiques ou graveleux et de calcaires à Algues

- **Barrémien (n^{4a})**

Distinguée au sue de Djebel Roknia, au Djebel Azraouat Sud et une petite partie dans

Djebels Zana et Tiferene. Il s'agit de 200 m environ d'une série à grosses barres de calcaires graveleux, oolithiques à sommet micritique avec de petits niveaux dolomitiques roux et rares joints argileux.

- **Barrémien (n^4)**

Calcaires variés, dolomies et micrites à néotrocholines et choffatelles, cette formation se trouve au niveau du Djebel Aourir, ce barrémien atteint 300 m d'épaisseur. Cette formation vient buter la faille qui sépare l'ensemble allochtone Sud-Sétifien des écailles parautochtones aurésiennes.

- **Néocomien (n^{1-3})**

C'est une série à dominance argileuse bariolée qui forme une vire caractéristique à Kef Oum-Tiour, Djebel Bou-Hedfène (Sud du Djebel Agmerouel), Theniet Sefa et à Djebel Zana. L'épaisseur n'excède pas une centaine de mètres. Le sommet de la série, un peu plus marneux contient une association hauterivienne à lenticulina, on trouve aussi cette formation à l'Ouest de Djebel Tiferene et Djebel Aourir.

- **Néocomien-Barrémien (n^{1-4})**

Calcaires massifs oolithiques ou graveleux et dolomies, cette formation se trouve au niveau de Djebel Merzeguene.

II.4.2.2 Jurassique supérieur

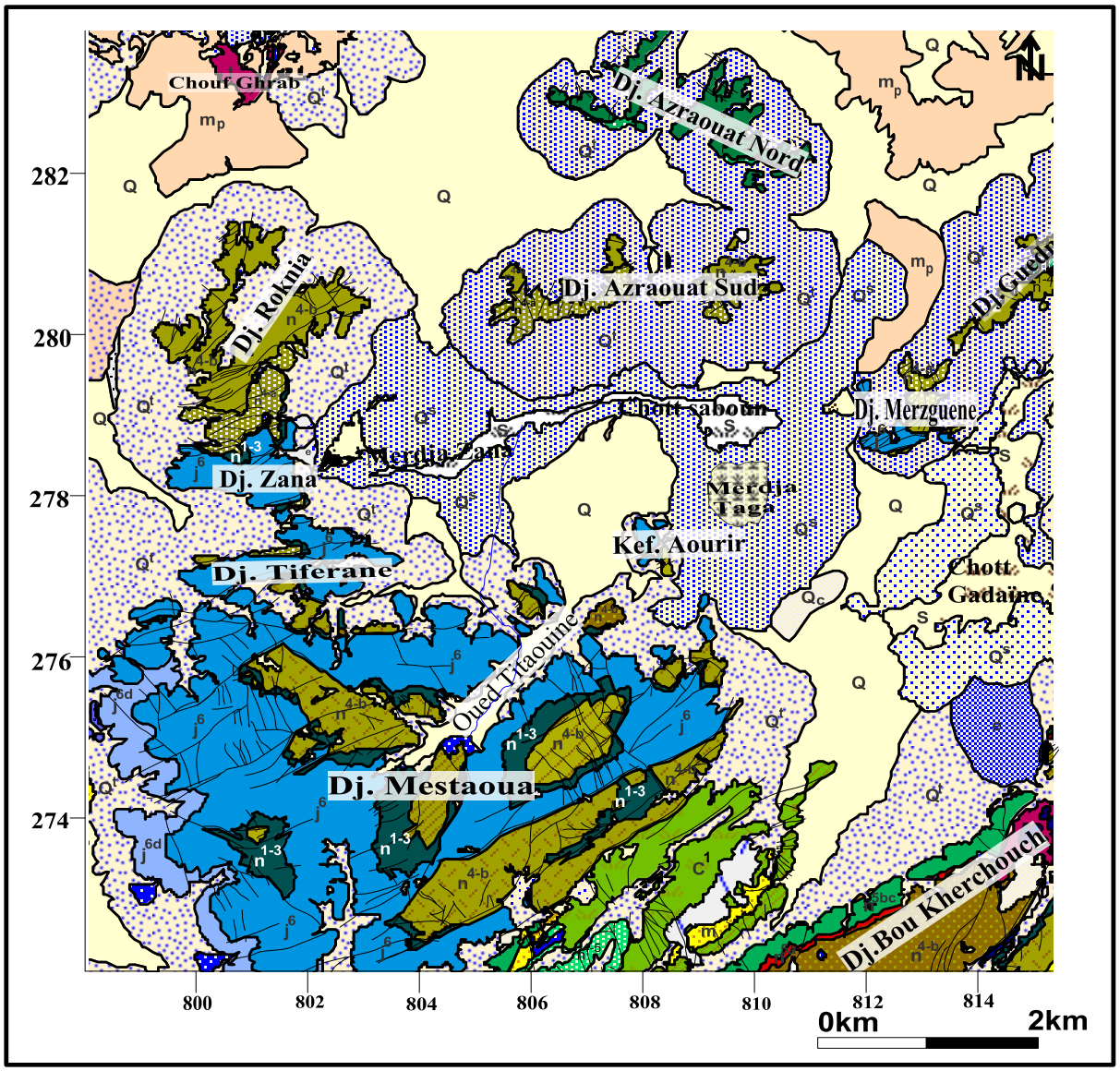
Le Jurassique est distingué uniquement en fonction de son faciès. Au Djebel Zana le jurassique est calcaire et prolonge celui du méridional du Djebel Mestaoua. Les Djebels Roknia et Azraouat représentent la couverture crétacée du Jurassique calcaire du Djebel Zana.

- **Jurassique supérieur (j^6)**

Ce sont des masses de calcaire massif en gros bancs, son épaisseur atteint 300 m au Djebel Zana et 350 m au djebel Mestaoua. Ils sont disposés en bancs pluri-métriques à aspect superficiel très caractérisés (peau d'éléphant) et au gros débris de Lamellibranches et de polypiers. Ces formations se trouvent au niveau de Djebel Zana, Koudiat Aourir et Djebel Tiferene et aussi au niveau d'Ain Merzeguene.

II.4.2.3 Trias (t)

C'est une formation complexe composée d'argile et de marnes bariolées gypsifères à glaçons calcaro-dolomitiques. Il se situe à l'extrême nord. L'important affleurement du Trias dans cette zone se trouve plus au nord à Chouf Gherab et à l'Ouest à Drâa Djebass et qui peut jalonner un contact plat entre Djebel Mestaoua et Djebel Messaouda. L'ensemble à un faible pendage vers le Nord.



Légende:

Terrains Sédimentaires

Formations peu ou pas Tectonisées

Quaternaire

- em — Eboulis en masses.
- e — Eboulis à blocs.
- S — Sols de Sebkha.
- Qs — Sols Salés.
- Q — Terre arables formations de pente, alluvions anciennes et Quaternaire indéterminé.
- Qd — Dunes (lunettes).
- Qt — Glacis polygéniques nappant les reliefs.
- Qc — Villafranchien: croutes calcaires.

Mio-Pliocène

- mp — Mio-Pliocène continental: argiles, conglomérats et calcaires lacustres.
- m — Burdigalien-Langhien: conglomérats,argiles et marnes bleues à Ostréidés..
- C1 — Cénomanien: calcaires à Caprinidés ou à Miliolidés ; à la basa, marnes à Aspidiscus affleurant trés mal.
- n^{5bc} — Aptien à dominante calcaire bien lité riche en Orbitolines avec au sommet les couches à Miliolidés et Ovalveolinanreicheli.
- n^{5a} — Aptien à dominante marneuse.

Ensemble Allochtone Sud-Sétifien

- n^{4-5} — Barrémo-Aptien: calcaires organogènes massifs blancs.

Ecailles des Djebels Agmeraoul ,Tissouras, Roknia,Messaouada et Azraouat.

- n^{4-b} — Barrémien supérieur: calcaires dolomies et nombreux niveaux de grés .
- n^{4-a} — Barrémien: calcaires massifs, oolitiques, graveleux ou fins à Dasycladacées.
- n^{4} — Barrémien: calcaro-dolomitique et gréseux de l'Agmerouel et du Tissouras.
- n^{1-3} — Néocomien: argiles vertes et rouges et marno-calcaires à Ammonites .
- n^{5} — Aptien: calcaires en petits bancs à Miliolidés Orbitolines et "Ovalveolina"reicheli.
- n^{1-4} — Néocomien-Barrémien: calcaires massifs oolitiques ou graveleux et dolomies.

Jurassique

- j6 — Jurassique supérieur: calcaires massifs à Clypeina jurassica .
- j^{ed} — Jurassique supérieur: dolomitique de l'Agmerouel et du Tissouras.

Trias Exotique

- t — Trias: Argiles et marnes bariolées gypsiffères à glaçons.

0km 2km

Fig. 2.7 : Extrait des cartes géologiques de Bourhzel et Merouana, échelle 1/50 000
D'après J.M. Vila & S. Guellal (1977)

II.5 Tectonique

L'Algérie septentrionale peut être subdivisée en plusieurs domaines plus ou moins parallèles présentant des configurations tectoniques différents. Divers travaux ont contribués à l'amélioration des connaissances sur la tectonique de la plateforme setifiennes et constantinoise, en particulier (J. Savorin 1920, J. Glaçon 1967, J.M. Vila 69-71-1972). De ces travaux il ressort que la plateforme setifiennes est formé de dômes à pendages faibles, souvent limités par des failles subverticales, séparés par, des larges cuvettes recouvertes par le Quaternaire. Ces divers travaux conduisent de façon évidente à admettre l'Allochtonie au moins relative des séries à dominances carbonatées. Ainsi R. Guiraud en 1977 admet que l'unité carbonatée repose sur un matériel Autochtone assez souple (Mésozoïque, Eocène, Miocène) fortement plissé et écaillé.

L'histoire tectonique de la région est caractérisée par deux grandes phases orogéniques qui sont responsables des structures rencontrées dans la région d'étude. La tectonique prédominante est la tectonique Atlasique relativement souple, les structures anticlinales et synclinales présentent une direction Sud-ouest – Nord-Est. A la tectonique souple s'ajoute la tectonique cassante avec des fossés d'effondrement de direction Nord-ouest – Sud-Est.

Les phases tectoniques ont a priori une incidence sur l'hydrogéologie de la zone, car elles affectent les formations calcaires. Elles sont à l'origine d'une perméabilité karstique. Le phénomène de karstification a dû débuter avant les dépôts des séries tertiaires et ceci durant la période ou les assises du Crétacé étaient émergées.

II.6 Aperçu structural

Au Nord, les massifs présentent des plis de direction Atlasique tronquées par des failles, ce qui entraine par endroits la présence des structures monoclinales. Au sud le chevauchement des écailles sur le para-autochtone aurésien redresse les contacts presqu'à la verticale (Vila, 1980). De cela l'ensemble Zana, Roknia et Azraouat pousse devant lui le Djebel Mestaoua chevauchant le Djebel Messaouda. Les synclinaux proviennent des déformations des assises Miocène et Plio-Quaternaire qui se sont déposées dans les dépressions et des chenaux. Les parties sur lesquelles repose le Tertiaire sont restées vraisemblablement émergées depuis les formations des plis atlasiques jusqu'au premier retour marin (Aquitanien). Cette période est caractérisée par une érosion qui a conduit à la formation de relief accentué, (Fig. 2.8).

L'affleurement de Drâa El-Djebass, d'une surface de 1 Km² environ, isolé dans la Plaine de Bled-El-Merdja (Draâ Klalouche, Ain Djasser), sépare les massifs occidentaux (Messaouda). Il s'agit d'un affleurement chaotique qui correspond au Trias. L'examen de la forme de cet affleurement qui montre un étirement nord-Sud est un alignement avec le contact

anormal situé plus au Sud milite en faveur d'un chevauchement des massifs de Mestaoua sur le massif de Messaouda. Ce chevauchement s'explique par un déplacement des massifs vers le Sud et en même temps qu'une rotation de ces massifs et ceux de Zana vers l'Ouest (C.G.G, 1969). Il reste que la géophysique a mis en évidence des fractures de direction Nord-sud qui met en évidence le prolongement de ce contact anormal. En ce qui concerne la bande de Trias du Bled Chouf Gherab (Chouf Mokhtar)-Koudiat Sebâa Aioun, une campagne de prospection électrique a permis de constater qu'il s'agissait d'une lame peu épaisse à faible pendage vers le Nord. Elle peut donc constituer la base de la série du Djebel Hammam. C'est une série de nature comparable à celle du Djebel Zana et recouverte tectoniquement elle-même par la nappe néritique Constantinoise (chevauchement du Rokbet el Djemel). La coupe interprétative intègre toutes ces conclusions (fig. 2.9).

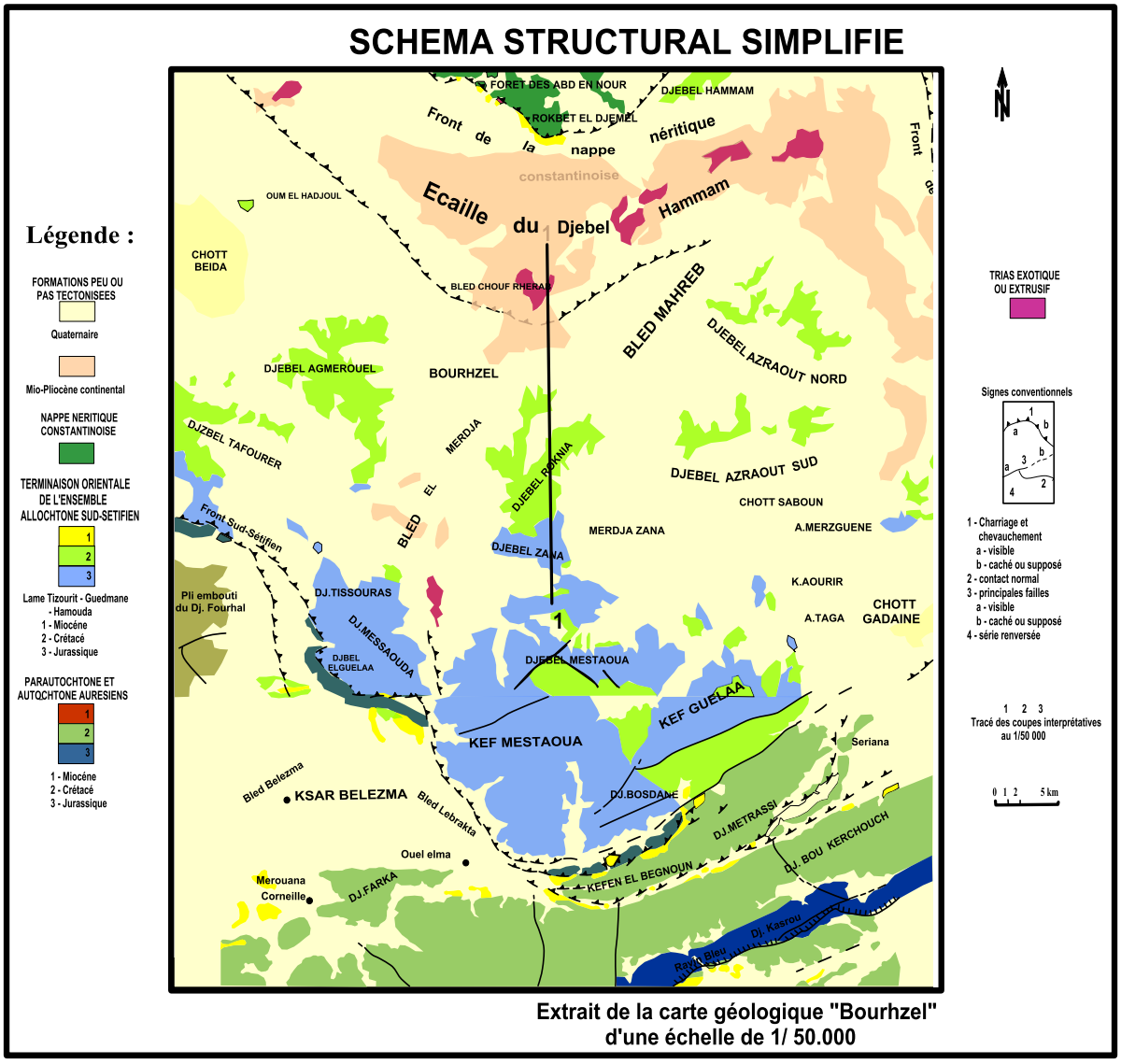
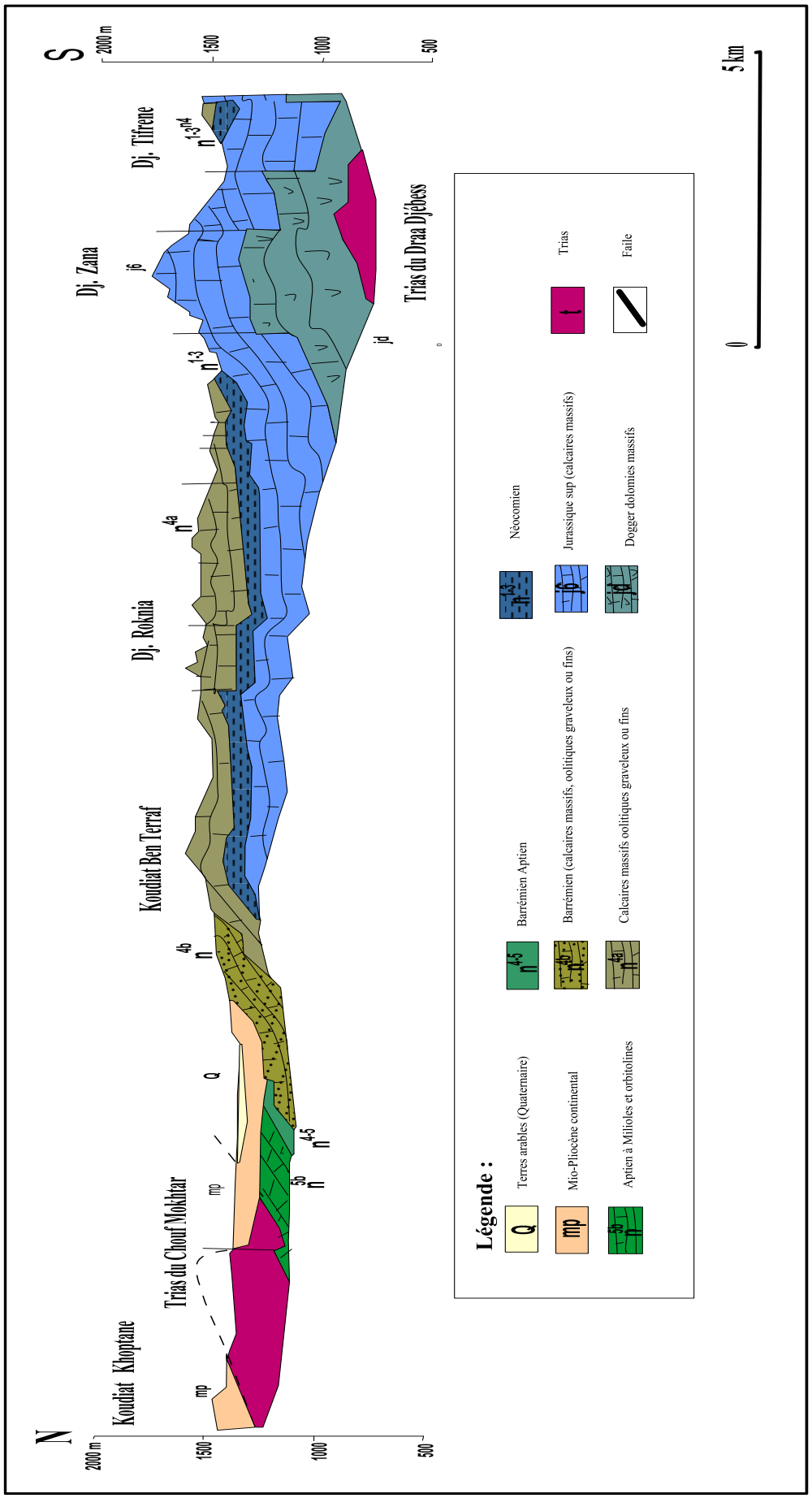


Fig. 2.8 : Schéma structural simplifié de la plaine de Zana. (Extrait des cartes géologiques aux 1/50000 de Bourhzel et Merouana)



Extrait de la carte géologique "Bourhzel" d'une échelle de 1/ 50.000

Fig. 2.9 : Coupe géologique interprétative

II.6.1 Phases tecto-orogéniques

Les premières déformations importantes dont les traces sont relevées ont débutés à la fin du Turonien et se sont accentuées pendant le Sénonien inférieur. Les mouvements amorcés alors vont généralement se poursuivre, de façon épisodique jusqu'à l'Eocène moyen, période à laquelle se produit une très importante phase de compression (phase Atlasique). Ultérieurement la chaine Alpine Algérienne n'a plus enregistré de mouvement compressif jusqu'à la phase du Quaternaire basal. Deux phases tectoniques majeures peuvent être saisies, la première est la phase Atlasique et la deuxième est la phase Alpine.

II.6.2 Phase Atlasique

Succédant à la phase pré-orogénique située entre le Jurassique et l'Eocène, la phase Atlasique est orogénique paroxysmale qui s'est développée entre le Lutétien supérieur et le Miocène. Elle est responsable des plis aurésien de direction Nord-Est–Sud-Ouest créant des anticlinaux calcaro-dolomitique de formation affectées par des failles.

II.6.3 Phase Alpine

Lors de la phase Alpine on assiste à une accentuation des bombements anticlinaux et de la fracturation. Cependant un autre réseau de failles se met en place de direction Nord-ouest – Sud-Est qui va hacher les massifs carbonatés. Ces derniers sont soulevés en horst, alors que les séries incompétentes subissent des contraintes donnant des structures complexes.

Après cette phase vient une phase de distension ou se forment les grands bassins, qui seraient comblés par les apports détritiques continentaux intercalés par des niveaux calcaire, lacustre et argile.

A la fin du Miocène et du Quaternaire se développe de grands mouvements tant verticaux qu'horizontaux qui donnent l'aspect final de la structure.

II.7 Conclusion

La plaine de Zana fait partie de l'ensemble Sud setifien. Elle apparait comme une plateforme remplie de formations du Mio-Plio-Quaternaire, formés par des argiles, calcaires, conglomérats et des alluvions. La plaine est cernée par des massifs rocheux carbonatés fortement plissés et tectonisés composés de calcaire massif d'âge Jurassique et Crétacé.

La plaine apparait comme une plateforme qui s'est déplacée sur la couverture triasique. Cette plateforme constitue un anticlinal dont le flanc Nord plonge sous l'écaille de Djebel Hammam, qui fait lui-même partie du front de la nappe néritique constantinoise. Pour le flanc Sud, l'anticlinal butte conte l'autochtone aurésien ce qui a pour effet par endroit de redresser à

la vertical les couches. Ce redressement des couches imperméables au niveau du contact anormal entraine une limite hydrogéologique étanche.

Cette structure a engendré deux horizons aquifères superposés. Ces aquifères se trouvent en contact direct dans plusieurs endroits ce qui donne la possibilité d'une communication intra-aquifère :

- ✓ la plaine proprement dite comblée par des sédiments récents du Mio-Plio-Quaternaire qui présente un aquifère superficiel alimenté essentiellement par les glacis qui nappent les reliefs. Jadis il est exploité par de nombreux puits et forage situés en général à la périphérie de ces derniers. De nos jours l'aquifère a connu un rabattement conséquent suite à une surexploitation et une sècheresse prononcée ;
- ✓ La nature carbonatée des massifs qui cerne la plaine possède une morphologie Karstique grâce à la tectonique qui permet d'envisager l'existence en profondeur des ressources en eau importantes. Cette interprétation est corroborée par la présence d'un certain nombre d'exsurgences à fort débit comme Ain Zana qui avait permis l'implantation de l'antique Diana Veteranorum. C'est cette source qui entretien en permanence les marécages de l'Oued Saboun (actuellement juste un petit flux).

Chapitre 3 :

Cadre Géophysique

Chapitre III Cadre Géophysique

Introduction

La prospection et l'exploitation des ressources hydrauliques souterraines sont étroitement liées à la connaissance de la nature géologique des formations et leur extension aussi bien horizontale que verticale (épaisseur), ainsi les études géophysique sont des moyens indispensables dans toute étude hydrogéologique. De ce fait, l'étude géophysique est d'un apport précieux, car elle permet de compléter et/ou de confirmer les données géologique est de déterminer les zones susceptibles d'être horizons productifs et de bien cartographier la géométrie de l'aquifère.

La géophysique de surface comprend nombre de méthodes qui, à partir de la mesure d'un ou de plusieurs paramètres physiques (densité, résistivité électriques, etc.) permettent d'imaginer le sous-sol.

Dans ce chapitre nous étudierons la géométrie de l'aquifère de la plaine de Zana par la prospection électrique.

III.1 Principe de la prospection électrique

Le principe de la prospection géophysique est de déterminer, à partir de mesures effectuées depuis la surface du sol une caractéristique physique du sous-sol et d'en déduire des indications sur sa constitution. De nombreuses méthodes existent en fonction du paramètre physique concerné, parmi ces méthodes :

III.1.1 Polarisation spontanée

On mesure les courants électriques naturels liés aux mouvements de l'eau dans le sol (infiltration, écoulement de nappe) ou aux différences de potentiel entre des formations aquifères différentes. On peut ainsi mettre en évidence des fractures drainant des aquifères.

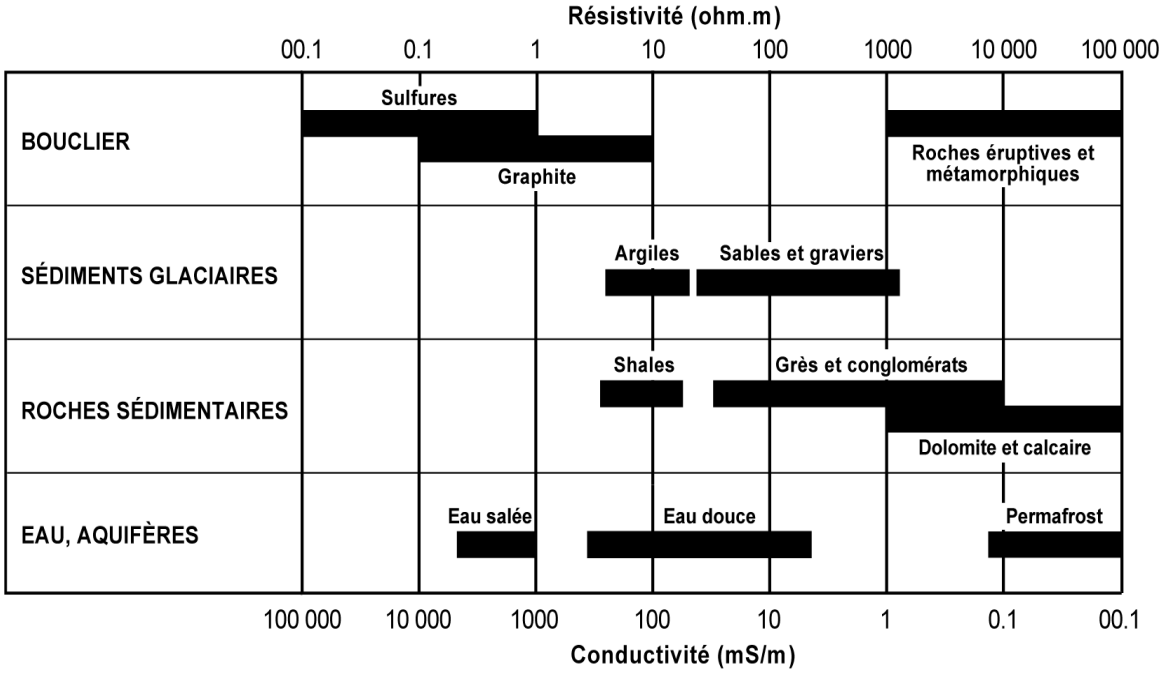
III.1.2 Méthode électrique des résistivités

La méthode repose sur l'étude de la conductivité électrique des roches qui sont directement fonction de leurs teneurs en eau. On mesure en fait la résistivité électrique (inverse de la conductivité) qui s'exprime en ohm.mètre (Ω.m). Cette résistivité (ρ) d'un milieu est la propriété physique qui détermine la capacité de ce milieu à laisser passer le courant électrique.

La résistivité des formations varie de quelques Ω.m pour les vases ou les argiles vaseuses, à quelques dizaines d'Ω.m pour les argiles, les marnes ou les terrains composites, et

à plusieurs centaines ou milliers d'Ω.m pour les calcaires, les granites ou les graves sèches, (tableau 3.1).

Tableau 3.1 : Caractéristiques électriques des roches



La prospection électrique est la méthode géophysique la plus adaptée pour la prospection hydrogéologique. Elle consiste à injecter dans le sol, un courant électrique d'intensité I par le biais de deux électrodes d'injection A et B (ligne d'émission) et de mesurer une différence de potentielle ΔU entre deux électrodes M et N de cuivre ou de plomb donc non polarisables (ligne de réception). Les quatre électrodes sont disposées dans un même alignement et symétriquement par rapport au centre du dispositif. On utilise généralement le dispositif Schlumberger, où la distance MN est petite devant la distance AB.

Le sondage électrique permet de mesurer la résistivité apparente, obtenue par la relation $\rho a = k. (\Delta U / I)$, où k est un coefficient géométrique fonction du dispositif adopté, en écartant progressivement les électrodes A et B du centre, donc en augmentant la profondeur d'investigation à la verticale de la station de mesure. En reportant sur un diagramme bi-logarithmique les résistivités apparentes calculées en fonction de la longueur AB/2, on obtient une courbe caractéristique du sondage électrique réalisé. L'interprétation de la courbe a pour but de déduire les caractéristiques géo-électriques des différentes formations se trouvant en profondeur et de tirer des conclusions sur la nature des différentes formations et émettre des hypothèses sur la présence ou l'absence de l'eau. L'épaisseur de chacune des formations concernées peut être faite à partir de catalogues de courbes existants dans le cas de lignes d'émissions réduites. Elle nécessite par contre de recourir à des méthodes plus complexes

(méthode du point auxiliaire) ou à des programmes informatiques (permettant d'optimiser les interprétations à partir des données acquises) lorsque les lignes d'émission sont importantes. Le dispositif de Schlumberger est le plus adopté. Le maillage le plus adapté pour l'hydrogéologie est une maille de 200 m de côté. Bien que son taux de réussite soit élevé (près de 90%), elle n'est pas garantie étant donné que l'hydrogéologie est une science naturelle. Notant que les buts ne peuvent être atteints que si les conditions suivantes sont remplies :

- ✓ les diverses formations lithologiques doivent êtres caractérisées par des résistivités nettement différentes ;
- ✓ le courant électrique envoyé de la surface doit pénétrer en profondeur jusqu'aux objectifs à étudier ;
- ✓ les déformations du champ électrique dues aux hétérogénéités du sous-sol, doivent être mesurables à la surface

III.1.3 Le profil de résistivité ou traînée électrique

Cette technique permet de compléter les techniques précédentes et consiste à déplacer un dispositif AMNB constant sur une surface ou le long d'un tracé. On mesure ainsi la variation de résistivité du sous-sol à une profondeur sensiblement constante, ce qui permet de préciser, souvent en association avec des sondages électriques, l'homogénéité ou non de la formation, ses éventuelles variations latérales de faciès ou l'existence d'une faille.

III.2 Campagne de prospection électrique de la plaine de Zana

Notre objectif n'est pas d'exposer les aspects théoriques et techniques de ces différentes techniques, mais plutôt d'en dégager les applications en hydrogéologie. Nous nous aiderons de la bibliographie déjà fournie dans ce domaine. Une étude géophysique par prospection électriques a été effectuée par la campagne générale de géophysique (C.G.G) pour le compte de la direction départementale des travaux publics et de l'hydraulique et de la construction de Batna durant la période allant du 08 avril au 14 aout 1969 touchant les plaines d'El Madher, Gadaïne et de Zana (Chott Saboun), (Fig. 3.1). La méthode adoptée dans cette étude est celle des sondages électriques verticaux avec les dispositifs quadratiques rectilignes AMNB de Schlumberger, dont les différentes longueurs de la ligne AB varient entre 1000 et 3000 m. 67 sondages électriques sont exécutés au niveau de la plaine de Zana Beida suivant 9 profil (P. Q. R. S. T. U. V. W. X) ; orientés Nord-Sud.

La campagne géophysique réalisée a pour objectifs :

- ✓ Détecter la profondeur du substratum ;
- ✓ Détermination des extensions en profondeur des massifs calcaires du Crétacé et du

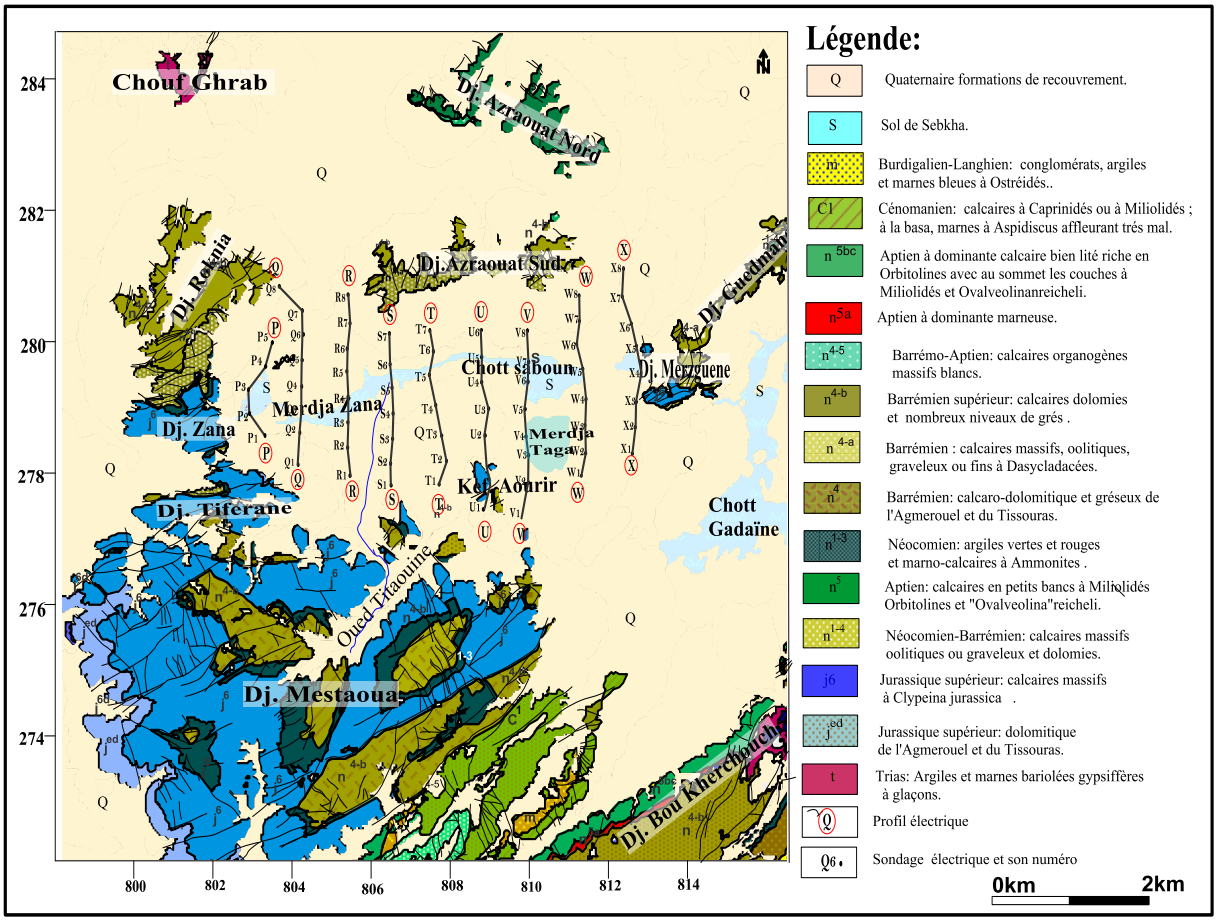
Jurassique (Djebel Roknia et Agmerouel) ;

- ✓ Recherché dans le remplissage Plio-Quaternaire, l'existence de niveaux perméables ;
- ✓ Préciser l'extension du Trias en profondeur ;
- ✓ Détermination des lieux d'implantations possibles d'ouvrages dans les zones centrales des plaines pour solliciter la nappe profonde du Crétacé ou du Jurassique.

Cette prospection électrique a permet l'établissement :

- ✓ D'une carte du substratum à une échelle de 1/50000 ;
- ✓ D'une carte du recouvrement résistant à une échelle de 1/50000 ;
- ✓ D'une carte des résistivités en ligne AB = 3000 m à une échelle de 1/50000 ;
- ✓ D'une carte des résistivités en ligne AB = 1000 m à une échelle de 1/50000 ;
- ✓ D'une carte tectonique schématique à une échelle de 1/50000 ;
- ✓ De coupes transversales à une échelle horizontale de 1/25000 et verticale 1/10000.

Les résultats obtenus sont particulièrement intéressants pour le substratum et le remplissage du Mio-Plio-Quaternaire.



Extrait de la carte des sondages électriques d'une échelle de 1/ 50.000

Fig.*3.1 : Carte de position des sondages électriques d'une échelle 1/50 000, (C.G.G, 1969, modifié sur fond géologique par l'auteur)*

III.2.1 Etalonnage des mesures

L'étalonnage a été réalisé sur deux forages F55 et J7.

III.2.1.1 Forage F55 de Zana (S.E Q7)

Ce forage est situé sur le profil Q7 de l'étude de 1969. Le forage a atteint le substratum du Crétacé inférieur à 68 m (eau à 480 mg/l) et le recouvrement est constitué d'éboulis (eau à 1600 mg/l). Ainsi le recouvrement a une résistivité de 20 ohm.m et les calcaires cristallins une résistivité de plus de 100 ohm.m, (Fig. 3.2).

III.2.1.2 Forage (S.E D2 et J7, plaine de Gadaïne)

Ces sondages sont effectués sur des terrains salés des chotts dans la plaine de Gadaïne du côté Est de la plaine de Zana. Ils montrent que les basses résistivités de surface (0.5 – 1 ohm.m) correspondants à des salinités de l'ordre de 40 à 80 gr/l, rendent difficile l'estimation des résistivités et épaisseurs des terrains sous-jacents et de ce fait, il n'y a plus de milieux électriques franchement différenciés, au moins jusqu'à 100 m de profondeur, (Fig.3.3).

III.2.1.3 Echelle des résistivités

Les étalonnages, les mesures paramétriques et l'estimation statistique déduite des S.E permettent d'obtenir l'échelle des résistivités citée dans le tableau 3.2

Tableau 3.2 : Echelle des résistivités

Formation	Résistivité en ohm.m
Terrains salés des Chotts	0,5-02
Argiles du Plio-Quaternaire	02-10
Sables argileux-graviers du Plio-Quaternaire	10-50
Calcaires lacustres du Pliocène	50 - 80
Marnes salées du Mio-Pliocène	03-10
Marnes du Miocène éventuelles (non étalonnées) salées	02-05 ?
Conglomérats du Miocène (bordures des massifs)	100-150
Marnes sénoniennes salées	05-10
Calcaires cénomaniens ou turoniens	100-150
Marnes cénomaniennes salées	02-05
Calcaire du Crétacé inférieur (sans distinction)	100-300
Marnes Valanginiennes (Sud)	10-20 ?
Calcaires du Jurassique	100-500

III.2.2 Difficultés d'interprétation

Les difficultés rencontrées dans l'interprétation se résument comme suit :

- ✓ La région a une forte tectonique, les couches ont une grande variabilité des pendages et ont une succession de divers niveaux de résistivités variées dans le substratum ;
- ✓ Présence des formations superficielles fortement salés dans les zones centrales rendant difficile l'estimation des épaisseurs et des profondeurs des niveaux résistants et la distinction entre terrains résistants du recouvrement et niveaux identiques du substratum suite au phénomène de convention ;
- ✓ La variation du faciès, en particulier dans les horizons marneux, introduit une certaine erreur dans l'évaluation des épaisseurs suite au phénomène d'équivalence.

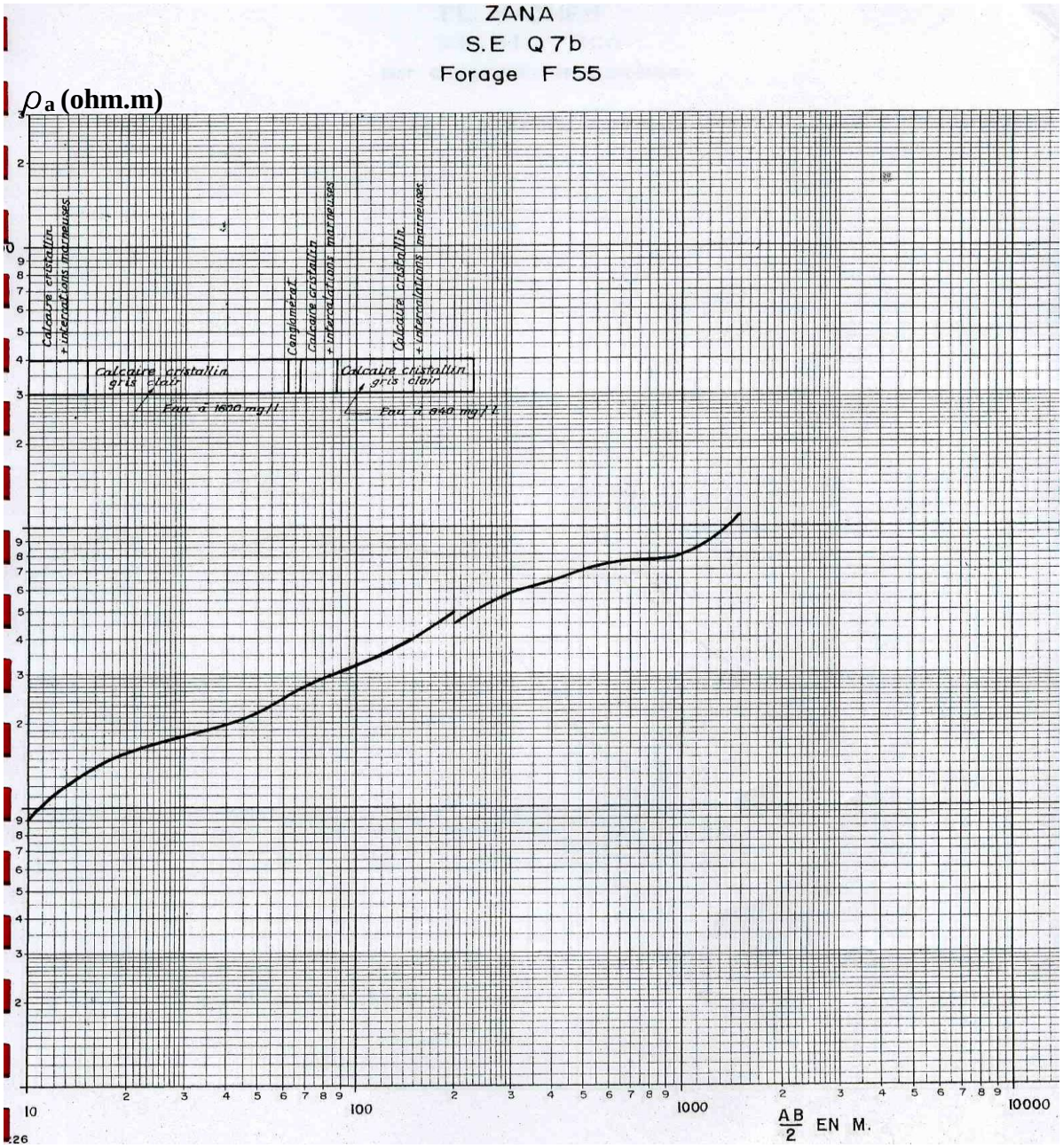


Fig. 3.2 : Courbe d'étalonnage au niveau du forage F55 de Zana

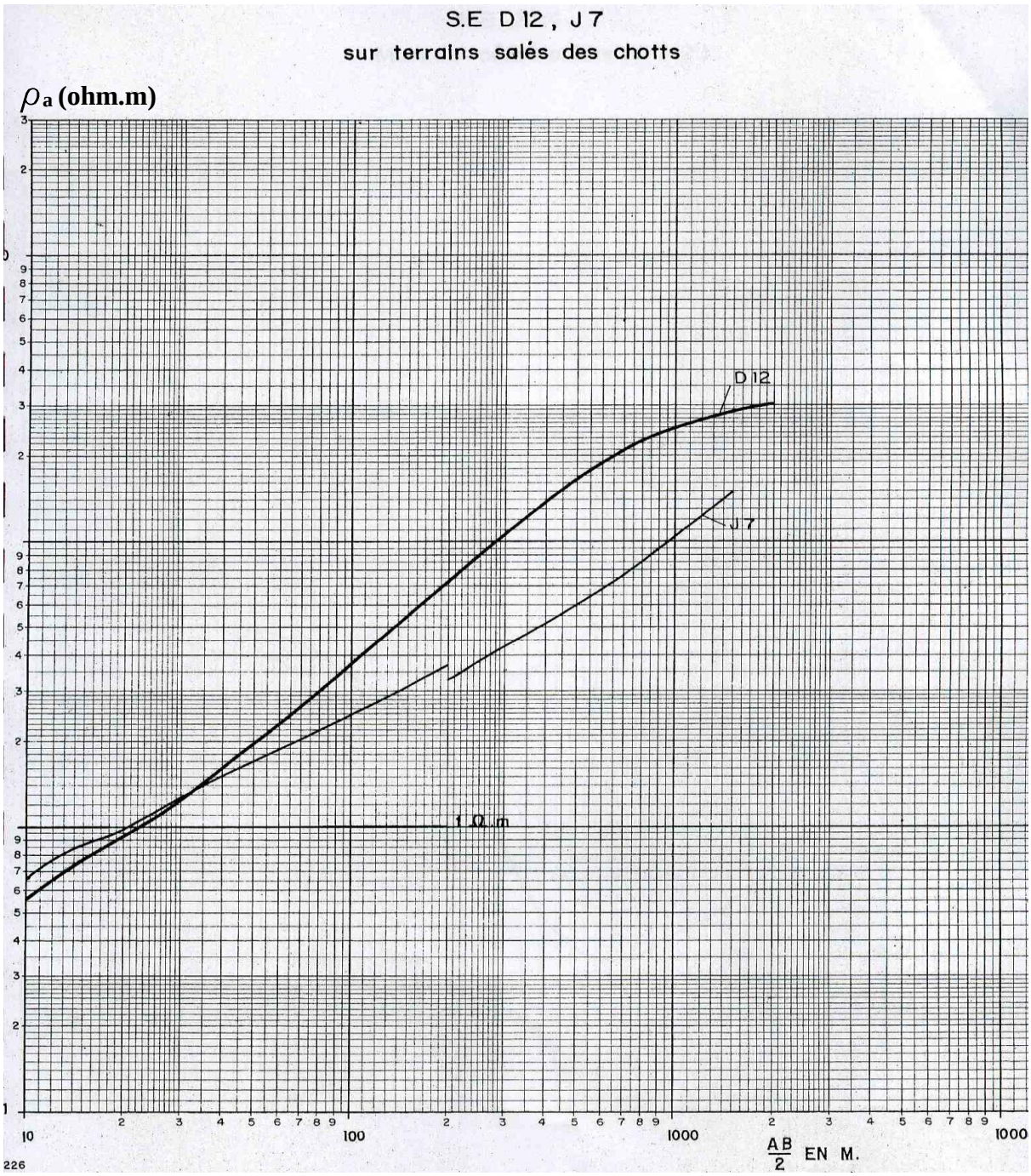


Fig. 3.3 : Courbe d'étalonnage au niveau du forage D12 et J7, plaine de Gadaïne

III.3 Examen des résultats

L'interprétation que nous présentons est purement géophysique (épaisseur, résistivité des couches) que géologique (nature et attribution d'âge probable). Cette interprétation reste parfois douteuse, en l'absence de forages profonds d'étalonnage. Nous examinons successivement :

- ✓ L'allure structurale du substratum, les grands accidents qui l'affectent et la nature des formations ;
- ✓ Les formations du recouvrement.

III.3.1 Etude du Substratum

III.3.1.1 Carte de résistivité en ligne AB = 3000m

Cette carte traduit grossièrement la répartition des formations résistantes et conductrices vers une profondeur moyenne de 300 à 750 m. Il faut noter que les formations très salées du Chott peuvent influencer la résistivité apparente (on la diminuant) suite à l'effet de convention mais conserves les grandes lignes structurales.

Les résistivités dans l'ensemble sont élevées (80 à 150 ohm.m), sauf à l'endroit du Chott Saboun et Merdja de Zana (20 à 50 ohm.m). Cette diminution progressive des résistivités vers le centre de la plaine s'explique par l'épaisseur considérable des formations argileuses et les formations salées au niveau de Chott Saboun et Merdja de Zana, tandis que la forte résistivité constatée en bordure de la plaine montre l'affleurement d'une formation résistante (Calcaires du crétacé et du Jurassique).Les formations résistantes du Crétacé sont à faible profondeur, notamment dans le prolongement du massif de Mestaoua. Aussi ces formations peu profondes se poursuivent vers le Nord-Est en bordures des Djebels Merzeguene, Tizourite, Azraouat et Guedmane, (Fig. 3.4).

La structure d'ensemble apparait comme une plateforme peu profonde, englobant le Mestaoua, la plaine de Zana et les Djebels du Nord. Ici on a affaire à des formations Crétacées et Jurassiques en position anticlinal dans l'ensemble et pénéplanées.

III.3.1.2 Coupes géo-électriques

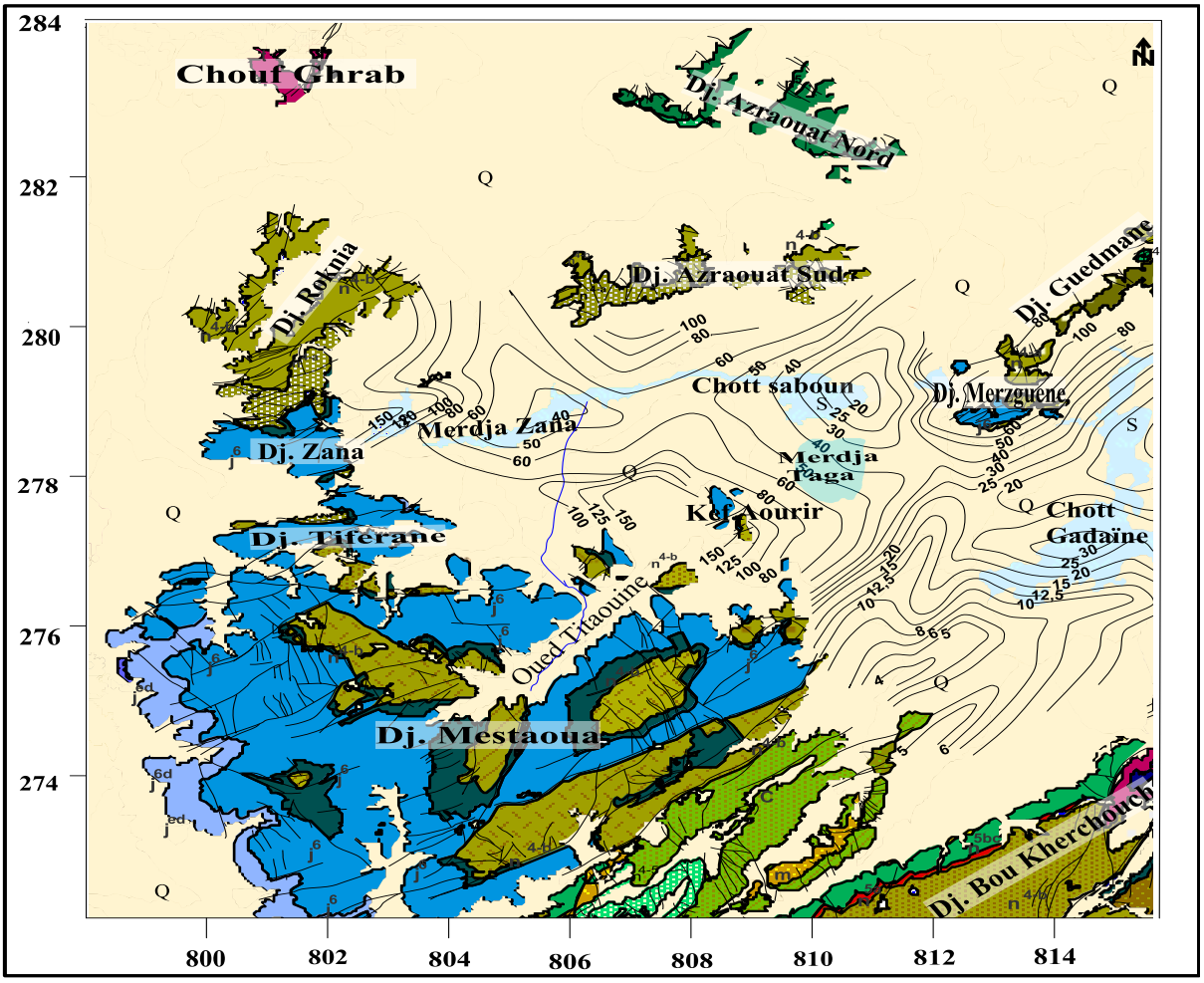
Les formations crétacés et jurassiques sont très résistantes, on position anticlinales dans l'ensemble et pénéplanées. Les coupes V et W traduisent bien cette allure. Le substratum est en général peu profond, 200 à 350 m. Le recouvrement très conducteur est constitué par des argiles du Plio-Quaternaire sauf au sud au voisinage de Kef Aourir, ou il y a une épaisse formation résistante, attribuée au substratum, (Fig. 3.7).

III.3.1.3 Carte du substratum

Vue la complexité de la tectonique et de la stratigraphie l'étude n'a pas donnée une image parfaite du substratum profond car certains structures locales restent mal définies.

Toutes les formations ayant des résistivités voisines, de façon générale la plaine de Zana montre un substratum relativement peu profond, inférieur à 300 m en général, il est formé par le Crétacé inférieur ou éventuellement le Jurassique dans le prolongement de Mestaoua. Ce dernier se prolonge au Nord-Est par les Djebels Merzeguene, Tizourite et Guedmane, (Fig. 3.5).Cette carte schématise et mis en relief les zones de moindre profondeur des formations résistantes et épaisses du substratum (côtes du toit supérieur à + 500 m) c'est-à-

dire généralement profondeur inférieures à 300 - 400 m dans la plaine de Zana-Chott Saboun, et dans le synclinal de Seriana les côtes du toit supérieur est à + 100 m. Elle met en évidence les compartiments principaux et leur liaison avec les massifs affleurements. Ce point est important pour l'alimentation de ces compartiments.

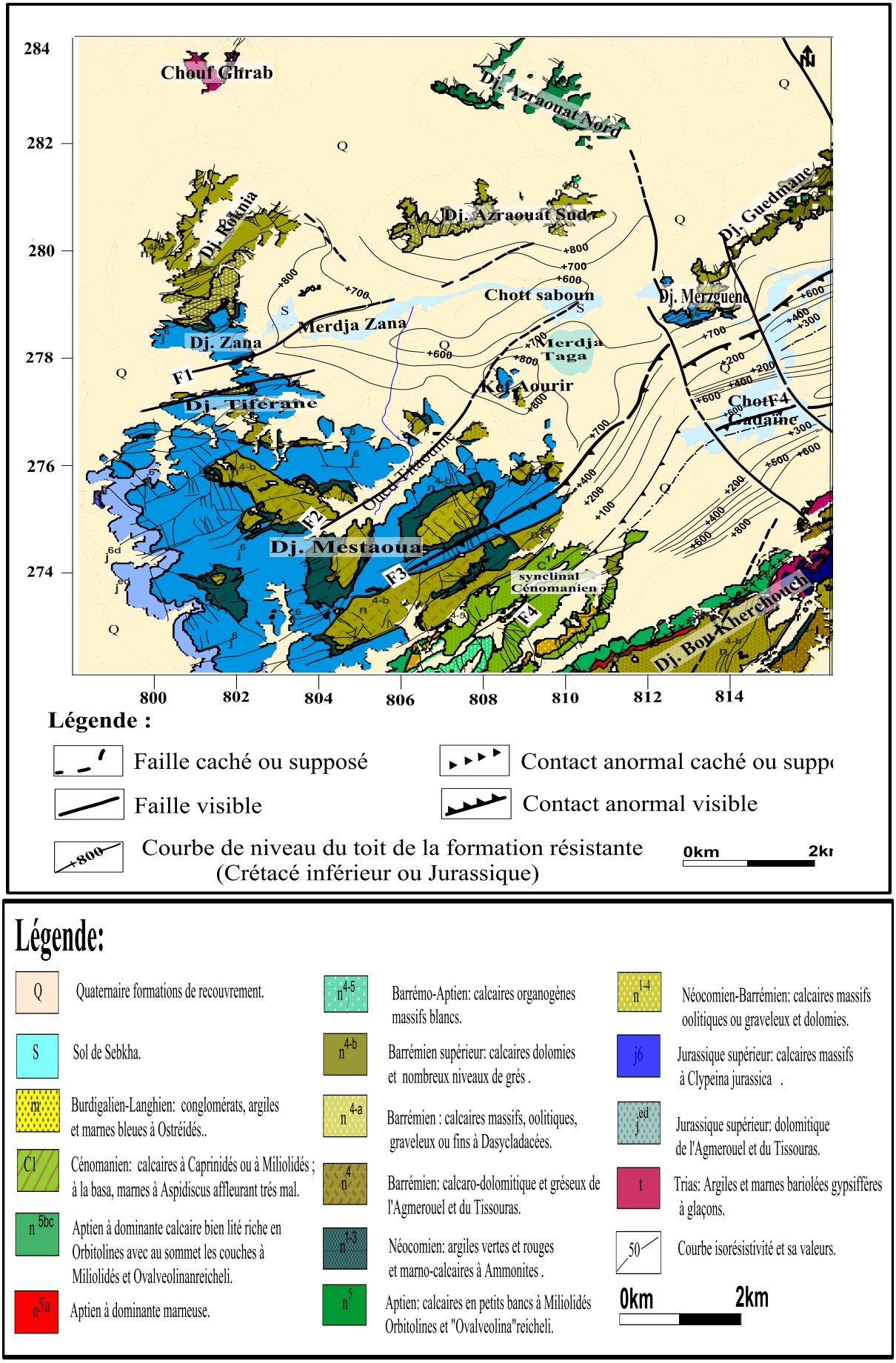


Légende:

- Q — Quaternaire formations de recouvrement.
- S — Sol de Sebkha.
- m — Burdigalien-Langhien: conglomérats, argiles et marnes bleues à Ostréidés..
- C1 — Cénomanien: calcaires à Caprinidés ou à Miliolidés ; à la basa, marnes à Aspidiscus affleurant trés mal.
- n 5bc — Aptien à dominante calcaire bien lité riche en Orbitolines avec au sommet les couches à Miliolidés et Ovalveolinanreicheli.
- n 5a — Aptien à dominante marneuse.
- n 4-5 — Barrémo-Aptien: calcaires organogènes massifs blancs.
- n 4-b — Barrémien supérieur: calcaires dolomies et nombreux niveaux de grés .
- n 4-a — Barrémien : calcaires massifs, oolitiques, graveleux ou fins à Dasycladacées.
- n 4 — Barrémien: calcaro-dolomitique et gréseux de l'Agmerouel et du Tissouras.
- n 1-3 — Néocomien: argiles vertes et rouges et marno-calcaires à Ammonites .
- n 5 — Aptien: calcaires en petits bancs à Miliolidés Orbitolines et "Ovalveolina"reicheli.
- n 1-4 — Néocomien-Barrémien: calcaires massifs oolitiques ou graveleux et dolomies.
- j6 — Jurassique supérieur: calcaires massifs à Clypeina jurassica .
- j ed — Jurassique supérieur: dolomitique de l'Agmerouel et du Tissouras.
- t — Trias: Argiles et marnes bariolées gypsiffères à glaçons.
- 50 — Courbe isorésistivité et sa valeurs.

0km 2km

Fig. 3.4 : Carte des résistivités en ligne AB = 3000 m d'une échelle 1/50 000, (C.G.G, 1969, modifié sur fond géologique par l'auteur)



Légende:

Q	Quaternaire formations de recouvrement.
S	Sol de Sebkha.
m	Burdigalien-Langhien: conglomérats, argiles et marnes bleues à Ostréidés..
Cl	Cénomanien: calcaires à Caprinidés ou à Miliolidés ; à la basa, marnes à Aspidiscus affleurant trés mal.
n^{5bc}	Aptien à dominante calcaire bien lité riche en Orbitolines avec au sommet les couches à Miliolidés et Ovalveolinanreicheli.
n^{5a}	Aptien à dominante marneuse.
n^{4-5}	Barrémo-Aptien: calcaires organogènes massifs blancs.
n^{4-b}	Barrémien supérieur: calcaires dolomies et nombreux niveaux de grés .
n^{4-a}	Barrémien : calcaires massifs, oolitiques, graveleux ou fins à Dasycladacées.
n^{4}	Barrémien: calcaro-dolomitique et gréseux de l'Agmerouel et du Tissouras.
n^{1-3}	Néocomien: argiles vertes et rouges et marno-calcaires à Ammonites .
n^{5}	Aptien: calcaires en petits bancs à Miliolidés Orbitolines et "Ovalveolina"reicheli.
n^{1-4}	Néocomien-Barrémien: calcaires massifs oolitiques ou graveleux et dolomies.
j6	Jurassique supérieur: calcaires massifs à Clypeina jurassica .
ed j	Jurassique supérieur: dolomitique de l'Agmerouel et du Tissouras.
t	Trias: Argiles et marnes bariolées gypsifères à glaçons.
50	Courbe isorésistivité et sa valeurs.

0km 2km

Fig. 3.5 : Carte du substratum d'une échelle 1/50 000,
(C.G.G, 1969, modifié sur fond géologique par l'auteur)

III.3.2 Etude du recouvrement

III.3.2.1 Carte de résistivité en ligne AB = 1000m

Cette carte a pour but de localiser les niveaux résistant du recouvrement entre des profondeurs allant de 100 m et 300 m.

En fait cette carte est influencée par les massifs calcaires peu profonds des bordures. Ainsi dans la plaine de Zana, une large plage résistante aux abords du Djebel Aourir qui avance jusqu'au Chott Saboun, (Fig. 3.6). Cette carte à permet la délimitation parfaite des affleurements résistants avec un seuil mettant en liaison le Djebel Roknia avec le Djebel Azraouat.

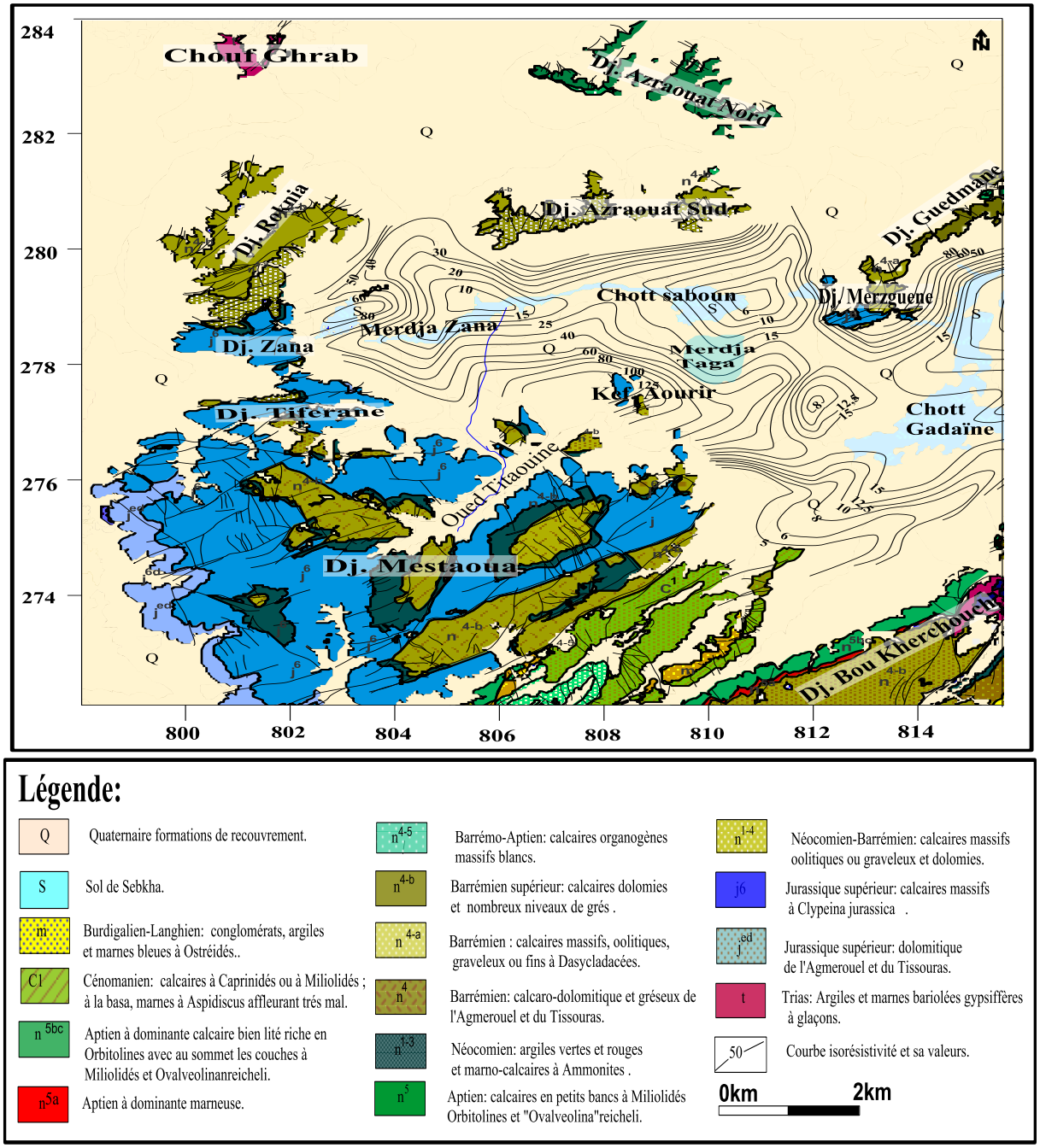
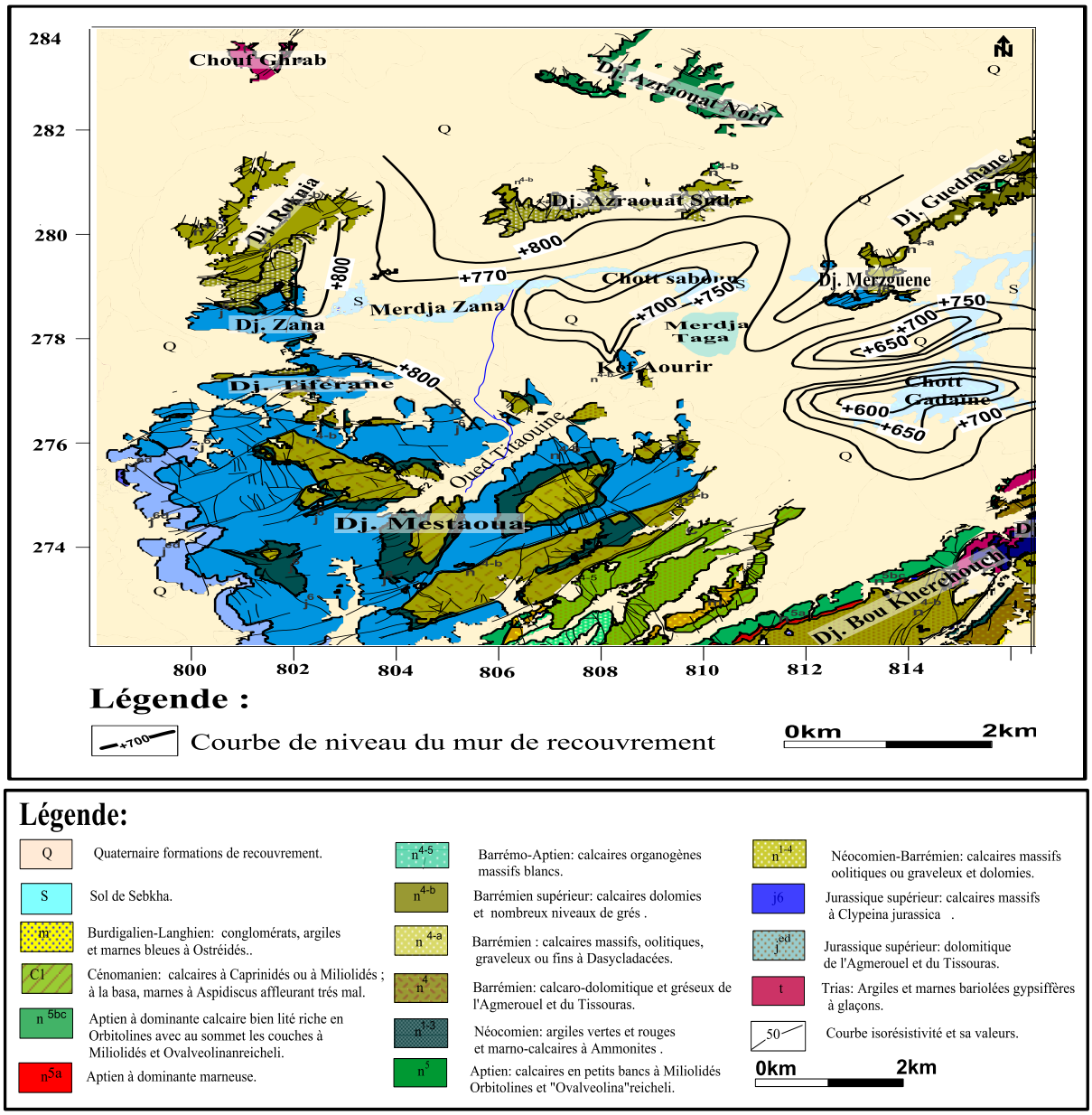


Fig. 3.6 : Carte des résistivités en ligne AB = 1000 m d'une échelle 1/50 000, (C.G.G, 1969, modifié sur fond géologique par l'auteur)

III.3.2 Carte de recouvrement

Sur cette carte schématique sont reportées les courbes de niveau du mur des niveaux résistants que l'on peut sans grand risque d'erreur rattacher au recouvrement du Quaternaire. Cette carte permet de délimiter les niveaux perméables, ou supposés tels, les plus importants et les plus épais. Dans la plaine de Zana, les dépôts résistants et épais arrivent à 150m dans certains endroits mis en évidence au Sud s'organisent bien au débouché de l'Oued Titaouine, (Fig. 3.7). Il y a donc peu de doute qu'ils représentent un ancien cône de déjection (S.E S3, T2 et U5) voir même l'ancien lit de l'Oued dont on verrait la trace le long du flanc Nord du môle de Mestaoua (jusqu'en W6 et X7). C'est ce niveau qui s'amenuisant et remontant en surface au centre de la plaine alimenterait la Merdja de Zana et le Chott Saboun. Il est probable que ces dépôts résistants soient bien alimentés et le recouvrement représente probablement un bon aquifère



Légende:

- Q — Quaternaire formations de recouvrement.
- S — Sol de Sebkha.
- m1 — Burdigalien-Langhien: conglomérats, argiles et marnes bleues à Ostréidés..
- C1 — Cénomanien: calcaires à Caprinidés ou à Miliolidés ; à la basa, marnes à Aspidiscus affleurant trés mal.
- n 5bc — Aptien à dominante calcaire bien lité riche en Orbitolines avec au sommet les couches à Miliolidés et Ovalveolinanreicheli.
- n5a — Aptien à dominante marneuse.
- n 4-5 — Barrémo-Aptien: calcaires organogènes massifs blancs.
- n 4-b — Barrémien supérieur: calcaires dolomies et nombreux niveaux de grés .
- n 4-a — Barrémien : calcaires massifs, oolitiques, graveleux ou fins à Dasycladacées.
- n 4 — Barrémien: calcaro-dolomitique et gréseux de l'Agmerouel et du Tissouras.
- n 1-3 — Néocomien: argiles vertes et rouges et marno-calcaires à Ammonites .
- n 3 — Aptien: calcaires en petits bancs à Miliolidés Orbitolines et "Ovalveolina"reicheli.
- n 1-4 — Néocomien-Barrémien: calcaires massifs oolitiques ou graveleux et dolomies.
- j6 — Jurassique supérieur: calcaires massifs à Clypeina jurassica .
- j ed — Jurassique supérieur: dolomitique de l'Agmerouel et du Tissouras.
- t — Trias: Argiles et marnes bariolées gypsiffères à glaçons.
- 50 — Courbe isorésistivité et sa valeurs.

0km 2km

Fig. 3.7 : Carte de recouvrement d'une échelle 1/50 000, (C.G.G, 1969, modifié sur fond géologique par l'auteur)

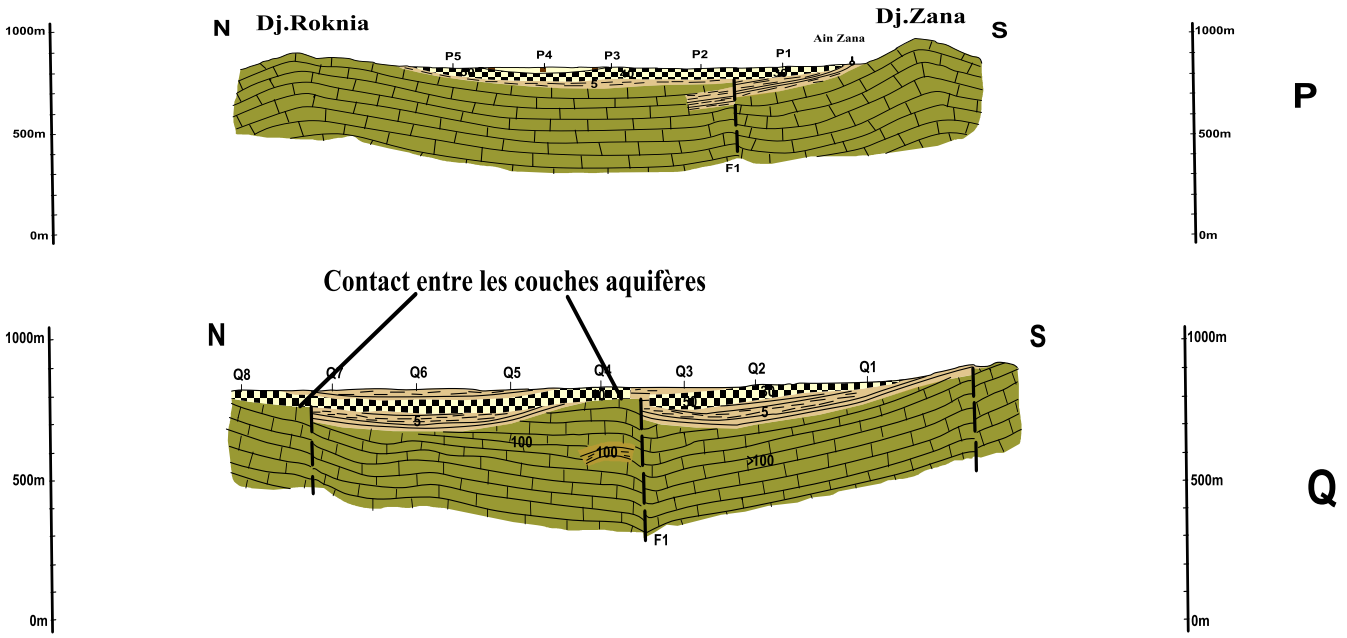
III.3.2.3 Coupes géo-électriques

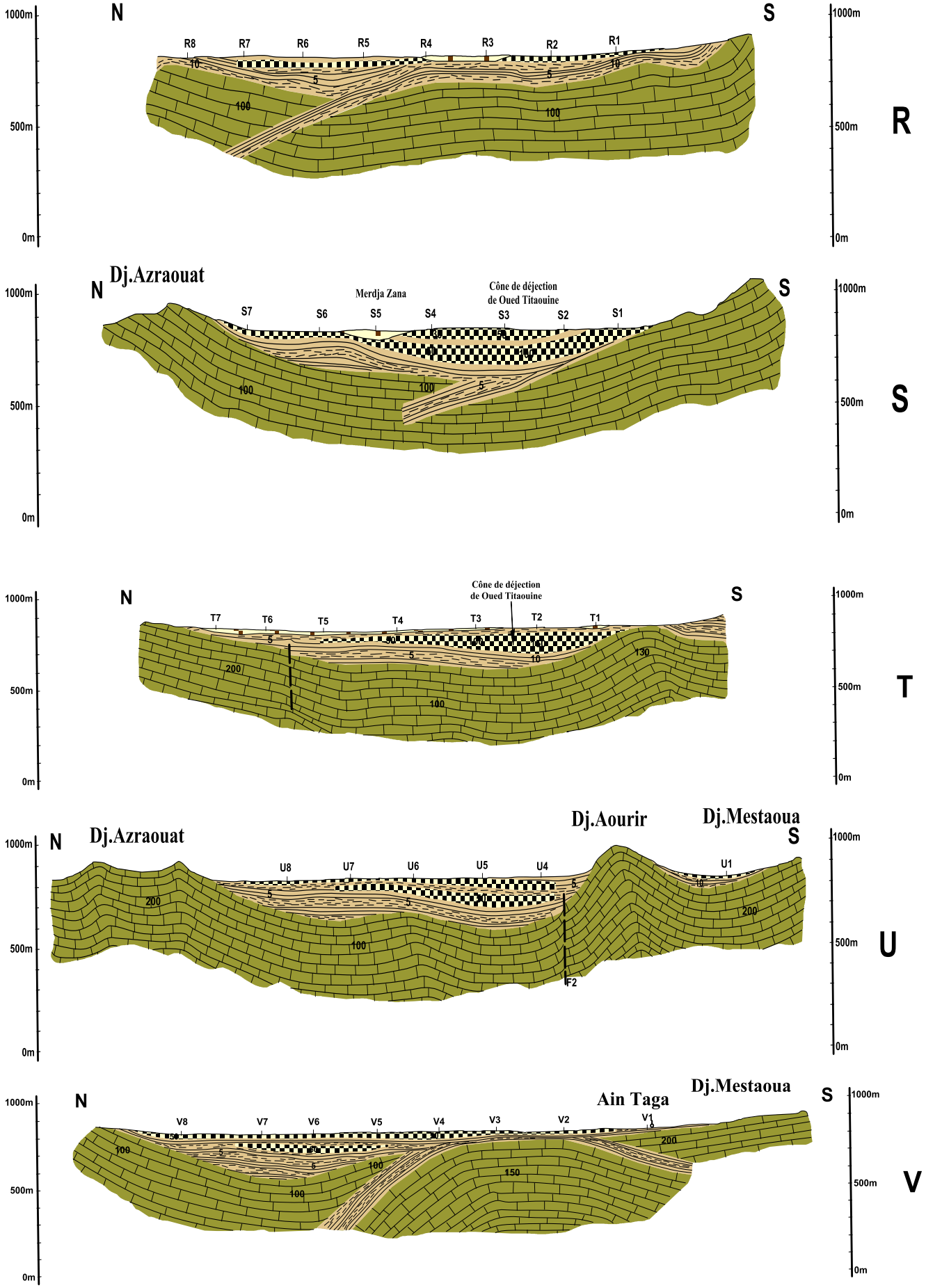
Les coupes électriques sont représentées à l'échelle verticale au 1/1000 et à l'échelle horizontale 1/25000. En examinant les divers coupes géo-électriques on s'aperçoit qu'il peut exister des niveaux résistants dans le recouvrement, souvent peu épais et recouvert d'un terrain argileux conducteur, (Fig. 3.8). Les coupes dévoilent ce qui suit :

- ✓ Le recouvrement est généralement très conducteur, ce sont des argiles Plio-Quaternaires sauf au Sud sur les profils (S et T) au voisinage du Djebel Aourir où un niveau très résistant de 100 à 150 ohm.m pourrait être confondue avec le substratum surtout au S1-S2 et T1-T2 ;
- ✓ Des dépôts grossiers qui proviendrait des déjections de l'Oued Titaouine épais de 100 m à 150 m au Sud et s'amincissent vers le Nord-Est (S.E U4 à U6, V5 à V7, W5 à W6) recouverts au Sud d'un niveau argileux, il se rapproche de la surface au S5 et au W5, où ils alimentent la Merdja de Zana et Chott Saboun. Ces niveaux perméables probablement en charge, perdent leur capacité en se rapprochant de la surface ;
- ✓ Présence des accidents transversaux importants qui compliquent les structures des directions Sud-ouest - Nord-Est (faille F2, F3 et F4) qui provoquent la remontée du substratum.

En générale les coupes géo-électriques dévoilent que :

- ✓ L'épaisseur du recouvrement augmente en allant des affleurements vers le centre de la plaine ;
- ✓ Le recouvrement est en général assez régulier ;
- ✓ Le substratum est relativement peu profond (300 m en général), il s'agit du Crétacé inférieur ou du Jurassique dans le prolongement de Mestaoua.




N
S
R
R8
R7
R6
R5
R4
R3
R2
R1
1000m
500m
0m
Dj.Azraouat
Merdja Zana
Cône de déjection
de Oued Titaouine
S
S7
S6
S5
S4
S3
S2
S1
T
T7
T6
T5
T4
T3
T2
T1
U
Dj.Aourir
Dj.Mestaoua
U8
U7
U6
U5
U4
U1
F2
V
Ain Taga
V8
V7
V6
V5
V4
V3
V2
V1

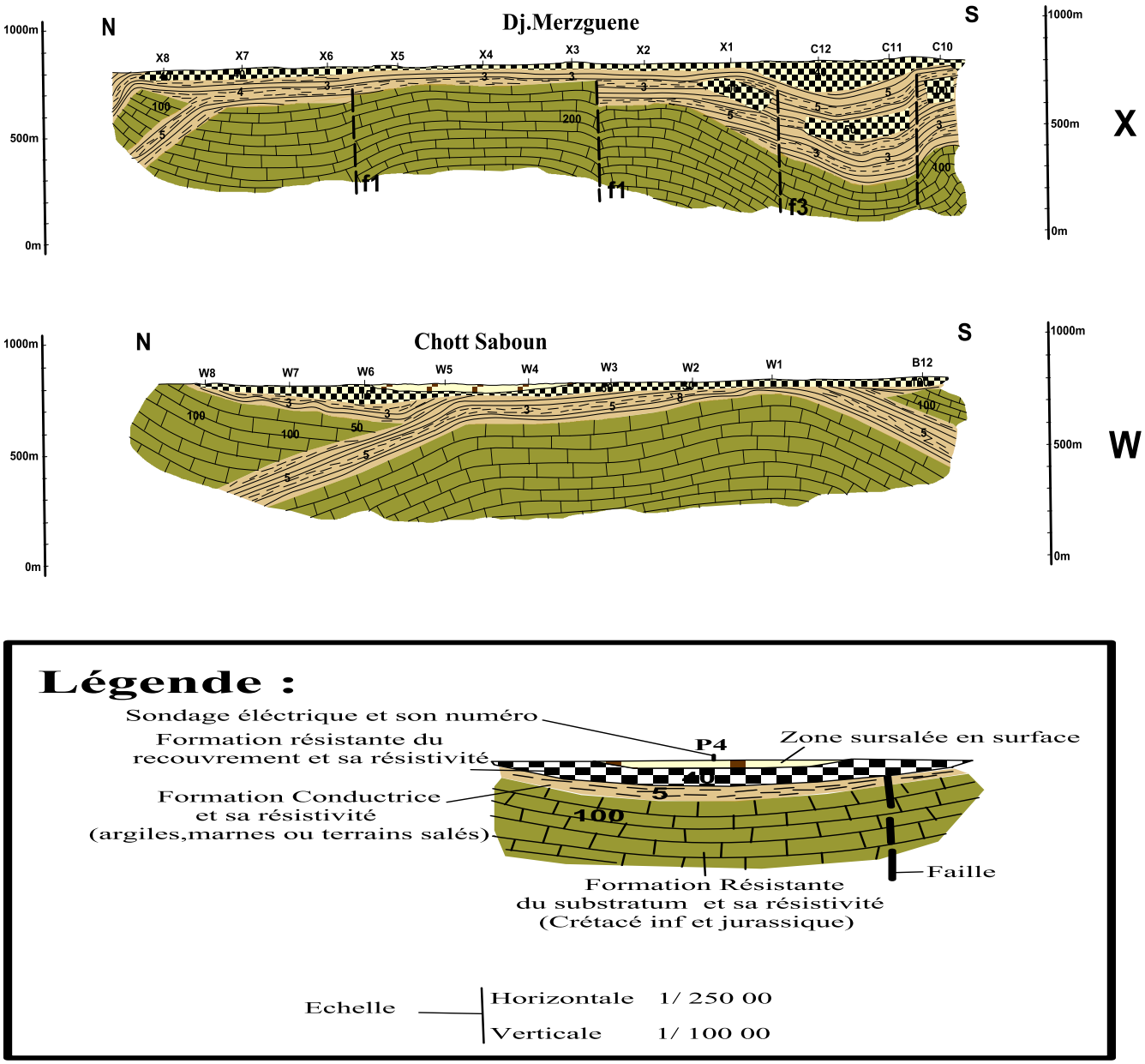


Fig. 3.8 : Coupes géo-électriques, (C.G.G, 1969, repris par l'auteur)

III.4 Conclusion

Dans l'ensemble, l'étude géophysique a montré que la zone étudiée présente des possibilités assez importantes. Les résultats obtenues sont particulièrement intéressants non seulement en ce qui concerne le substratum mais aussi et surtout en ce qui concerne le remplissage. Sommairement les résultats obtenus peuvent se résumer comme suit :

- ✓ Le remplissage de la plaine est Miocène à Plio-Quaternaire, en majorité marneux et argileux mais il peut contenir quelques niveaux perméables (conglomérats ou grès Miocènes, calcaires lacustres Pliocènes, sable, gravier Plio-Quaternaire). Ce recouvrement épais de 150 m semble présenter un ancien cône de déjection de l'Oued Titaouine qui s'aminci et remonte en

surface au centre de la plaine, pour alimenter la Merdja de Zana et le Chott Saboun ; il constitue probablement un bon aquifère ;

- ✓ Un aquifère superficiel alimenté par des massifs du Crétacé par l'intermédiaire des niveaux en charge du recouvrement, a comme exutoire Chott Saboun. La salure de la nappe augmente au voisinage de ce Chott ;
- ✓ L'étude délimite les divers compartiments du substratum Crétacé ou Jurassique dans le prolongement de Mestaoua. Ces horizons sont relativement peu profonds (inférieur à 300 m en général) et qui, en outre, sont en liaison avec les massifs affleurant ;
- ✓ Les failles affectant les formations carbonatées constituent un champ important pour le développement du karst et assurent les relations hydrogéologiques entre les deux aquifères du Mio-Plio-Quaternaire et du Crétacé Jurassique ;
- ✓ Les deux aquifères superposés, sont séparés par une formation imperméable argilo-marneuse, mais elle n'empêche pas le contact entre les deux aquifères au niveau des failles ou au niveau des piémonts (la formation carbonatée est surmontée directement par les alluvions) ;
- ✓ On remarque aussi que la formation carbonatée est pénétré par une formation conductrice probablement Triasique dans certains endroits.

Chapitre 4 :

Contexte Climatique

Introduction

L'étude hydrogéologique est étroitement liée à l'étude climatique, le comportement des nappes et la variation du niveau piézométrique dépendent étroitement des précipitations et des prélèvements. Il est important de signaler à cet effet que l'alimentation est régie par la fraction de pluie qui s'infiltre vers la zone saturée, constituant à moyen terme la véritable ressource mobilisable. Il s'agit donc dans ce chapitre, à partir des paramètres climatiques (pluviomètrie, température, etc) d'essayer de dégager les caractéristiques climatiques de la région, d'établir un bilan et le calcul du ruissellement et l'infiltration qui participe à l'alimentation et au renouvellement des nappes.

Le trait le plus frappant du climat de l'Algérie est sans doute la grande variabilité des précipitations et des températures liées aux irrégularités topographiques et aux influences opposées de la Méditerranée et du Sahara. Ainsi, les monts de l'Atlas saharien et tellien protègent les hautes plaines respectivement des vents désertiques du Sahara et ceux du Nord chargée en humidité. L'Est algérien est la région la plus variée du pays sur le plan climatique, (Fig. 4.1). Aussi, tout bilan hydrologique se trouve directement influencé par les nuances du climat, plus spécialement par deux paramètres déterminants : pluviométrique (conditionnant l'alimentation en eau) et évaporométrique (pertes ou retour de l'eau à l'atmosphère).

L'objectif de ce chapitre est d'établir une définition générale des différents contextes climatiques de la région d'étude. Nous avons utilisé des valeurs statistiques calculées à partir des données quotidiennes enregistrées (températures et précipitations) entre 1969 et 2015 à la station d'Ain Djasser et des données enregistrées entre 1989 et 2015 à la station d'Ain Skhouna-Aéroport.

IV.1 Généralité sur le climat méditerrané

Le choix d'une classification des climats, dépend avant tout de l'usage que l'on veut en faire. Il est toutefois plus courant de faire appel à des classifications ne reposant que sur des statistiques mensuelles de température et de précipitations. Une définition de la zone méditerranéenne a été proposée par Le Houérou (1980) : « Pluviométrie annuelle supérieure à 400 millimètres, Pluviométrie estivale/Moyenne des températures maximales du mois le plus chaud inférieure à 7 », mais il en existe beaucoup d'autres. Généralement, le climat méditerranéen se définit par les deux conditions suivantes : la température du mois d'hiver le plus froid est compris entre -3° et 18°C et le mois le plus sec de l'été à une pluviométrie inférieure au tiers de celle du mois d'hiver le plus pluvieux. Le climat méditerranéen apparaît ainsi comme un climat de transition entre les deux grands climats généraux que sont le climat tempéré d'une part et les climats désertiques d'autre part. Il présente par ailleurs des différences

notables en fonction de la latitude, du relief ou encore de la distance par rapport à la mer. Généralement le climat méditerranéen se caractérise par des hivers doux et humides, des printemps et des automnes souvent humides et des étés secs.

Pour une caractérisation plus fine à notre zone d'étude nous utiliserons les données fournies par office national de la météorologie ONM, à savoir les données de la station d'Ain Djasser et ceux de la station d'Ain Skhouna/Aéroport, (Tableau 4.1).

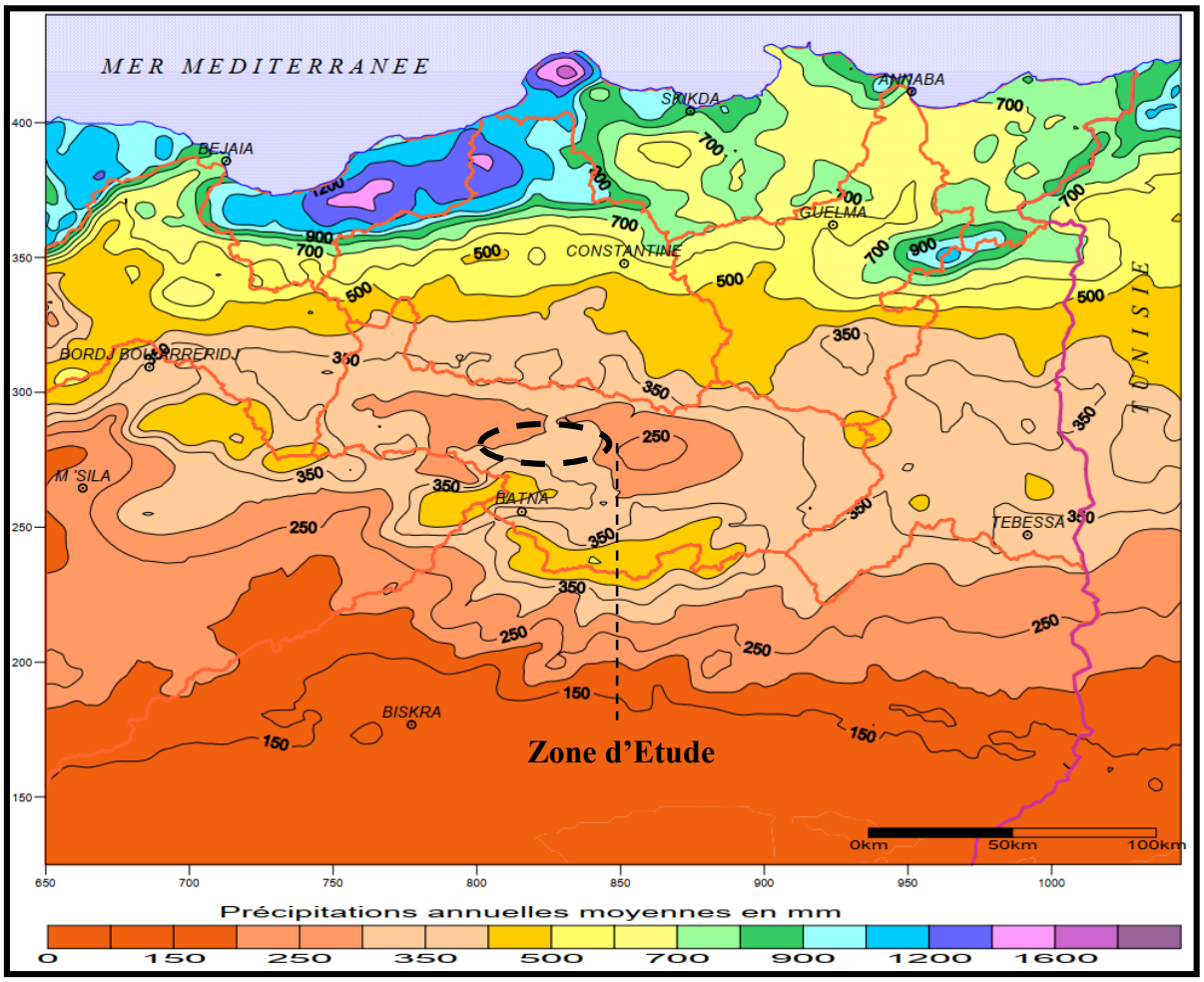


Fig. 4.1 : Carte des précipitations annuelles moyennes de l'Est algérien, (A.N.R.H., 1993)

IV.1.1 Aperçu général sur le climat de la région

La plaine de Zana fait partie du bassin versant des hauts plateaux Constantinois et plus précisément du sous bassin versant Merdja Zana (07-02) selon la codification de l'agence nationale des ressources hydraulique (Fig. 1.2). Le climat régnant dans la région est de type méditerranéen semi-aride, avec un hiver relativement tempéré et un été sec et chaud. Cette zone est caractérisée par une grande variabilité interannuelle des précipitations, car une grande partie des pluies peut se concentrer en quelques semaines, se présentant sous forme d'averses intenses. Ainsi de grandes sécheresses sont suivies de pluies torrentielles qui donnent naissance à un ravinement sur les piedmonts des massifs et des pentes en détruisant le sol et les cultures.

Nous allons faire une analyse des précipitations et des températures et de tenter de cerner le contexte climatique général de la région, car il joue un rôle important sur les réserves d'eaux souterraines par l'intermédiaires des précipitations efficaces.

L'étude des caractéristiques climatiques se fera sur la base des données des deux stations les plus proches de la région, en l'occurrence la station pluviométrique d'Ain Djasser au Nord-Ouest à environ 18 Km du centre de la plaine et la station météorologique d'Ain Skhouna-Aéroport à l'Est à environ 12 Km du centre de la plaine, (Fig. 4.2).

IV.2 Paramètres climatiques

IV.2.1 Précipitations

Les précipitations sous toutes leurs formes, ont une influence directe sur le comportement hydrologique d'un bassin versant. Cette influence est visible sous forme d'écoulement de surface ou souterrain. De même les précipitations influent directement le comportement climatique (ETR et ETP).

L'objet du présent chapitre sera l'étude de la variabilité des précipitations sur la base des données pluviométrique de deux stations pluviométriques (Tableau 4.1) implantées dans cette région.

L'examen des données relatives à ces deux stations ont permis de constater que les précipitations se répartissent de manière hétérogène dans le temps. Cependant, ces situations ne s'organisent pas de manière aléatoire et la distribution des pluies s'effectue, dans l'année, selon un schéma précis. Les précipitations surviennent essentiellement pendant la saison du printemps avec un hiver et un automne arrosé ; quelques pluies estivales peuvent par ailleurs survenir. L'approche de ces phénomènes nécessite une analyse au pas de temps mensuel. Les résultats relatifs à la pluviométrie moyenne mensuelle pour les deux stations sont consignés dans le Tableau 4.2.

Tableau 4.1 : Caractéristiques des stations pluviométriques.

N°	Nom de la station	X (Km)	Y (Km)	Longitude	Latitude	Altitude (m)
01	Ain Skhouna-Aéroport	828.05	179.05	6°19'01" E	35°45'19'' N	821.29
02	Ain Djasser	798.85	289.10	6°01'8" E	35°51'25" N	865.00

Sur la base des données enregistrées de 1969 à 2014 (45 ans d'enregistrement) au niveau de la station d'Ain Djasser et de 1989 à 2014 (25 ans d'enregistrement) au niveau de la station d'Ain Skhouna- Aéroport, il s'avère que la pluviométrie moyenne mensuelle de la région révèle les

grands traits du climat méditerranéen, c'est à dire des pluies importantes aux saisons transitoires (printemps et automne) et une période de pluviosité réduite en période estivale. On remarque clairement que les mois les moins pluvieux sont ceux de juin, juillet et août avec un minimum de 05 mm au mois de juillet à la station d'Ain Djasser et un maximum de 22 mm au mois d'août à la station d'Ain Skhouna-Aéroport. Par contre le reste des mois sont plus pluvieux avec un minimum de 22 mm enregistré au mois de novembre à la station d'Ain Djasser et un maximum de 44 mm au mois de mai à la station d'Ain Skhouna-Aéroport, (Tableau 4.2 et Fig. 4.3).

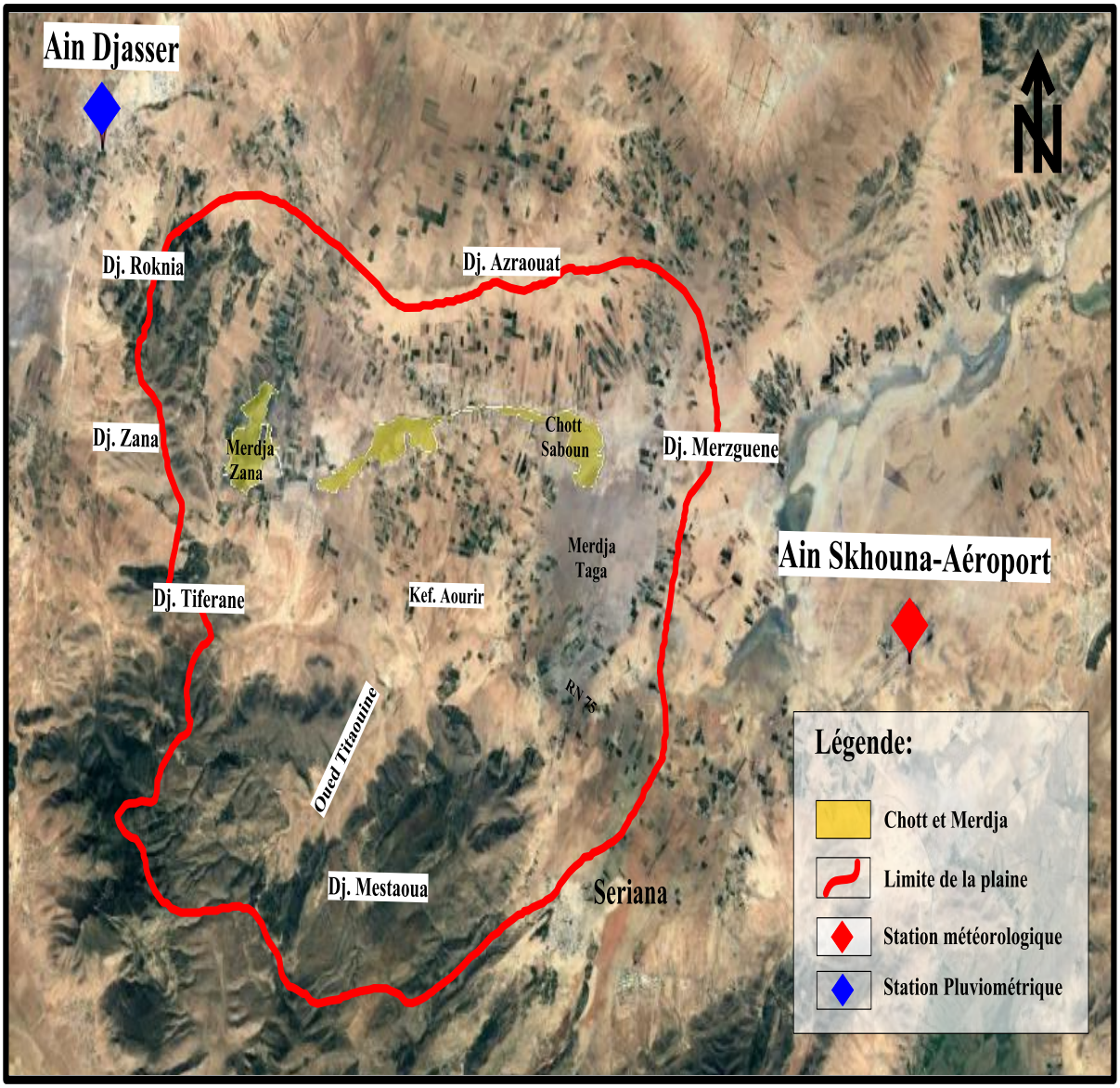


Fig. 4.2 : Carte de situation des stations météorologique et pluviométrique

Sur une échelle interannuelle, l'année la moins pluvieuse est celle de 2000/2001 avec une moyenne annuelle de 137 mm enregistrée à la station d'Ain Djasser et l'année la arrosée est celle de 2004/2005 avec une moyenne de 597 mm enregistrée à la station d'Ain Skhouna/Aéroport.

Tableau 4.2 : Précipitations moyennes mensuelles interannuelles et saisonnières en mm.

Station	Période	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Total
Ain Skhouna - Aéroport	1989 - 2014	36	24	25	31	32	23	33	36	44	18	7	22	331
		85			86			**113**			47			
Ain Djasser	1969 - 2014	30	23	22	28	26	23	28	32	33	14	5	12	276
		75			77			93			**31**			

A l'échelle saisonnière, on remarque que la saison la plus sèche est l'été avec un minimum de 31 mm calculé à la station d'Ain Djasser et la saison la plus humide est le printemps avec un maximum de 113 mm calculé à la station d'Ain Skhouna/Aéroport.

A l'échelle spatiale, on constate que la région d'Ain Djasser au Nord de la plaine de Zana reçoit les plus faibles précipitations, avec un minimum de 05 mm au mois de juillet et un maximum de 33 mm au durant le mois de mai. Par contre la partie Sud à la plaine de Zana, reçoit plus de précipitations avec 44 mm au mois de mai à la station d'Ain Skhouna/Aéroport et un minimum de 07 mm au mois de juillet enregistré à la même station, (Tableau 4.2).

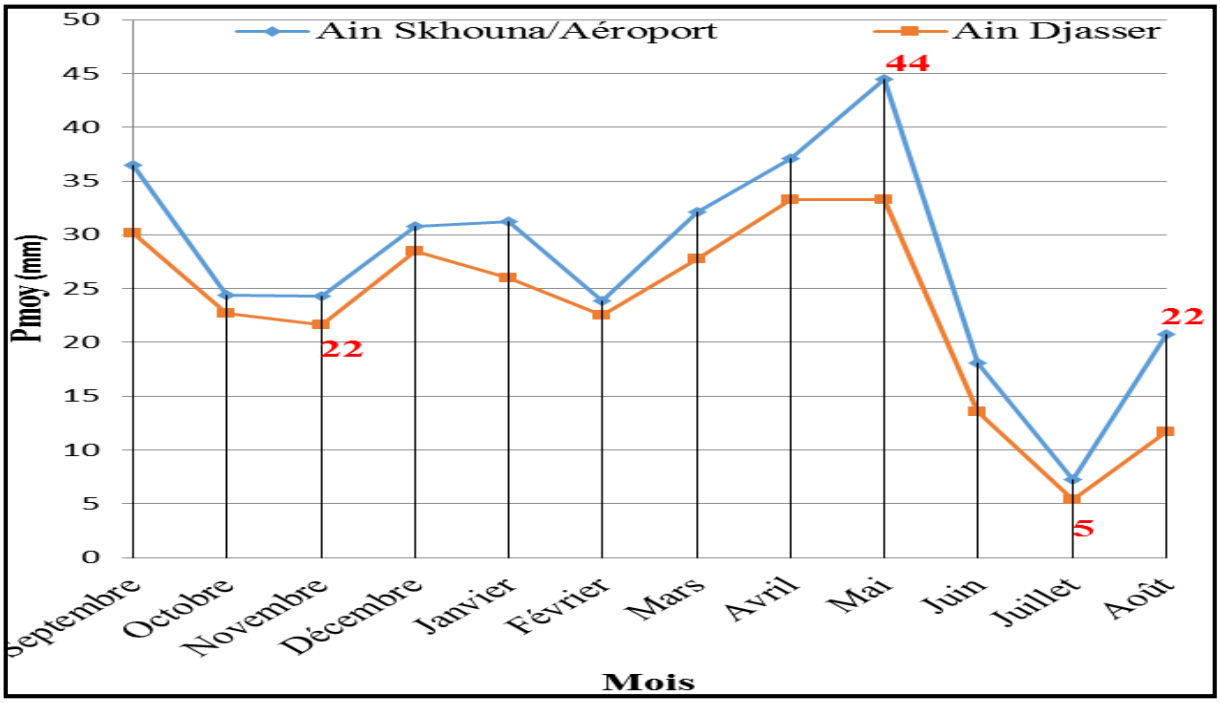


Fig. 4.3 : Variation des précipitations moyennes mensuelles interannuelles

IV.2.2 Températures

La température de l'aire suit un cycle quotidien appelé variation (ou cycle diurne) avec un minimum et maximum observable au cours d'une journée ou année ou mois. L'étude des

températures est d'un grand intérêt, car elle permet de quantifier l'évaporation et par conséquent les conditions d'alimentation des aquifères et agit sur le chimisme de l'eau.

Dans le présent paragraphe nous examinerons d'une manière générale les températures qui ont été enregistrées au niveau des stations d'Ain Skhouna-Aéroport et Ain Djasser.

L'examen de ces données montre que les températures moyennes interannuelles diffèrent légèrement entre les deux stations, (Fig.4.4). Les mois les plus froids sont : novembre, décembre, janvier, février mars et avril. Durant ces mois on enregistre les températures les plus basses, quand à celles des restes des mois, elles sont plus élevées. La température moyenne la plus basse est enregistrée au mois de janvier à la station d'Ain Skhouna-Aéroport avec 5.58 °C et la température moyenne la plus élevée est enregistrée au mois de juillet à la station d'Ain Djasser avec 26.79 °C.

Tableau 4.3 : Températures moyennes mensuelles interannuelles en °C.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Moy.
Station Ain Skhouna/ Aéroport													
T moy max	29.36	24.09	17.24	12.87	11.99	13.32	17.04	20.23	25.97	31.68	**35.69**	34.99	22.87
T moy Min	14.42	10.09	4.79	1.24	**0.06**	0.44	3.06	5.68	9.74	14.31	17.11	17.19	8.18
T moy	21.64	16.84	10.75	6.72	**5.58**	6.65	9.99	13.09	18.10	23.30	**26.71**	26.15	15.46
Station Ain Djasser													
T moy max	29.25	24.06	16.55	12.51	12.10	12.99	16.38	20.66	26.24	32.64	**36.29**	35.23	22.91
T moy Min	13.53	9.93	4.25	0.80	**-0.64**	-0.27	2.95	5.61	9.26	14.09	17.04	17.05	7.80
T moy	21.78	17.40	10.66	6.84	**5.64**	6.45	9.18	12.71	16.97	23.21	**26.79**	26.26	15.32

Les courbes des variations des températures démontrent que les deux stations se caractérisent par une variation mensuelle irrégulière, tels que les températures les plus élevées des maxima sont atteintes au mois de juillet pour la station d'Ain Skhouna-Aéroport (36.29 °C) et Ain Djasser (35.69 °C), alors que les plus basses des minima sont observées en mois de Janvier pour la station d'Ain Skhouna-Aéroport (0.06 °C) et Ain Djasser (-0.64 °C), (Tableau 4.3 et Fig. 4.4). L'allure des courbes des températures montre que les températures des deux stations sont asymptotique et décroit de septembre jusqu' à janvier, où on enregistre les

températures les plus basses et ensuite elle croit jusqu'au mois de Juillet et Aout où on enregistre les températures maximales (Fig. 4.4).

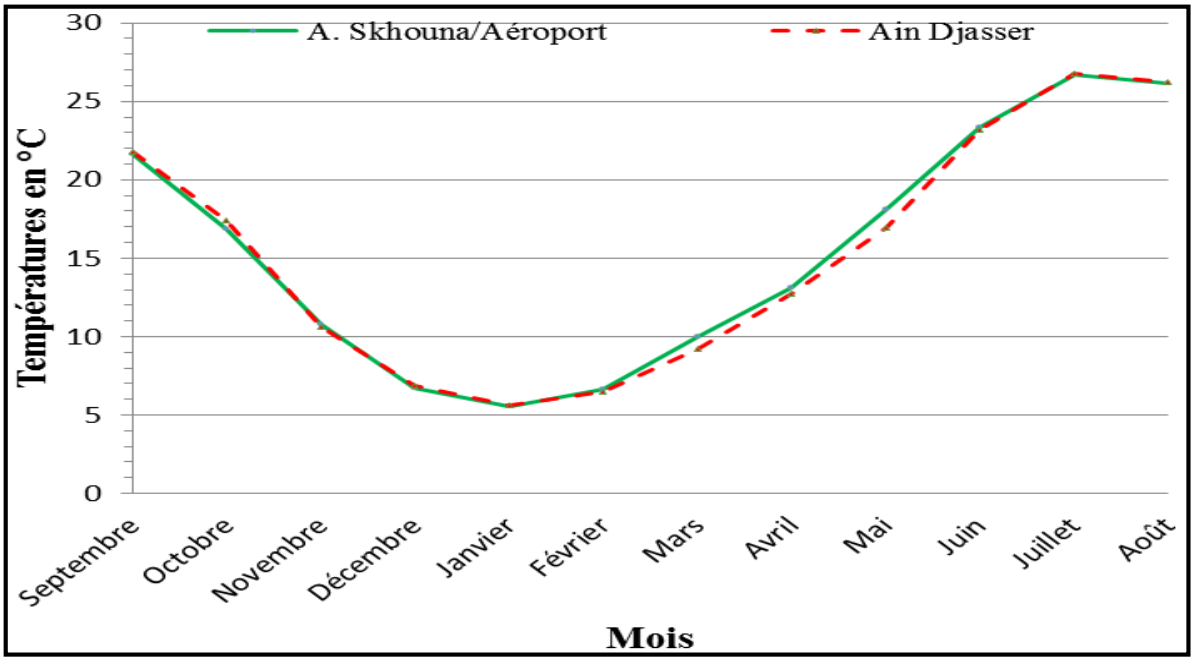


Fig. 4.4 : Variation des températures moyennes

IV.3 Caractérisation du climat

La combinaison des précipitations et des températures caractérise le rythme climatique à dominance méditerranéenne régnant à travers le nord de l'Algérie. Cette combinaison pluvio-thermique permet de définir des domaines bioclimatiques bien distinctes. Notons biens que les limites entre les cinq grands types de bioclimats méditerranées « humide P_{an}> à 900 mm ; subhumide P_{an}> à 600 mm ; semi-aride 300-350 < P_{an}< 550-600 mm ; subaride P_{an}< 350 mm et aride P_{an}< 150 mm » sont définies grâce à un tracé sur un Climagramme combinant le quotient pluvio-thermique d'Emberger en ordonnée et la moyenne des températures minimales du mois le plus froid en abscisse. La moyenne des températures minimales du mois le plus froid peut être une seconde fois utilisée pour préciser les sous-étages bioclimatiques à hiver froid, frais, doux et chaud. La carte au 1/ 1000 000 de Côte. M. (1998a) réalisée suivant ce principe (Fig.4.5).

Dans le présent paragraphe nous essayerons de classer la zone d'étude selon des indices à combinaison pluvio-thermique. Il existe beaucoup de méthodes et de formules qui permettent d'évaluer les indices climatiques, nous citons celle de De Martonne, d'Emberger, de Moral, de Stewart et celle d'Euverte. Pour notre cas nous nous contenterons de calculer l'indice d'aridité annuel de De Martonne et le diagramme d'Emberger et cela en se basant sur les températures mesurées dans les deux stations.

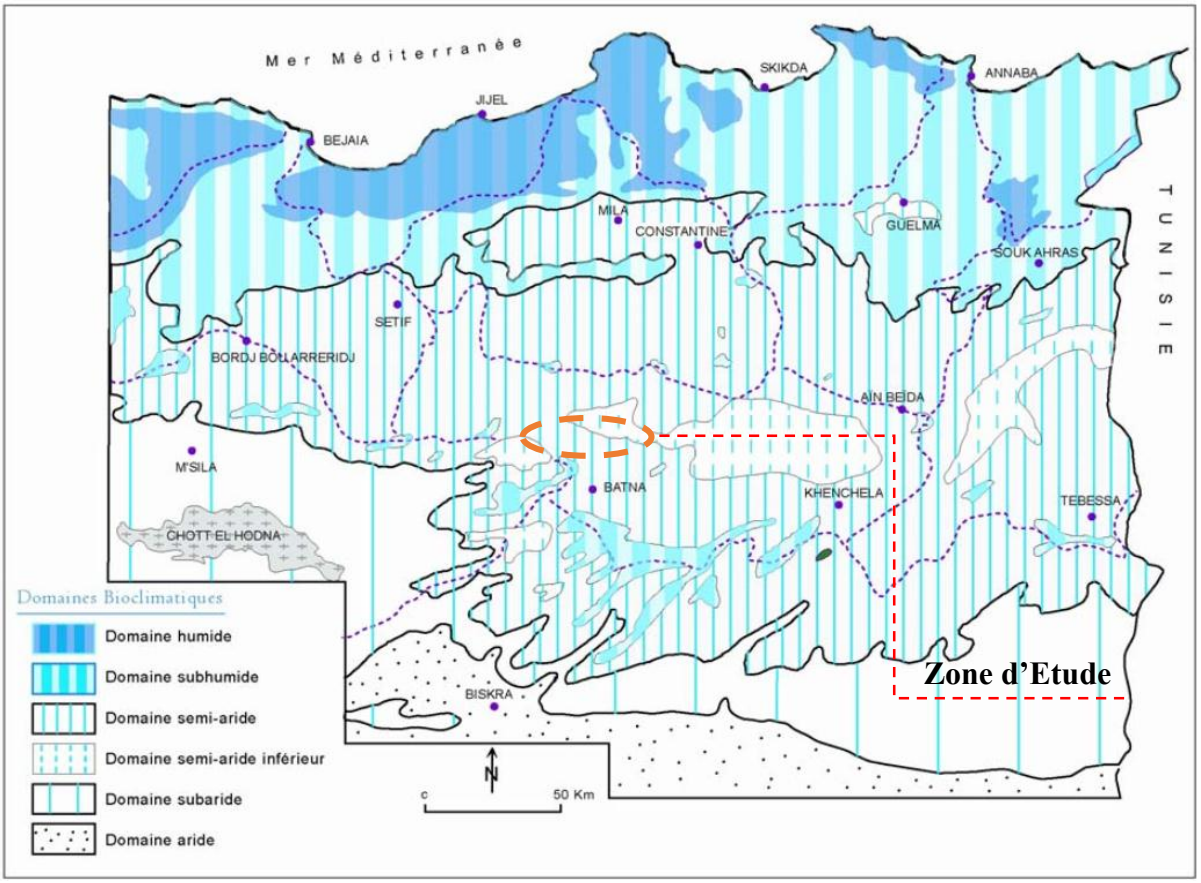


Fig. 4.5 : Carte simplifiée des zones bioclimatiques de l'Est algérien (établie d'après Côte M., 1998a)

IV.3.1 Indice d'aridité de De Martonne

L'aridité peut s'exprimer quantitativement par différents indices d'aridité conventionnels et empiriques, la plupart est un simple rapport hydro thermique fondé principalement sur des grandeurs moyennes des précipitations et des températures qui sont utilisées pour définir les degrés d'aridité et les conditions d'écoulement fluvial.

Cet indice proposé par De Martonne en 1923 est fondé sur le régime des précipitations et sur les températures, il est calculé par la formule suivante :

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

Où :

I : indice d'aridité annuel de De Martonne ;

P : précipitations moyennes annuelles (mm) ;

T : température moyenne annuelle (°C).

Selon De Martonne :

- pour des valeurs de I inférieures à 5, on est en présence d'un régime hyper aride ;

- pour des valeurs de I comprises entre 5 et 10, on est en présence d'un régime désertique ;

- pour des valeurs de I comprises entre 10 et 20, on est en présence d'un régime semi-aride, mais tout dépend de la répartition saisonnière des pluies.

Les différentes valeurs de l'indice d'aridité calculées selon la formule de De Martonne sont reportées dans le tableau 4.4.

Tableau 4.4 : Indice d'aridité de De Martonne.

Station	Période	P (mm)	T (°C)	I	Type de Climat
A. Skhouna- Aéroport	1989-2014	331	15.46	13.00	Semi-aride
A. Djasser	1969-2014	276	15.32	10.90	Semi-aride

Selon cet indice la région d'étude appartient à une zone ayant un climat semi-aride. Un abaque donné par De Martonne permet de représenter les différentes stations, Fig. 4.6. L'ensemble des stations étudiées se trouve dans la zone à régime semi-aride à écoulement temporaire.

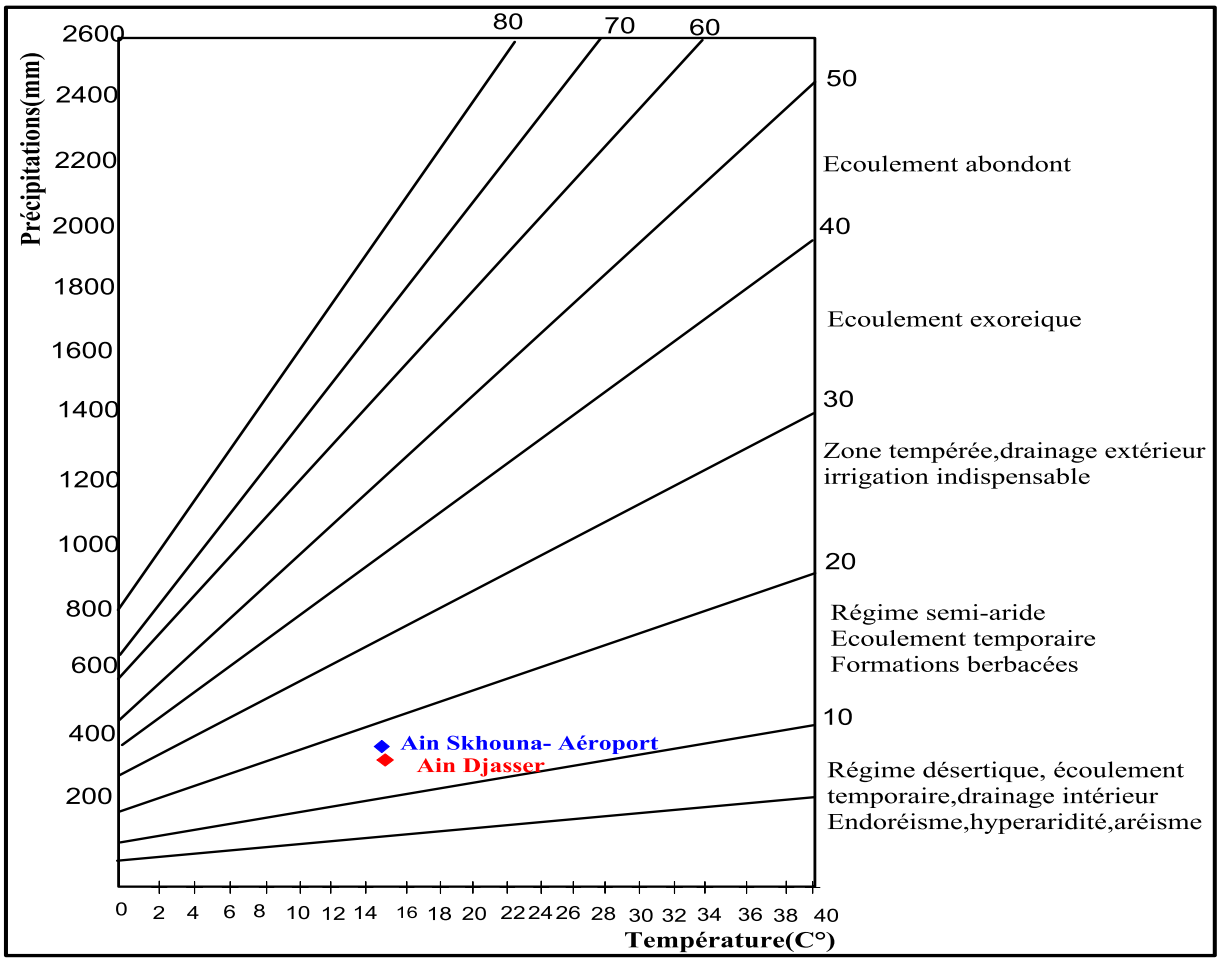


Fig. 4.6 : abaque d'indice d'aridité de De Martonne

Pour préciser les conditions de la semi-aridité estivale, les élèves de De Martonne avaient proposé l'utilisation d'un indice d'aridité mensuel calculé à l'aide de la relation suivante :

$$I = \frac{12P}{T+10}$$

Où :

P : précipitations du mois considéré (mm) ; multiplié par 12 pour rendre cet indice comparable à l'indice annuel.

Tableau 4.5 : Indice d'aridité mensuelle de De Martonne.

Mois	I		Etage Bioclimatique	Mois	I		Etage Bioclimatique
	A. S-Aéroport	A. Djasser			A. S - Aéroport	A. Djasser	
S	13.65	11.33	Semi-aride	M	19.81	17.52	Semi-aride
O	10.73	10.07	Semi-aride	A	18.71	16.91	Semi-aride
N	14.46	12.78	Semi-aride	M	18.79	14.68	Semi-aride
D	22.95	19.95	Semi-aride	J	6.49	5.06	Désertique
J	24.65	19.95	Semi-aride	Jt	2.29	1.63	Hyper-aride
F	16.58	16.78	Semi-aride	A	7.30	3.97	Désert/H. aride

Selon la classification précédente par les élèves de De Martonne, les mois de septembre, octobre, novembre, décembre, janvier, février, avril et mai présentent un climat semi-aride pour les deux stations. Le mois de juin est très rugueux et tend vers l'étage désertique pour les deux stations. Le mois de juillet est caractérisé par un climat steppique, alors que le mois d'août devient hyper-aride pour la station Ain Djasser et Désertique pour la station d'Ain Skhouna/Aéroport, Tableau 4.5.

IV.3.2 Diagramme de L. Emberger

Le diagramme d'Emberger c'est un indice de caractérisation des climats ; il précise cinq étages bioclimatiques : humide, subhumide, aride, semi-aride, et saharien, et quatre sous-étages bioclimatiques :

- ✓ A hiver froid m < 0°c ;
- ✓ A hiver frais 0 < m < 3°c ;
- ✓ A hiver doux ou tempéré 3 < m <7°c ;
- ✓ A hiver chaud m < 7°c.

Cet indice est donné par la relation suivante qui combine trois facteurs climatiques primordiaux (moyenne des températures extrêmes, précipitation et valeur de l'évaporation grâce à l'amplitude extrême M-m.

$$Q_2 = 3.43 \frac{P}{(M - m)}$$

Avec :

P : Précipitations annuelle en mm ;

M : Moyenne des températures maximales du mois le plus chaud exprimée en degré absolu (°K) ;

M : Moyenne des températures minimales du mois le plus froid exprimée en degré absolu (°K) ;

Avec T °k = T °C + 273.2

On constate à partir de l'indice d'Emberger que la région d'étude appartient à l'étage bioclimatique semi-aride, toute fois la partie nord de la région est caractérisé par un hiver froid (station d'Ain Djasser) et un hiver plutôt frais caractérise la partie sud de la région (station d'Ain Skhouna-Aéroport), Fig. 4.7.

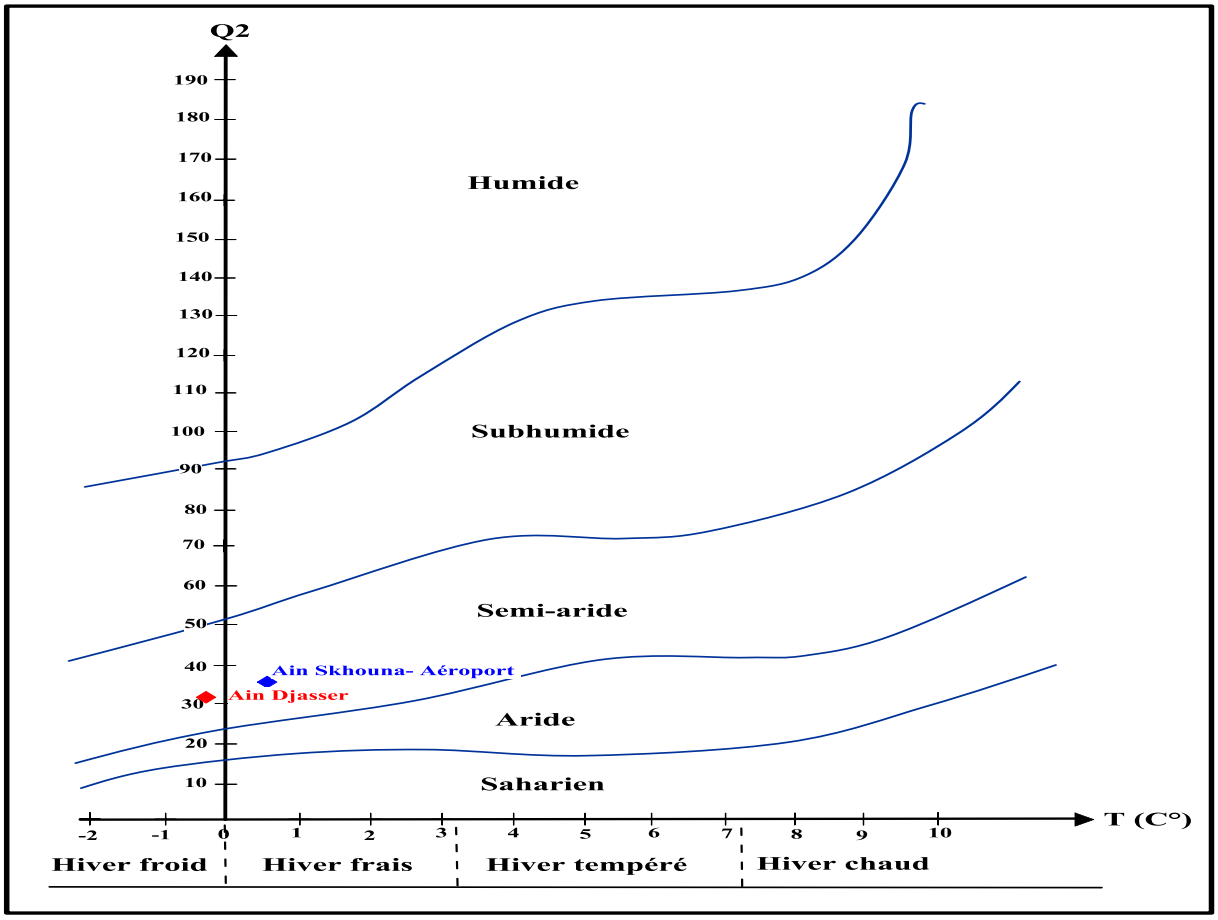


Fig. 4.7 : Climato-gramme d'Emberger

IV.3.3 Le quotient pluviométrique annuel de Moral

Moral propose en 1964 d'utiliser la relation suivante pour calculer le quotient pluviométrique annuel

$$I_A = \frac{P}{T^2 - 10T + 200}$$

Où :

I_A : quotient pluviométrique annuel ;

P : précipitations moyennes annuelles (mm) ;

T : température moyenne annuelle (°C).

Cet indice pluviométrique utilise également la hauteur annuelle des précipitations (P en mm) et les températures moyennes annuelles (T en °C) pour délimiter l'humidité et la sécheresse.

Avec :

$I_A = 1$, on est à la limite de la zone aride ;

$I_A < 1$, on est dans un climat sec.

$I_A > 1$, on est dans un climat humide (Guyot 1999).

Les différentes valeurs du quotient pluviométrique annuel calculé selon la relation de Moral sont reportées dans le tableau 4.6

Tableau 4.6 : Quotient pluviométrique annuel de Moral.

Station	Période	P (mm)	T (°C)	I_A
Ain Skhouna- Aéroport	1989-2014	331	15.46	1.16
Ain Djasser	1969-2014	276	14.32	0.98

Selon cette indice, on peut dire que le climat de la plaine de Zana est à la limite sec-humide, c'est-à-dire qu'il peut être qualifié de semi-aride.

IV.3.4 Comparaison des indices climatiques

Sachant que les éléments climatiques les plus importants pour la caractérisation d'un climat sont, les précipitations, les températures, l'évaporation et les méthodes combinant ces éléments (pluvio-thermique). Les méthodes pluvio-thermiques sont plus intéressantes que celles qui incluent un seul élément. Toutes ces méthodes ont qualifié le climat de la plaine de Zana comme étant semi-aride, ce qui est en conformité avec la carte des étages bioclimatiques, établie par M. Côte en 1998, (Fig. 4.5).

IV.4 Estimation des paramètres du bilan hydrologique

Le bilan hydrologique est un moyen de contrôle de la cohésion des données climatiques évaluées séparément et exprime le processus que peut suivre une quantité d'eau au sol issue des précipitations avant de retourner à l'atmosphère. Le calcul de ce bilan est basé sur l'estimation des paramètres fondamentaux, à savoir l'ETP et l'ETR. Sachant que l'évaporation représente le processus au cours duquel l'eau se transforme en vapeur. L'ensemble des processus d'évaporation et de transpiration est connu sous le nom d'évapotranspiration. Cette dernière est l'une des composantes fondamentales du cycle hydrologique.

D'après la carte de l'ETP annuelle moyenne construite à partir de la somme des 12 grilles des ETP mensuelles par l'ANRH en 2002, la partie couvrant la région d'étude, (Fig. 4.8) est caractérisée par des lames d'évapotranspiration comprises entre 1200 et 1300 mm.

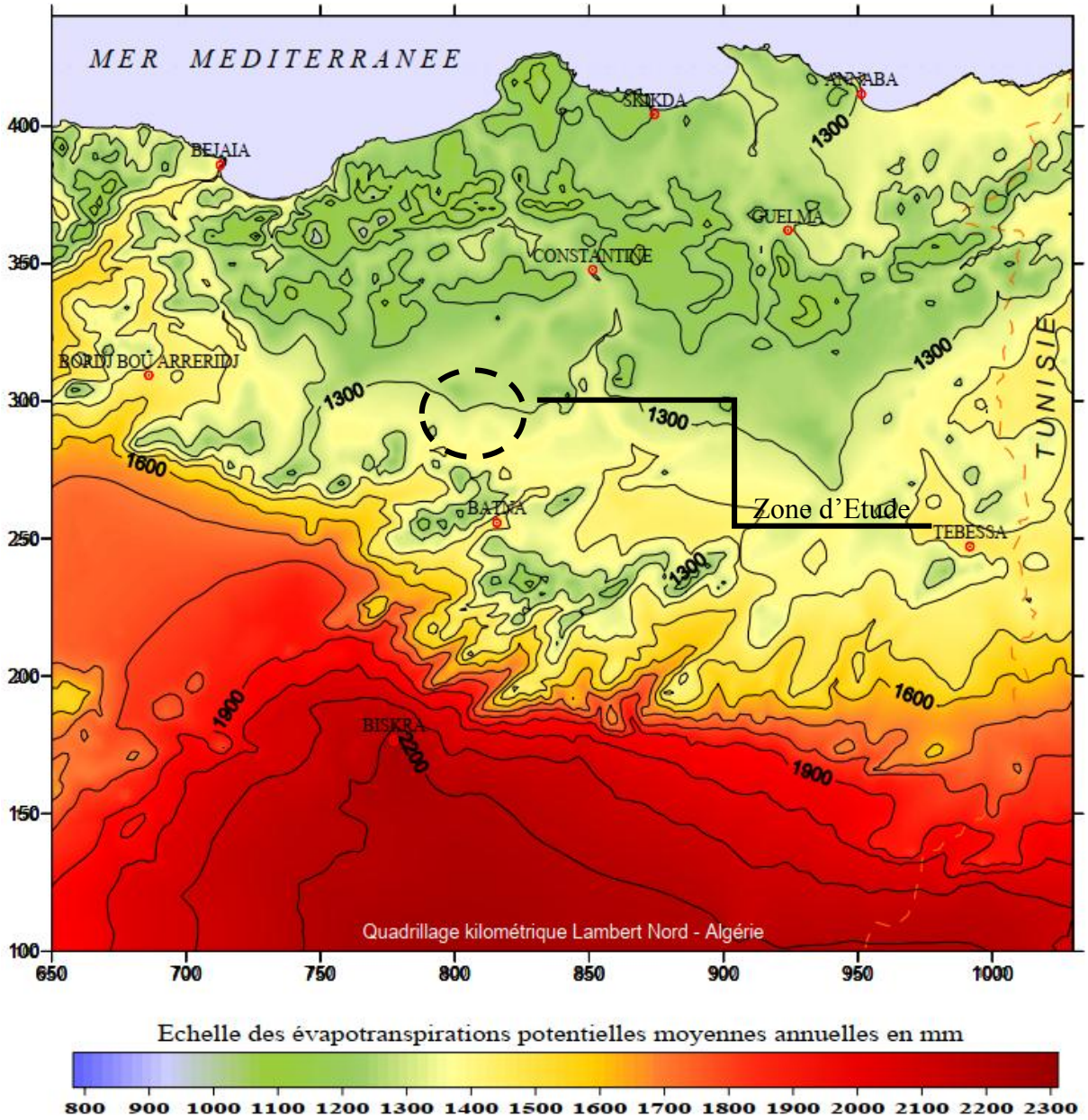


Fig. 4.8 : Zones d'ETP de l'Est algérien, (ANRH, 2002)

IV.4.1 Evapotranspiration potentielle (ETP)

IV.4.1.1 Méthode de Thornthwaite

Selon Roche (1963) : « L'ETP correspond à l'évaporation d'une surface qui serait suffisamment approvisionnée en eau pour évaporer la quantité d'eau maximale permise par les conditions climatiques ». Ce paramètre est calculé par plusieurs méthodes, la plus répondue est celle de G.W. Thornthwaite présentée, en 1948, et qui ne tient compte que de la température. La formule qui permet un tel calcul est la suivante :

$$E.T.P = 16 * \left(10 * \frac{t}{I}\right)^{A}$$

Où :

ETP : évapotranspiration potentielle mensuelle (mm) ;

t : température moyenne mensuelle (°C) ;

I : indice thermique annuel ; $I = \sum i$

i : indice thermique mensuel.

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

a : exposant climatique donné par L. Serra en 1954 ;

$$a = 0,0161I + 0,5$$

Certains auteurs pensent que les valeurs de l'ETP calculées par la méthode de Thornthwaite sont ou bien sous estimées dans les régions arides et semi-arides, ou bien surestimées dans les régions tropicales humides et équatoriales, c'est pour cette raison que l'ETP est multipliée par un facteur de correction K donné par les tables et qui est fonction du temps, du mois et de la latitude du lieu.

$$E.T.Pc = K * E.T.P$$

Où :

ETP : évapotranspiration potentielle calculée à l'aide de la formule (mm) ;

ETPc : évapotranspiration potentielle corrigée (mm) ;

K : facteur de correction.

IV.4.2 Evapotranspiration réelle

Elle correspond à l'évapotranspiration qui se produit pendant un intervalle de temps donné, dans des conditions réelles des teneurs en eau du sol. Ce paramètre est calculé par plusieurs méthodes empiriques prenant en compte les précipitations et les températures.

IV.4.2.1 Méthode de Turc

Suite à ses expériences faites sur des cuves lysimétriques à Versailles, Rothamsted et Groningen, L. Turc a publié une gamme de formules permettant le calcul de l'ETP. En 1962, il ajouta à sa formule de calcul de l'ETR. C'est la méthode la plus répandue, elle tient compte des précipitations et des températures moyennes annuelles.

$$E.T.R = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Où :

ETR : évapotranspiration réelle (mm) ;

P : précipitation moyenne annuelle (mm) ;

L : le pouvoir évaporant de l'atmosphère ;

$$L = 300 + 25T + 0,05T^3$$

Où :

L : le pouvoir évaporant de l'atmosphère ;

T : température moyenne annuelle (°C).

Les différentes valeurs de l'ETR calculée selon la méthode de Turc sont portées dans le tableau ci-dessous 4.7

Tableau 4.7 : Valeurs de l'ETR selon la méthode de Turc

Station	Période	P (mm)	T (°C)	ETR (mm)
Ain Skhouna/Aéroport	1989-2014	331	15.46	324
Ain Djasser	1969-2014	276	15.32	276

IV.4.2.2 Méthode de Verdeil

Verdeil a établi en Algérie en (1988) un abaque pour le calcul du déficit d'écoulement pour des précipitations comprises entre 0 et 600 mm. La valeur du déficit d'écoulement est obtenue directement sur l'abaque, (Fig. 4.9).

Cet abaque permet de calculer les différentes valeurs du déficit d'écoulement qui correspond en gros à l'ETR pour les deux stations, Tableau 4.8

Tableau 4.8 :Valeurs de l'ETR selon la méthode de Verdeil.

Station	Période	P (mm)	T (°C)	ETR (mm)
Batna ville	1989-2014	331	15.46	310
Ain Djasser	1969-2014	276	15.32	265

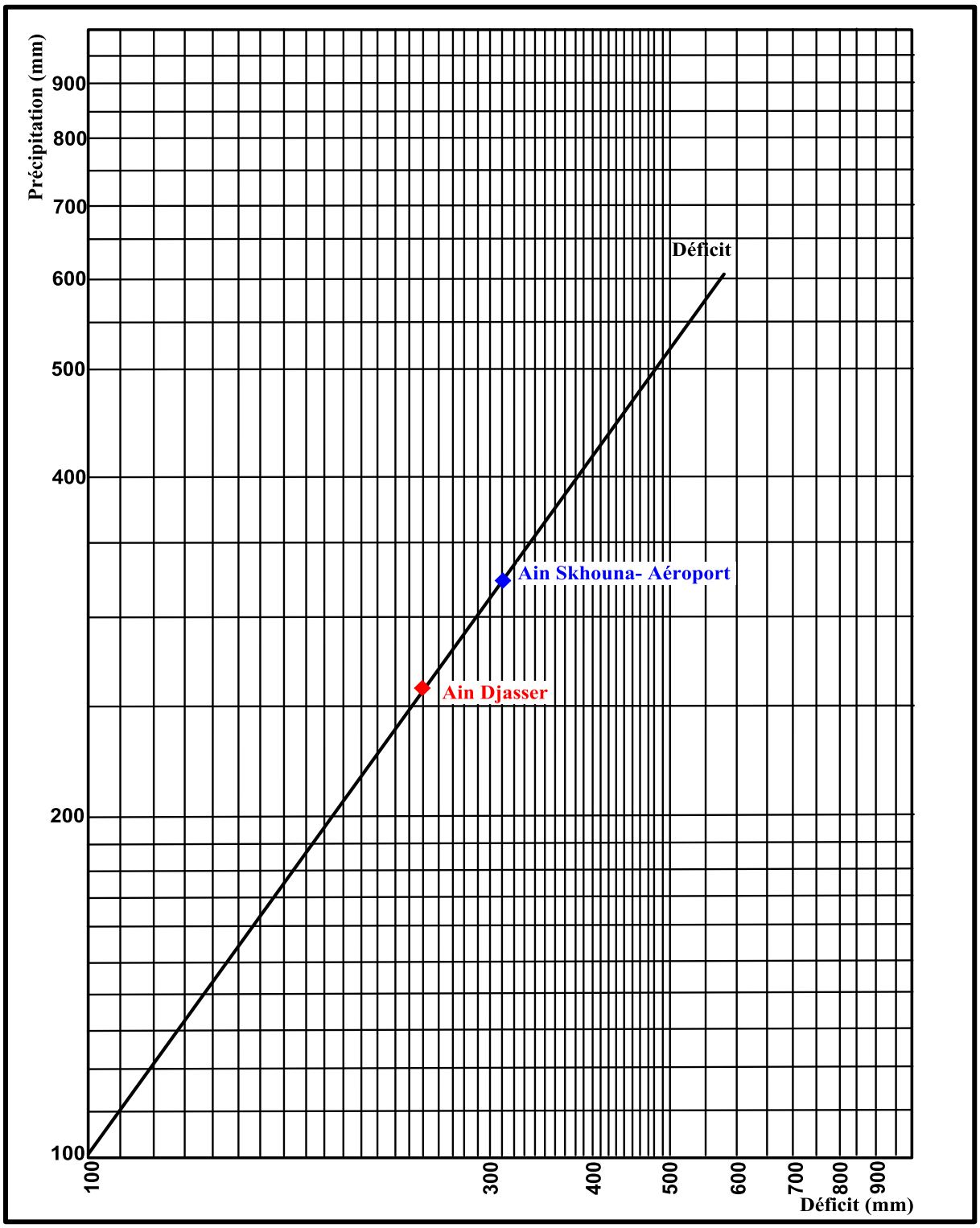


Fig. 4.9 : Abaque de Verdeil

IV.5 Bilan hydrologique

Partant de connaissance des précipitations tombées sur la région, de l'évapotranspiration potentielle et d'une valeur maximale standard de la réserve facilement utilisable du sol ou *R.F.U.*, la méthode du bilan hydrique (ou évaporométrique) de Thornthwaite est adoptée afin de quantifier mois par mois les différentes composantes du bilan.

IV.5.1 Bilan hydrologique de Thornthwaite

Le bilan hydrologique établi selon la méthode de G.W. Thornthwaite a l'avantage d'estimer pour chaque mois : l'évapotranspiration réelle, la réserve facilement utilisable, le déficit agricole et l'excédent. Cette méthode est basée sur la notion de réserve d'eau facilement utilisable (RFU).

L'estimation de ce paramètre a été faite par l'application de la formule d'Hallaire 1960 (cité par J.Ricard1979)donnée ci-dessous :

$$RFU = \frac{1}{3} Da * He * \Pr$$

Où :

RFU : la réserve facilement utilisable (m) ;

Da : densité apparente du sol prise égale à 1,4 ;

He : capacité de rétention prise égale à 0,3 ;

Pr : profondeur des racines prise égale à 0,4 m.

La RFU ainsi calculée pour la région est égale à 56 mm. Les bilans hydrologiques, selon la méthode de Thornthwaite, pour les deux stations sont portés dans les tableaux 4.9 et 4.10

La méthode de Thornthwaite est critiquée par plusieurs chercheurs, car elle donne par rapport aux mesures effectuées avec des lysimètres des résultats sous-estimés en zones arides et semi arides, et surestimées dans les zones tropicales humides ou équatoriales. Elle conviendrait selon les chercheurs seulement aux régions humides et subhumides de la zone tempérée, là où elle a été mise au point (USA).

Tableau 4.9 : Bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite
Station Ain Skhouna-Aéroport

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Annuel
T (°C)	21.64	16.84	10.75	6.72	5.58	6.65	9.99	13.09	18.10	23.30	26.71	26.15	**15.46**
I	9.19	6.29	3.19	1.56	1.18	1.54	2.85	4.29	7.01	10.28	12.64	12.24	**72.27**
a								1.7					
ETP	98.4	65.0	30.9	14.2	10.4	13.9	27.4	42.8	73.2	111.2	139.5	134.6	**761.5**
K	1.03	0.97	0.86	0.81	0.87	0.85	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	_
ETPc	101.36	63.01	26.56	11.49	9.07	11.85	28.18	47.08	88.58	135.69	172.93	156.19	**851.99**
P	36.00	24.00	25.00	31.00	32.00	23.00	33.00	36.00	44.00	18.00	7.00	22.00	**331.00**
P-ETP	-65.36	-39.01	-1.56	19.51	22.93	11.15	4.82	-11.08	-44.58	-117.69	-165.93	-134.19	_
RFU	0.00	0.00	0.00	19.51	42.44	53.59	56.00	44.92	0.34	0.00	0.00	0.00	_
Da	65.36	39.01	1.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	117.35	165.93	134.19	**523.40**
Ex	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**2.41**
ETR	36.00	24.00	25.00	11.49	9.07	11.85	28.18	47.08	88.58	18.34	7.00	22.00	**328.59**

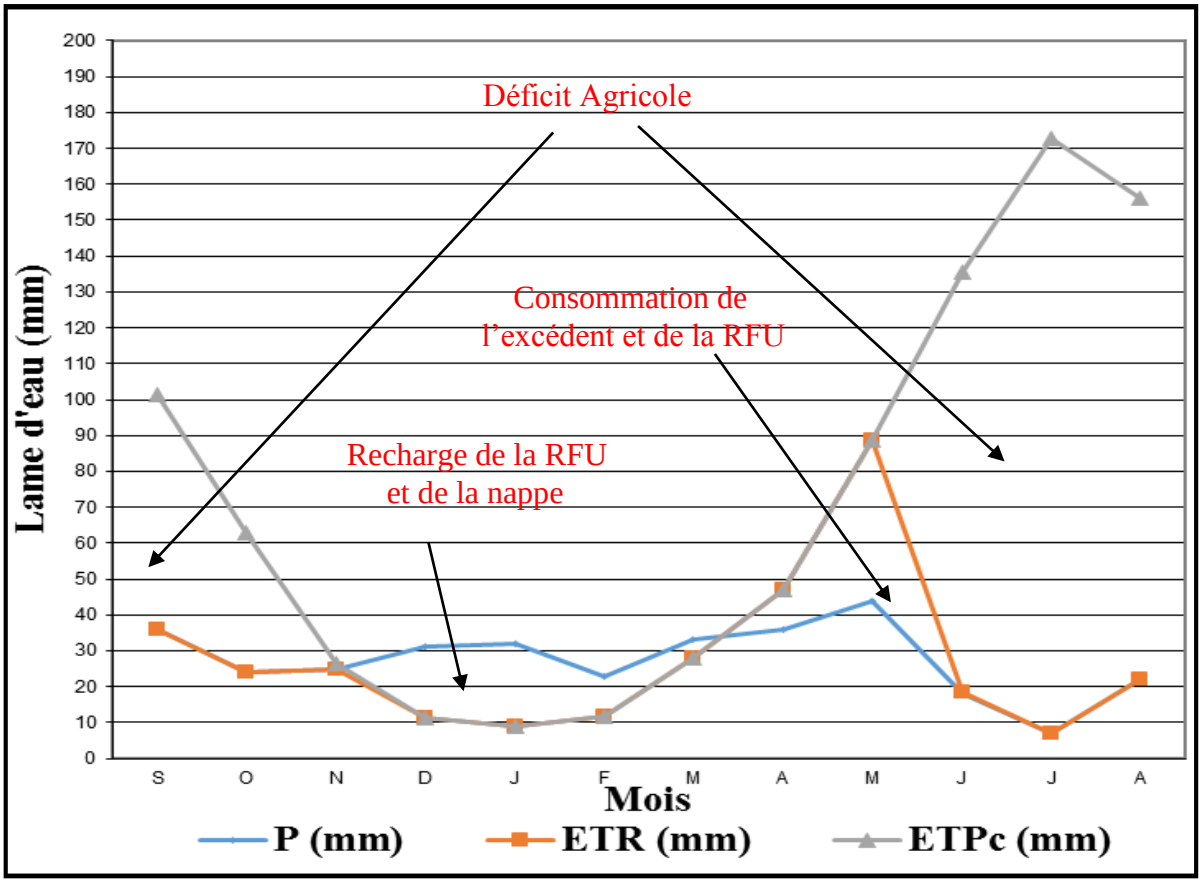


Fig. 4.10 : Variation mensuelle des éléments du bilan hydrique, Station Ain Skhouna-Aéroport

Tableau 4.10 : Bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite

Station Ain Djasser

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Annuel
T (°C)	21.78	17.4	10.66	6.84	5.64	6.45	9.18	12.71	16.97	23.21	26.79	26.26	15.32
I	9.28	6.61	3.15	1.61	1.20	1.47	2.51	4.11	6.36	10.22	12.70	12.32	71.52
a								1.6					
ETP	99.9	69.0	30.8	14.9	10.8	13.5	24.1	41.2	66.2	110.9	140.3	135.8	757.5
K	1.03	0.97	0.86	0.81	0.87	0.85	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	_
ETPc	102.85	66.96	26.52	12.04	9.42	11.47	24.84	45.30	80.16	135.25	174.03	157.54	846.39
P	30.00	23.00	22.00	28.00	26.00	23.00	28.00	32.00	33.00	14.00	5.00	12.00	276.00
P-ETP	-72.85	-43.96	-4.52	15.96	16.58	11.53	3.16	-13.30	-47.16	-121.25	-169.03	-145.54	_
RFU	0.00	0.00	0.00	15.96	32.54	44.06	47.22	33.92	0.00	0.00	0.00	0.00	_
Da	72.85	43.96	4.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13.24	121.25	169.03	145.54	570.39
Ex	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETR	30.00	23.00	22.00	12.04	9.42	11.47	24.84	45.30	66.92	14.00	5.00	12.00	276.00

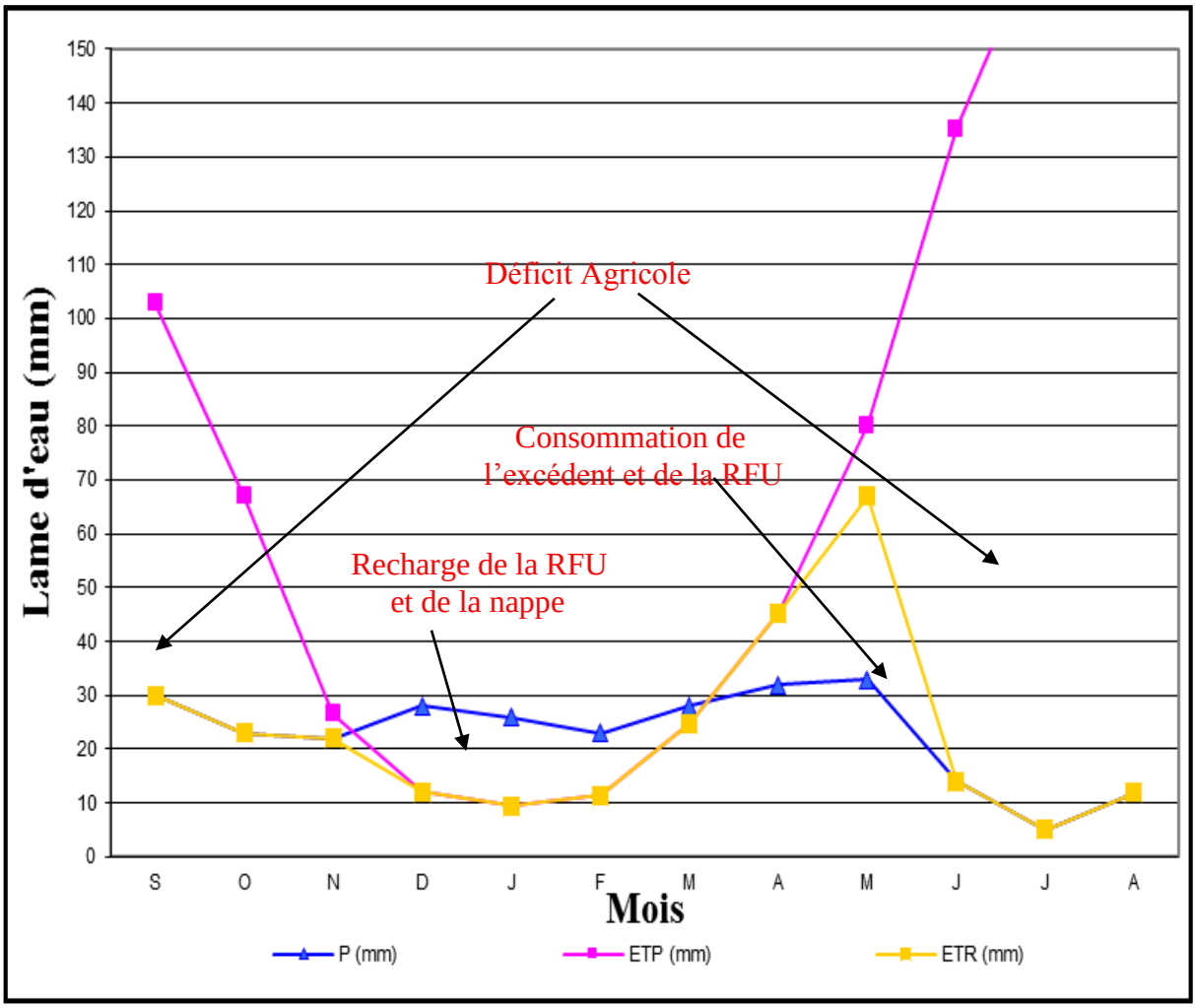


Fig. 4.11 : Variation mensuelle des éléments du bilan hydrique, Station Ain Djasser

IV.5.2 Interprétation du bilan hydrologique

Partant de connaissance des précipitations, de l'évapotranspiration potentielle et d'une Valeur maximale standard de la réserve facilement utilisable du sol ou RFU, la méthode du bilan hydrique (ou évaporométrique) de Thornthwaite est adoptée afin de quantifier mois par mois les différentes composantes du bilan.

Ainsi, les constations suivante sont dégagées : La pluie ne permet pas un stockage permanent de l'eau dans le sol, ce qui induit un déficit agricole plus ou moins long s'étalant s'étalant sur au moins six mois de l'année. Ainsi, la saturation de la RFU (56 mm), pour une année moyenne, ne dure que cinq à six mois de décembre à mai. Cette situation induit un déficit agricole pendant au moins six mois à partir de la saison du printemps jusqu'à la saison de l'automne. Ce déficit agricole coïncide avec la période sèche d'où la nécessité d'apporter aux sols agricoles des appoints d'irrigation par les eaux souterraine disponibles.

L'ETR ne couvre que 38.5 % de l'ETP pour la station d'Ain Skhouna-Aéroport et 32.6 % pour la station d'Ain Djasser. Par contre l'ETP consomme presque la totalité des précipitations. Ceci induit un faible excédent à la station d'Ain Skhouna-Aéroport et un excédent nulle à la station d'Ain Djasser et par conséquent la recharge de la nappe est très limitée. L'observation du graphe du bilan hydrologique nous amène à dire que l'ETP est importante du mois d'avril jusqu'au mois de novembre, avec des valeurs atteignant les 174 mm au mois de juillet à la station d'Ain Djasser, rendant ainsi nécessaire l'irrigation. A partir du mois de novembre, on assiste à une reconstitution du stock qui s'accompagne d'une augmentation de la RFU, qui atteint son maximum entre les mois de janvier et mars. Au-delà de cette période, on assiste à une baisse de la RFU, traduisant un épuisement du stock, (Tableaux 4.09, 4.10 et Fig. 4.10, 4.11).

IV.6 Calcul du ruissellement

Lors de leur étude sur les bassins tunisiens ;Tixeront et Berkaloff ont donné en 1961 une méthode de calcul du ruissellement utilisable lorsque les précipitations sont inférieures à 600 mm. La formule de calcul du ruissellement est la suivante :

$$R = \frac{P^3}{3(E.T.P)^2}$$

Où :

R : ruissellement (mm) ;

P : précipitation moyenne annuelle (mm) ;

ETP : évapotranspiration potentielle annuelle (mm).

Cette méthode de calcul du ruissellement est critiquée car elle est empirique donc elle nécessite des corrections à l'aide d'installations lysimétriques d'une part, et son utilisation est limitée aux précipitations moyennes annuelles inférieures à 600 mm d'autre part.

Pour notre cas, on va utiliser cette méthode au pas annuel pour quantifier la quantité d'eau ruisseler suite à la chute des pluies. Les valeurs du ruissellement selon la méthode de Tixeront et Berkaloff sont portées dans le tableau 4.11

Tableau 4.11 : Ruissellement selon la méthode de Tixeront et Berkaloff

Station	Période	P (mm/an)	ETP (mm/an)	R (mm/an)	R en % de P
Ain Skhouna-Aéroport	1989-2014	331	761.5	20.85	6.30
Ain Djasser	1969-2014	276	757.5	12.21	4.43

IV.7 Calcul de l'infiltration

Par définition l'infiltration est la quantité d'eau qui pénètre dans le sous-sol et alimente les aquifères souterrains. Ce paramètre peut être estimé à partir de la formule du bilan hydrologique donnée par la relation suivante :

$$P = D + R + I \Rightarrow I = P - (D + R)$$

Où :

P : précipitation (mm) ;

D : déficit d'écoulement ou (ETR) (mm) ;

R : ruissellement (mm) ;

I : infiltration (mm).

Les valeurs des différents paramètres du bilan hydrologique sont reportées dans le tableau 4.12

Tableau 4.12 : Différents paramètres du bilan hydrologique

Station	Période	P (mm/an)	D (mm/an)	R (mm/an)	I (mm/an)
Ain Skhouna-Aéroport	1989-2014	331	328.59	20.85	0
Ain Djasser	1969-2014	276	276	12.21	0

On constate que l'infiltration directe à partir du sol est nulle pour les deux stations, ce qui pose le problème de l'alimentation des nappes d'eau souterraines de la région notamment

la nappe du Mio-Plio-quaternaire. Il est à noter que ces valeurs ne représentent pas réellement l'infiltration dans tout le bassin, car son estimation est basée sur les données des deux stations pluviométriques proches de la région. Seuls les mesures d'infiltration in situ, réparties sur toute la superficie de la plaine, pourrait nous donner une approche fiable de ce paramètre

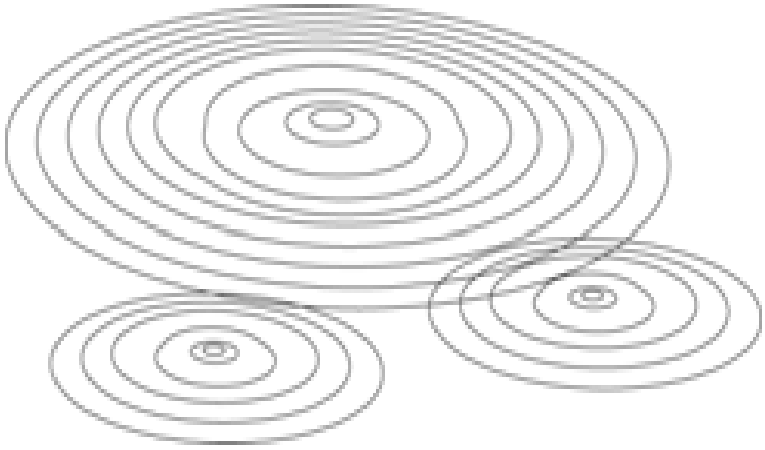
IV.8 Conclusion

L'étude climatologique a abouti aux conclusions suivantes :

- ✓ Les hauteurs moyennes des précipitations varient légèrement d'une station à une autre, elles sont plus importantes dans la partie Sud de la plaine (Station Ain Skhouna-Aéroport) proche des reliefs hauts des Djebels Mestaoua et Zana, elles décroissent vers le nord de la plaine ou on remarque le plongement de la région dans les hautes plaines setifiennes (station Ain Djasser) ;
- ✓ Les températures moyennes diffèrent légèrement entre les deux stations, elles diminuent au fur et à mesure que l'on se dirige vers le Nord ;
- ✓ L'étude des indices climatiques a confirmé l'appartenance de la région au climat semi-aride influencé par les courants humides de la méditerrané en hiver et chauds du Sahara en été ;
- ✓ Quant au bilan hydrologique ; on constate qu'il est déficitaire pour les deux stations étudiées ;
- ✓ L'infiltration directe à partir du sol est pratiquement nulle pour les deux stations, ce qui pose le problème de l'infiltration directe au niveau de la plaine (nappe superficielle).

Chapitre 5 :

Aperçu Hydrogéologique



Introduction

La source d'alimentation des réservoirs souterrains est l'infiltration à partir de la surface du sol d'une fraction fixe de l'eau connue sous le nom de précipitations efficaces. L'infiltration renouvelle l'eau des aquifères souterrains et acquis une certaines compositions chimique par son circuit dans les aquifères qui lui donne un certain faciès chimique.

Dans les terrains poreux, comme le sable, la circulation de l'eau est homogène et lente ; elle permet une bonne filtration et une certaine autoépuration des eaux. Dans un massif karstifié, par contre, la circulation de l'eau est hétérogène : rapide dans les grands conduits verticaux et horizontaux (jusqu'à 400 m par heure) et lente dans les fines fissures (jusqu'à 10 m par heure)

L'analyse des données géologiques et géophysiques ainsi les logs stratigraphiques des forages, ont permis de révéler la présence de deux aquifères superposés, séparés par une couche imperméable correspondant aux formations marneuses et argileuses :

- ✓ Un aquifère superficiel très étendue et de profondeur importante au centre de la plaine, abrité dans les formations récentes du Mio-Plio-Quaternaire. Cet aquifère a été exploité par de nombreux puits et forages aux seuls usages agricoles, abreuvoirs, domestiques et rarement pour l'AEP individuel. De nos jours les puits traditionnels sont à sec sauf quelque puits au niveau de chott et Merdja de mauvaise qualité.
- ✓ Un aquifère relativement profond d'âge Jurassique et Crétacé (dans les calcaires fissurés), exploité par une batterie de forage. Cet aquifère constitue le principal réservoir de la région pour subvenir aux différents besoins socio-économiques (AEP).

Dans ce chapitre on s'intéressera à l'aquifère superficielle et on étudiera essentiellement :

- ✓ La piézométrie ;
- ✓ L'évolution piézométrique.

V.1 Les formations aquifères

La lithologie et les caractéristiques hydrodynamiques, essentiellement la perméabilité, constituent les principaux facteurs qui permettent d'identifier les formations susceptibles d'être le siège d'un écoulement souterrain dans une région. Ainsi, on a classé les terrains en deux catégories du point de vue hydrogéologique.

- ✓ Les formations susceptibles de constituer un aquifère à porosité d'interstice comme les alluvions de surface et les formations susceptibles de contenir un aquifère karstique comme les calcaires fissurés de la région de Zana.
- ✓ Les formations imperméables comme les marnes.

L'étude géologique et géophysique de la plaine de Zana ont permis de bien cartographier la géométrie et la nature des aquifères existants. On peut distinguer deux systèmes :

V.1.1 Aquifère superficiel

Cet aquifère à pour siège les formations épaisses (150 à 200 m au centre de la plaine) perméables ou peu perméables du recouvrement Mio-Plio-Quaternaire. Ce recouvrement est constitué essentiellement par des niveaux de sables et graviers du Plio-Quaternaire, limons, argiles et calcaires lacustres du pliocène et des conglomérats et des grès du Miocène. Ces formations poreuses affleurent presque dans la totalité de la plaine à l'exception des massifs cordelières, tel Djebel Zana, Roknia, Mestaoua, Tizourit, Merzeguene et Azraouat sud. Au Nord-Ouest, la nappe est contenue dans les alluvions du Quaternaire et elle constitue le prolongement de la plaine d'Ain Djasser (Bled Louni), par contre au Nord-Est elle est contenue dans les alluvions du Quaternaire et les calcaires lacustres du Mio-Pliocène et se prolonge vers la plaine de Bir Chouhada (ex Levasseur). Au Sud-Est elle est contenue dans des alluvions et des limons salés du Quaternaire aux abords du Djebel Aourir, de ce côté la nappe se prolonge vers le Chott de Gadaïne et toute fois il peut y avoir écoulement de la nappe vers le Chott. Du côté Sud-Ouest elle est contenue dans les alluvions du Quaternaire jusqu'au aux abords de Djebel de Mestaoua et Zana-Roknia à l'Ouest.

Cet aquifère est alimenté par les glacis nappant les reliefs et par les niveaux sous-jacents en charge, eux même recevant leur alimentation des massifs du Jurassique et du Crétacé par l'intermédiaire des dépôts grossiers de bordure. Le Chott et les Merdjas représentent l'affleurement de la nappe superficielle. Les puits peu profonds qui exploitaient cette nappe restent souvent dans les alluvions très argileuses de surface. De nos jours cette nappe a connu un rabattement dramatique (les puits traditionnels à sec) suite à la surexploitation et la rareté des précipitations enregistrées ces dernières années.

V.1.2 Aquifère profond

Les massifs sont entièrement calcaires et ne comportent aucuns bancs marneux. Ils sont d'une épaisseur puissante allant jusqu'à 800 m d'épaisseur et affleurent sur une grande superficie (Djebels Mestaoua, Messaouda, Zana, Azraouat sud et nord, Merzeguene, Roknia et Guedamne). L'excellence du réservoir est confirmé jadis par les sources tels Aïn Zana, Aïn Taga et Aïn Merzeguene qui naissent probablement à la faveur d'accidents (dont le débit total est de 100 l/s) et par les forages tels Zana N° J6 (56 l/s) , Zana N°J7 (42 l/s), Zana N° J8 (55 l/s), Zana N° J8' (39 l/s) et Zana N° J9 (14 l/s) ; voir log stratigraphique en annexes.

V.2 Etude des aquifères

Notre travail porte essentiellement sur l'aquifère superficiel et un descriptif sur l'aquifère profond selon la disponibilité de la bibliographie (Chabour, 1993 et Athamena, 2008, etc.).

V.2.1 Aquifère superficiel

L'aquifère superficiel est contenu dans les formations Mio-Plio-Quaternaire avec une épaisseur qui atteint les 200 m au centre de la plaine. Il est constitué essentiellement par du remplissage Mio-Plio-Quaternaire. Ce remplissage est constitué essentiellement par des niveaux de sables et graviers du Plio-Quaternaire, limons, argiles et calcaires lacustres du pliocène et des conglomérats et des grès du Miocène. Ces formations poreuses occupent presque la totalité de la plaine à l'exception des massifs affleurant comme des îlots tels Djebel Aourir, Azraouat etc.

V.2.1.1 Inventaire des points d'eau

L'inventaire des points d'eaux captant l'aquifère superficiel nous permet de constater que la totalité des ouvrages sont des forages. Les compagnes sont effectuées en six périodes (2008, 2015, 2016 basses eaux et hautes eaux) et ont permis de mesurer les niveaux piézométriques. Malheureusement, durant les six campagnes piézométriques, quelques forages n'ont pas fait l'objet de relevé continu à chaque compagne pour diverses raisons qui sont indépendantes de notre volonté, cette situation nous a poussés à écarter ces forages de l'inventaire. Quatre-vingt-dix-sept forages ont été inventoriés dont une cinquantaine est retenus pour le suivi piézométrique, Fig. 5.1. L'ensemble des forages retenus est représentatif et bien répartis sur l'ensemble de la région. Nous signalons que les mesures ont été faites en utilisant une sonde piézométrique de 200 m à double signalisation (sonore et lumineuse).

V.2.1.2 Piézométrie

Une carte piézométrique est une représentation cartographique de la surface d'eau de la nappe (appelé niveau statique). Les niveaux statiques sont définis comme sur les cartes topographiques, c'est-à-dire avec des courbes de niveau appelé iso-pièzes qui correspondent aux altitudes de la nappe au moment de la mesure piézométrique. La carte piézométrique nous renseigne donc sur le niveau statique, mais également sur la situation de la nappe (zone de recharge, de décharge), sur le sens des écoulements des eaux et le gradient de la nappe. Les iso-pièzes sont variables au cours de l'année, à la fin de la période hivernale, les précipitations rechargent les nappes, la carte piézométrique réalisée à cette période de l'année est qualifiée en

hautes eaux. Par ailleurs, à la fin et la période estivale, les fortes chaleurs abaissent le niveau statique (sorties, évaporation) la carte piézométrique réalisée est alors qualifiée en basses eaux. Quant à la précision de la carte, elle dépend du nombre de points de mesure, de la répartition spatiale de ces points et du matériel utilisé.

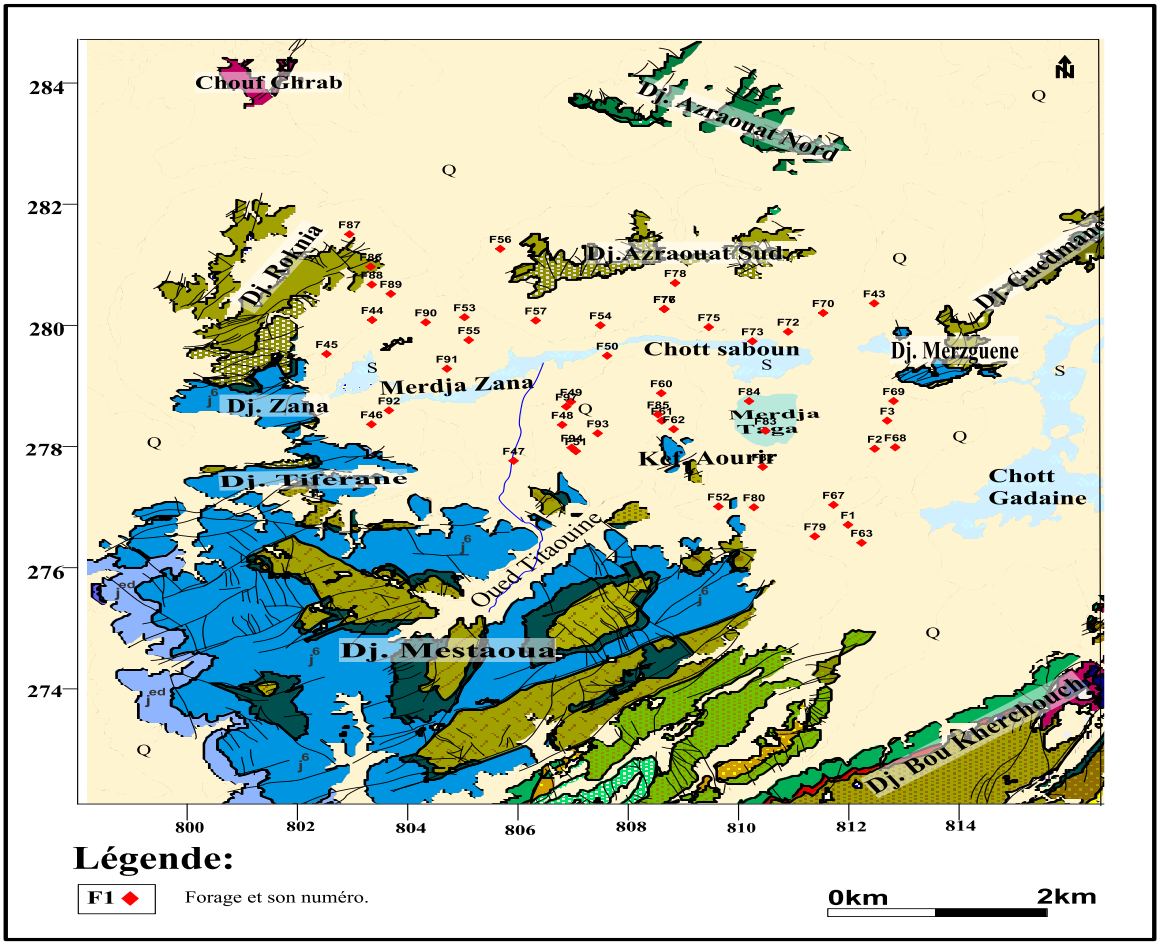


Fig. 5.1 : Carte d'inventaire des forages de la nappe superficielle de Zana

V.2.1.3 Evolution de la piézométrie

Le suivi de l'évolution piézométrique de la nappe dans le temps et dans l'espace nous renseigne sur les directions générales de l'écoulement et les fluctuations du niveau piézométrique d'une part. D'autres part, le calcul des 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 les mécanismes d'acquisition du chimisme et l'origine de la pollution. La cartographie piézométrique a été illustrée à la base des relevés piézométriques des différentes campagnes, par interpolation triangulaire, en utilisant le logiciel Surfer 8 (Golden software, 2002). La géolocalisation des points d'eaux est faite avec un GPS de marque Garmin.

V.2.1.4 Carte piézométrique mars 2008

L'observation de la morphologie de la carte piézométrique des hautes eaux permet de constater que l'écoulement souterrain est convergent vers la zone de drainage (Chott Saboun et Merdja Zana), suivant une direction de l'Ouest vers le l'Est (Roknia-Centre de la plaine), du Sud-Ouest vers le Nord-Est, de l'Est vers l'Ouest et du Nord-Est vers le Sud-Ouest (Azraouat-Centre de la plaine), Fig. 5.2. D'une manière générale la surface piézométrique met en évidence une nappe convergente. Son alimentation se fait à partir des bordures calcaires des Djebel Roknia à l'Ouest, Djebel Mestaoua au Sud, Djebel Azraouat Sud au Nord et l'îlot Kef Aourir au Sud-Est. Nous remarquons que la région est caractérisée par une ligne de partage des eaux séparant Chott Saboun de Chott Gadaïne de direction Nord-Sud à partir de l'extrême Est du Djebel Azraouat Sud jusqu'è Kef Aourir.

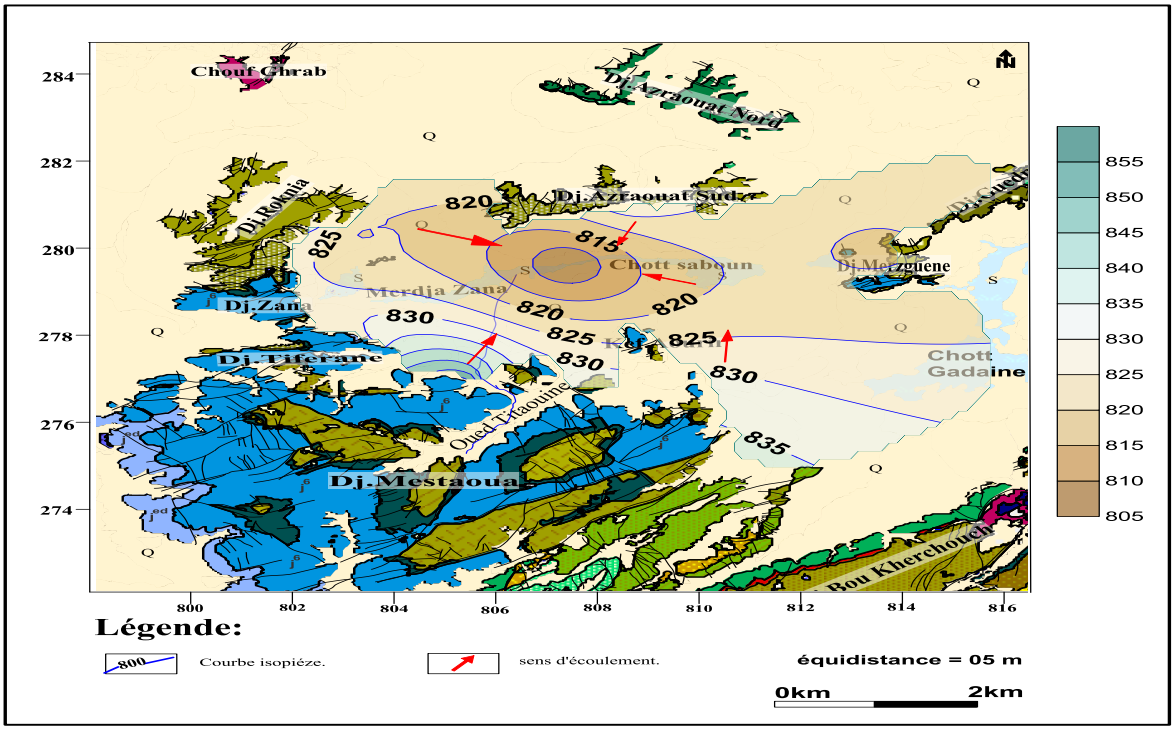


Fig. 5.2 : Carte piézométrique de la nappe superficielle de Zana (Mars2008)

V.2.1.5 Carte piézométrique septembre 2008

Cette carte piézométrique correspond à la période des basses eaux, Fig. 5.3. Elle possède la même morphologie piézométrique que la carte des hautes eaux de la même année. Néanmoins, on remarque une certaine fluctuation de la surface piézométrique (rehaussement) aux alentours des massifs, qui sont dues une forte recharge, car l'année 2008 est bien arrosée pendant le début de la saison estivale et le début de l'arrière-saison (précipitations annuelle enregistré à la station d'Ain Djasser égale à 391 mm avec 74.19, 19.21 et 43.5 mm aux mois de mai, juin et septembre respectivement). La remarque principal qu'on

peut tirer est que durant cette année le bilan de la nappe est équilibré d'une manière générale (Entrées ≈ sorties).

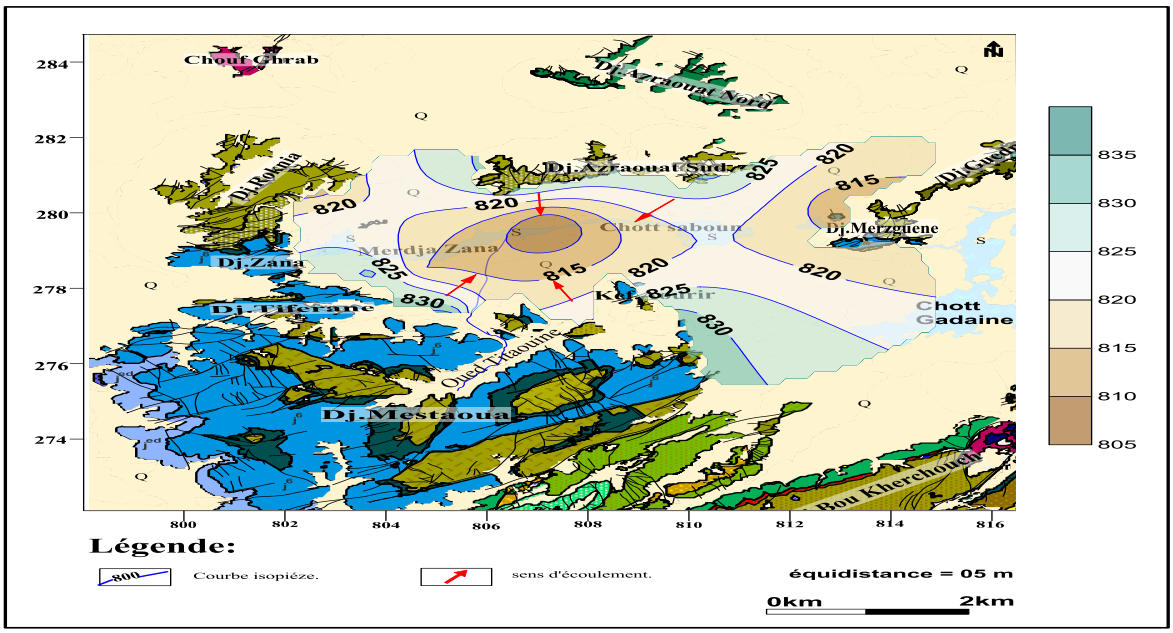


Fig. 5.3 : Carte piézométrique de nappe superficielle de Zana (Septembre 2008)

V.2.1.6 Carte piézométrique mars 2015

Les courbes piézométriques dévoilent une même allure morphologie que les cartes précédentes, ce qui traduit le même régime d'écoulement convergent. Cependant, on note rabattement important (diminution des nivéaux piézométriques) par rapport à l'année 2008. Ce rabattement témoigne d'un déséquilibre dans le bilan de la nappe qui est le résultat de la faible recharge de la nappe due à la faible pluviométrie annuelle qui n'excède pas 296 mm et la surexploitation par une centaine de forages, Fig. 5.4.

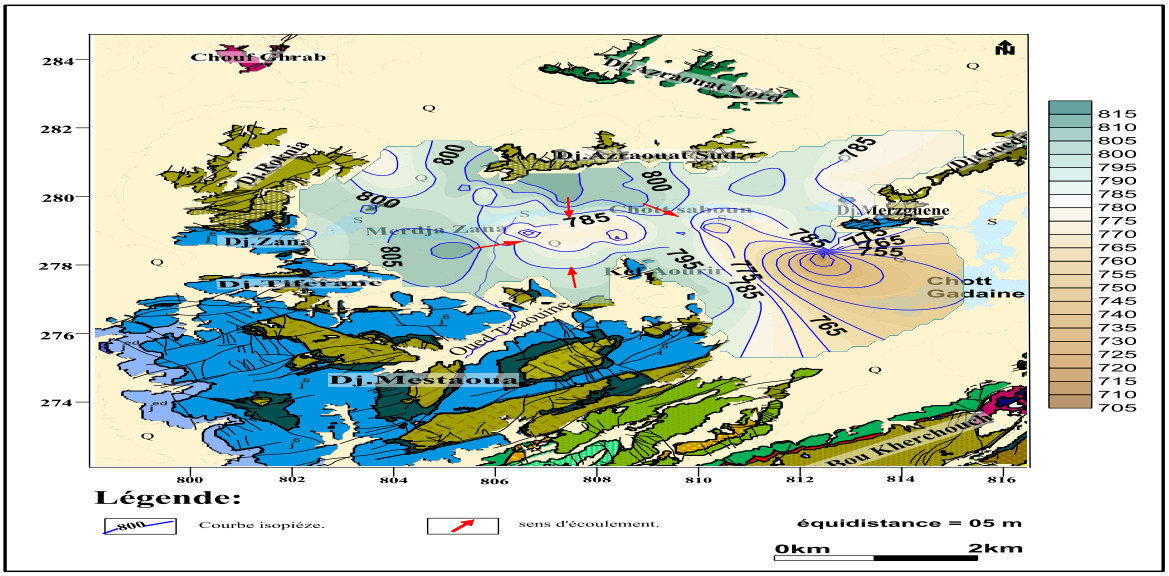


Fig. 5.4 : Carte piézométrique de la nappe superficielle de Zana (Mars 2015)

V.2.1.7 Carte piézométrique septembre 2015

L'analyse de cette carte révèle la même morphologie de la carte piézométrique, mais avec des fluctuations piézométriques en baisses qui sont dues aux sur-pompages et les aléas climatiques, Fig. 5.5. Des perturbations locales au niveau de la zone septentrionale de la plaine sont visibles, due probablement à la surexploitation de la nappe dans cette zone.

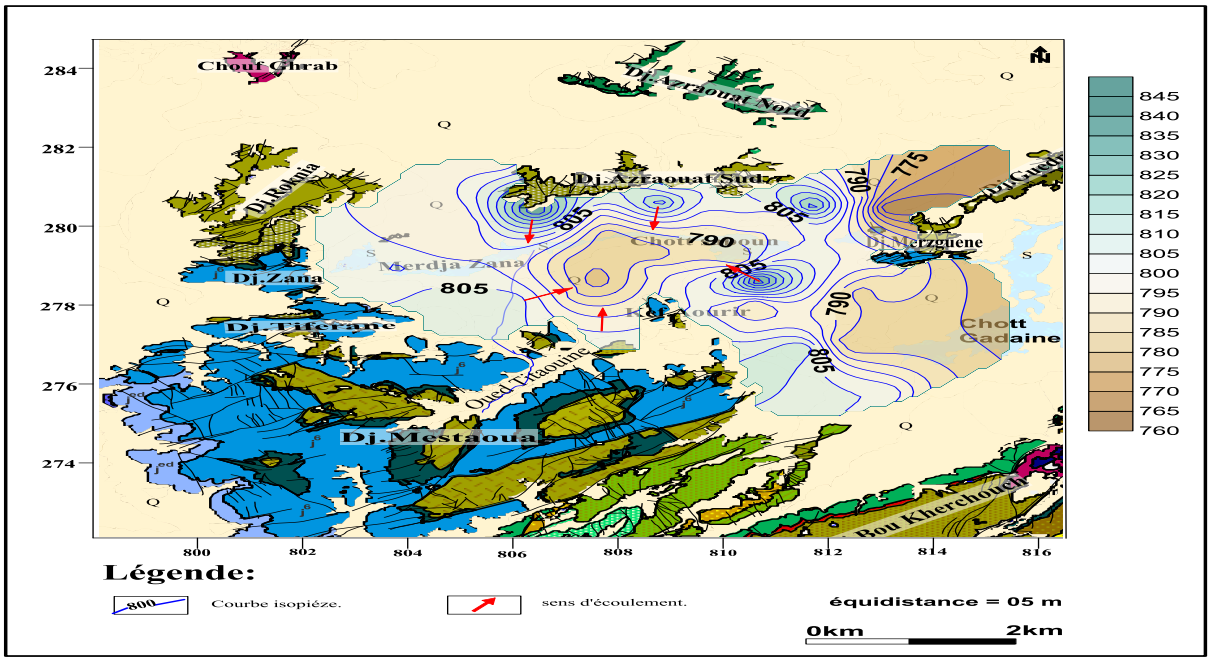


Fig. 5.5 : Carte piézométrique de la nappe superficielle de Zana (Septembre 2015)

V.2.1.8 Carte piézométrique mars 2016

Cette carte piézométrique confirme la même morphologie de l'écoulement souterrain Fig. 5.6. Une nette diminution des niveaux piézométriques est visible côté Est de la plaine ; ceci est dû à la faible recharge qui n'arrive pas à combler l'exhaure de la nappe.

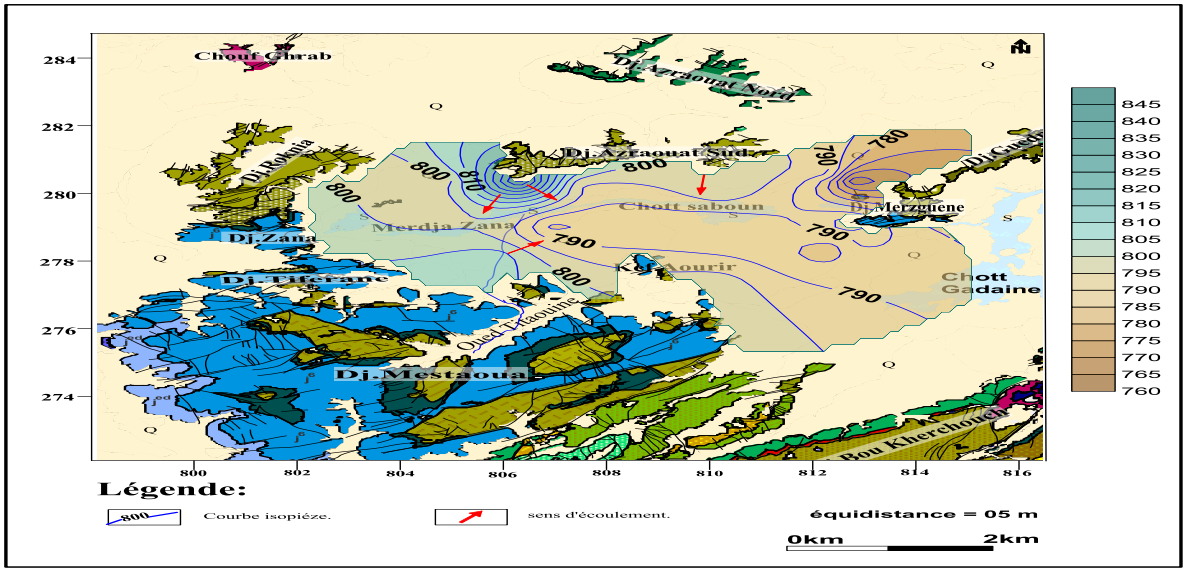


Fig. 5.6 : Carte piézométrique de la nappe superficielle de Zana (Mars 2016)

V.2.1.9 Carte piézométrique septembre 2016

L'examen de la carte piézométrique ne révèle aucun changement que ce soit de la morphologie générale ou de l'allure des courbes iso-pièzes, reflétant ainsi le même régime d'écoulement, Fig. 5.7. Il faut signaler que l'écoulement des eaux souterraines présente une certaine convergence vers le centre de la plaine pour coïncider avec les zones de drainance (Chott Saboun et Merdja Zana).

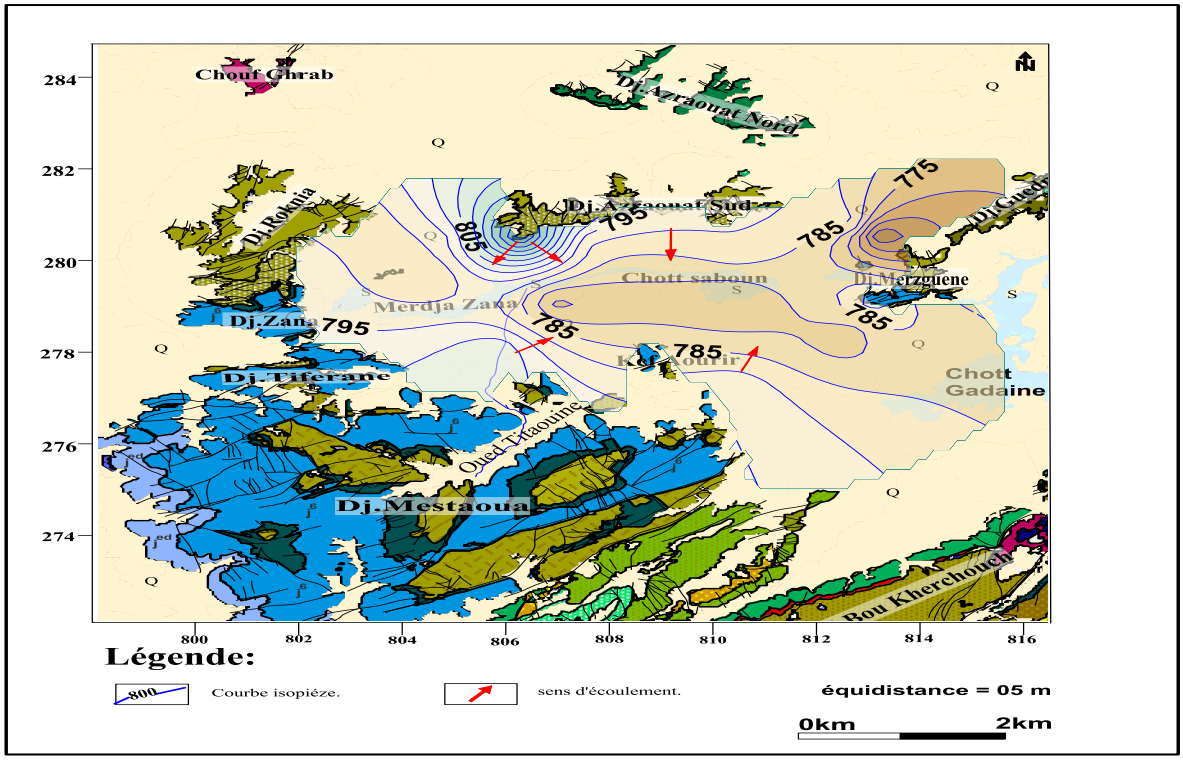


Fig. 5.7 : Carte piézométrique de la nappe superficielle de Zana (Septembre 2016)

V.2.1.10 Gradient hydraulique moyen

D'après les cartes piézométriques, les courbes iso-pièzes s'incurvent et gardent leurs parallélismes aux bordures des massifs, ce qui met en évidence, une alimentation du recouvrement à partir des massifs par le biais des pieds monts. L'écoulement souterrain est orienté généralement vers le centre de la plaine ou se trouve les zones de drainage (Chott Saboun et Merdja de Zana), le gradient hydraulique est très variable d'une zone à une autre. Les courbes iso-pièzes resserrées au nord du côté de Djebel Azraouat indiquent un gradient important, de l'ordre 0.007. Dans la partie centrale les courbes iso-pièzes sont espacées car c'est la zone de convergence (accumulation de l'eau souterraine), indiquant un gradient hydraulique moyen, de l'ordre de 0.005. Dans le reste de la plaine, les courbes iso-pièzes sont plus espacées, indiquant un gradient hydraulique plus faible de l'ordre de 0.003. L'hétérogénéité de la lithologie du remplissage Mio-Plio-Quaternaire (graviers, sables, limons, argiles et calcaires lacustres) est probablement l'origine de la variation du gradient hydraulique.

V.2.1.11 Battement moyen de la nappe

L'aquifère du recouvrement Mio-Plio-Quaternaire représente une nappe libre dont le niveau statique est fortement exposé aux variations saisonnières et en relation directe avec la pluviométrie. La superposition de la carte piézométriques du mois de mars 2008 avec celle du mois de l'année 2016, a permis de dresser une carte de battement de la nappe étalé sur une période de huit ans. Les réserves d'eau souterraines que constitue la nappe superficielle de Zana sont caractérisées en générale par une irrégularité et discontinuité. Cette particularité est due à l'alimentation pour l'essentiel par l'infiltration des pluies et l'exploitation sans cesse grandissante. Ainsi, les variations du stock d'eau de la nappe de Zana amortissent les écarts entre alimentation et puisage. Ces variations de la réserve en eau souterraine se manifestent par des fluctuations des niveaux, malheureusement dans le sens de diminution, observables dans les forages.

La diminution du niveau piézométrique est nettement visible sur la carte de battement. Cette diminution indique clairement que la nappe subie une exploitation intense d'un côté et exposée aux aléas climatiques singularisés par des faibles précipitations de l'autre côté. Nous pensons que dès qu'il y a des apports importants durant la période humide ou la demande d'exploitation baisse, il, y'aura un relèvement du niveau d'eaux.

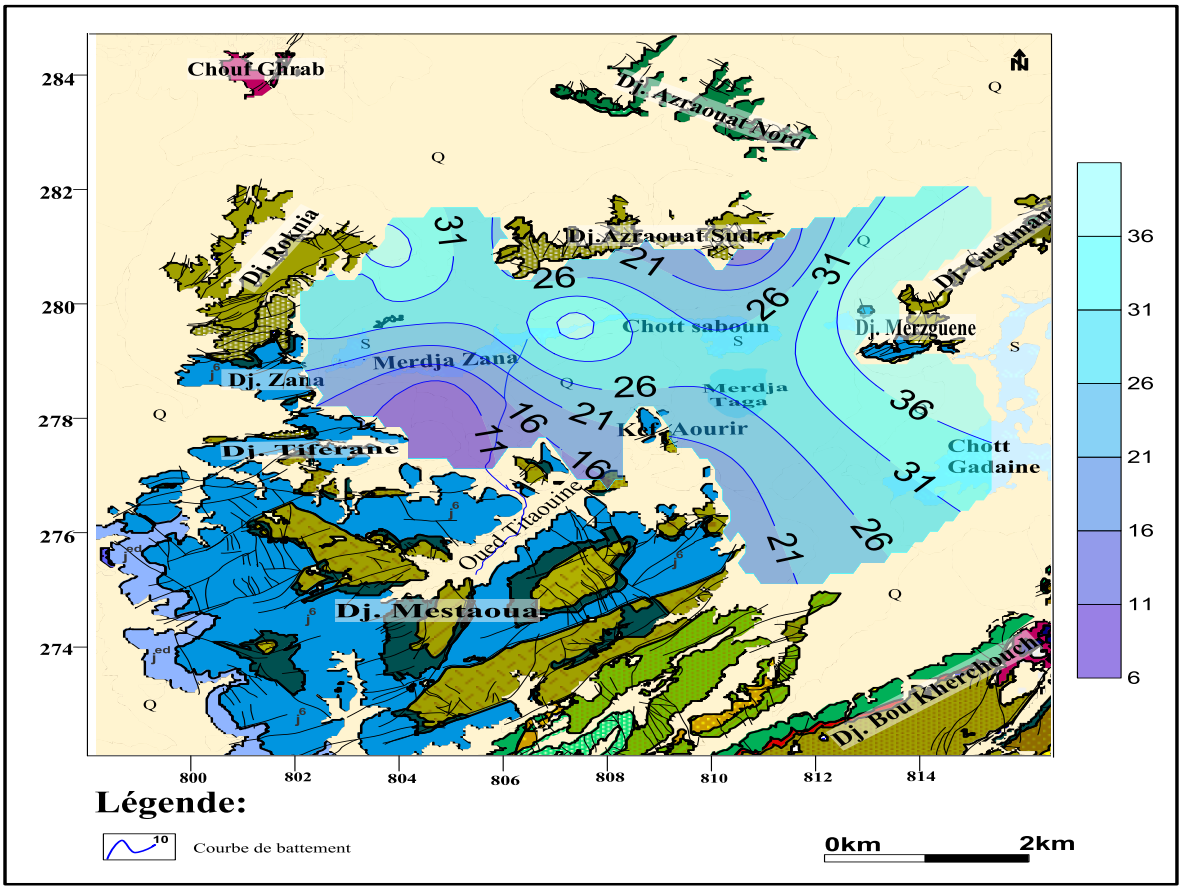


Fig. 5.8 : Carte de battement de la nappe superficielle de Zana (2008- 2016)

La superposition des six cartes piézométriques de la saison humide et sèches, nous a permis de calculer le battement de la nappe et on remarque que la diminution varie de 6.0 m à 30.0 m. Cette fluctuation diminue vers le Sud (Djebel Mestaoua) et le Nord (Azraouat) et devient importante vers le Nord-Ouest (Djebel Roknia) et l'Est de la plaine, Fig. 5.8. Cette configuration de variation des niveaux d'eau obtenue est due à la multiplication des forages au centre de la plaine et la présence d'une ligne de partage des eaux à l'Est de la plaine.

V.2.2 Aquifère profond

Les massifs carbonatés des Djebels de Zana, Roknia, Mestaoua, Azraouat, Tizourite, Aourir, Metrassi et Messaouda présentent des champs de lapiez perturbés par des diaclases très ouvertes. Les lapiez de ruissellement dessinent un véritable chevelu de petites rigoles observées aux piedmonts des massifs.

Les lapiez de fissures débutant dans les calcaires en blocs parallélépipédiques de plus de 50 cm de côtés s'observent sur le sommet de Mestaoua. Cette morphologie est due à la circulation des eaux souterraines dans des larges conduites qui ne se forment que dans les roches solubles (calcaires, dolomies et le gypse). Les indices de karstification ont été signalés à travers les pertes partielles et parfois totales lors de la réalisation des forages dans la région.

L'alimentation des aquifères karstiques se fait à partir des précipitations efficaces sur leur affleurement (impluvium). Cette alimentation est favorisée par la fente des neiges. Les eaux pénètrent dans les fissures et les pores communicants pour aboutir à un véritable réseau souterrain pouvant acheminer de grands volumes d'eau. Ce réseau se manifeste en profondeur par une perte totale ou partielle lors du fonçage de forages. L'exutoire naturel est les sources qui jaillissent dans la région.

Dans la plaine de Zana, nous distinguons deux aquifères profonds de nature karstique :

- ✓ Le Karst du Jurassique supérieur ;
- ✓ Le Karst du Crétacé inférieur.

V.2.2.1 karst du Jurassique supérieur

Le karst du Jurassique supérieur se trouve sous le recouvrement Mio-Plio-Quaternaire dans l'axe de la plaine, constitué par des formations calcaires du Jurassique supérieur. Le toit de cet aquifère est constitué par des argiles et des marnes au niveau des massifs, et cela est corroboré par les forages J8' et J7 d'une profondeur de 220 m chacun, Fig. 5.9, 5.10 et logs stratigraphiques en annexes. Le karst du Jurassique affleure sur les massifs de Djebel Zana (300 m d'épaisseur) qui est le prolongement de Djebel Mestaoua (350 m d'épaisseur) et sur Koudiat Aourir et Djebel Merzeguene. Les formations du Jurassique supérieur sont des calcaires en gros

bancs et des calcaires dolomitiques, ce qui nous laisse conclure que ces formations sont bien alimentées. Au-delà de ses affleurements les formations jurassiques plongent rapidement sous le recouvrement Mio-Plio-Quaternaire.

V.2.2.2 karst du Crétacé Inférieur

Le karst du Crétacé inférieur est le plus intéressant dans la région. Ces formations se trouvent dans les formations allochtones du nord (Azraouat Nord et Sud et Djebel Roknia) et les formations autochtones du sud (Djebel Mestaoua). Les formations carbonatés du crétacé inférieur affleurent aux bordures et formant les reliefs ceinturons la plaine, tels Djebel Azraouat au nord, Djebel Roknia au nord-ouest et Djebel Metrassi au sud. Ces massifs carbonatés plongent sous le recouvrement et forment une partie importante du substratum du recouvrement, comme l'indique les logs stratigraphiques des foragesJ8, J6 et J19, (voir log stratigraphique en annexes).

V.2.2.3 Géométrie de l'aquifère karstique

La nappe profonde est contenue dans les formations carbonatées du Jurassique supérieur et du crétacé inférieur. La corrélation de la géologie, la géophysique et les logs des forages réalisés dans la région a bien cartographié l'extension de cet aquifère karstique. Généralement ce grand réservoir carbonaté est caractérisé par :

- ✓ Un substratum constitué par des niveaux d'argiles imperméables contenu dans le Jurassique supérieur et le Crétacé inférieur d'âge Néocomien et Cénomanien, cela est éclairci par les logs des forages situés aux piedmonts des massifs (J6, J7 et J8) ;
- ✓ Un toit souvent recouvert par les formations détritiques du Mio-Plio-Quaternaire avec passage de calcaires lacustre et éléments grossiers, ce qui laisse jaillir des sources ;
- ✓ Les coupes géologiques montrent que ces formations karstiques sont peu profondes dans la plaine de Zana (environ 150 à 200 m de remplissage Mio-Plio-Quaternaire au-dessus des formations carbonatées) et par contre elles s'enfouissent à 500 m de profondeur dans les bassins de subsidences de Gadaïne, Seriana et El Madher ;
- ✓ Les limites de cet aquifère s'étend des bordures des massifs du Crétacé inférieur et du Jurassique supérieur des Djebels de Mestaoua, Metrassi au Sud, Djebels Azraouat Nord et Sud au Nord, Tizourite au Nord-Est et l'ensemble Zana-Roknia à l'Ouest.

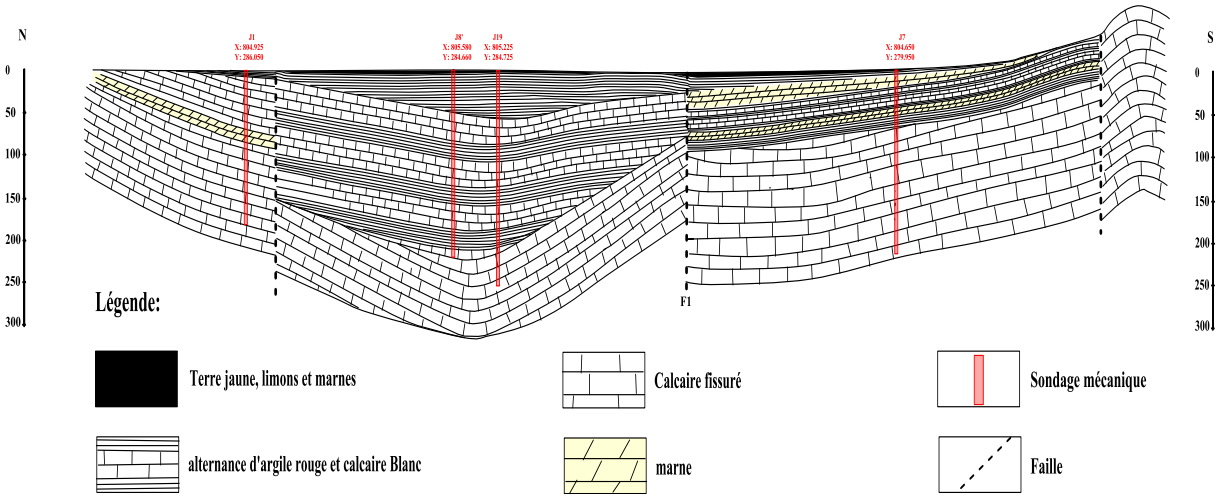


Fig. 5.9 : Coupe hydrogéologique interprétative

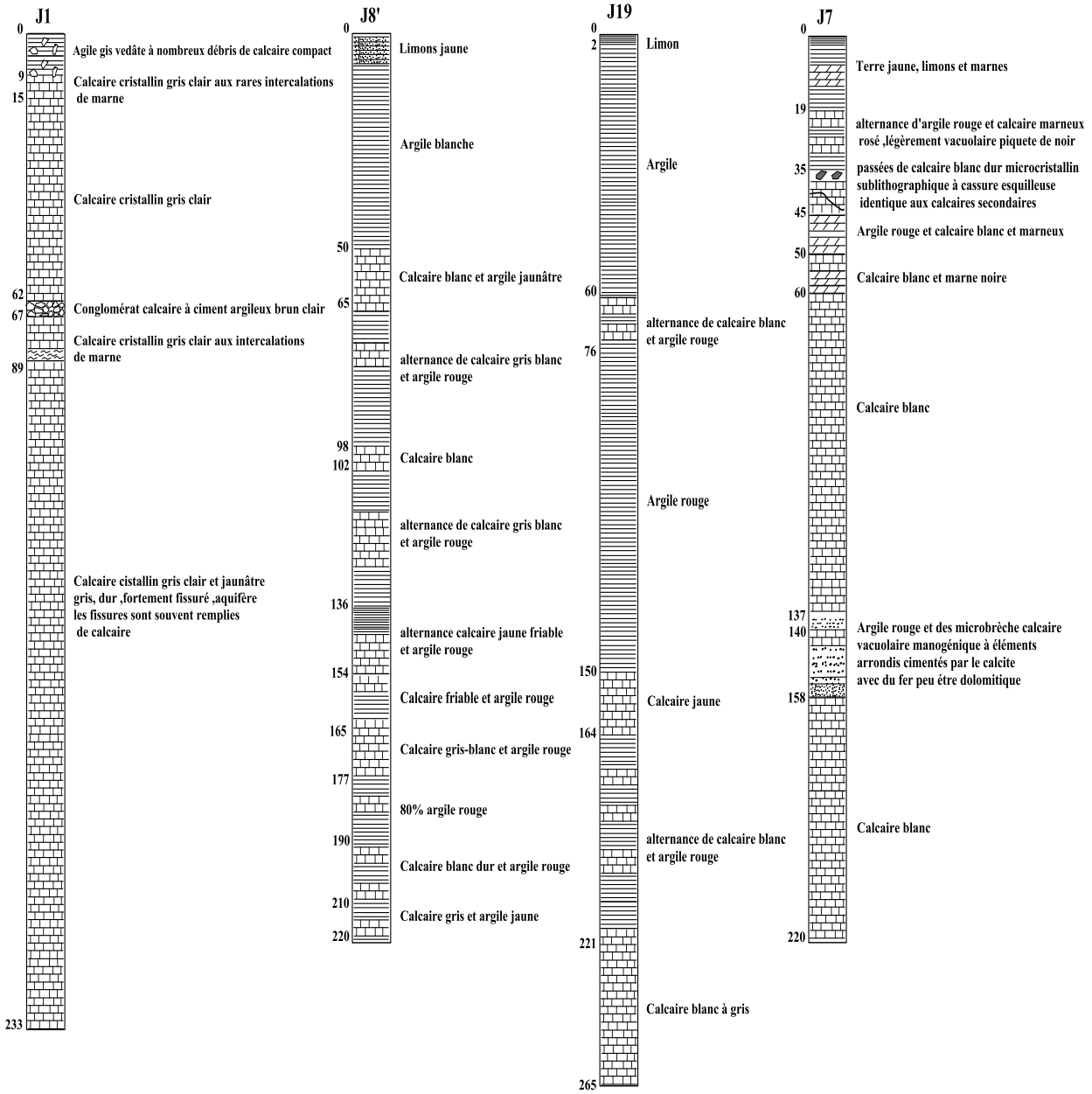


Fig. 5.10 : Logs stratigraphiques des forages dans la région

V.3 Interactions entre les aquifères

La plaine de Zana est entourée par des formations carbonatées du Crétacé inférieur et du Jurassique supérieur. Ces massifs plongent sous le remplissage du Mio-Plio-Quaternaire et réapparaissent de l'autre côté, par exemple le Djebel Mestaoua plonge vers le Nord-Est sous le recouvrement et apparaît avec ces formations au Djebel Tizourite et Merzeguene. Cette morphologie laisse les deux formations superposées et probablement en communication dans plusieurs endroits ou le substratum du recouvrement est imperméable, Fig. 5.11. Cette superposition et communication permet à l'eau de passer d'un horizon à un autre et instaure une relation drainante nappe profonde-nappe superficielle, Fig. 3.8.

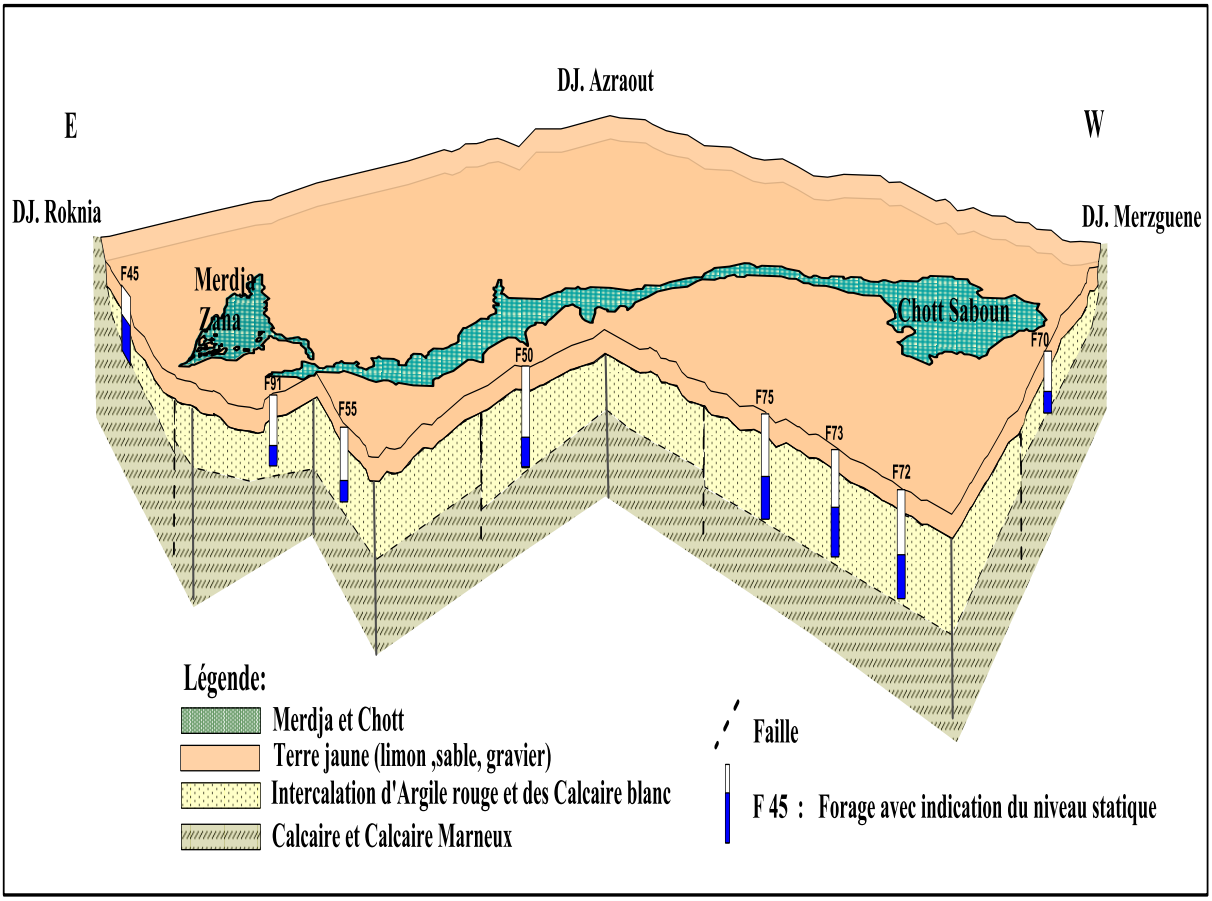


Fig. 5.11 : Coupe en 3D du complexe aquifère de la plaine de Zana

V.4 Conclusion

Au terme de ce chapitre nous pouvons conclure que :

- ✓ Le complexe aquifère de la région est formé par deux nappes. Un aquifère superficiel contenu dans le remplissage du Mio-Plio-Quaternaire d'une épaisseur pouvant atteindre les 200m. La nappe est alimentée par les massifs carbonatés qui l'entoure et son exutoire principal est le Chott Saboun et la Merdja de Zana. Un aquifère profond karstique contenu dans les massifs calcaires du Crétacé inférieur et du Jurassique supérieur. Les deux aquifères sont

superposés et en communication par endroits comme on l'a vu précédemment au chapitre géophysique.

- ✓ L'écoulement souterrain se fait, en général, selon une direction convergente, avec un axe de drainage qui coïncide sensiblement avec le Chott Saboun et Merdja Zana.
- ✓ L'allure générale des courbes iso-pièzes est restée constante, resserrées au Nord et plus espacées à l'ouest et l'Est, lors des six campagnes piézométriques.
- ✓ - L'évolution de la piézométrie dépend de l'intensité de pompage et des conditions climatiques, qui influent sur le battement de la nappe par la recharge, puisage et évaporation.
- ✓ L'alimentation se fait à partir des bordures calcaires des massifs de Roknia à l'Ouest, Djebel Azraouat au Nord, Djebel Mestaoua au Sud et Kef Aourir au Sud-Est.
- ✓ Les fluctuations saisonnières de la surface piézométrique connaissent une diminution ressentie surtout à Nord-Ouest et au centre de la plaine. Elles oscillent entre 6.0 et 30 m pour la période 2008-2016. Ces fluctuations sont soumises aux caractéristiques climatiques de la région (faible pluviométrie et forte évaporation) et la surexploitation.

Chapitre 6 :

Hydrochimie

Introduction

Dans les régions soumises au climat semi-aride voir plus sec (aride et hyper aride), le seul facteur limitant l'exploitation de la ressource en eau souterraine est principalement le volet qualitatif des eaux que le volet quantitatif. Il est clair que le chimisme des eaux souterraines dépend, particulièrement, de la composition lithologique des couches traversées et du temps de séjour des eaux. L'interaction eau-roche influe directement sur la composition chimique des eaux souterraines. Les teneurs de éléments naturels (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}, Cl^{-}, SO_4^{2-}, HCO_3^{-} , etc.) dans les eaux souterraines sont conditionnées par divers facteurs tels que les conditions climatiques, les activités anthropiques, les échanges entre aquifères superposés en contact et les échanges entre eaux souterraine et les eaux de surface. Il est évident que Les activités anthropiques ont une influence nocive sur la qualité physicochimique des eaux souterraines. L'agriculture, l'industrie et les rejets des eaux usées causent des dégâts collatéraux sur l'environnement et spécialement sur la qualité et la salubrité des eaux souterraines. L'influence est ressentie en agriculture par apports aux éléments K^{+}, Ca^{2+}, NO_3^{-}, SO_4^{2-}, NH_4^{+} et PO_4^{3-} et en industries par apports aux métaux lourds et toxiques. De même les rejets des eaux usées apportent les éléments Na^{+}, K^{+}, NO_3^{-}, Cl^{-}.

Le présent chapitre sera donc consacré à l'étude de l'origine de la minéralisation et la pollution azotée ressentie dans la région de Zana en s'appuyant sur des arguments géochimiques (Athamena, 2008). Les arguments géochimiques permettent de contribuer à la compréhension de la circulation des eaux souterraines en se basant sur le mécanisme d'acquisition des ions et leur évolutions dans les aquifères (Schöeller, 1962).

Pour atteindre les objectifs assignés dans ce chapitre, nous avons exploité les résultats d'analyses des échantillons prélevés lors des compagnes (2013, 2014, 2015 et 2016). En premier lieu, nous avons cherché à caractériser les propriétés physico-chimiques in-situ (pH, température, conductivité) et à montrer leur variabilité spatio-temporelle. Puis en deuxième lieu, nous avons cherché à déterminer les principales interactions eau-roche qui controlent les mécanismes de l'acquisition du chimisme des eaux souterraines de l'aquifère superficiel de Zana, et d'identifier l'impact de l'activité humaine sur la qualité de ces eaux.

VI.1 Echantillonnage et acquisition des données

VI.1.1 Réseau d'échantillonnage

Un réseau d'échantillonnage a été choisi pour permettre d'acquérir des données représentatives sur la variabilité spatio-temporelle de la qualité des eaux souterraines de la nappe superficielle de Zana. Ce réseau se compose de vingt-cinq points d'eau, Fig. 6.1, réparti sur la totalité de la plaine. Les critères du choix des points d'eau à échantillonner sont :

- ✓ Points d'eau proches des bordures calcaires des massifs ;
- ✓ Points d'eau aux voisinages des plans d'eau (Chott et Merdja), photos N° 01 et 02 ;
- ✓ Points d'eau répartis dans le remplissage Mio-Plio-Quaternaires ;
- ✓ Points d'eau au sein des terrains cultivés ;
- ✓ Points d'eau à côté de la RN 77.

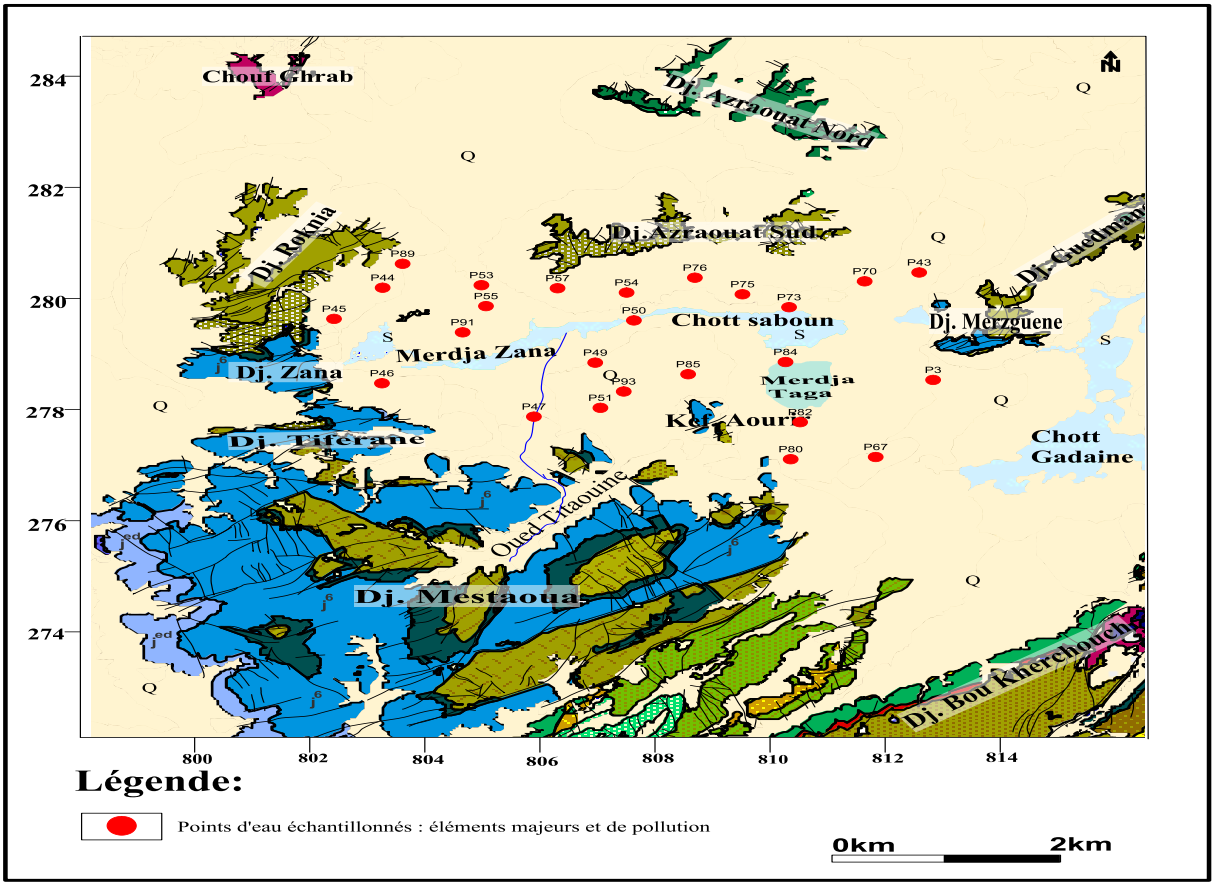


Fig. 6.1 : Position des points d'eau échantillonnés pour analyses chimiques.

Les prélèvements ont été effectués pendant cinq compagnes selon une fréquence annuelle pendant les basses eaux pour éviter le phénomène de dilution et les pics de concentration d'éléments de pollution transportés suite aux lessivages des terres agricoles par les eaux de ruissellement. Le choix des points d'eau et la fréquence d'échatillonage est fixé de cette manière, pour pouvoir faire une étude comparative et statistique plus tard, ce qui nous donnera une idée sur l'évolution spatio-temporelle de la minéralisation et la pollution. On a procédé à une analyse complète de tous les éléments majeurs (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}, Cl^{-}, SO_4^{2-} et HCO_3^{-}) et les composés azotés (NO_3^{-}, NO_2^{-}, NH_4^{+}). Les méthodes analytiques utilisées sont :

- ✓ la méthode colorimétrique pour les éléments (Cl^{-}, SO_4^{2-}, HCO_3^{-}, NO_3^{-}, NO_2^{-}, NH_4^{+} et PO_4^{3-}) ;
- ✓ la méthode de spectrométrie à flamme pour les éléments majeurs (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+} et K^{+}).

Les mesures des paramètres physico-chimiques mesurés in situ et les appareils utilisés sont donnés dans le tableau 6.1.

Tableau 6.1 : Paramètres mesurés in situ et appareillage utilisé.

Paramètres mesurés	Appareil utilisé
Température (°C)	Thermomètre digital, marque CRISON PH 25
pH	pH-mètre, marque CRISON PH 25
Conductivité (µS/cm)	Conductimètre, marque CRISON Cm 35
Salinité (mg/l)	Conductimètre, marque CRISON Cm 35

VI.1.2 Stratégie de prélèvement

L'échantillonnage des points d'eau est une opération délicate à laquelle le plus grand soin doit être apporté. L'échantillon doit être homogène, représentatif et obtenu sans modifier les caractéristiques physico-chimiques de l'eau (gaz dissous, matières en suspension, etc.) (Rodier, 2009). A chaque prélevement on a utilisé des bouteilles en polyéthylène nouvelles. Les bouteilles ont été lavés plusieurs fois à l'aide de l'eau ultra pure et par la suite rincés à plusieurs reprises avec l'eau pompée. Avant chaque échantillonnage, 15 min de pompage des eaux souterraines pour retirer stockées dans la structure. Les échantillons hermétiquement fermés et conservés à l'abri de la lumière dans une glaciaire ont été acheminés vers les laboratoires d'analyse. Les bouteilles destinés à l'analyse des cations sont acidifié à un pH < 2 avec de l'acide nitrique ultra pur.

VI.1.3 Représentativité de l'échantillonnage

La vérification de la qualité des analyses hydro-chimiques est un jugement nécessaire pour la détermination de la représentativité des échantillons. Ainsi, on a utilisé la méthode de la balance ionique qui se base sur le principe d'électro-neutralité d'une analyse complète (la somme des charges des anions doit être égale à la somme des charges des cations). Cette méthode prend uniquement les éléments majeurs en considération et s'applique pour un pH voisin de 7 (Rodier, 2009).

La validité des résultats chimiques est annoncée si l'erreur sur la balance ionique reste au-dessous d'un seuil raisonnable généralement pris égal à 10 %. Cette balance ionique (BI) est calculée à partir des teneurs en éléments majeurs dans une eau. Elle traduit la somme des cations sur la somme des anions en méq/l. L'erreur sur la balance est exprimée en pourcent (%), selon formule suivante :

$$BI^{\pm}(\%) = \left(\frac{\sum r\ \text{Cations} - \sum r\ \text{Anions}}{\sum r\ \text{Cations} + \sum r\ \text{Anions}}\right) * 100$$

Les incertitudes sur les résultats (selon les techniques d'analyse) peuvent expliquer les erreurs parfois élevées sur les balances ioniques, à cause de la présence éventuelle d'anions organiques non pris en compte dans les calculs (Favreau, 2000). Il s'avère souvent, que le seuil de 10% élimine un nombre significatif d'analyses, souvent effectuées à des époques et par des laboratoires différents (Kloppmann et *al*, 2011).

Nous avons retenus dans le cadre de ce travail, un seuil d'incertitude de 10%. Cette condition a été vérifiée pour la quasi-totalité des échantillons, à l'exception de quatorze échantillons prélevés l'an 2013. Ces incertitudes dépassant le seuil tolérable peuvent être dues soit à une mauvaise manipulation, erreur dans l'acidification des bouteilles destinées aux analyses des anions soit à l'évolution du système calco-carbonique des échantillons. Les statistiques descriptives des résultats des physico-chimiques de toutes compagnes confondues sont consignées dans le tableau 6.2.

Tableau 6.2 : Statistiques descriptive des résultats d'analyse physico-Chimique

Paramètres physico-chimiques	**Unité**	**OMS Eau potable 2006**	**Normes Algérienne 2011**	**Min**	**Max**	**moyenne**	**Ecart-type**
Ca^{2+}	mg/l	100	200	44,09	488,97	144,70	83,69
Mg^{2+}		50	-	23,88	350,00	109,38	69,41
Na^{+}		PVG	200	28,06	340,63	117,57	63,51
K^{+}		12	12	0,033	18,4	5,21	4,65
SO_4^{2-}		500	400	25	2860	441,90	517,57
Cl^{-}		250	500	35	637,25	269,44	138,05
HCO_3^{-}		250	-	164,7	1311,5	319,85	154,09
NO_3^{-}		50	50	0,2	108	21,81	26,32
NH_4^{+}		0.5	0.5				
NO_2^{-}		0.2	0.2				
T°	°C	-	25	8	26	16,69	3,93
pH	-	6.5≤pH≤9.5		6,8	8,4	7,33	0,22
C. E	(µS/cm)	-	2800	368	8590	2556,80	1681,37
TDS	mg/l	1000	-	356	13950	3128,64	2768,07
O_2	mg/l	-	-				

PC : pas de contraintes. PVG : pas de valeurs guide

VI.2 Etude analytique des paramètres physiques

VI.2.1 Température

La température est un facteur important dans le contrôle des paramètres physico-chimiques, il intervient dans certain réactions d'échange entre l'eau et les sédiments, ou des réactions biochimiques, une élévation de la température peut favoriser l'adsorption des

micropolluants, notamment les métaux lourds, (Benbouih, 2000). Elle catalyse les réactions chimiques dans l'eau de plus, en mettant en évidence des contrastes de température de l'eau sur un milieu, il est possible d'obtenir des indications sur l'origine et l'écoulement de l'eau. Les températures mesurées in situ en degré Celsius, varient entre 8.3 et 26.0 °C. On remarque aussi qu'à l'exception de certains forages situés du côté de Djebel Azraouat dans la température avoisine et dépasse les 20 °C ; le reste des points d'eau présente des températures ordinaires.

VI.2.2 Le potentiel hydrogène (pH)

Par définition ; le pH est la mesure de l'activité des ions H^+ contenus dans une eau. C'est un paramètre qui détermine l'acidité ou l'alcalinité d'une eau selon la formule $pH = -\log(H^+)$ Le pH est un paramètre physique nécessaire pour l'interprétation des résultats analytiques d'ensemble (Criaud & Fouillac, 1986). C'est un indicateur important de l'agressivité de l'eau vis-à-vis des différents composants du milieu récepteur. La nature des terrains traversés par les eaux est la cause naturelle, provoquant des variations importantes du pH (NOUAYTI, 2015).

Dans les conditions naturelles, le pH des eaux souterraines varie entre 6,5 et 8.5 et il est proche de 8 pour l'eau de mer. La mesure du pH des eaux échantillonnées dans la nappe superficielle de Zana est faite in situ et contrôlé au laboratoire. Les valeurs mesurées sont comprises entre 6,8 et 8,4 et montrent que tous les puits se trouvent dans l'intervalle de norme de potabilité, Fig. 6.2.

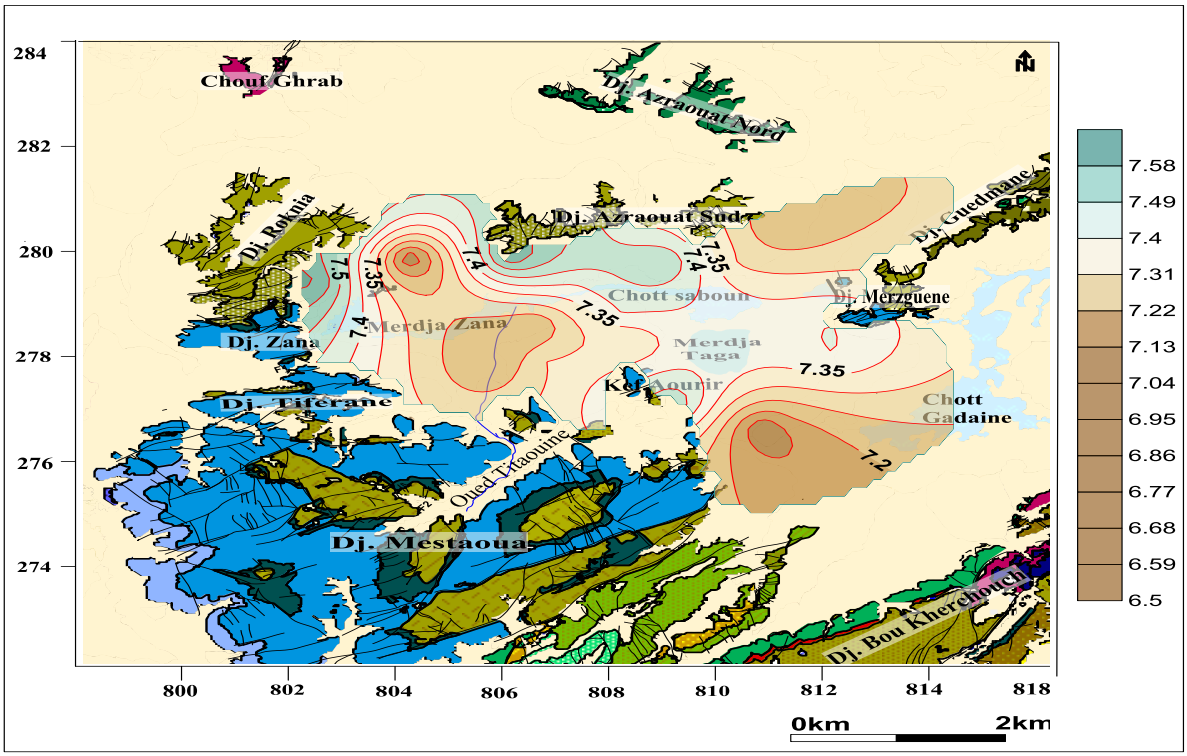


Fig. 6.2 : Répartition spatiale du pH dans les eaux de la nappe superficielle de Zana

L'étude de l'évolution spatiale de pH, nous indique une tendance en diminution de ce paramètre aux voisinages des zones marécageuses, (Fig. 6.3).

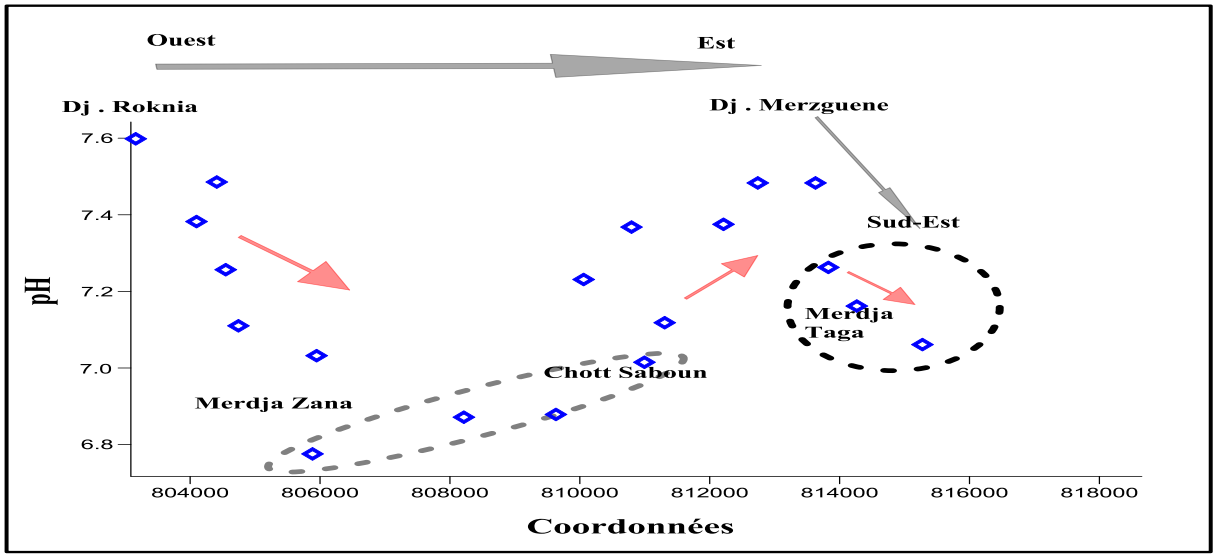


Fig. 6.3 : Variation spatiale du pH des eaux souterraines de la nappe superficielle de Zana

VI.2.3 Conductivité

Par définition, la conductivité électrique est la propriété qu'à une eau pour conduire le courant électrique, elle dépend de la quantité d'ions que renferme cette eau ainsi que de sa température. Elle peut donc servir à estimer la teneur en sels dissous dans cette eau. C'est un paramètre qui donne une idée sur la salinité totale des eaux, une salinité élevée peut être naturelle ou due à des rejets salins (Rodier, 2009).

Les valeurs mesurées sur terrain ont été ramenées à une température standard de 25°C. Nous avons répertoriée quelques points d'eau qui ont une conductivité inférieure à 2000 µS/cm et également quelques points d'eau ayant une conductivité supérieure à 7500 µS/cm. Les valeurs mesurées oscillent entre 368 µS/cm et 8590 µS/cm. Les valeurs élevées, on les rencontre dans les zones basses d'accumulation des eaux souterraines, au centre de la nappe et au Nord-Ouest de la plaine, qui sont dues aux formations triasique de Chouf Gherab, qui affleure plus Nord. Les valeurs de la conductivité électrique montrent que les eaux de certains forages dépassent la norme recommandée relative à la potabilité des eaux. L'analyse des résultats des mesures de la conductivité des deux dernières années (2015 et 2016), montrent fort bien une évolution temporelle de la minéralisation entre ces deux années, Fig. 6.4. Les valeurs élevées de la conductivité électrique durant l'année 2015 (Moy= 3858,00 µS/cm) contre celles de l'année 2016 (Moy= 3465,20 µS/cm) indiquent un processus de minéralisation des eaux par apports des entrants agricoles lessivé par les eaux de ruissellement de surface. Cette hypothèse est corroboré avec la pluviométrie, puisque l'année 2015 est la plus arrosé ces dernière années ou on a enregistré des pluies à la fin de l'année estivale et le début de l'arrière-saison (P_{an2015} = 339 mm à la station d'Ain Skhouna/Aéroport).

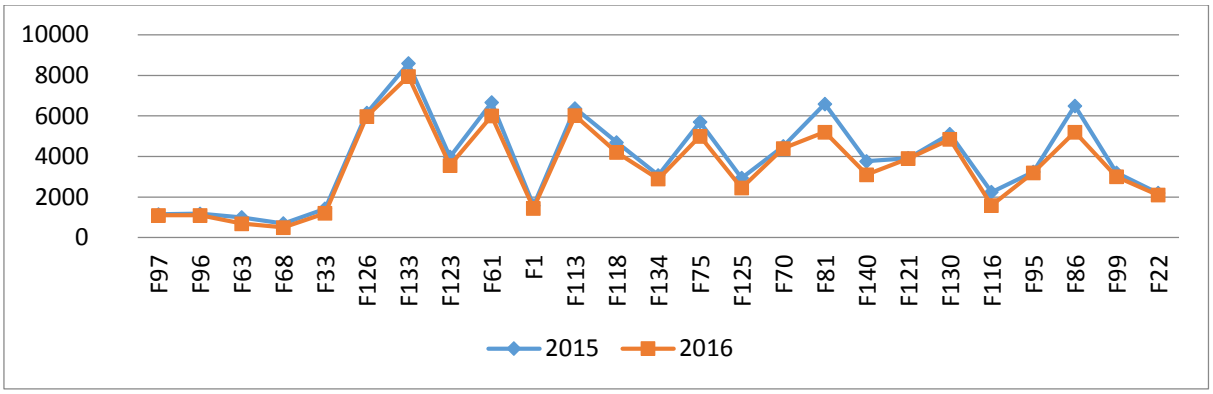


Fig. 6.4 : Variation Temporelle de la C.E dans les eaux de la nappe superficielle de Zana

Cette variation importante de la conductivité électrique d'un point à un autre montre une hétérogénéité dans la distribution de la charge minérale dans les eaux souterraines de la nappe superficielle de Zana, Fig. 6.5. Ceci laisse à penser à la prédominance du phénomène de dissolution et le lessivage. La tendance de la diminution du pH suivant la direction Ouest-Est, Fig. 6.3 et l'augmentation de la conductivité (Minéralisation) suivant le même axe, Fig. 6.6 et qui coïncide nettement avec les zones de convergence des eaux souterraines et de surfaces, nous laisse à penser à une éventuelle dissolution des évaporites et transports des entrants agricoles par lessivage des terres. Cette dissolution des évaporites et le lessivage des terres auraient pour conséquence l'augmentation de la charge minérale dans ces eaux.

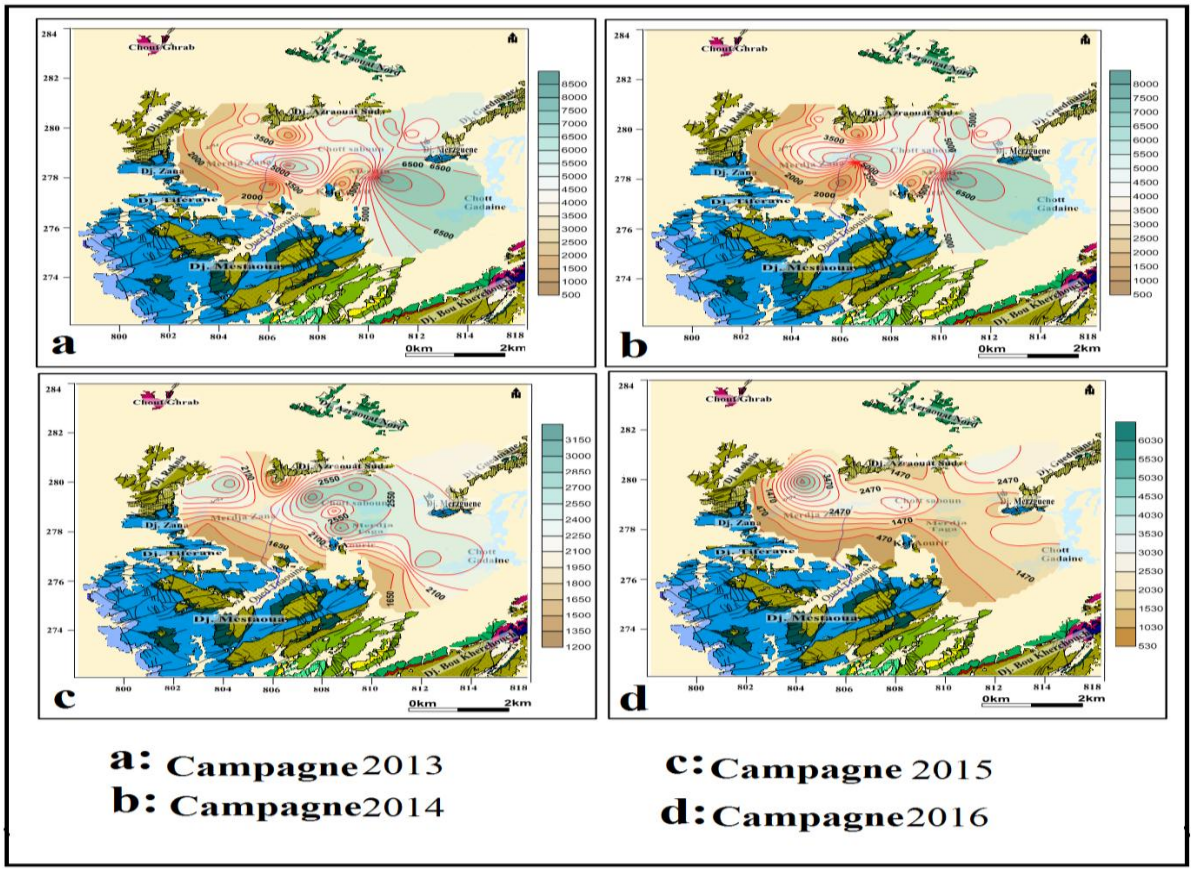


Fig. 6.5 : Répartition spatiale de la C.E dans les eaux de la nappe superficielle de Zana

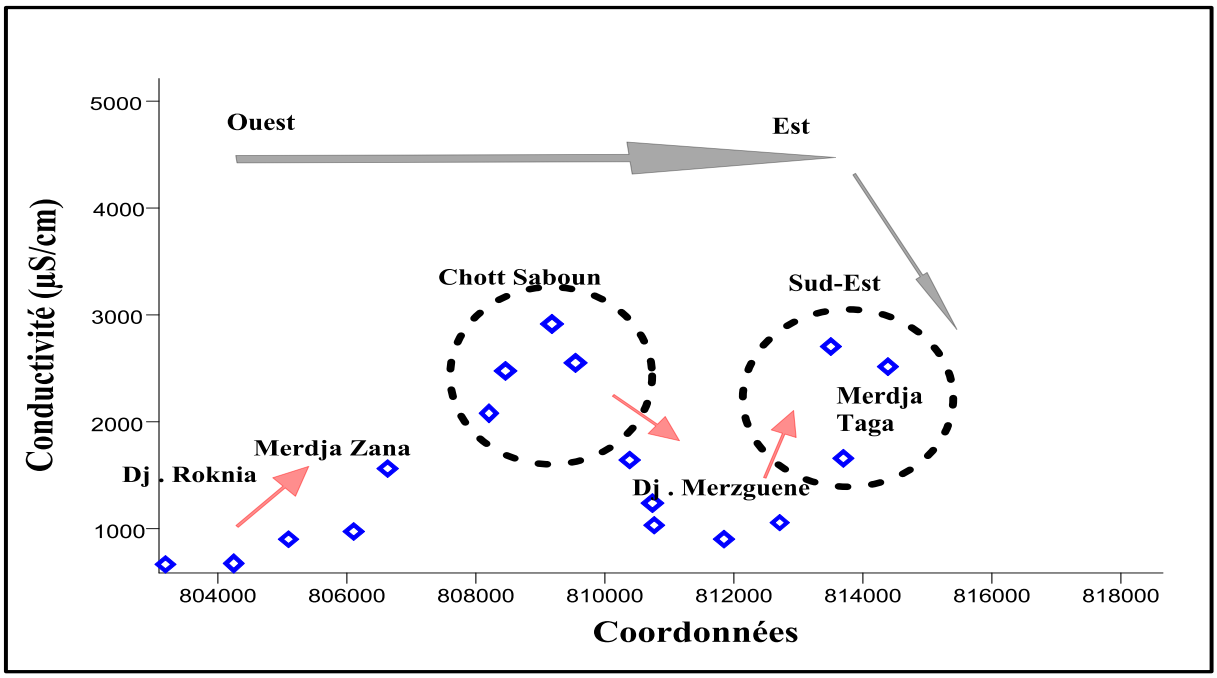


Fig. 6.6 : Variation spatiale de la C. E *dans les eaux de la nappe superficielle de Zana*

VI.2.4 Charge totale dissoute TDS

Ce paramètre représente la minéralisation totale dissoute dans l'eau qui n'est autre que la somme des concentrations des éléments dissous. Les eaux étudiées ont des valeurs de TDS oscillant entre 356 mg/l et 13950 mg/l. Les valeurs les plus élevées sont enregistrées dans le centre de la plaine et les plus basses du côté du massifs Azraouat. Selon les lignes directrices de l'OMS concernant la qualité de l'eau potable, la valeur optimum pour la TDS est en dessous de 1000 mg/l. Les résultats d'analyse ont montré que la majorité des échantillons sont dépassé les limites de potabilité, Fig. 6.8. La figure 6.7 illustre l'évolution de la conductivité électrique et la charge totale dissoute durant l'année 2016. Elle montre une corrélation positive (r = 0,75) entre ces deux paramètres représentant la salinité totale de l'eau.

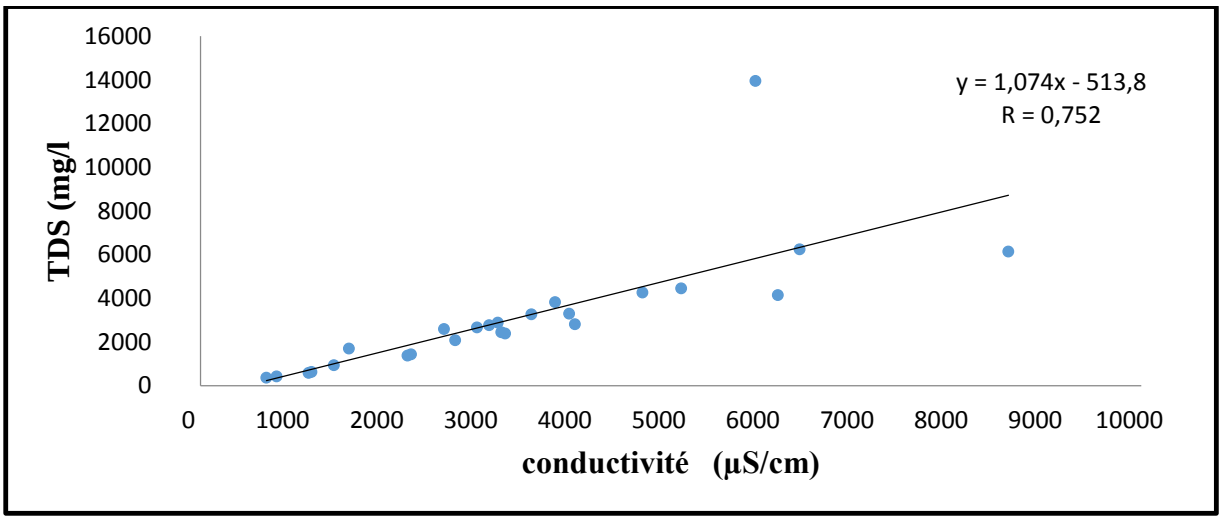


Fig. 6.7 : Corrélation entre la TDS et la conductivité

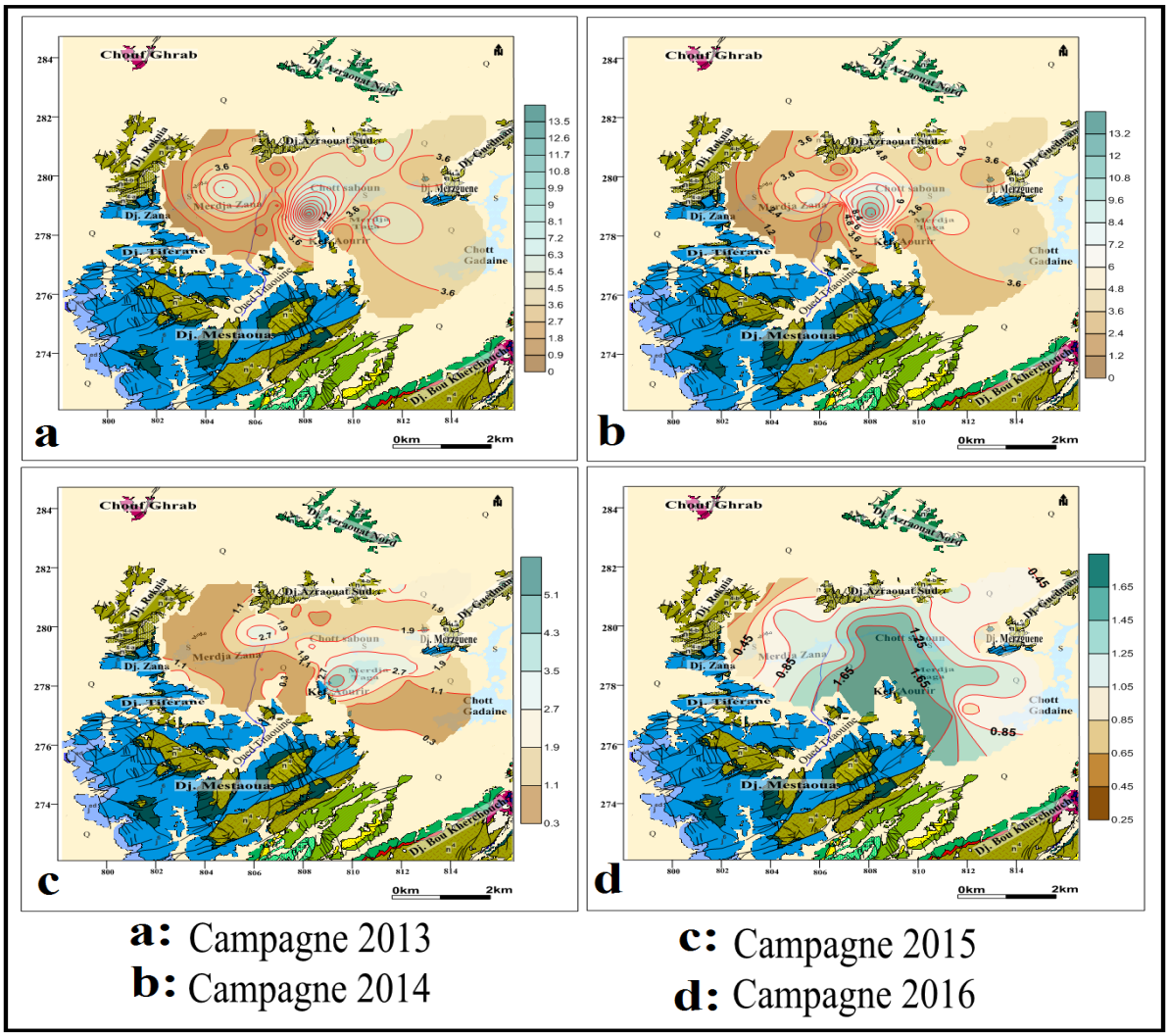


Fig. 6.8 : Répartition spatio-temporelle de la TDS (g/l).

VI.3 Etude analytique des éléments majeurs

Les éléments chimiques dits majeurs correspondent aux anions et cations qui constituent de façon prépondérante la minéralisation des eaux. Leurs teneurs varient entre quelque mg/l à quelque centaines de mg/l.

Les analyses chimiques effectuées sur les échantillons prélevés des vingt-cinq points d'eau de la région d'étude, montrent des teneurs variables des différents éléments dosés d'un point à un autre. L'examen de l'analyse montre que l'ion SO_4^{2-} est prédominant sur les ions Cl^- et HCO_3^- et les ions Mg^{2+} et Ca^{2+} sont prédominant sur les ions Na^+ et K^+.

VI.3.1 Le calcium

Le calcium est l'élément de prédilection des roches carbonatées. La présence des ions Ca^{2+} dans l'eau est liée principalement à deux origines naturelles : soit la dissolution des formations carbonatées ($CaCO_3 = Ca^{2+} + CO_3^{2-}$), soit à la dissolution des formations gypseuses [$CaSO_4$, $2(H_2O) = Ca^{2+} + SO_4^{2-} + 2(H_2O)$]. La concentration en cet élément dans les eaux

souterraines est contrôlée principalement par la solubilité de certains minéraux comme les minéraux carbonatés (calcite et dolomite), le gypse ou encore les silicates (Blum & *al*, 2002). Une teneur faible en calcium fait penser à un échange de base contre le sodium ou à l'absence de minéraux riches en calcium faiblement altérables. Par contre une teneur élevée en calcium provient de la mise en solution du gypse ou de l'anhydrite. En ce qui concerne les teneurs en calcium dans les eaux souterraines de la nappe superficielle de Zana varient entre 44.09 mg/l comme valeur minimale et 488.97 mg/l comme valeur maximale. Ces concentrations indiquent que ces eaux sont influencées par la dissolution des formations carbonatées et les formations gypseuses à la fois comme on le verra plus loin. Les teneurs en Ca^{2+} les plus faibles ont été observées à l'Est de la plaine vers Chott Gadaïne, par contre les valeurs les plus élevées sont rencontrées aux limites avec les massifs carbonatés (Zana et Roknia à l'Ouest, Mestaoua au sud et Azraouat au Nord), Fig. 6.9.

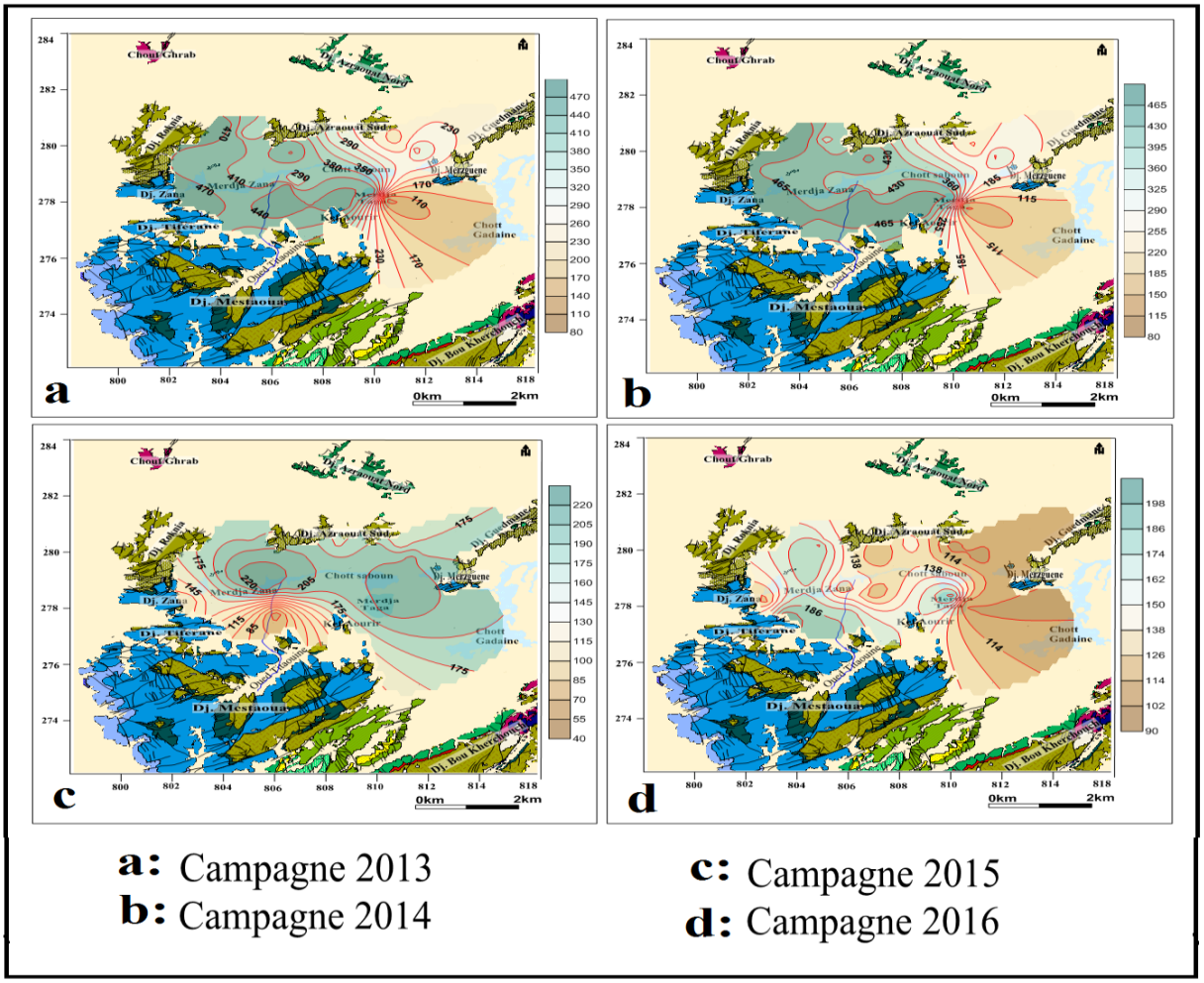


Fig. 6.9 : Répartition spatio-temporelle du calcium (mg/l)

VI.3.2 Le magnésium

Chimiquement le magnésium s'apparente au calcium et ses origines sont comparables à celle du calcium, car il provient de la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en

magnésium, magnésite : $MgCO_3 = Mg^{2+} + CO_3^{2-}$, et dolomite : $CaMg(CO_3)_2 = Ca^{2+} + Mg^{2+} + 2(CO_3^{2-})$. Quand la dolomie est attaquée, il n'y a pas de solubilité sélective, il y a autant de calcium que de magnésium. Si toutefois la quantité du calcium dépasse celle du magnésium, l'eau aurait obtenu sa minéralisation du calcaire. Par contre une teneur élevée en magnésium peut faire penser à une contamination d'eau de mer ou du lessivage des minéraux magnésiens. La répartition spatiale de Mg^{2+} dans les eaux souterraines de la nappe superficielle de Zana montre que les concentrations sont supérieures à la norme d'OMS de potabilité qui est 50 mg/l en général, avec 23.88 mg/l comme valeur minimale et 350.0 mg/l comme valeur maximale. La concentration du Magnésium augmente progressivement au Nord-Ouest et au centre de la plaine, Fig. 6.10. L'enrichissement en Magnésium pourrait être en rapport avec la dissolution du calcaire et dolomie du Crétacé et Jurassique en bordures Ouest et Sud de la plaine lors de la recharge de la nappe et/ou la dissolution des évaporites de Chouf Gherab au Nord-Ouest et le lessivage des terres riches en minéraux magnésien.

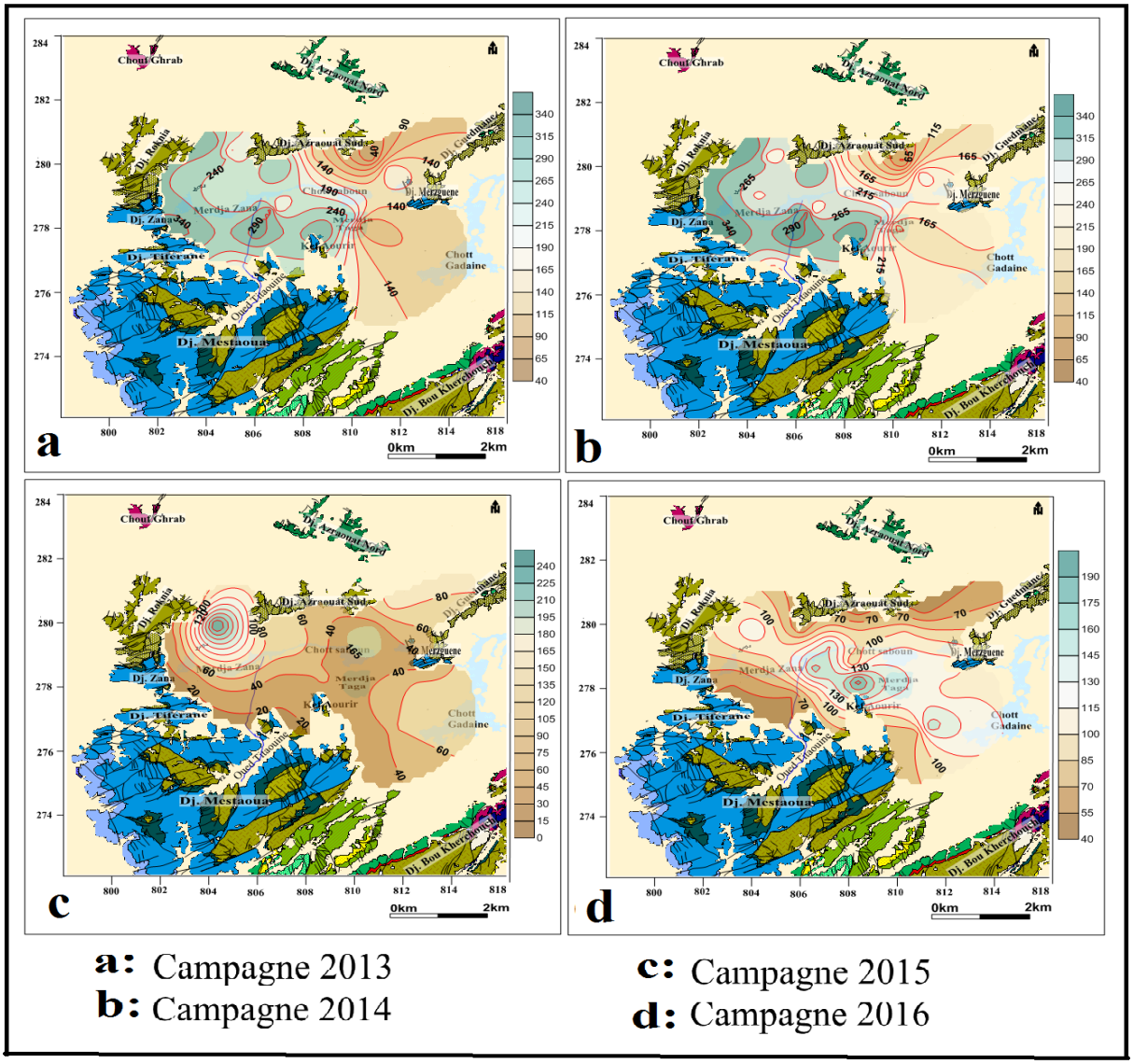


Fig. 6.10 : Répartition spatio-temporelle du magnésium (mg/l).

VI.3.3 Le sodium

L'origine de cet élément est liée principalement à la dissolution des formations salifères et à l'effet de la salinité marine. La plus importante source de sodium se trouve dans les évaporites (halite NaCl, mirabilite $Na_2SO_4(10(H_2O))$. La présence du sodium est liée à la dissolution rapide des formations évaporitique riches en halite. L'existence des Sebkhas et des Chotts peut être aussi à l'origine de cet élément. La concentration en sodium de l'eau de mer avoisine les 10560 mg/l.

Les teneurs en sodium mesurées varient entre 28.06 mg/l comme valeur minimale et 340.63 mg/l comme valeur maximale. La moyenne de cet élément est 117.5 mg/l. Les concentrations les plus élevées sont observées dans la partie centrale de la plaine (Chott Saboun, Gadaïne et Merdja Taga) et la partie Nord-Ouest (Trias de Chouf Gherab). Par contre, les teneurs relativement faibles sont observées aux bordures des massifs, (Fig. 6.11). Ces concentrations témoignent d'un apport salifère à partir des dépôts évaporitique liées aux Chotts et à la Merdja et du Trias de Chouf Gherab au Nord-Ouest. Néanmoins, il est probable qu'au cours de leur cheminement, les eaux souterraines peuvent subir une minéralisation au contact des argiles constituant le mur entre les deux aquifères de la région. Ils peuvent donner du sodium par le phénomène d'échange de base et ce, en fixant un ion Ca^{2+} après libération de deux ions Na^{+}.

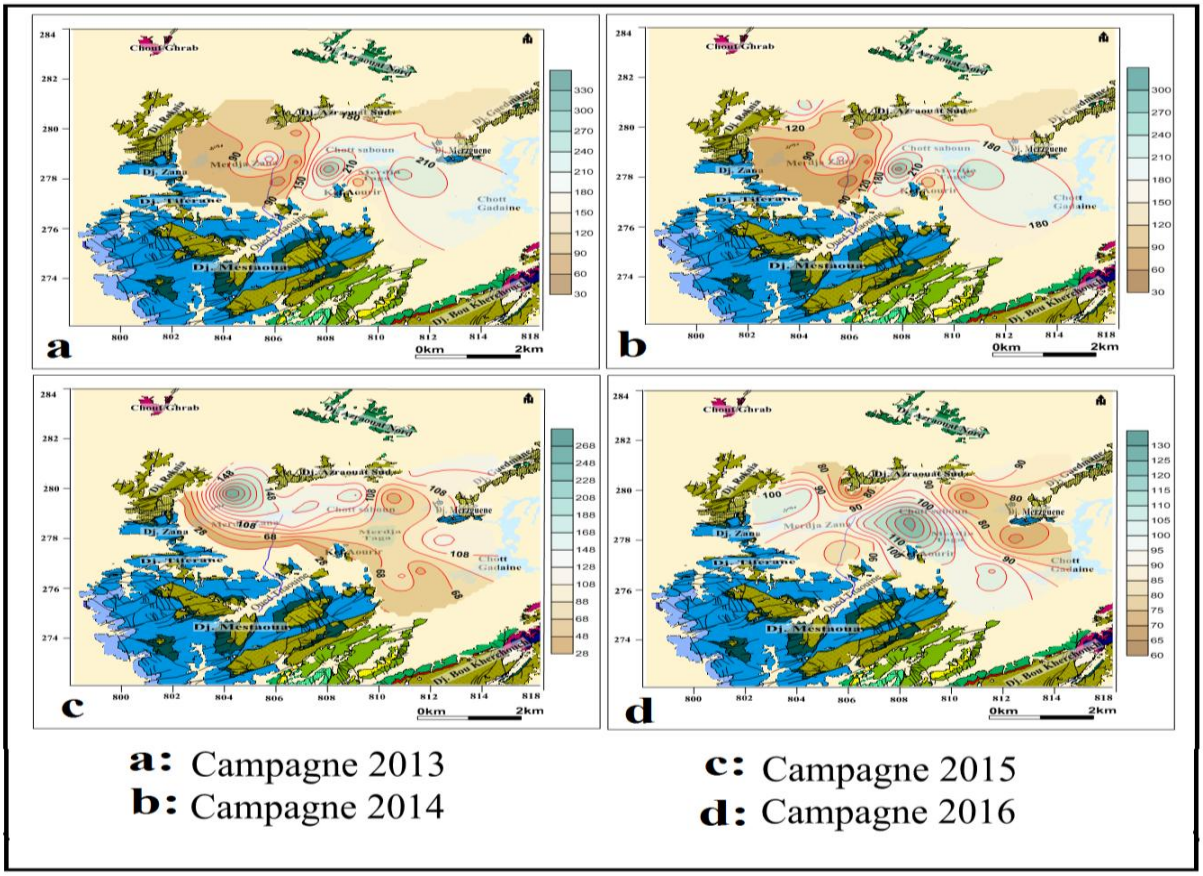


Fig. 6.11 : Répartition spatio-temporelle du sodium (mg/l).

VI.3.4 Le potassium

Le potassium provient de l'altération des formations silicatées (gneiss, schiste), des argiles potassiques et de la dissolution des engrais chimiques (NPK) qui sont utilisés massivement par les agriculteurs. En général le potassium dépasse rarement les 10 ou 15 mg/l dans les eaux naturelles. Dans les eaux de mer le potassium avoisine les 380 mg/l.

Les teneurs en potassium présentent des valeurs relativement faibles. Elles oscillent autour d'une valeur moyenne de 5,21 mg/l. Le maximum, et le minimum sont respectivement de 0,03 mg/l et 18,40 mg/l, Fig. 6.12.

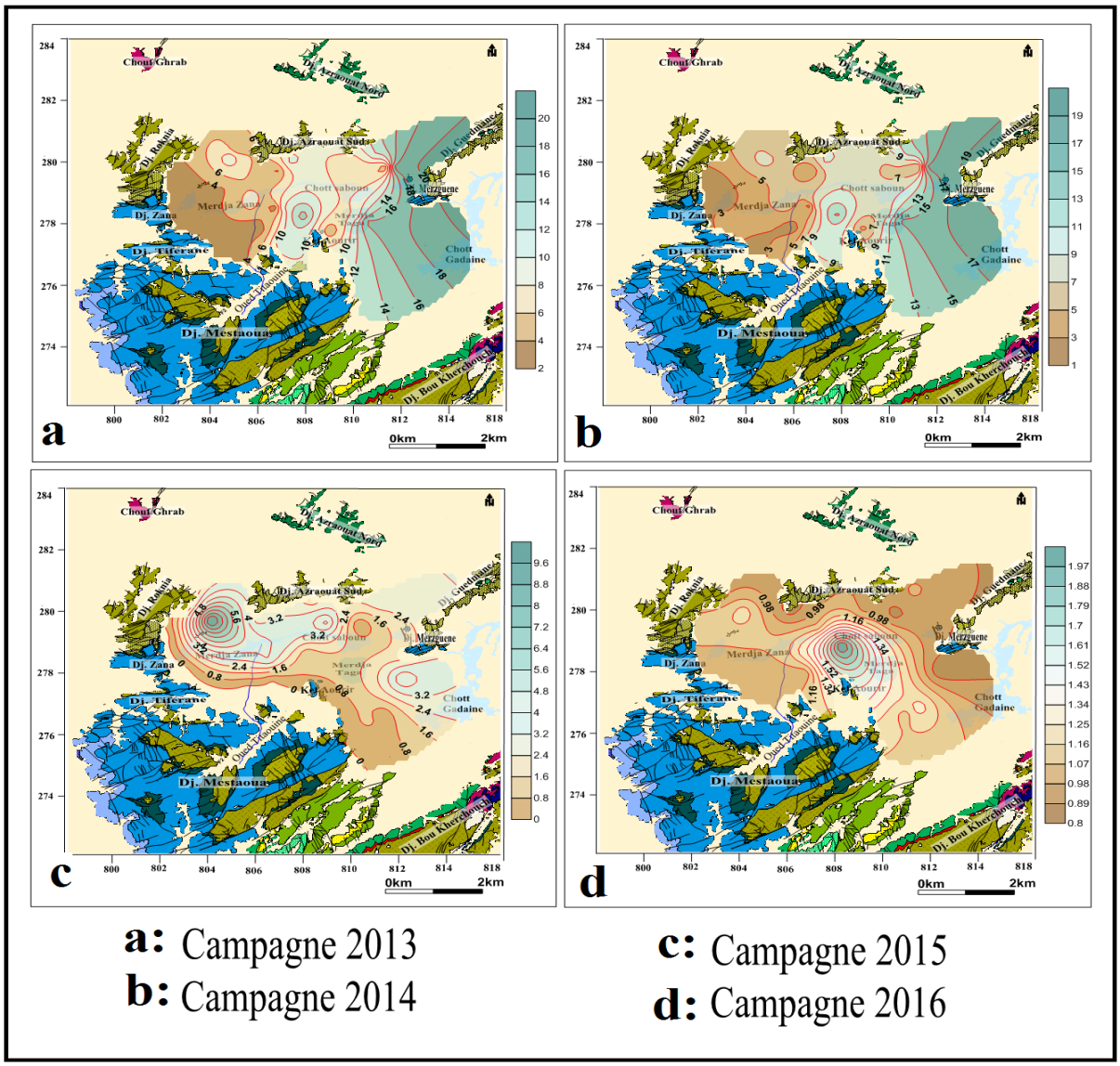


Fig. 6.12 : Répartition spatio-temporelle du potassium (mg/l).

VI.3.5 Les chlorure

L'ion chlorure possède des caractéristiques différentes de celles des autres éléments, il n'est pas adsorbé par les formations géologiques, ne se combine pas facilement avec les éléments chimiques et reste très mobile. Il constitue un bon indicateur de la pollution. L'origine de cet élément est liée principalement à la dissolution des formations salifères. Les évaporites

constituent la source principale de cet élément. L'effet de la salinité marine, les bassins endoréiques (Chotts, Sebkhas), les eaux fossiles ou connées, le salage des routes et l'adoucissement des eaux par les résines, les rejets d'assainissement, peuvent aussi être à l'origine de cet élément. Le chlore est présent dans les eaux naturelles bien qu'il soit en faible quantité. Dans l'eau de pluie il avoisine les 4 mg/l et dans l'eau de mer les 18,98 g/l. Généralement les eaux riches en chlore sont riches en sodium, parfois le calcium remplace le sodium. Dans les aquifères libres, la concentration en chlorure est directement liée à la teneur en chlorure des précipitations. Les concentrations mesurées dans ces systèmes dépendent de la lithologie. Dans les nappes captives, des fortes teneurs en chlorures sont à prévoir en présence de formations évaporitique riches en chlore (Blum & *al*, 2002).

Les teneurs en chlorures des points d'eau analysés varient entre 17.75 mg/l comme valeur minimale et 637.25 mg/l comme valeur maximale, Fig. 6.13. Ces concentrations indiquent l'existence d'apports salifères à partir des formations évaporitique liées à la Sebkha et la Merdja et probablement d'origine de l'industrie agro-alimentaire (plusieurs batteries de poulaillers) ou liée à l'urbanisation par les rejets des eaux usées. Les fortes concentrations des ions chlorures sont enregistrées sur toute la plaine. Les teneurs enregistrées, pendant toute la période d'observation, montrent des valeurs importantes qui dépassent la norme de potabilité de l'OMS fixée à 250 mg/l.

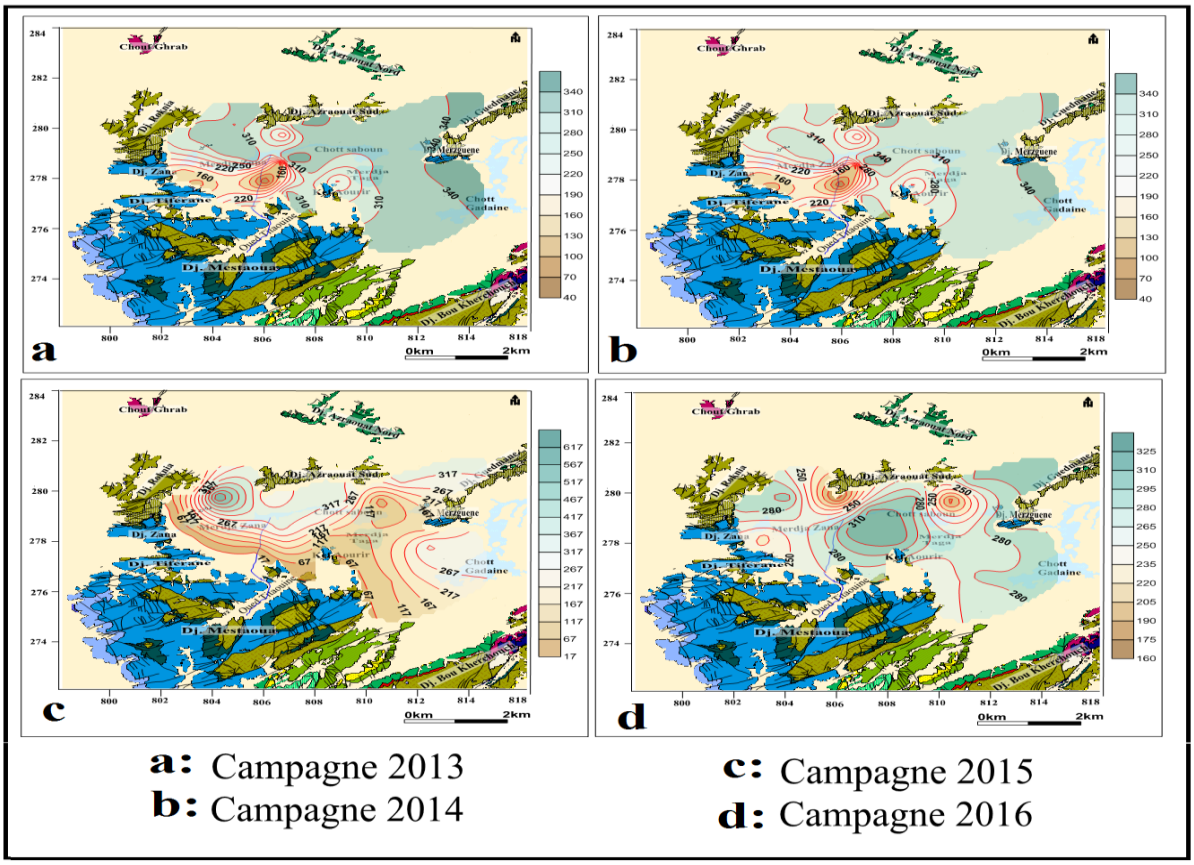


Fig. 6.13 : Répartition spatio-temporelle des chlorures (mg/l).

VI.3.6 Les sulfate

Les sulfates sont facilement solubles dans l'eau. La présence des ions sulfatés dans l'eau est liée à la dissolution des formations gypseuses, à la dégradation de la matière organique dans le sol (Viéville, 1983) ainsi qu'à l'apport anthropique (origine agricole). Dans les eaux de pluie les sulfates sont de l'ordre du mg/l.

Les teneurs en sulfates enregistrées varient entre 25.0 mg/l comme valeur minimale et 2860.0 mg/l comme valeur maximale. La présence des sulfates dans l'eau est liée à la dissolution du gypse et au lessivage des dépôts évaporitique issus du trias de Chouf Gherab, selon la relation : $CaSO_4, 2H_2O = Ca^{2+} + SO_4^{2-} + 2H_2O$. Les plus faibles teneurs sont enregistrées à proximité des bordures Ouest, Nord et Sud, là où les teneurs gypseuses sont faibles, les fortes teneurs sont enregistrées au centre et à l'Est de la plaine, Fig. 6.14.

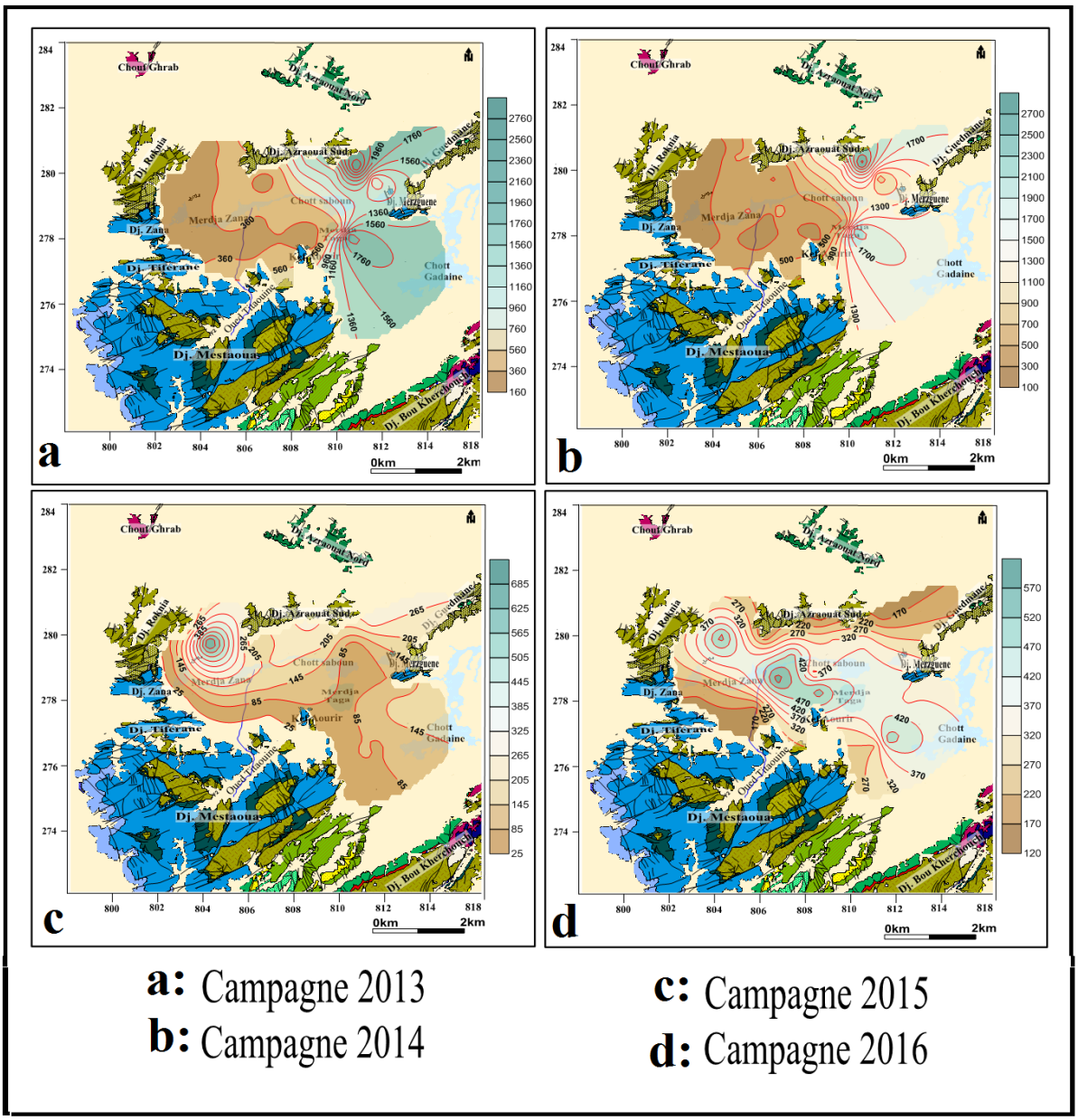


Fig. 6.14 : Répartition spatio-temporelle des sulfates (mg/l).

VI.3.7 Les bicarbonates

Les bicarbonates ont pour origine la dissolution des minéraux carbonatés et l'action combinée du CO_2 des eaux météoriques et du sol, l'apport atmosphérique de cet élément est négligeable. C'est dans les aquifères carbonatés (calcaires) riches en gaz carbonique que l'ion HCO_3^- prédominera.

Les teneurs en bicarbonates dans les eaux souterraines du Zana varient entre 164,7 mg/l et 1311,5 mg/l. la répartition de cet élément est homogène sur l'ensemble de la plaine, les faibles teneures sont enregistrées au centre de la plaine (Chott Saboun et Merdja Zana), Fig. 6.15. La présence des bicarbonates dans l'eau est due à la dissolution des formations carbonatées qui bordent la nappe, selon la réaction suivante : $CaCO_3 + H_2O + CO_2 = 2HCO_3^- + Ca^{2+}$.

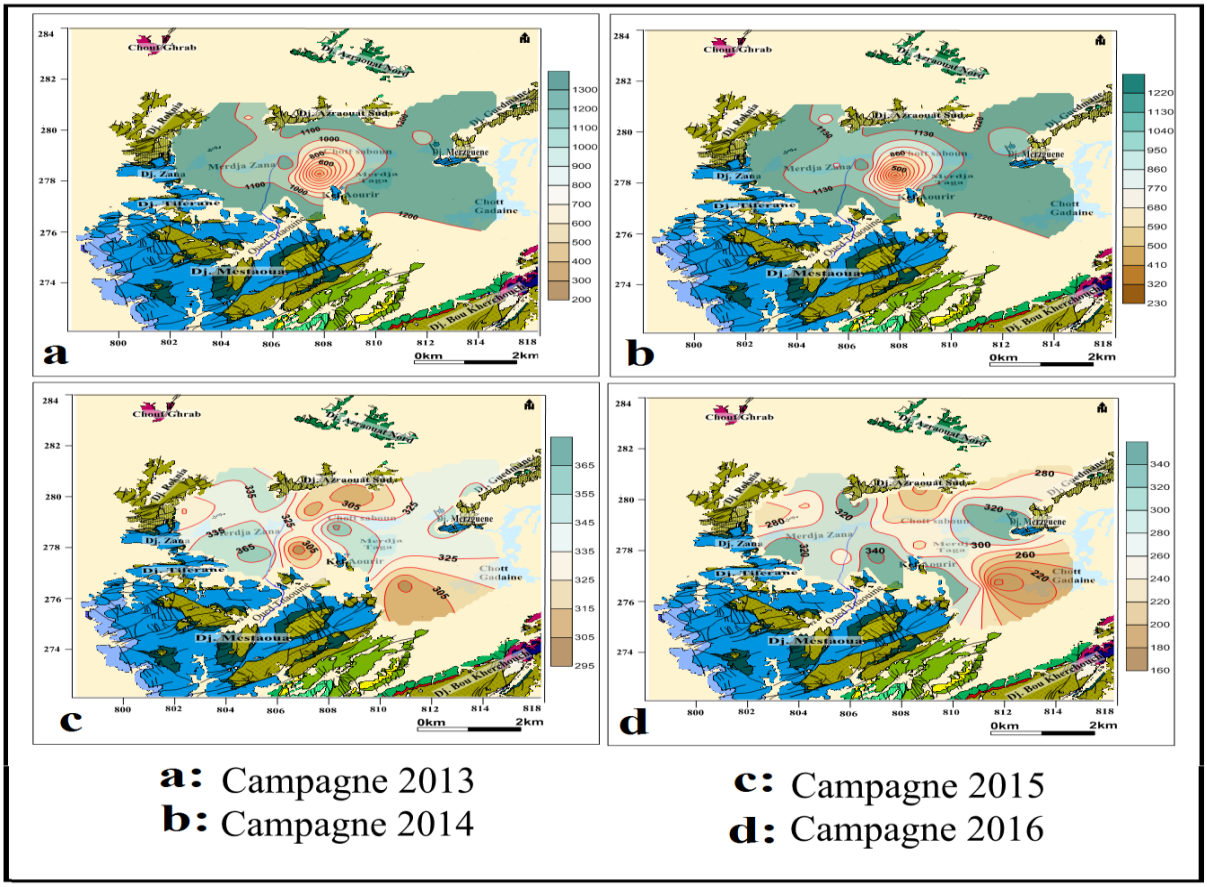


Fig. 6.15 : Répartition spatio-temporelle des bicarbonates (mg/l).

VI.4 Faciès chimiques des eaux

VI.4.1 Représentation graphique

Les faciès hydro chimiques, d'après Jaeckli (1970), sont fréquemment utilisés en hydrogéologie pour décrire grossièrement la composition des eaux naturelles. On les détermine par le calcul des quantités en réaction (conversion des concentrations en méq/l), et en tenant compte de la classification des ions (formule ionique). Parmi les méthodes graphiques les plus utilisées, celle de Schoeler et Berkaloff (1935-1938) et celle de Piper (1944).

Dans le but de bien identifier les faciès hydro-chimiques et d'avoir une indication sur l'aspect qualitatif des eaux de la nappe superficielle de Zana, la représentation graphique des résultats d'analyses s'avère un outil incontournable. Pour atteindre cet objectif, on a eu recours au diagramme de Piper. Les résultats obtenus pour les années 2013, 2014, 2015 et 2016, ont démontrés que la répartition des différents faciès dépendait de la lithologie de la région et de l'hydrodynamisme de la nappe. Ainsi les eaux de la nappe superficielle de Zana varient entre le type sulfaté et celui chloruré, pour les anions, et entre le type magnésienne et celui calcique pour les cations. La plupart des eaux échantillonnées dans la nappe sont caractérisées par une majorité sulfaté pour les anions et de magnésienne pour les cations, donc, elles peuvent être classés comme des eaux sulfaté-magnésienne, Fig. 6.16 et quelque échantillons des massifs Ouest (Djebel Zana notamment) sont bicarbonatées.

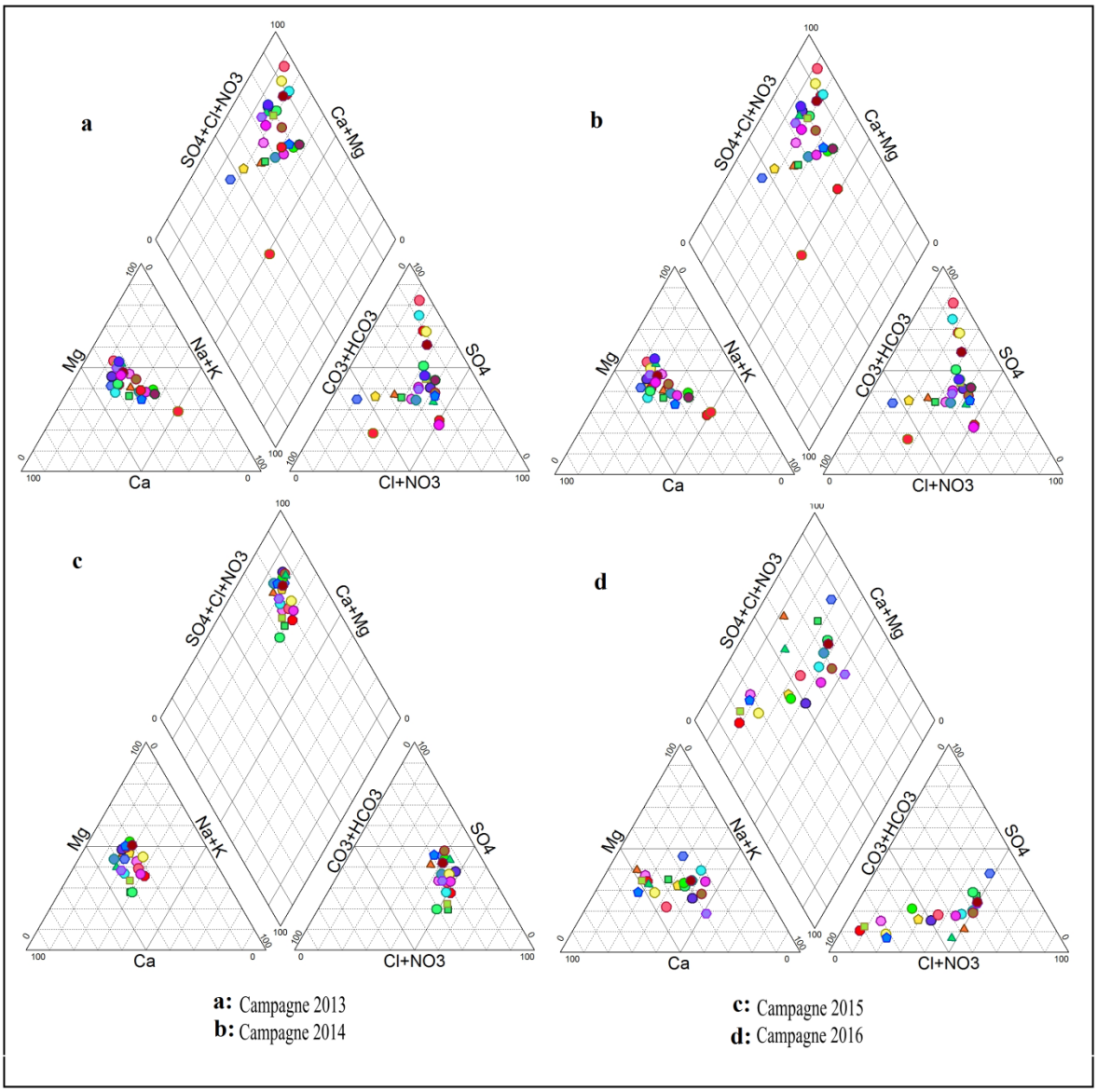


Fig. 6.16 : Diagrammes de Piper illustrant les faciès chimique des eaux de la nappe superficielle de Zana

Le faciès chloruré-magnésien est dominant au Nord de la plaine et coïncide sensiblement avec les axes routes. Les points 93 et 55 sont alignés avec la RN 77 Batna-Sétif, les points 73, 75 et 54 alignés avec le chemin communal Zana-Lazrou et le point 44 à côté du chemin de wilaya A153, Fig. 6.17. Cette répartition spatiale, nous laisse penser à une origine anthropique liée aux rejets domestiques non contrôlé des regroupements urbains parsemé dans cette région et le lessivage des salissures des routes. Le faciès bicarbonaté dominant le long des bordures calcaires de l'Ouest. Il tire son origine des formations carbonatées bordant la nappe du côté Ouest et Sud-ouest (Djebel Zana, Roknia et Tiferene). Le faciès sulfaté-magnésien est le plus important et se répand à l'intérieur de la nappe. Il s'explique par la présence des formations alluvionnaires salées du Mio-Plio-Quaternaire, des argiles gypsifères et le lessivage des terres riches en sulfates. On le rencontre également au Nord-Ouest, ceci est dû probablement aux apports latéraux venant de Djebel Chouf Gherab, qui est constitué de formations triasique, photos N° 03 et 04.

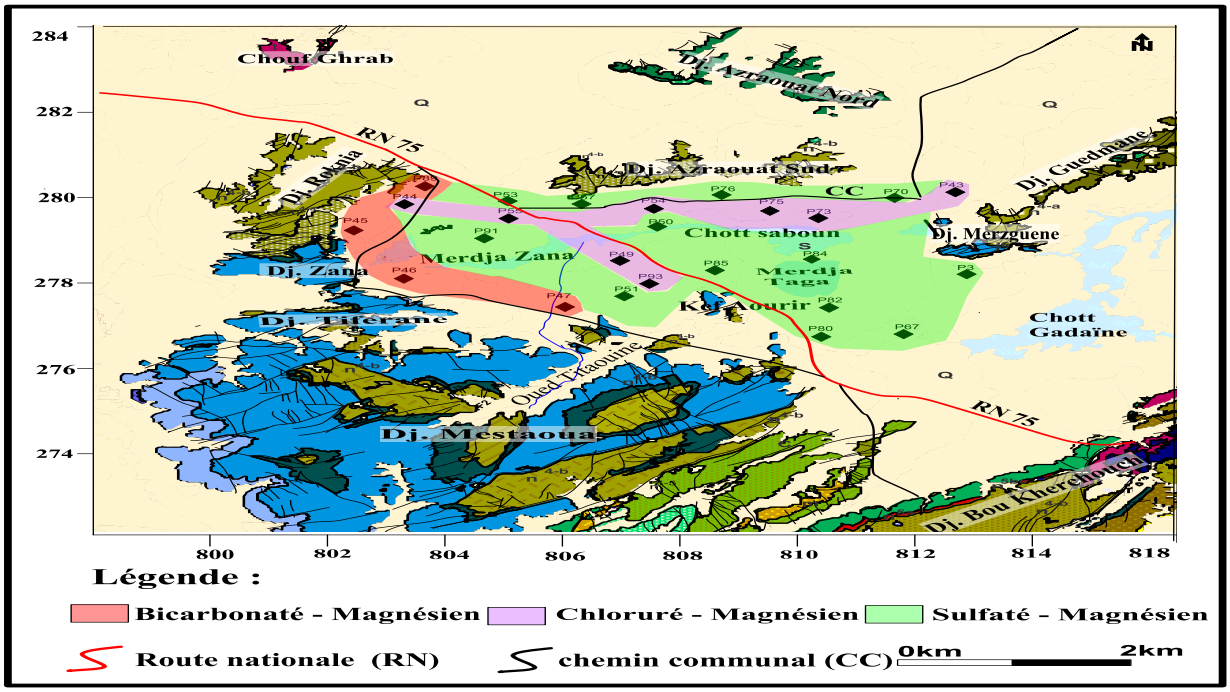


Fig. 6.17 : Répartition générale des faciès chimique des eaux de la nappe superficielle de Zana

VI.4.2 Faciès caractéristiques

A partir de la représentation graphique des faciès chimiques par le diagramme de Piper, on a constaté la dominance de trois faciès qui sont : le sulfaté- magnésien, le chloruré-magnésien et le bicarbonaté-magnésien. Ceci corrobore avec les teneurs dominantes des ions suivants : SO_4^{2-}, Cl^-, HCO_3^- et Mg^{2+}.

Pour une meilleur confirmation de la dominance des ions : SO_4^{2-}, Cl^- et Mg^{2+}, on fait recours aux deux diagrammes caractéristiques, Fig. 6.18 qui utilisent les rapports Cl^-/ SO_4^{2-} vs

Mg^{2+}/ Ca^{2+} et Cl^{-}/ HCO^{3-} vs $Mg2^{+}$/ Ca^{2+}. L'interprétation de ces deux diagrammes a montré la concentration des rapports d'ions en trois pôles majeurs durant les années 2013, 2014, 2015 et 2016, indiquant les trois faciès, déterminés précédemment, qui caractérise les eaux de la nappe superficielle de Zana.

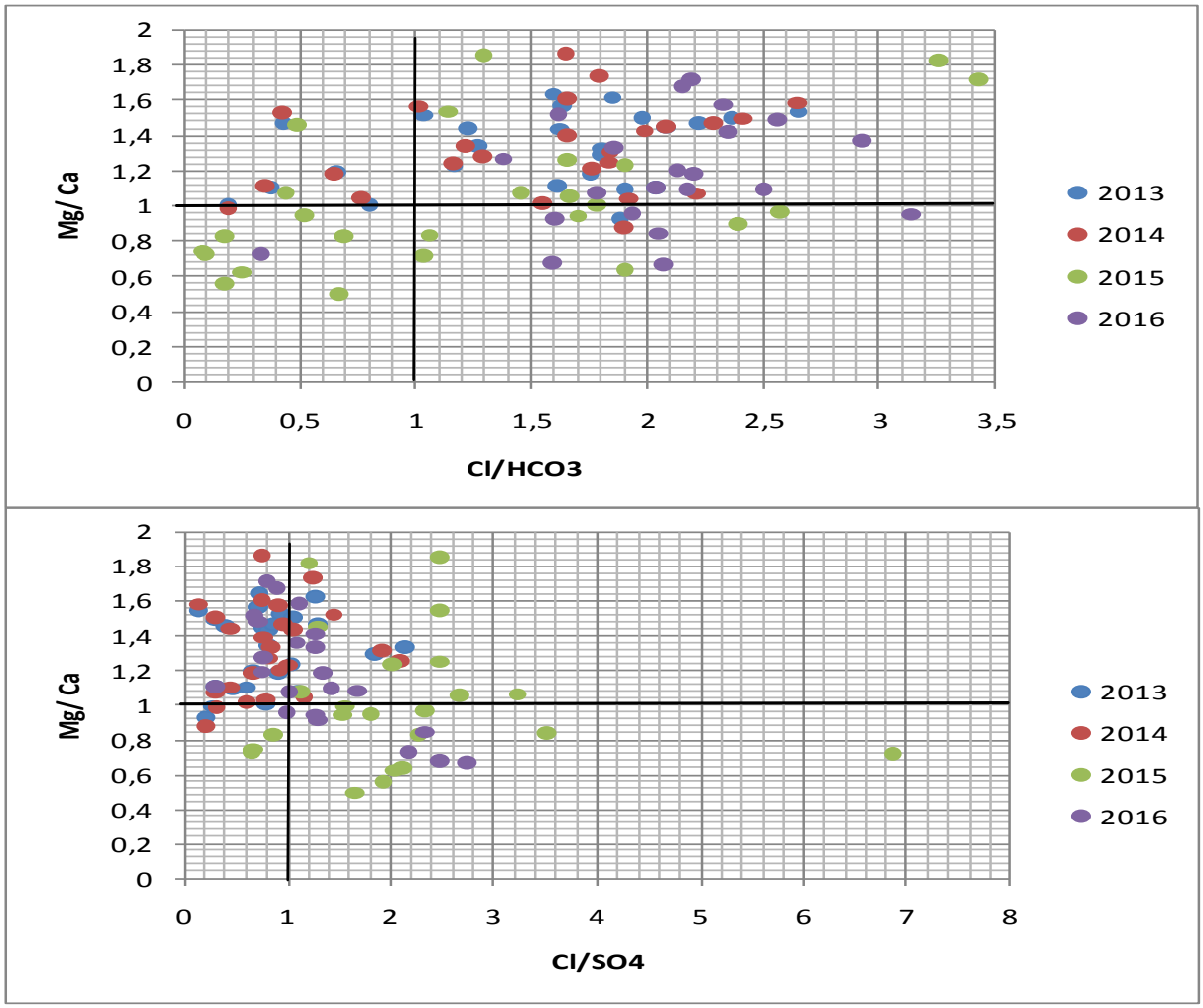


Fig. 6.18 : Evolution et distribution des faciès chimiques

VI.5 Etude des rapports caractéristiques et origine des éléments dominants

Les eaux souterraines qui circulent dans la nappe superficielle de Zana proviennent des formations carbonatées du jurassique et du crétacé qui bordent la plaine et de la matrice de recouvrement très hétérogène (argiles, limon, alluvions, sables, graviers, dépôts évaporitique, etc.). Le parcours d'écoulement souterrain et les couches traversées influent sur le chimisme de l'eau. Pour identifier l'origine probable des ions et les mécanismes d'acquisition du chimisme des eaux souterraines de la nappe superficielle de Zana, nous avons eu recourt à l'exploitation des résultats d'analyses chimiques des eaux prélevées.

Le rapport caractéristique est le rapport de certain élément chimique exprime en milli équivalent par litre (méq/l), ce paramètre donne une indication sur la zone d'alimentation, et la circulation des eaux souterraines.

VI.5.1 Rapports et diagrammes caractéristiques

VI.5.1.1 Rapport r(Mg^{2+}/Ca^{2+})

L'étude du rapport Ca^{2+}/Mg^{2+} des eaux souterraines suggère la dissolution de la calcite et de la dolomite présente dans les aquifères de la région d'étude. Le rapport $Mg^{2+}/Ca^{2+} > 1$ indique la dissolution de la dolomite, tandis qu'un rapport inférieur à l'unité est indicatif de la contribution de plus de la calcite (Maya & Loucks, 1995). La majorité des échantillons de la nappe superficielle ont un rapport supérieur à 1 durant toutes les années. Ce rapport traduit la dissolution rapide des dolomies par rapport à la calcite, Fig. 6.19.

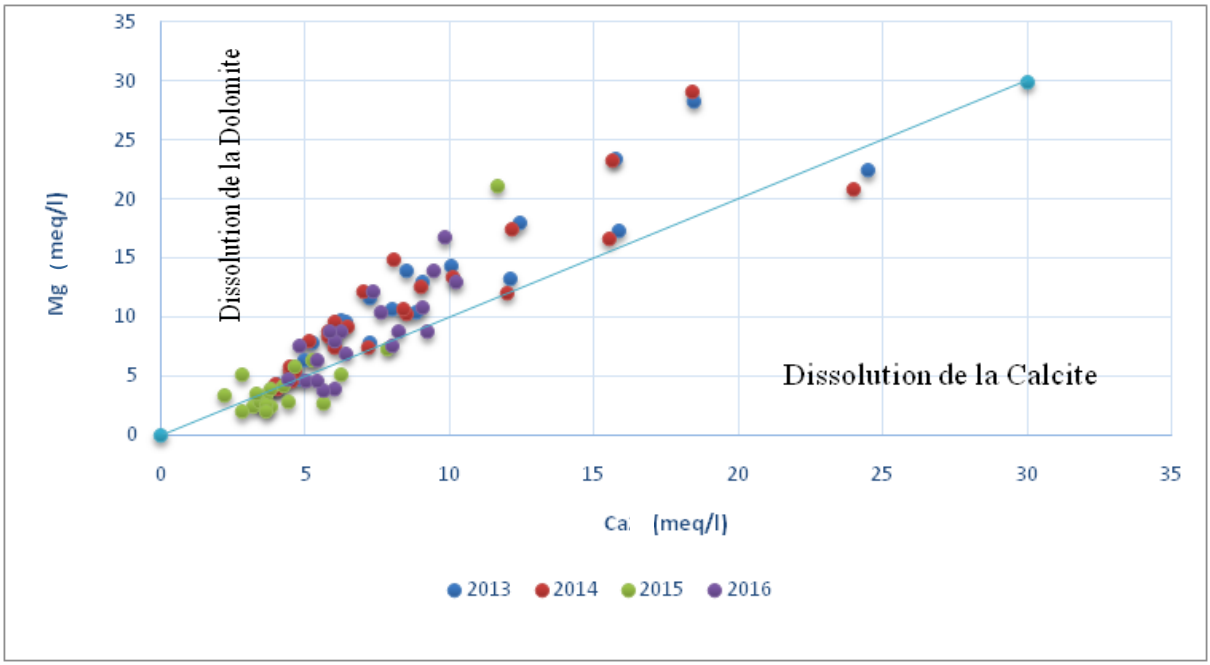


Fig. 6.19 : Diagramme Mg^{2+} vs Ca^{2+}

VI.5.1.2 Rapport r(Cl^-/ SO_4^{2-})

Ces deux ions sont issus de deux formations différentes, le SO_4^{2-} provient du gypse et le Cl^- provient de la dissolution de l'halite et probablement d'une pollution anthropique (Apports en engrais et rejets domestiques). On a associé l'évolution de ces ions à la conductivité électrique pour mettre en relief la façon selon laquelle ils évoluent et déterminer lequel entre eux est à l'origine de la salinité des eaux de la nappe. L'interprétation du graphe, Fig. 6.20 a révélé que la majorité des points d'eau présente un rapport ($Cl^-/SO4^{2-}$) inférieur à 1 pour les années 2013 et 2014, indiquant ainsi que les eaux sont plus sulfatées que chlorurées, à cause du lessivage des terrains riches en sulfates, en général des lentilles de gypse. Par contre on assiste à une dominance des ions chloruré pour les années 2015 et 2016, ce qui traduit une provenance anthropique probable (défaillance des systèmes d'assainissement ou rejet directe dans la plaine).

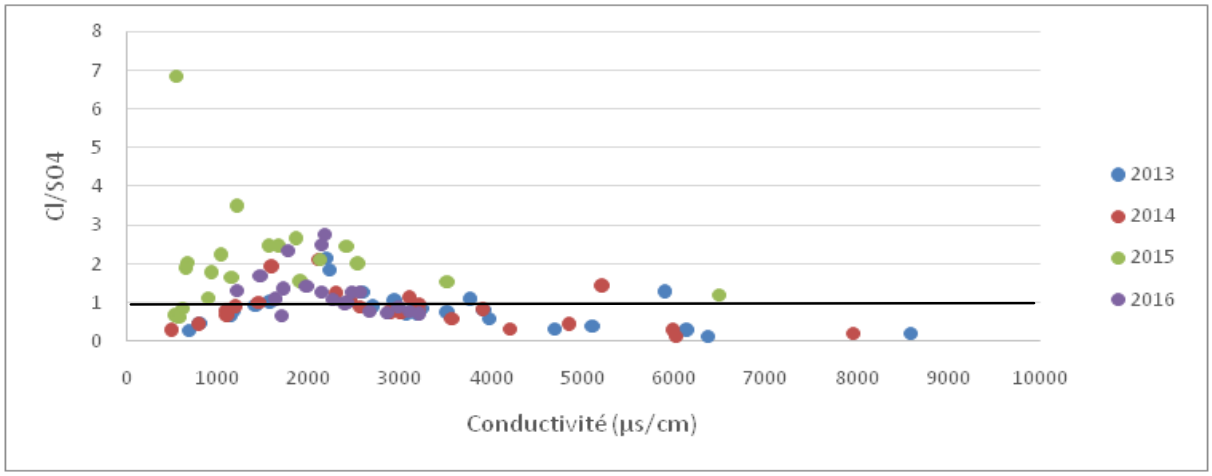


Fig. 6.20 : Diagramme Conductivité vs Cl^-/SO_4^{2-}

VI.5.1.3 Rapport r ($Ca^{2+}/SO_4^{2-}+HCO_3^-$)

On examine l'origine du calcium en fonction des bicarbonates et des sulfates ; qui indiquent ses deux origines principales et qui sont les formations carbonatées et évaporitique (gypse). La représentation graphique du calcium en fonction des bicarbonates, Fig. 6.21a, montre une origine dans l'ensemble évaporitique (excès du Ca^{2+}). La représentation graphique des teneurs en Ca^{2+} en fonction de $HCO_3^- + SO_4^{2-}$, Fig. 6.21b, montre une origine carbonatée du calcium.

Fig. 6.21: Diagramme $HCO_3^-+SO_4^{2-}$ vs Ca^{2+}

VI.5.1.4 Rapport r(Ca^{2+} + Mg^{2+} / $SO_4^{2-}+HCO_3^-$)

Le report des échantillons des eaux souterraines du Zana sur le diagramme de dispersion de [r (HCO_3^- + SO_4^{2-}) en fonction de r (Ca^{2+} + Mg^{2+})] et par rapport à la ligne de pente 1. On peut conclure que la majorité des points d'eau se trouve autour de la droite de pente égale 1, Fig. 6.2, traduisant une minéralisation d'altérations combinées carbonatées et silicatées, (Datta & Tyagi, 1986). Les points d'eaux se situant au-dessus de la droite, traduisent une altération climatique des carbonates avec domination des ions calcium et magnésium.

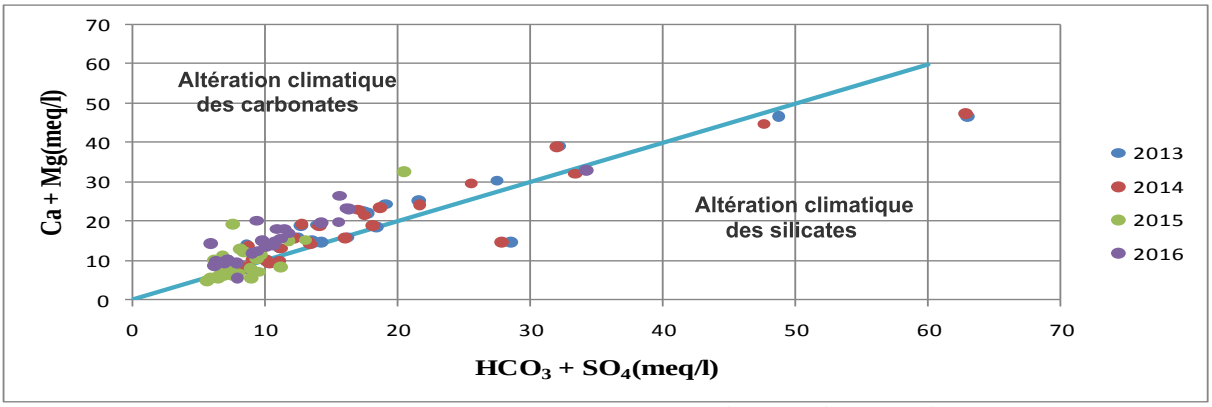


Fig. 6.22: Diagramme HCO_3^- + SO_4^{2-} vs Ca^{2+} + Mg^{2+}

VI.5.1.5 Rapport r(Mg^{2+} + Ca^{2+}) vs HCO_3^-

Le diagramme représentant la variation des alcalino-terreux (Ca^{2+} + Mg^{2+}) en fonction de HCO_3^- montre que la majorité des échantillons prélevés au niveau de la nappe de Zana au-dessus de la droite de pente 1, Fig.6.23, traduisant la dominance du Ca^{2+} et Mg2+. L'excès du Ca^{2+} + Mg^{2+} peut être attribué à la dissolution des carbonates (Calcite $CaCO_3$, dolomite CaMg (CO_3) des calcaires dolomitique des massifs du jurassique et crétacé, aux évaporites et au climat semi-aride régnant par le phénomène d'évaporation, ce qui joue un rôle important dans l'augmentation de la concentration des éléments (Ca^{2+} + Mg^{2+}).

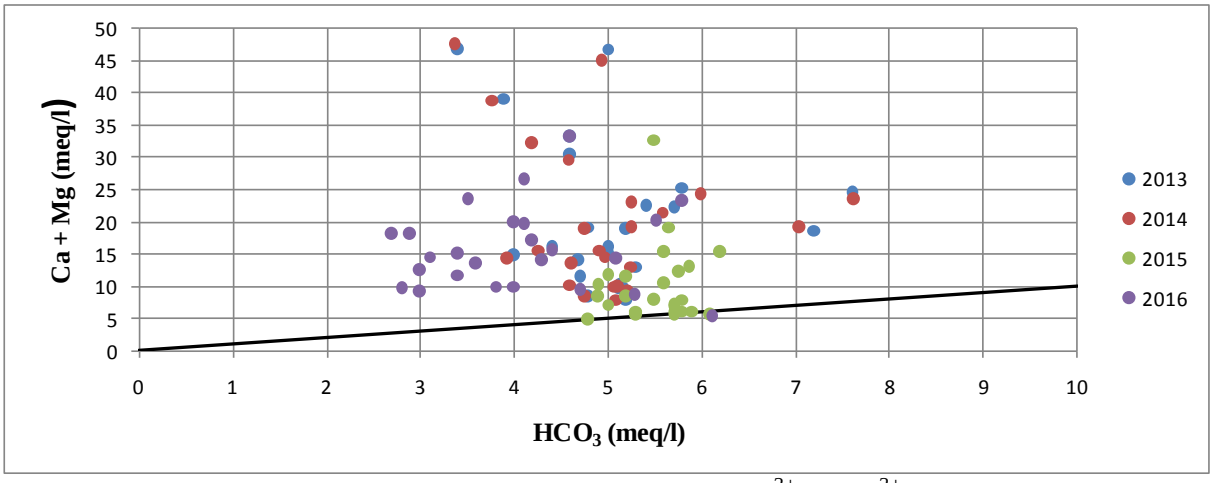


Fig. 6.23 : Diagramme HCO_3^- vs Ca^{2+} + Mg^{2+}

VI.5.1.6 Rapport r(Ca^{2+}/ Mg^{2+} vs Cl^-)

Le rapport r(Ca^{2+}/Mg^{2+}) permet de déterminer la contribution de la calcite dans les eaux souterraines (Maya & Loucks, 1995). Généralement, le rapport Ca^{2+}/Mg^{2+} des eaux des roches sédimentaires est élevé (> 1), et ce en raison de la prédominance du Ca^{2+} dans ce type de roches et de même par la circulation des eaux dans les formations gypsifères (Schoeller, 1964).

En ce qui concerne les eaux souterraines de la plaine de Zana, 65% des points analysés l'an 2015 présentent des rapports élevés (> 1), ce qui laisse à penser que le

processus à l'origine de l'augmentation de ce rapport serait lié à la dissolution de la calcite et le gypse. Par contre les faibles valeurs de ce rapport (< 1) ont été particulièrement observées durant les années 2013, 2014 et 2016. Ces faibles valeurs du rapport supposent un apport en ions Mg^{2+} provenant des roches magnésiennes (dolomies et de calcaires dolomitiques). Le diagramme (Ca^{2+}/Mg^{2+}) vs Cl^- fait ressortir que le rapport (Ca^{2+}/Mg^{2+}) des eaux souterraines de la plaine de Zana est en intégralement inférieur à 2, Fig. 6.24, ce qui traduit que les processus du chimisme dominants dans les eaux seraient liés à la dissolution des deux principaux minéraux carbonatés (la dolomite et la calcite).

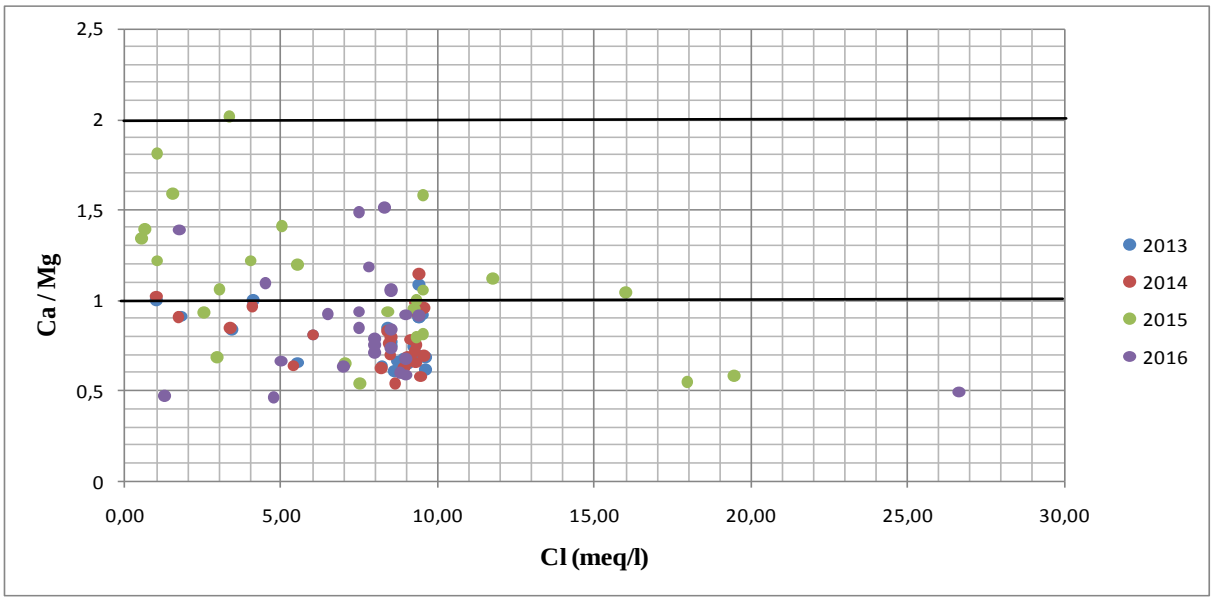


Fig. 6.24 : Diagramme Ca^{2+}/ Mg^{2+} vs Cl^-

VI.5.1.7 Rapport r(Cl^-+SO_4^{2+}) vs (Ca^{2+}+Mg^{2+})

La corrélation parfaite entre le (Cl^- + SO_4^{2-}) et le (Mg^{2+} + Ca^{2+}) dans la totalité des points d'eau de la plaine de Zana, indique la même origine des quatre éléments, Fig. 6.25. Ainsi, la nature lithologique des formations aquifères caractérisées par la présence d'anhydrite et de gypse suggère l'origine de Cl^-, $SO4^{2+}$, Ca^{2+} et Mg^{2+}.

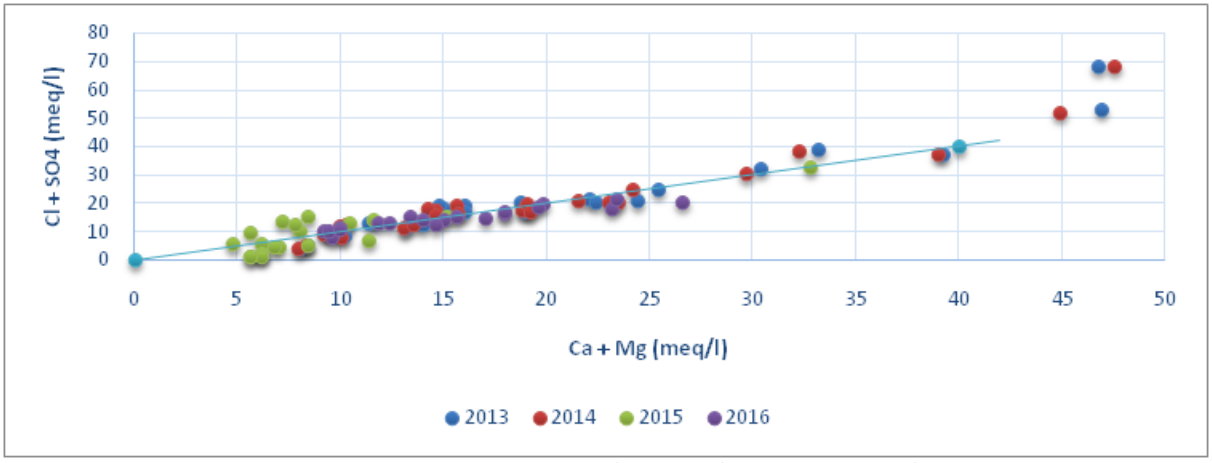


Fig. 6.25: Diagramme Ca^{2+} + Mg^{2+} vs Cl^- + SO_4^{2-}

VI.5.1.8 Rapport r(SO_4^{2+} vs Ca^{2+})

Le diagramme SO_4^{2-} vs Ca^{2+} permet d'individualiser les points contrôlés par la dissolution du gypse ou d'anhydrite selon l'équation :

$$CaSO_4 = Ca^{2+} + SO_4^{2+}$$

Ainsi, les points situés sur la droite de pente 1, indiquent que les sulfates et une partie du calcium proviennent de la dissolution des gypses. Les quelques points au-dessous de la droite indiquent que le calcium provient de la dissolution des carbonates, Fig. 6.26.

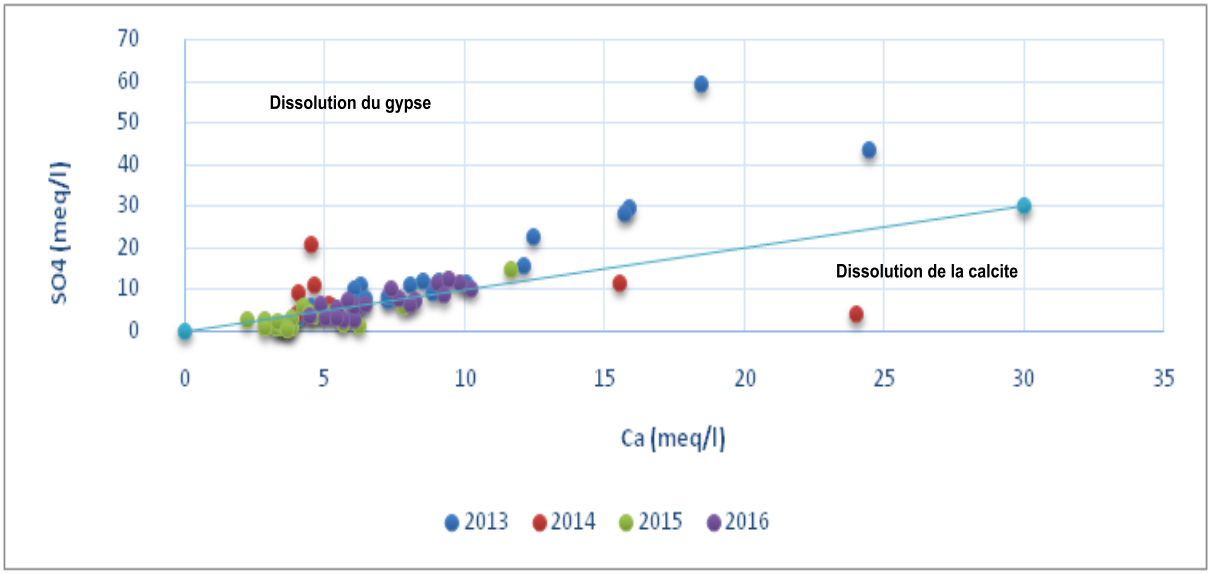


Fig. 6.26: Diagramme Ca^{2+} vs SO_4^{2-}

VI.5.1.9 Rapport r(Na^+ vs Cl^-)

La présence de l'ion Cl^- et de l'ion Na^+ dans les eaux souterraines peut être d'origine diverse. Dans les eaux naturelles, le sodium et les chlorures sont souvent liés à la dissolution de l'halite (NaCl) présente dans les formations géologiques encaissantes soit aux apports de pluies météoriques enrichis particulièrement en Cl^- et Na^+ provenant de l'eau de mer. Dans ce cas précis, le rapport d'ions Cl^-/Na^+ devrait être identique à celui de l'eau de mer, donc proche de 1,16. Il arrive également que ces deux éléments aient une origine autre que naturelle, c'est-à-dire, une origine anthropique. Les apports d'origines anthropiques constituent un facteur prépondérant d'acquisition de la minéralisation de l'eau.

L'évolution du sodium est étudiée en fonction de la teneur des chlorures, car ce dernier est considéré comme un traceur stable et conservatif des évaporites, très soluble, entrant rarement dans les précipitations salines, n'intervenant pas dans les phénomènes d'oxydoréduction et peu influencé par l'intervention des bactéries. En plus son déplacement n'est pas retardé dans l'eau.

Le rapport Na^+ vs Cl^- montre que la quasi-totalité des points sont situées en dessous de la droite de pente égale à 1, Fig. 6.27, traduisant une origine autre que l'halite et que seulement

quelques points ont une origine de l'halite. Il y a donc, une perte nette en sodium (élément non conservatif) par rapport aux chlorures (éléments conservatifs). Ceci pourrait être expliqué par une origine autre que naturelle et/ou l'interaction eaux/roches, où la perte en ion sodium est alors compensée par un gain en ion calcium par le processus d'échange cationique sur les argiles.

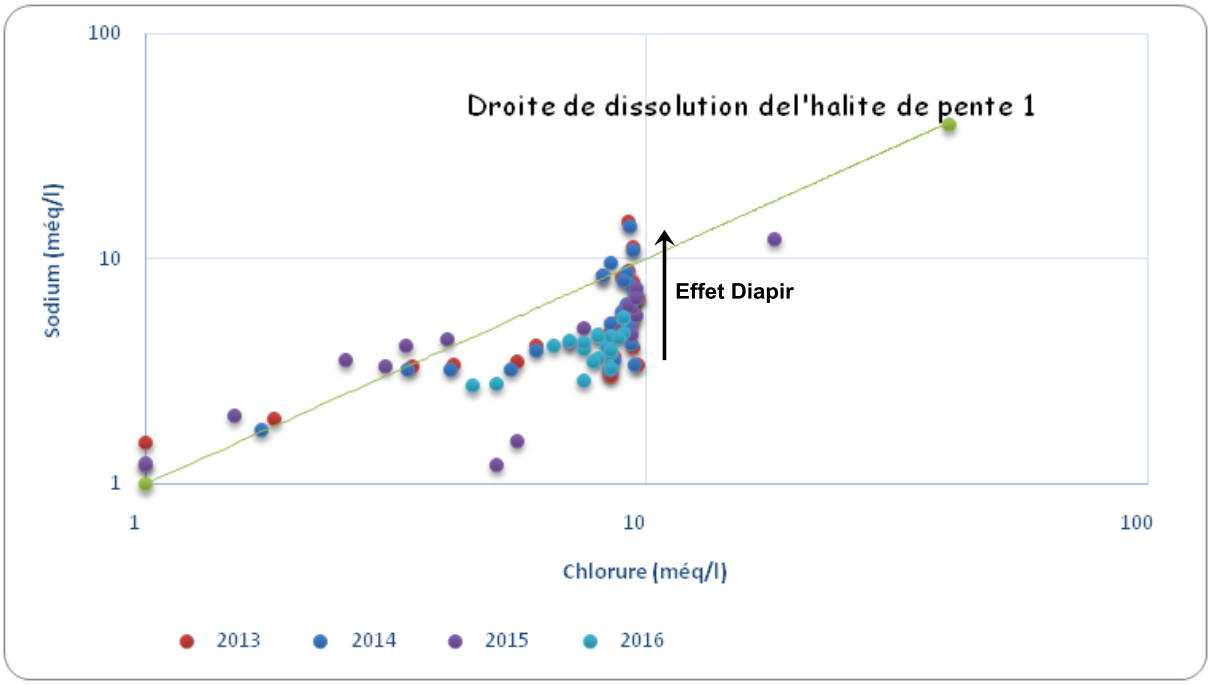


Fig. 6.27 : Diagramme Cl^- vs Na^+

La projection des différents points sur le diagramme $Ca^{2+}/(HCO_3^-+SO_4^{2-})$ vs Na^+/Cl^-, Fig. 6.28, montre que les eaux la majorité des points d'eau présente l'état naturel, et que quelque points subissent un échange de base.

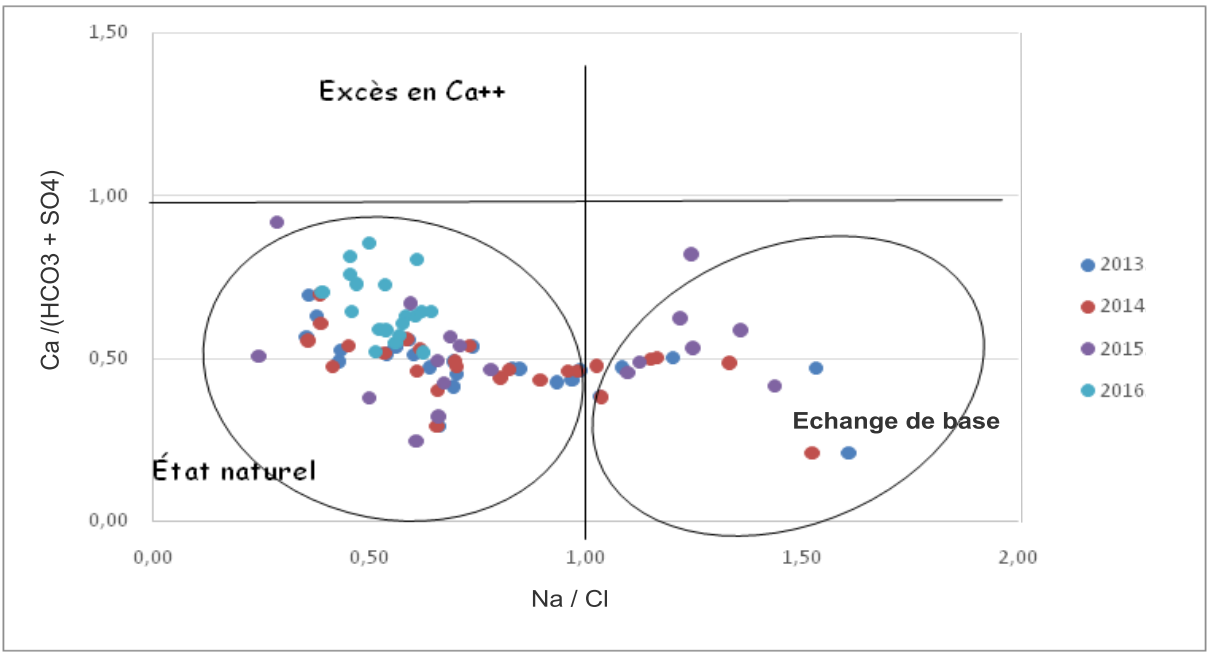


Fig. 6.28: Diagramme Na^+/Cl^- vs $Ca^{2+}/(HCO_3^- +SO_4^{2-})$

VI.5.1.10 Diagramme (Conductivité Vs $HCO_3^-/Cl^- + SO_4^{2-}$)

Le diagramme ($HCO_3^-/Cl^-+SO_4^{2-}$) vs conductivité électrique a dévoilé la présence d'un pôle mineure et un autre majeure : le premier est carbonaté et caractérisé par une dominance des ions HCO_3^- pour des conductivités différentes. Le second dominant, est évaporitique (gypsifère), représente la majorité des points d'eau, les ions Cl^- et SO_4^{2-} y dominent. Ce pôle est accompagné d'une conductivité plus importante qui atteint 8590 µS.cm^{-1}, Fig. 6.29. L'évolution de la conductivité électrique commence par des valeurs faibles (<600 µS.cm^{-1}) qui sont liées aux formations carbonatées des bordures, caractérisant les points d'eaux ayant un faciès bicarbonaté magnésien. Lorsque les eaux souterraines s'écoulent en contact avec la matrice hétérogène argilo-gypsifère et dépôts évaporitique, elles se chargent en ions Cl^- et SO_4^{2-} et acquièrent des valeurs de conductivité très importantes, qui dépassent 7000 µS.cm^{-1}.

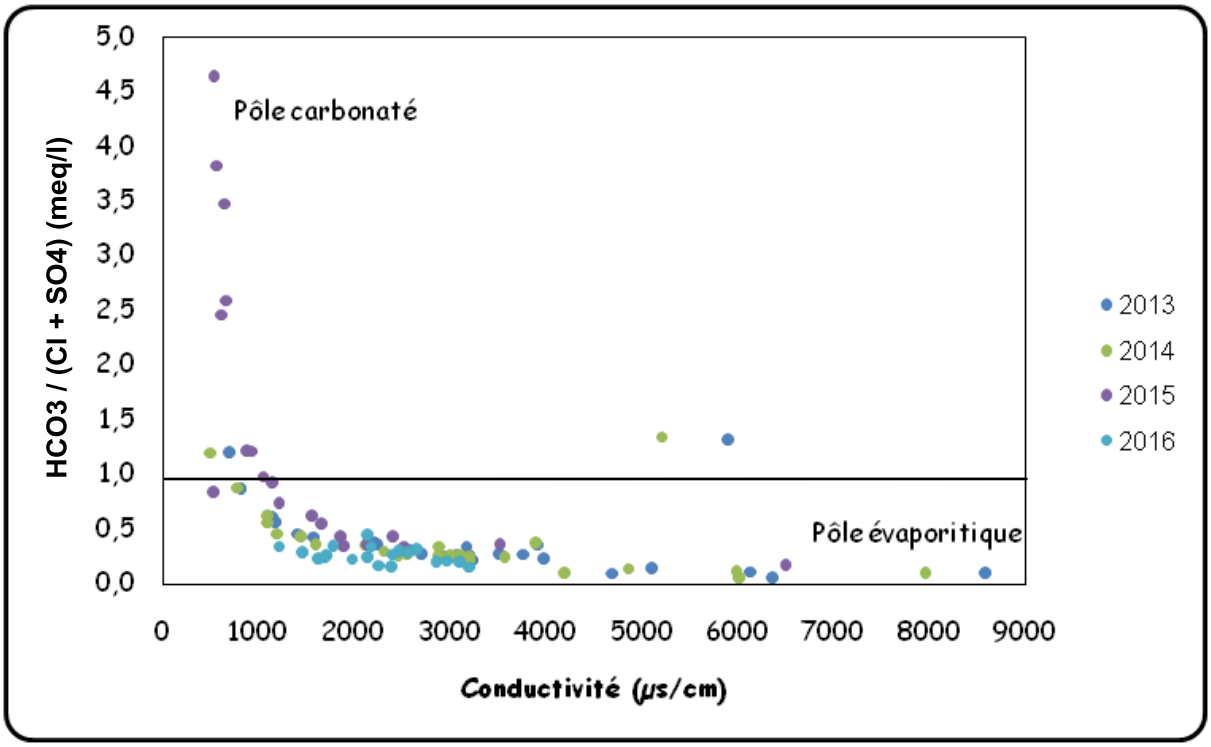


Fig. 6.29 : Origine de la salinité

VI.5.2 Modélisation géochimique

Les eaux météoriques commencent à acquérir leur minéralisation dès les premières pluies, où elles se chargent en une faible concentration d'éléments chimiques. Une fois interceptées par le sol, une partie des eaux de précipitation ruisselle à la surface et l'autre s'infiltre dans le sous-sol pour atteindre la nappe, (Gouaidia, 2008). Les eaux de ruissellement vont s'écouler vers les exutoires où elles subiront une évaporation sous l'effet de la température, ce qui produit une précipitation des éléments chimiques sous forme de minéraux et enrichie d'avantage les sols. Quant aux eaux qui s'infiltrent dans les formations géologiques calcaires,

seront chargées en ions Ca^{2+}, HCO_3^-, par la dissolution. Les points d'eaux qui se trouvent à proximité des bordures calcaires de Djebel Zana, Djebel Roknia et Djebel Tiferene attestent de cette minéralisation et se caractérisent par un faciès bicarbonaté magnésien. De même les eaux qui s'infiltrent dans formations riches en gypses et en sels, acquerrons des concentrations importantes en Na^+, Ca^{2+}, SO_4^{2-}. Les activités anthropiques peuvent accentuer la concentration des ions, tels l'utilisation des engrais chimiques dans l'agriculture, fait augmenter les concentrations des éléments de NO_3^-, K^+ et PO_4^{3-}. Aussi l'irrigation par des eaux salées conduit à la salinisation des sols et augmente ainsi la minéralisation. Dans le but d'expliquer les mécanismes d'acquisition de la minéralisation, on fait recours à la modélisation géochimique. Elle a été effectuée par simulation à l'évaporation naturelle en utilisant le logiciel Phreeqci (Parkhurst & Appelo, 1999). Ce logiciel permet de calculer la spéciation aqueuse et les conditions d'équilibre thermodynamique des eaux par rapport aux principales phases minérales présentes dans l'aquifère. Le mode de réaction minérale (dissolution ou de précipitation) est limité par les indices de saturation pour chaque minéral (Deutsch, 1997). Le calcul de l'indice de saturation (IS) des minéraux dissous dans l'eau ont été menés en utilisant la loi de Debye & Hückel (1923), exprimée comme suit :

$$IS = \text{Log}\ \frac{PAI}{K}$$

Avec :

PAI : Produit d'activité des ions concernés ;

K : le produit de solubilité du minéral considéré.

Lorsque :

- ✓ **IS > 0,5** : l'échantillon est sursature vis-à-vis d'un minéral. Ce minéral aurait tendance à se précipiter ;
- ✓ **IS <-0,5** : l'échantillon est sous-saturé à l'égard d'un minéral. Cela signifie que le minéral à tendance à la dissolution ;
- ✓ **0,5 < IS < 0,5** : l'échantillon est à saturation (en équilibre). Cette fourchette de saturation tient en compte des éventuelles erreurs sur les mesures du pH qui se percute sur les calculs d'IS.

Les eaux souterraines du Zana sont globalement en équilibre de saturation par rapport au minéraux carbonatés (la calcite, la dolomite et l'aragonite) à l'exception de quelque points d'eaux qui sont légèrement sur saturées en dolomite durant les deux années 2013 et 2014. Si l'on admet que l'état d'équilibre se fait dans l'intervalle de - 0.5 à + 0.5, on peut dire que les trois minéraux ont atteint leur état d'équilibre et non pas celui de la sursaturation, ceci met en évidence une formation possible en bicarbonate de calcium et magnésium. Par contre, tous les échantillons sont sous saturés par rapport à aux minéraux évaporitique (l'anhydrite, le gypse et

la halite), tableau 6.3, 6.4, 6.5 et 6.6, favorisant ainsi le phénomène de dissolution de ces minéraux, Fig. 6.30. Ceci met peut être à l'origine d'une dissolution qui enrichit les eaux en SO_4^{2-}.

Tableau 6.3 : Indices de saturation des eaux souterraines de Zana (2013)

Point d'eau	SI Anhydrite	SI Aragonite	SI Calcite	SI Dolomite	SI Gypsum	SI Halite	p CO_2
P 47	-1,52	-0,28	-0,14	-0,07	-1,3	-6,64	-1,54
P 46	-1,49	-0,27	-0,12	-0,12	-1,27	-6,56	-1,54
P 93	-1,65	-0,34	-0,19	-0,22	-1,43	-7,14	-1,56
P 51	-1,69	-0,29	-0,15	-0,18	-1,47	-7,5	-1,53
P 54	-1,46	-0,24	-0,1	0,11	-1,24	-6,42	-1,53
P 45	-0,58	-0,03	0,11	0,38	-0,37	-5,89	-1,63
P 67	-0,34	0,12	0,26	0,6	-0,12	-5,76	-1,61
P 70	-0,86	0,04	0,18	0,52	-0,64	-6,03	-1,52
P 50	-1,14	-0,11	0,03	0,26	-0,92	-6,3	-1,59
P 82	-1,49	-0,31	-0,17	-0,12	-1,27	-6,31	-1,54
P 55	-0,37	-0,22	-0,08	0,14	-0,15	-6,07	-1,77
P 43	-0,63	-0,1	0,04	0,38	-0,41	-6	-1,71
P 3	-1,2	-0,26	-0,12	0,08	-0,98	-5,89	-1,57
P 57	-1,12	-0,01	0,13	0,51	-0,9	-5,82	-1,42
P 53	-1,29	-0,27	-0,13	0,04	-1,07	-6,07	-1,62
P 91	-1,3	-0,15	-0,01	0,32	-1,08	-6,21	-1,56
P 85	-1,06	-0,06	0,08	0,44	-0,84	-6,07	-1,52
P 76	-1,22	-0,17	-0,03	0,1	-1	-5,9	-1,57
P 44	-1,06	0,1	0,25	0,77	-0,84	-6,16	-1,4
P 73	-0,76	-0,1	0,05	0,37	-0,54	-5,95	-1,63
P 89	-1,57	-0,3	-0,16	-0,09	-1,35	-6,1	-1,59
P 49	-1,23	-0,36	-0,22	-0,15	-1,01	-5,86	-1,66
P 84	-1,45	0,32	0,47	1,22	-1,23	-5,61	-0,94
P 80	-1,08	-0,11	0,04	0,41	-0,86	-6,24	-1,54

P 75	-1,57	-0,22	-0,08	0,09	-1,35	-6,3	-1,59

Tableau 6.4 : Indices de saturation des eaux souterraines de Zana (2014)

Point d'eau	SI Anhydrite	SI Aragonite	SI Calcite	SI Dolomite	SI Gypsum	SI Halite	p CO_2
P 47	-1,53	-0,29	-0,14	-0,09	-1,31	-6,66	-1,54
P 46	-1,51	-0,28	-0,14	-0,14	-1,29	-6,58	-1,53
P 93	-1,66	-0,34	-0,2	-0,23	-1,44	-7,21	-1,57
P 51	-1,69	-0,3	-0,15	-0,2	-1,47	-7,57	-1,53
P 54	-1,47	-0,25	-0,11	0,1	-1,25	-6,47	-1,54
P 45	-0,59	-0,08	0,07	0,28	-0,37	-5,91	-1,67
P 67	-0,35	0,11	0,26	0,56	-0,13	-5,78	-1,61
P 70	-0,86	0,05	0,2	0,51	-0,64	-6,04	-1,5
P 50	-1,14	-0,13	0,01	0,23	-0,92	-6,29	-1,59
P 82	-1,48	-0,32	-0,17	-0,13	-1,26	-6,33	-1,54
P 55	-0,37	-0,23	-0,08	0,14	-0,15	-6,08	-1,78
P 43	-0,63	-0,12	0,03	0,34	-0,41	-6	-1,72
P 3	-1,21	-0,28	-0,14	0,05	-1	-5,89	-1,58
P 57	-1,11	0	0,14	0,52	-0,89	-5,83	-1,43
P 53	-1,29	-0,28	-0,14	0,01	-1,08	-6,08	-1,64
P 91	-1,32	-0,16	-0,02	0,33	-1,1	-6,22	-1,55
P 85	-1,06	-0,07	0,07	0,41	-0,84	-6,07	-1,53
P 76	-1,23	-0,18	-0,03	0,07	-1,01	-5,9	-1,57
P 44	-1,06	0,11	0,25	0,75	-0,84	-6,15	-1,4
P 73	-0,79	-0,1	0,05	0,37	-0,57	-5,95	-1,63
P 89	-1,63	-0,36	-0,22	-0,2	-1,41	-5,8	-1,6
P 49	-1,27	-0,38	-0,23	-0,18	-1,05	-5,86	-1,67
P 84	-1,5	0,31	0,45	1,22	-1,28	-5,63	-0,94
P 80	-1,12	-0,14	0	0,39	-0,9	-6,25	-1,56
P 75	-1,55	-0,23	-0,08	0,06	-1,33	-6,27	-1,6

Tableau 6.5 : Indices de saturation des eaux souterraines de Zana (2015)

Point d'eau	SI Anhydrite	SI Aragonite	SI Calcite	SI Dolomite	SI Gypsum	SI Halite	p CO_2
P55	-1,07	0,01	0,15	0,53	-0,85	-6,17	-1,52
P43	-1,61	-0,26	-0,12	-0,28	-1,4	-6,17	-1,65
P89	-1,38	-0,37	-0,22	-0,18	-1,16	-6,25	-1,73
P53	-1,05	-0,2	-0,06	0,08	-0,83	-6,14	-1,67
P45	-1,39	-0,28	-0,14	-0,03	-1,17	-6,15	-1,63
P46	-1,63	-0,52	-0,37	-0,59	-1,41	-6,27	-1,77
P57	-1,62	-0,48	-0,34	-0,59	-1,4	-6,6	-1,8
P76	-1,64	-0,22	-0,07	-0,19	-1,42	-6,22	-1,58
P3	-1,24	-0,37	-0,23	-0,2	-1,02	-6,27	-1,81
P82	-1,22	-0,18	-0,03	0,08	-1	-6,38	-1,65
P67	-1,45	-0,41	-0,27	-0,34	-1,23	-6,2	-1,73

P80	-1,45	-0,52	-0,38	-0,44	-1,24	-6,23	-1,78
P85	-1,08	-0,17	-0,03	0,3	-0,86	-6,05	-1,67
P84	-1,35	-0,33	-0,19	-0,22	-1,13	-6,02	-1,71
P50	-1,03	-0,25	-0,11	0,07	-0,81	-6,11	-1,74
P49	-1,12	-0,33	-0,18	-0,27	-0,9	-6,21	-1,84
P47	-1,62	-0,33	-0,18	-0,31	-1,4	-6,26	-1,67
P70	-1,33	-0,44	-0,3	-0,29	-1,11	-6,56	-1,77
P91	-1,26	-0,16	-0,01	0,07	-1,04	-6,19	-1,62
P93	-1,19	-0,27	-0,12	0,1	-0,97	-6,13	-1,66

Tableau 6.6 : Indices de saturation des eaux souterraines de Zana (2016)

Point d'eau	**SI Anhydrite**	**SI Aragonite**	**SI Calcite**	**SI Dolomite**	**SI Gypsum**	**SI Halite**	**p CO_2**
P55	-1,89	-0,12	0,02	0,1	-1,67	-6,76	-1,54
P43	-1,31	-0,07	0,07	0,25	-1,09	-5,99	-1,52
P89	-2,01	-0,28	-0,14	-0,18	-1,79	-6,68	-1,49
P53	-0,98	-0,03	0,12	0,62	-0,76	-5,42	-1,56
P45	-2,15	-0,31	-0,16	-0,28	-1,93	-7,58	-1,51
P46	-2,35	-0,29	-0,14	-0,29	-2,13	-7,85	-1,48
P57	-1,93	-0,43	-0,28	-0,17	-1,71	-6,13	-1,49
P76	-1,5	-0,34	-0,2	-0,27	-1,28	-6,07	-1,54
P3	-2	-0,31	-0,17	-0,29	-1,78	-6,44	-1,49
P82	-1,67	-0,25	-0,11	0	-1,45	-5,96	-1,51
P67	-1,78	-0,17	-0,03	-0,23	-1,56	-6,56	-1,56
P80	-2,3	-0,22	-0,08	-0,22	-2,08	-7,19	-1,47
P85	-1,94	-0,33	-0,18	-0,21	-1,72	-6,73	-1,49
P84	-2,01	-0,49	-0,35	-0,39	-1,79	-6,22	-1,46
P50	-1,75	-0,33	-0,19	-0,23	-1,53	-5,95	-1,51
P49	-2,4	-0,43	-0,28	-0,58	-2,18	-6,89	-1,55
P47	-2,21	-0,23	-0,09	-0,19	-1,99	-7,8	-1,46
P70	-2,44	-0,27	-0,12	-0,37	-2,22	-7,58	-1,51
P91	-1,58	-0,32	-0,18	-0,43	-1,36	-5,86	-1,55
P93	-1,55	-0,26	-0,12	-0,03	-1,33	-5,91	-1,56

Suivant la projection sur le diagramme ISC vs ISD, les points représentatifs des échantillons s'alignent autour d'une droite de régression, Fig. 6.31. Les eaux souterraines du Zana sont globalement équilibrées par rapport à la calcite et la dolomite. Selon l'indice de saturation en calcite ou en dolomite, les eaux de la région peuvent être réparties en quatre classes :

- ✓ classe A : les eaux sur saturées en dolomite sont équilibrées par rapport à la calcite. Cette classe on compte cinq points d'eaux durant les années 2013 et 2014, par la suite durant 2015 et 2016 un équilibre entre les deux minéraux s'est rétabli à l'exception d'un seul point qui est en sursaturation.

✓ classe B : les eaux sont équilibrées (-0,5 < IS < 0,5). Cette classe regroupe vingt points d'eau. La proximité de cette classe avec la droite ISC = ISD indique que ces eaux sont proches de la saturation primaire en carbonate.

✓ classe C : les eaux sont équilibrées par rapport à la calcite et sous saturées à la dolomite. Cette classe compte deux et un point d'eau durant les années 2015 et 2016.

Les valeurs faibles de la pression partielle en CO2 (pCO2) observées dans la plupart des échantillons sont caractérisées par des pH basique. Ceci les rend faiblement agressives et témoigne que nous somme devons une nappe semi-captive (1 p $CO_2 = 10^{-2}$ atm).

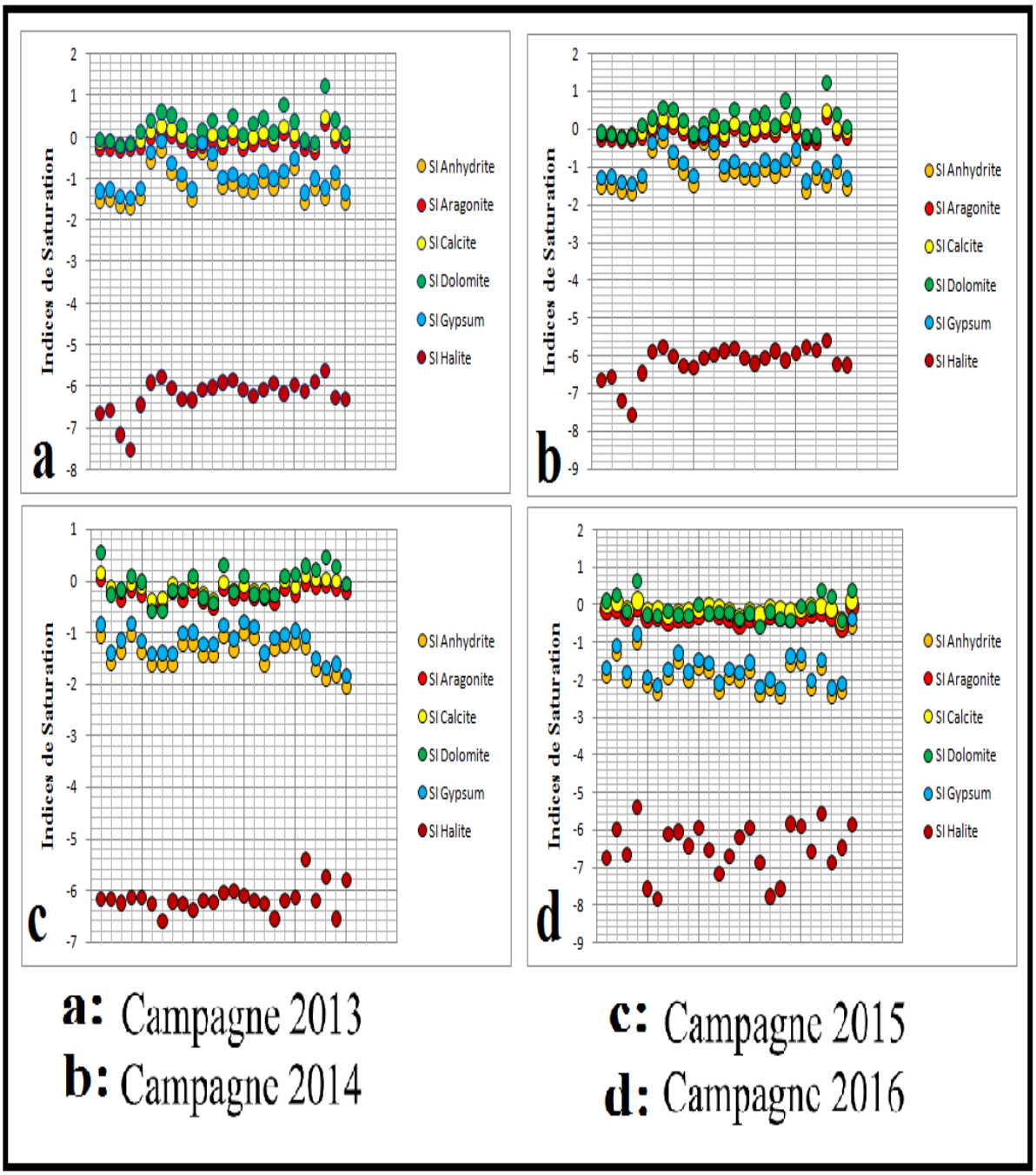
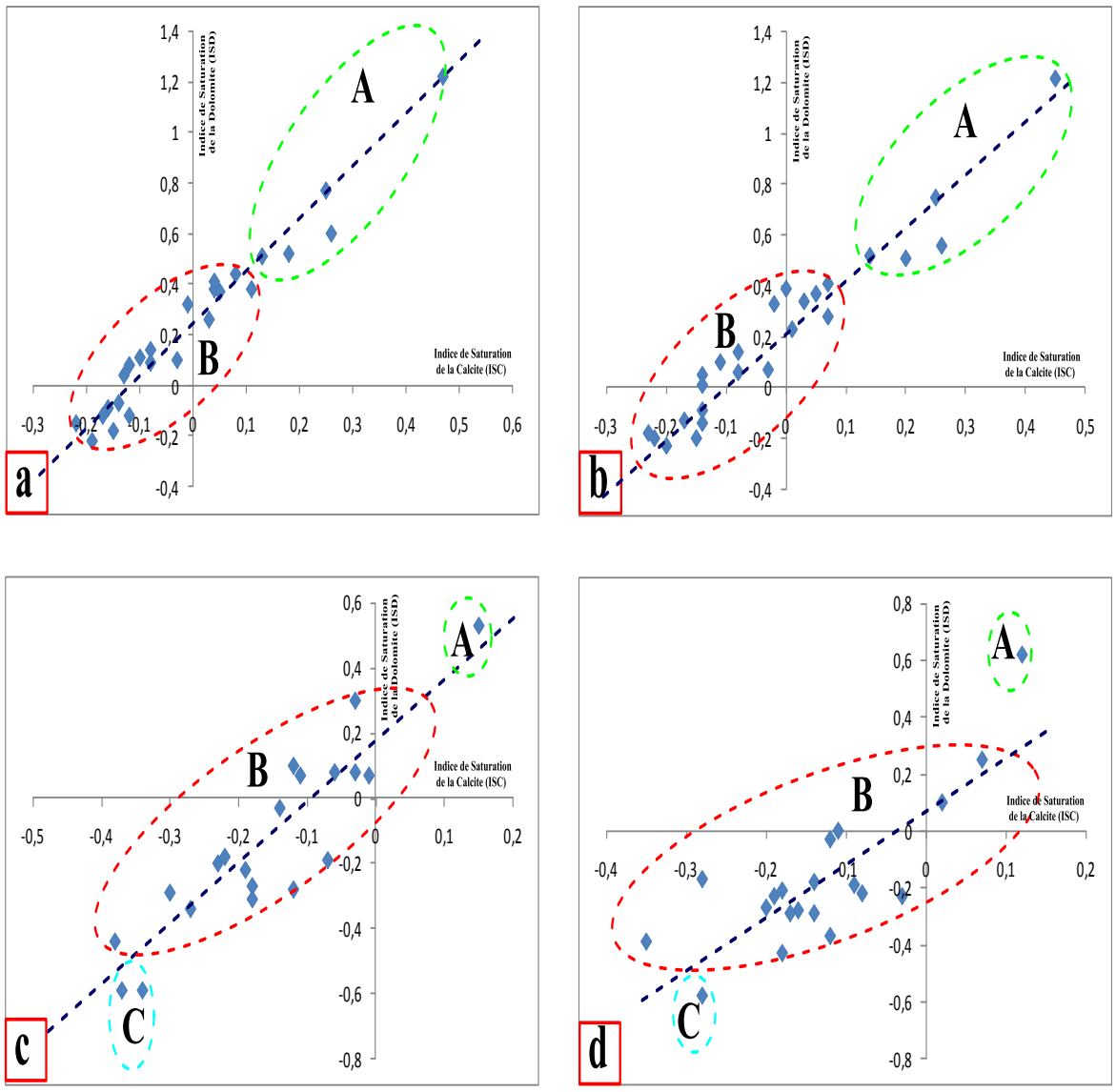


Fig. 6.30 : Evolution de l'indice de saturation



A: Eaux sur- saturées par rapport à la dolomite

B: Eaux équilibrées par rapport à la calcite et la dolomite

C: Eaux sous- saturées par rapport à la dolomite

a: Campagne 2013

b: Campagne 2014

c: Campagne 2015

d: Campagne 2016

Fig. 6.31 : Diagramme ISC vs ISD des eaux souterraines de la nappe superficielle de Zana

Le calcul de l'indice de saturation des différents minéraux dans l'eau indique que seuls les minéraux carbonatés ont tendance à atteindre l'équilibre, surtout sous la forme de dolomite et calcite. Par contre, les minéraux évaporitique, notamment la halite, sont toujours à l'état de sous-saturation, malgré les fortes concentrations qu'ils acquièrent durant leurs percolation au sous-sol.

VI.5.3 Analyse en composantes principales

Les données collectées de l'analyse chimique et mesures physico-chimiques des eaux ne permettent pas de faire directement l'interprétation des résultats. C'est pourquoi les analyses multidimensionnelles devront être utilisées. Elles permettent de tenir compte de l'ensemble des variables Physico-Chimiques qui caractérisent les eaux. L'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode statistique d'analyse de données qui consiste à rechercher les directions de l'espace qui représentent le mieux les corrélations entre n variables aléatoires. Le tableau analysé présente une grande hétérogénéité notamment au niveau des unités des variables (teneurs en méq/l, C.E en μs/cm,…) qu'il convient d'homogénéiser afin d'éviter les déformations lors de la projection sur les plans factoriels. C'est pourquoi, la première opération consiste à centrer et à réduire le tableau.

Centrer un tableau, consiste à calculer la moyenne pour chacune des variables qu'il faudrait soustraire à la valeur brute. La nouvelle valeur de la variable est soit positive soit négative. Cette opération permet de minimiser les déformations lors de la projection des vecteurs sur le plan factoriel. Réduire un tableau, consiste à calculer l'écart type pour chaque variable qu'il faudrait soustraire également à la valeur brute. La nouvelle valeur de la variable est soit positive soit négative. Cette opération est imposée par la nature même des variables qui ont des unités différentes, il convient, en effet d'éviter de faire apparaître des structures qui ne seraient dues qu'aux différences d'unités des variables.

Alors, l'utilisation de l'A.C.P permet une différenciation sur les particularités chimiques de l'eau, une détermination de leurs variations d'ensemble (facteurs) suivant les axes principaux et surtout une caractérisation des différents pôles d'acquisition de la minéralisation. Les variables, qui sont les analyses chimiques (éléments majeurs) et mesures physico-chimiques sont représentées géométriquement par un nuage de points centré. Le tableau des données traitées est constitué en lignes, par des individus ou unités statistiques sur lesquels sont mesurés des variables quantitatives disposées en colonnes. Si le tableau de données comporte ''*n*'' variables quantitatives, les individus peuvent être représentés dans un espace à ''*n*'' dimensions dans lequel la visualisation du nuage de points est impossible (Philippeau, 1986). Alors, le nuage est projeté avec un minimum d'erreur, dans un plan à une dimension. Ces plans sont caractérisés par deux axes factoriels orthogonaux qui expriment le maximum de la variance. Les plans sont définis de façon à présenter le maximum de variance. C'est le plan engendré par les axes F1 et F2 qui donne le maximum de l'information (plan principal). Ces deux axes pris deux à deux, définissent des plans factoriels orthogonaux entre eux et discriminent au mieux le nuage des individus par ordre croissant. Le premier axe F1 est celui qui exprime le plus fort pourcentage de la variance totale. Le second axe F2, indépendant du premier est celui qui

exprime la plus grande partie de la variance résiduelle et ainsi de suite (Mudry & Blavoux, 1986).

VI.5.3.1 Projection des variables

Les données physico-chimiques mesurées sur le terrain et les résultats des analyses des éléments majeurs ont été traités à l'aide du logiciel STATISTICA. L'analyse a été poussée jusqu'à trois facteurs et plus de 80% de la variance totale ont pu être exprimées. Le pourcentage de la variance, exprimée par le premier facteur (55.11%), montre qu'il existe une assez bonne structure dans l'échantillonnage réalisé. Cela prouve que de nombreux facteurs interviennent sur la structure des échantillons sont lié les uns aux autres. Ceci s'est répercuté sur la matrice de corrélation où on a eu une corrélation significative entre Mg^{2+}, Ca^{2+}, SO_4^{2-}, Cl^-, K^+, Na^+ et la conductivité. Il faut signaler que cent individus ont été introduits avec dix (10) variables. Le coefficient de corrélation critique tiré du tableau de Mangin (annexe II) est égal à 0,684 au seuil de 5% soit $r^2 = 0,42$. Ces corrélations font ressortir l'origine de la majorité des points par dissolution du gypse et de la dissolution du sel gemme à l'exception des HCO_3^- qui proviennent des formations carbonatés, tableau 6.7. L'analyse du plan factoriel F1-F2, Fig. 6.32 où plus de 70% de la variance totale sont exprimées, c'est-à-dire que près des 2/3 de l'information est extraite du tableau de données, l'analyse dans ce plan est donc très acceptable.

Le facteur F1 est fortement déterminé, négativement, par la C.E, Ca^{2+}, Mg^{2+}, TDS, SO_4^{2-} et d'une façon moindre par Na^+, K^+ et Cl^-. Ce facteur est déterminé négativement par le gypse et le sel gemme donc par les évaporites. Le facteur F2 est déterminé, négativement, par HCO_3^- c'est le facteur des formations carbonatées, Tableau 6.8.

Sur le plan factoriel F1-F3 ; Fig. 6.32, le facteur F3 est déterminé positivement par les nitrates qui témoignent de l'arrivée d'une pollution agricole ou un mélange d'eau profonde avec de l'eau de surface.

Tableau 6.7 : Matrice de corrélation des variables

	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO_4	HCO_3	NO_3	TDS	C. E
Ca	1.00									
Mg	**0.92**	1.00								
Na	0.41	0.35	1.00							
K	0.49	0.41	**0.71**	1.00						
Cl	**0.51**	**0.59**	**0.55**	**0.51**	1.00					
SO_4	**0.92**	**0.93**	0.37	0.44	0.40	1.00				
HCO_3	-0.16	-0.15	**0.59**	0.32	0.12	-0.20	1.00			
NO_3	0.11	0.23	0.24	0.18	0.40	0.15	0.26	1.00		
TDS	**0.88**	**0.82**	**0.74**	**0.67**	**0.69**	**0.81**	0.22	0.29	1.00	
C. E	**0.89**	**0.91**	**0.55**	**0.58**	**0.72**	**0.87**	-0.07	0.26	**0.91**	1.00

Tableau 6.8 : Corrélation facteurs-variables.

Désignation	Fact. 1	Fact. 2	Fact. 3
Ca	**-0.83**	0.50	-0.09
Mg	**-0.82**	0.50	0.10
Na	**-0.78**	-0.47	-0.23
K	**-0.74**	-0.22	-0.28
Cl	**-0.73**	-0.02	0.29
SO_4	**-0.79**	0.53	-0.05
HCO_3	-0.29	**-0.89**	-0.10
NO_3	-0.38	-0.28	**0.84**
C. E	**-0.98**	0.09	-0.06
TDS	**-0.81**	-0.52	-0.02

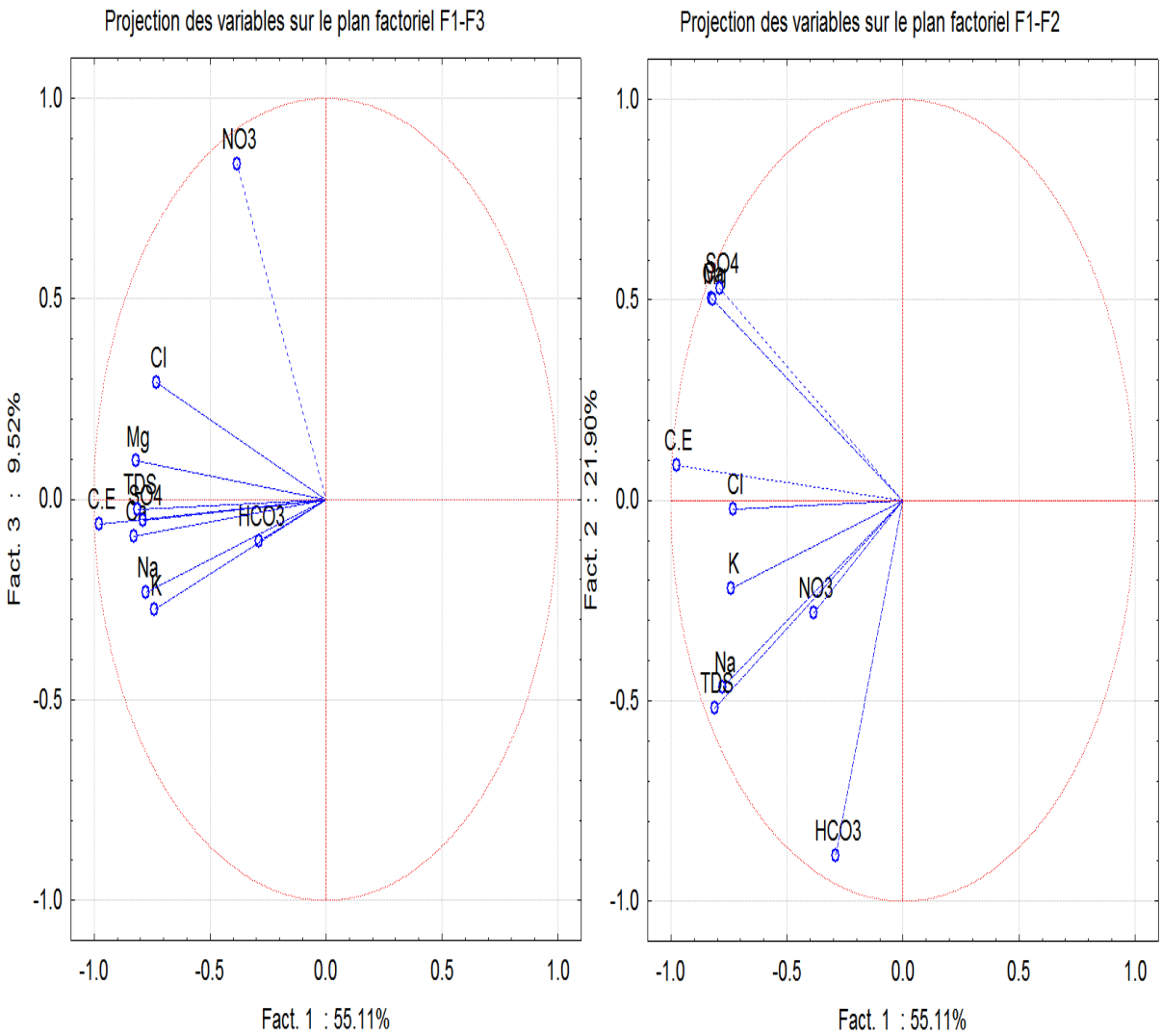


Fig. 6.32 : Cercle de corrélation, plan F1-F2 et F1-F3

VI.5.4 Analyse ascendante hiérarchique (CAH)

Il existe deux types d'analyse ascendante hiérarchique CAH : R et Q mode. L'avantage d'utiliser CAH est lié au fait qu'elle ne demande aucune connaissance préalable du nombre de groupes. Dans ce qui suit la CAH a été appliquée en utilisant la distance Euclidienne comme distance de mesure entre les échantillons et la méthode de Ward comme règle de liaison pour la classification des données hydrogéochimiques des eaux de la plaine de Zana. Le dendrogramme des dix paramètres physicochimiques (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}, Cl^{-}, HCO_3^{-}, SO_4^{2-}, NO_3^{-}, C. E et TDS) peut être divisé en trois groupes principaux, Figure 6.33 et dévoile que la teneur des sels dissouts et la conductivité peuvent êtres les éléments majeurs de distinction entre paramètres (Grp. 03). Le premier groupe Grp. 01 montre une étroite association entre Ca^{2+}, Mg^{2+}, SO_4^{2-} et la C. E et la TDS, ce qui traduit l'origine évaporitique de ces éléments et la participation majeure de ces éléments dans la minéralisation globale des eaux de la nappe superficielle de Zana. De même le groupe Grp. 01 montre une association lointaine entre K^{+} et Cl^{-} et les éléments du premier groupe, ce qui traduit l'origine probablement différente de ces deux éléments. Le deuxième groupe Grp. 02 montre la dissociation des nitrates des autres éléments chimiques présents dans l'eau souterraine, ce qui traduit l'origine anthropique de cet ion. Reste à signaler que ces analyses corroborent bien avec les résultats de l'analyse de la matrice de corrélation entre variables.

L'arbre des points d'eau a produit trois groupes majeurs, Figure 6.32 représentant le même faciès chimiques. Le premier groupe G1 montre une relation étroite entre les points 76, 73, 54, 70, 55, 57, 75 et 43. Ce groupe occupe la partie Nord et Nord-Est de la plaine (Djebel Azraouat, Djebel Guedmane et Djebel Merzeguene). Les eaux sont en contact avec les calcaires dolomitiques, caractérisé par les éléments Mg^{2+}, Cl^{-} et SO_4^{2-} . La TDS de ce groupe varie de 1350 à 6210 mg/l. Le deuxième montre une association étroite entre les points d'eau 91, 44, 53, 89 et 45. La TDS de ce groupe varie 560 à 3260 mg/l, caractérisé par Mg^{2+}, $SO4^{2+}$ et Cl^{-}. Ce groupe se localise au Nord-Ouest et caractérisé par des teneurs élevées en sulfates, magnésium et chlorure avec 13.03, 12.08 et 9.30 méq/l. ces teneurs sont attribuées aux apports latéraux du trias de Chouf Gherab.

Le troisième groupe G3 montre une association étroite entre les points d'eaux 51, 50, 85,80, 46, 67, 49, 3, 84, 82 et 46 avec une grande salinité (TDS varie de 360 à 13856 mg/l) caractérisé par Mg^{2+} et $SO4^{2-}$ (28.35 et 59.85 mg/l). Ce groupe est influencé par l'écoulement du nord vers le sud, ou l'eau s'enrichit d'avantage.

La chose qu'on peut tirer cette analyse est la succession logique des groupes suivant le sens d'écoulement. Cette succession (G1-G3 et G2-G3) permet la concentration des éléments

chimiques pendant leur parcourt dans l'aquifère. Cette succession peut être identique avec le schéma F1-F2, Figure 6.32.

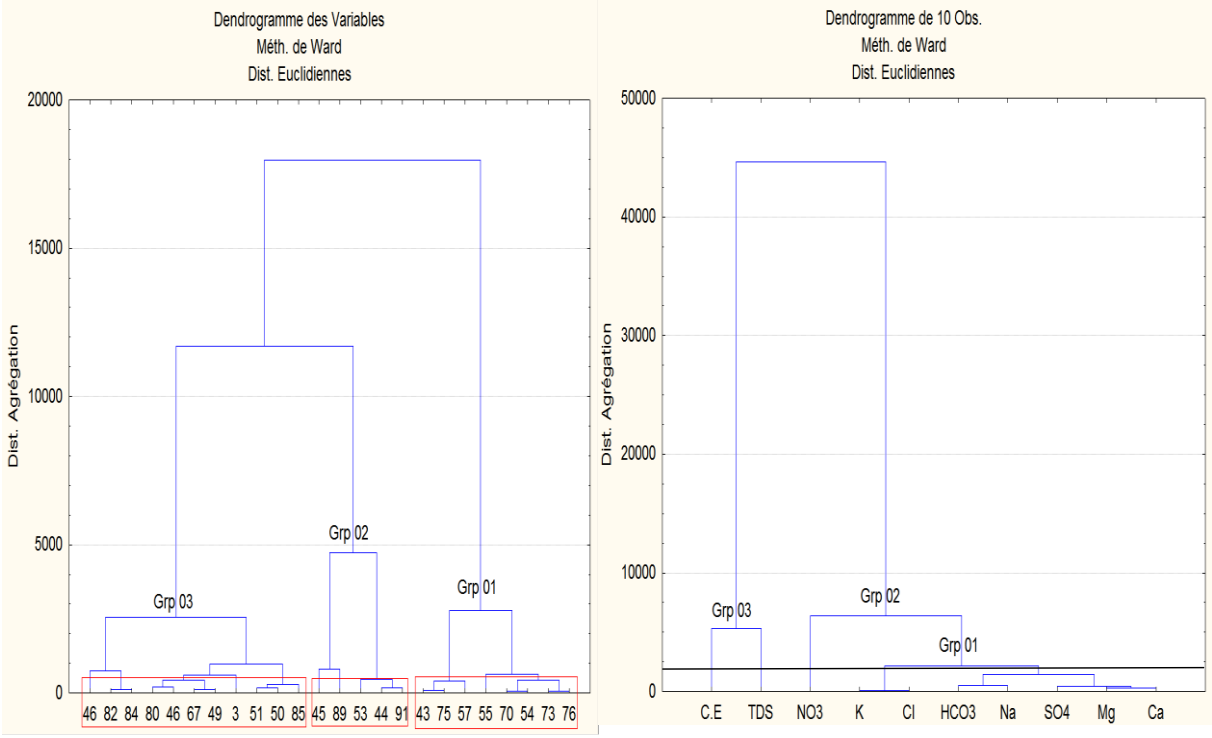


Fig. 6.33 : Dendrogramme des variables et observation des eaux souterraines de la nappe superficielle de Zana

VI.6 Aptitude de l'eau à l'irrigation

De toutes les activités humaines, l'irrigation est de loin la plus grande consommatrice d'eau, c'est pour cela qu'il est nécessaire d'avoir une ressource présentant des propriétés physico-chimiques adaptées aux plantes.

La plaine de Zana est une région à vocation agricole où sont pratiquées essentiellement les cultures céréalières et maraîchères. Les eaux d'irrigation présentent des teneurs élevées en certains éléments chimiques qui peuvent présenter un véritable danger, comme l'accumulation des sels dans le système racinaire qui perturbe la croissance de la plante et de changer la structure physique du sol par l'altération de sa perméabilité. Pour cela on va utiliser la classification de Richards(1954) et Wilcox (1948).

VI.6.1 Salinité

Selon R.S. Ayers et D.W. Westcot (1988), quand les eaux d'irrigation sont chargées en sels, ces derniers s'accumulent dans la zone racinaire après que la plante ait prélevé l'eau. Ces sels s'épaississent et limitent la disponibilité de l'eau dans le sol pour la culture. Les directives pour l'interprétation de la qualité d'une eau d'irrigation montre que :

- ✓ Si la salinité exprimée par la conductivité en µs/cm est inférieure à 700, il n'y aucune restriction pour l'irrigation ;
- ✓ Si la conductivité variée entre 700 et 3000 µs/cm, la restriction pour l'irrigation est légère à moyenne ;
- ✓ Si elle est supérieure à 3000µs/cm, la restriction pour l'irrigation est forte.

En se référant aux résultats, nous remarquons que les eaux souterraines de la plaine de Zana représentent une restriction légère à modérée pendant les quatre années avec et une restriction forte comprenant 15 à 19% des points d'eau. En cas d'irrigation avec ces eaux chargées en sels, on peut s'attendre à des chutes de rendements (R.S. Ayers et D.W. Westcot, 1988) de certaines cultures pratiquées au niveau de la plaine, tableau 6.9.

Tableau 6.9 : Baisse de rendements de certaines cultures en relation avec la salinité de l'eau d'irrigation (R.S. Ayers et D.W. Westcot)

Cultures	Conductivité électrique (µs/cm)			
Orge	5300	6700	8700	12000
Blé	4000	4900	6400	8700
Chute de rendement en %	0	10	25	50

Il est recommandé dans ce cas d'utiliser ces eaux pour des cultures tolérantes en sels, de pratiquer des cultures sur les sols légers (sableux), de faire des apports d'eau supplémentaires et faire le drainage.

VI.6.2 Eaux peu salées

Les eaux peu salées dont la conductivité électriques est inférieure à 200 µs/cm ont une forte tendance à mobiliser rapidement le calcium du sol ce qui entraine la dispersion des particules plus et l'obturation des espaces poreux, (R.S. Ayers et D.W. Westcot, 1988).

La valeur minimale de conductivité des eaux de la plaine de Zana est supérieure à 200µs/cm. Donc ce problème ne se pose pas.

VI.6.3 Eaux à forte teneur en sodium

L'abondance du sodium dans l'eau d'irrigation peut provoquer également la dispersion et une destruction de la structure du sol, si la teneur en sodium est au moins trois fois supérieure

à celle du calcium (R.S. Ayers et D.W. Westcot, 1988), dans telles conditions, il deviennent extrêmement difficile de satisfaire les besoins en eau de la culture, le risque est déterminé à partir de la valeur du sodium absorbable (Sodium Absorption Ration) (S.A.R). Pour une même conductivité, le risqué est d'autant plus grand que le coefficient est plus élevé. Le S.A.R est donné par la formule ci-dessous, il est utilisé en combinaison avec la conductivité électrique de l'eau selon la formule de Richards (1954) :

$$SAR = \frac{Na^{+}}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}}$$ Où tous les éléments sont exprimés en méq/l.

Pour classer les eaux d'irrigation, il est nécessaire d'évaluer la concentration en ions Na^{+} dans le sol. Cet élément remplace dans le complexe absorbent le calcium ou le magnésium.

La figure 6.34 et 6.35, récapitule les résultats obtenus après interprétation des diagrammes de Richards.

VI.6.4 Classification de l'eau d'irrigation selon le diagramme de Wilcox (1948)

Le développement des plantes est très faible ou nul dans les sols saturé en sodium, c'est pourquoi on utilise une classification basée sur la conductivité électrique et la teneur du sodium dans l'eau, qui est définie par la relation suivante.

$$\%Na^{+} = \left[\frac{rNa^{+}}{r\left(Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^{+} + K^{+}\right)}\right] * 100$$

Cette classification définie cinq classes d'eau :

1 : excellente, 2 : bonne, 3 : admissible, 4 : médiocre, 5 : mauvaise.

On ce qui nous concerne les diagrammes de Wilcox, Fig.6.36 et 6.37, nous remarquons quatre classes :

Selon les calculs 20 à 40 % des points d'eau pendant les quatre années d'observation sont médiocres et 48 à 56 % des points d'eau sont de mauvaise qualité. Tandis que 4 à 28 % de ces points sont de bonne qualité et seulement 04 % sont excellente

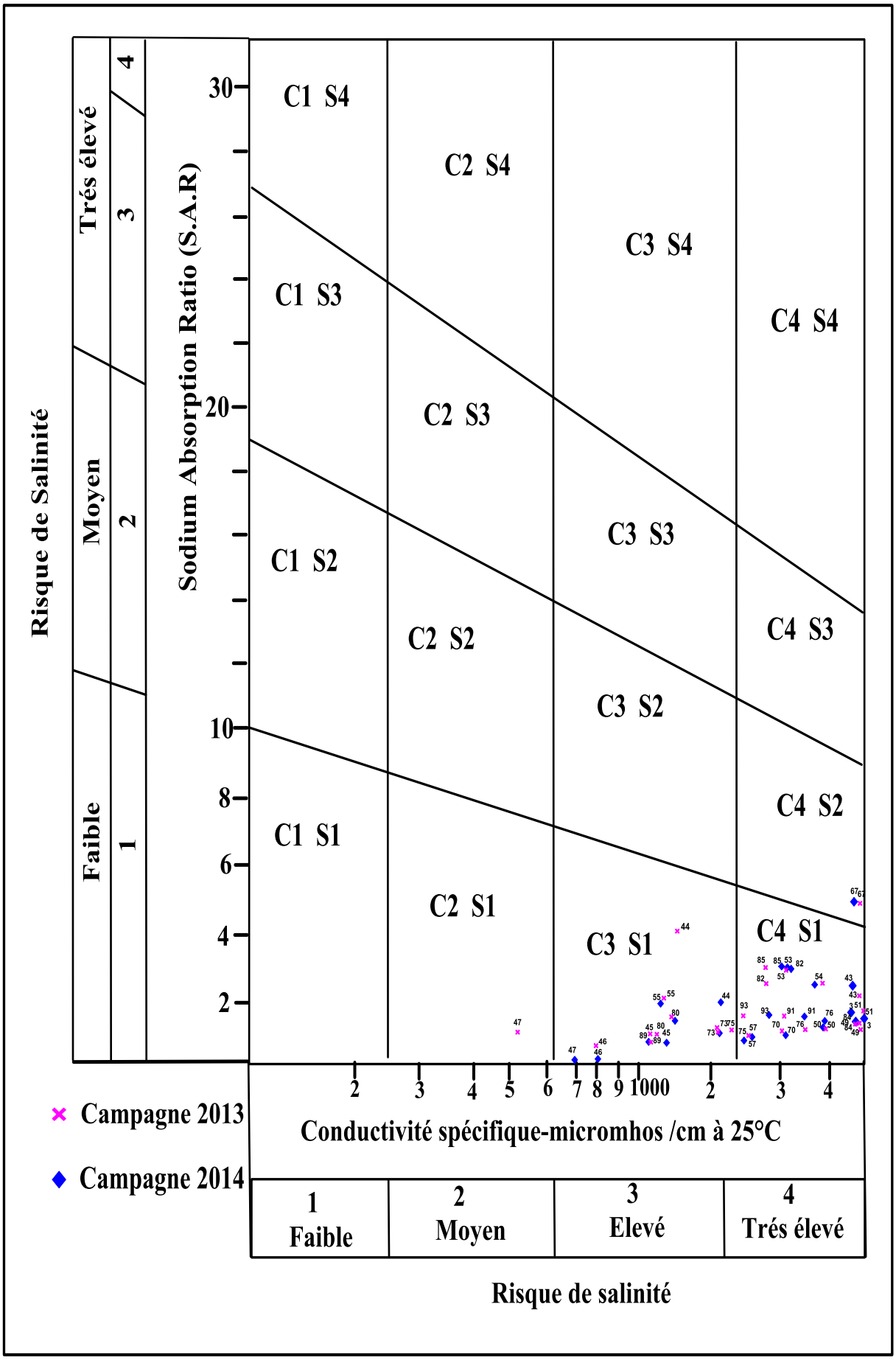


Fig. 6.34 : Diagramme du S.A.R

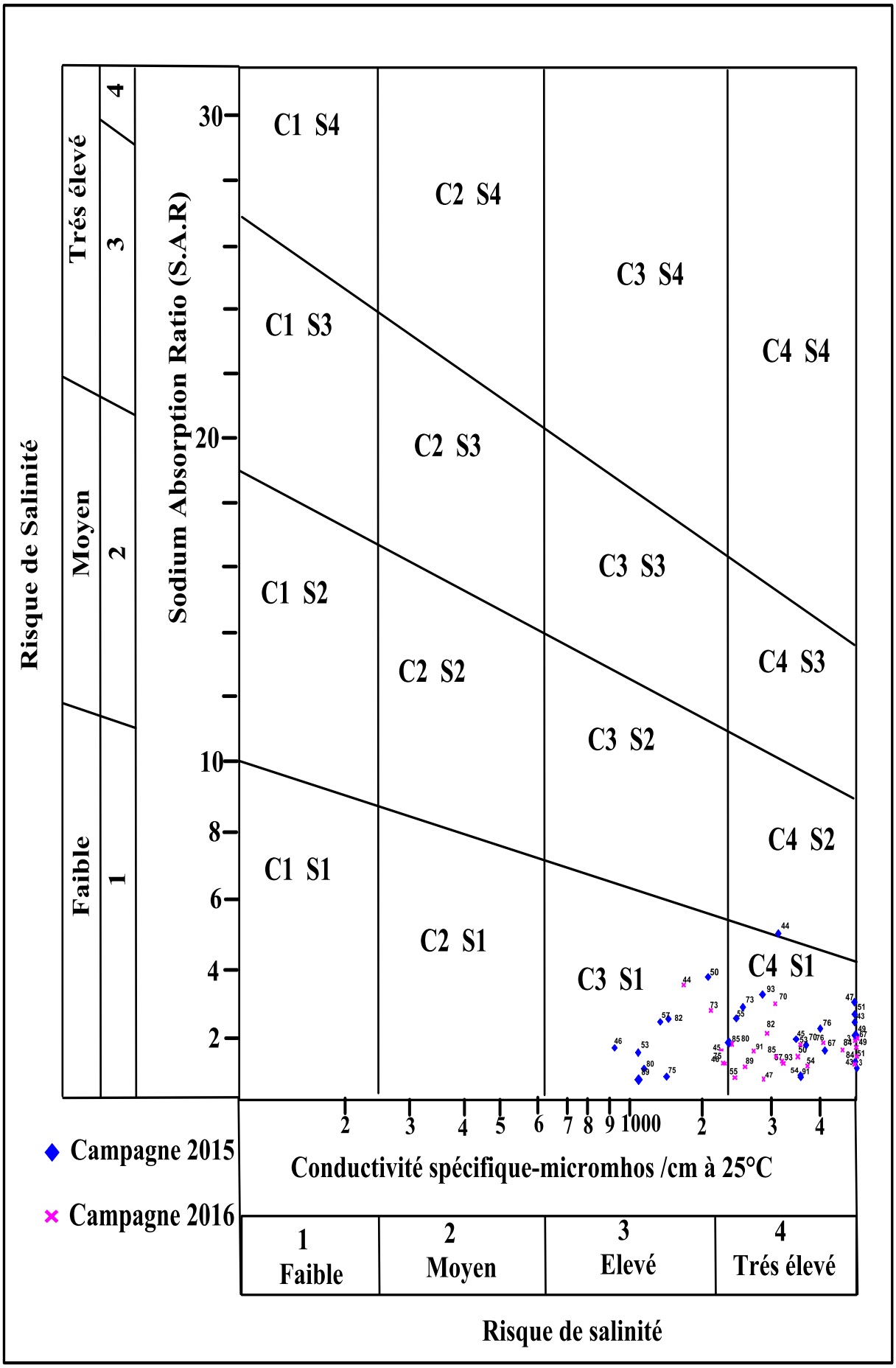


Fig. 6.35 : Diagramme du S.A.R

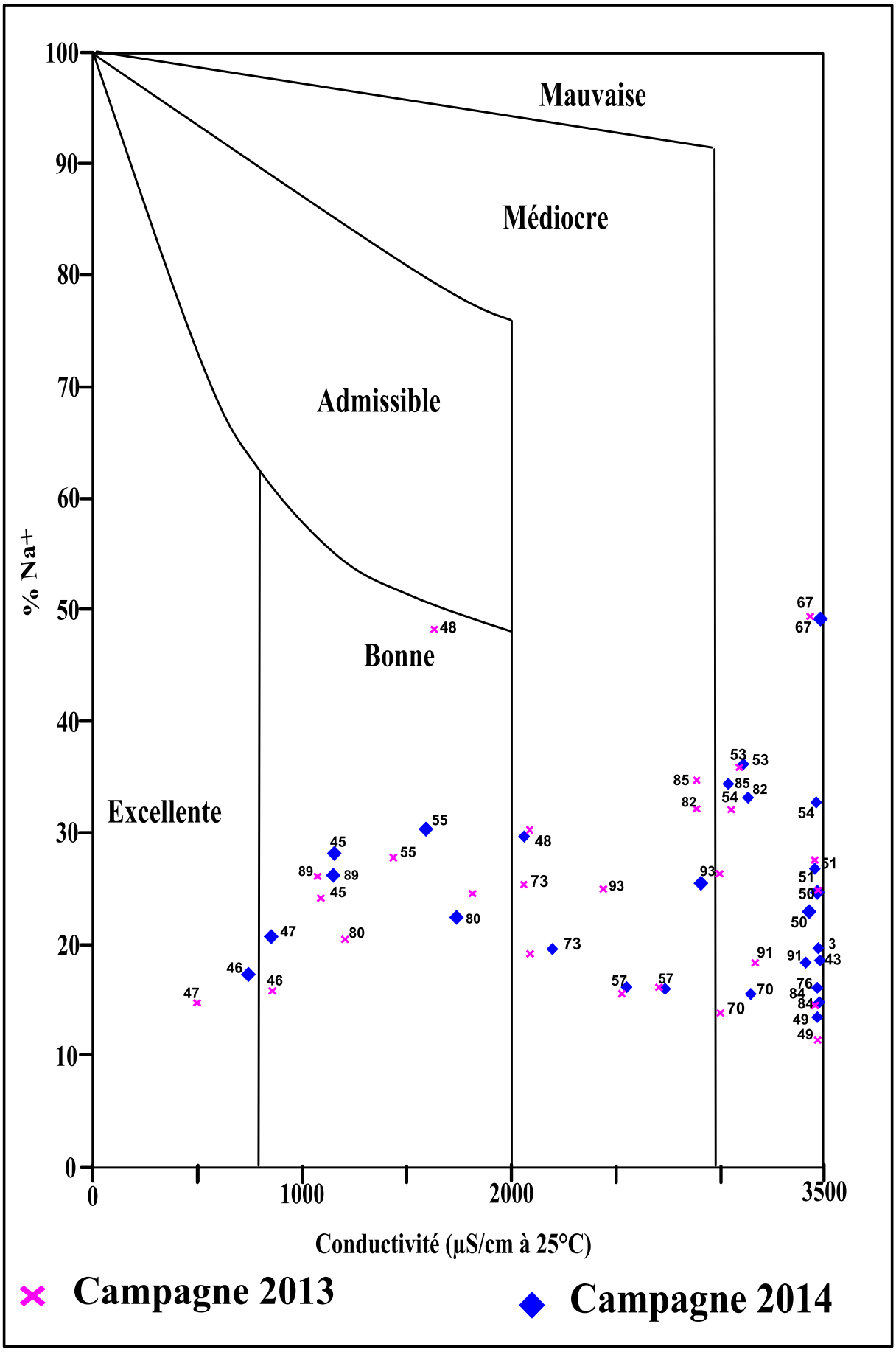


Fig. 6.36 : Diagramme de Wilcox

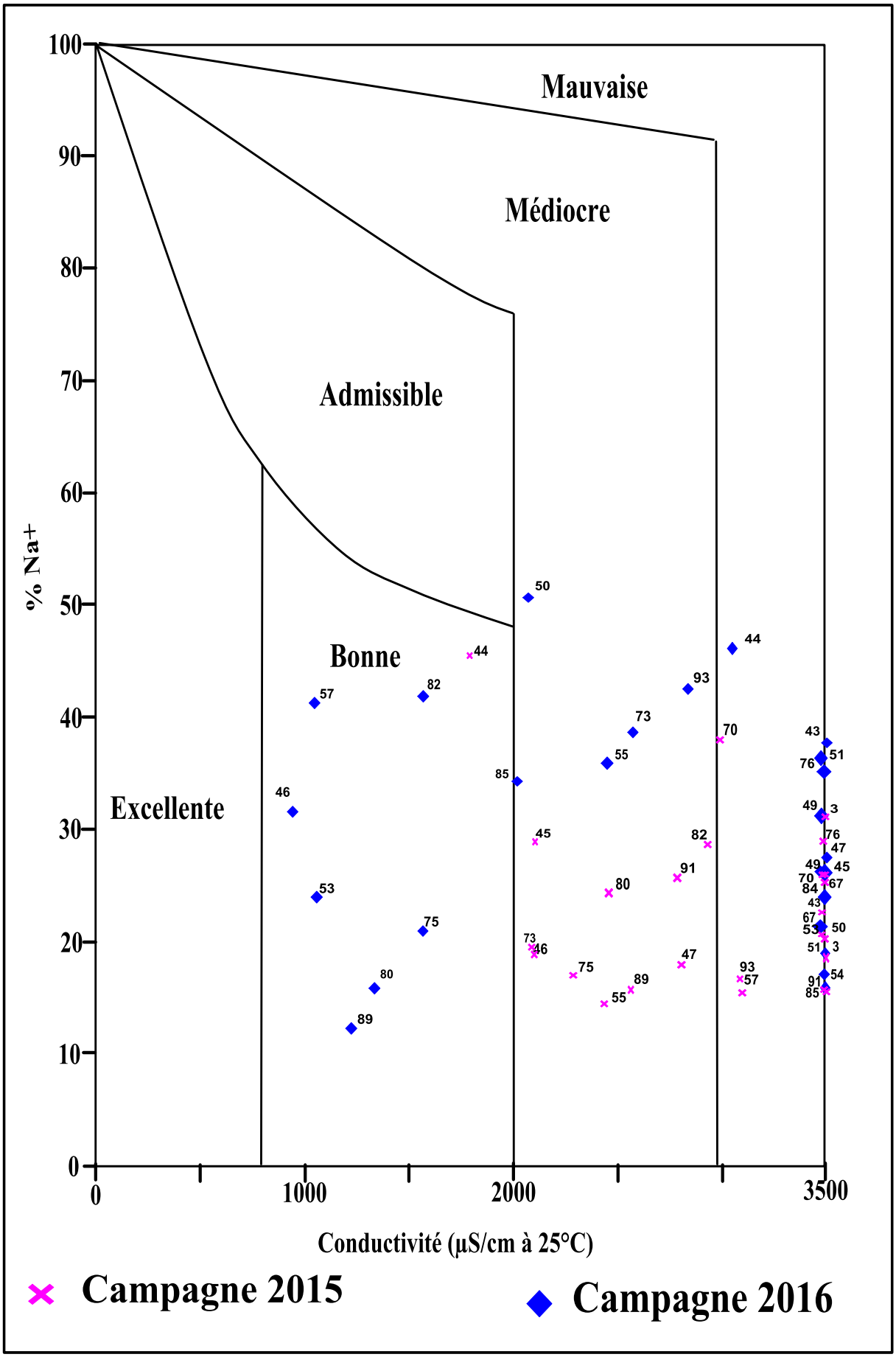


Fig. 6.37 : Diagramme de Wilcox

VI.7 Conclusion

L'étude hydrochimique a permis de mettre en évidence que l'évolution de la conductivité des eaux souterraines de la plaine de Zana se fait globalement suivant le sens d'écoulement convergent. L'augmentation de la conductivité est expliquée en grande partie par la minéralisation. Les eaux souterraines de la zone d'étude présentent des faciès variables. Cette variation est surtout liée à la nature lithologique des formations traversées. La détermination graphique des faciès à partir des diagrammes de Piper a permis de distinguer trois types de faciès hydro-chimiques, dont les plus dominants sont : le sulfaté-magnésien, chloruré-magnésien et le sulfaté-bicarbonaté rencontré dans la partie Ouest de la plaine. Les résultats d'analyses des échantillons d'eau prélevés sur les quatre ans (2013, 2014, 2015 et 2016), nous a permis de confirmer la variabilité saisonnière de la minéralisation des eaux souterraines. Le comportement des éléments hydro chimiques (Ca, Mg, Na, Cl, SO_4, HCO_3) caractérisant les formations géologiques principales de la région et a montré la dominance des ions gypsifère (SO_4, Mg et Ca) sur les ions carbonatés (Ca, HCO_3). Les eaux de la plaine sont plus sulfatées que chlorurés à cause du lessivage des terrains riches en sulfates et au engrais à base de sulfates utilisés pour l'agriculture. L'élément Ca proviennent à la fois des formations carbonatés et évaporitique.

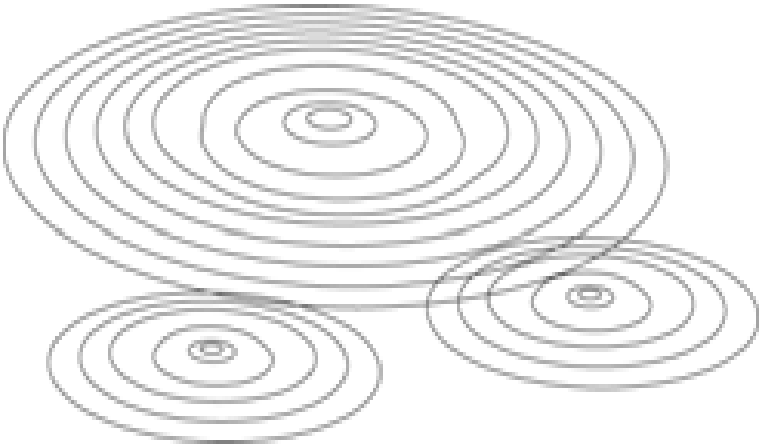
Pour le traitement statique des données des analyses chimiques par l'A.C.P, nous Soulignons, que le premier axe F1 est défini par la minéralisation du fait que la plus part des éléments se regroupent autour de cet axe. Le deuxième facteur F2 est déterminé par les bicarbonates qui ont une origine carbonatée. Dans l'axe F3, les éléments exprimant la pollution sont bien représentés, indiquant ainsi l'influence anthropique

Enfin, la modélisation géochimique envisagée par simulation à l'évaporation naturelle en utilisant le logiciel Phreeqci. , nous a permis de calculer la spéciation aqueuse et les conditions d'équilibre thermodynamique des eaux par rapport aux principales phases minérales présentes dans l'aquifère. Le calcul de l'indice de saturation (IS) des minéraux dissous dans l'eau a été mené en utilisant la loi de Debye & Hückel. L'étude des indices de saturation de certains minéraux a révélé que les eaux souterraines de la plaine de Zana sont sous saturées vis-à-vis des minéraux évaporitique et le plus souvent en équilibre vis-à-vis des minéraux carbonatés.

Et en dernier nous concluons que la majorité des points d'eau de la plaine de Zana sont acceptables et peuvent être exploitées pour l'irrigation.

Chapitre 7 :

Pollution des eaux



Chapitre VII : Pollution des eaux

Introduction

De tous temps, les activités humaines, libèrent dans l'environnement des substances et des produits potentiellement dangereux, appelés contaminants ou polluants. Ces derniers sont rejetés vers les exutoires naturels (mer, chott, oued, dépression). Leur présence, notamment dans les eaux souterraines, pose un problème qualitatif des ressources hydriques.

La région de Zana a connu durant ces dernières années une expansion galopante de l'activité agricole, surtout après la mise en œuvre du Programme National de Développement de l'Agriculture en (PNDA) en 2000 et celui du Fonds National pour la Régulation du Développement Agricole (FNRDA) en 2001. Le résultat direct de cette tendance expansionniste, d'une part, l'augmentation de la demande en eau et a d'autre part exposé les ressources hydriques à différentes pollutions résultant de l'activité agricole principalement. Par absence des ressources en eaux superficielles, la région de Zana connaît une dépendance totale des eaux souterraines. Ces réserves constituent l'unique ressource d'alimentation en eau potable et d'irrigation. Cette forte demande conjuguée aux pratiques agricoles mal contrôlées serait à l'origine de la dégradation qualitative des eaux souterraines.

Le présent travail vise à cartographier la vulnérabilité de la nappe superficielle de Zana à ces contaminants et leur répartition spatio-temporelle, car le contrôle de cette contamination passe par une bonne connaissance des sources de contaminants et des conditions hydrodynamiques et lithologiques de la nappe, qui influent sur leur mobilité.

VII.1 Principales sources de pollution dans la plaine de zana

Les sources de pollution se multiplient et se diversifient en fonction du progrés socio-économique enregistré ces dernières années, ajoutant à cela la croissance démographique galopante . Zana est l'une des strates agricoles de la wilaya de Batna. Depuis le début des années 2000, la région a connu un accroissement de la population rurale et surtout une intensification des cultures. De ce fait, les besoins en eau augmente de plus en plus. Les ressources en eau mobilisable dans la région se trouvent de plus en plus menacées par divers types de pollution. Ajoutant à cela la topographie plane et fermée de la région,la dominance de sols lourds (argiles, limons, etc.) et les difficultés d'exutoire qui dévoile un endoreisme prononcé (présence de Chott saboun et des Merjas Zana et Taga à l'intérieur de la plaine).

Durant nos sorties sur terrain, on a pu dresser un inventaire des différentes potentielles sources de pollution :

- ✓ L'élevage intensif des animaux (ovins, bovins et volailles) ;
- ✓ Les cultures maraîchère et céréalière, qui utilisent d'importantes quantités de

fertilisants sous forme de fumier, à raison de 2.5 q/ha/an en moyenne, ou d'engrais azotés à raison de 33 unités d'azote (01 q/ha d'ammonium nitrate 33.5%) ;

- ✓ Les rejets d'assainissement dans la nature sans aucun traitement (Chef-lieu de commune, Zones éparses Zana-Ouled –Sbaâ et Theniet Sedra).
- ✓ La nature du réseau d'assainissement qui est à 80 % en ciment comprimé, ce qui permet des fuites de l'effluent à travers la canalisation, surtout après la consommation de la durée de vie du matériau (dépassé).

Ce constat nous a permis de choisir un réseau d'une vingtaine de forages pour le suivi de l'évolution de la pollution azotée. Quatre campagnes de prélèvements ont été menées à raison d'une par an, lors des basses eaux. Ces différentes campagnes ont permis le dosage des NO_3^-, NO_2^- et NH_4^+.

V II.1.1 Pollution urbaine

L'usages quotidien de l'eau par les ménages et les services dégrade sa qualité, ces rejets domestiques sont composés de matières azotées de nature essentiellement organique (protéines, urée,…..), matières organiques et minérales, phosphates et détergents et de nombreux micro-organismes pathogènes (bactéries, virus, algues).

V II.1.1.1 Evaluation de la population

La population est un paramètre déterminant et stratégique dans toute étude, elle devra ainsi faire l'objet d'analyses détaillées dans ses différents aspects, c'est ainsi que les prévisions doivent porter sur le nombre de la population future.

L'évaluation de la population à l'horizon de calcul considéré est calculée par la formule des intérêts composés :

$$P_f = P_0 \times \left(1 + \frac{\tau}{100}\right)^n$$

Où:

P_f: population future à l'horizon considéré (habitant);

P_0: population de référence (habitant);

ζ: taux d'accroissement égal à 1.44 % (PDAU) ;

n: nombre d'année séparant l'année de référence et de l'horizon considéré.

La population future calculée est reportée dans le tableau 7.1.

Tableau 7.1 : Evaluation de la population

Population /Année	**2008**	**2018**	**2038**
n	0	10	20
Chef-lieu	1963	2265	2613
Zana-Ouled-Sbaâ	1959	2260	2607
Theniet Sedra	618	713	823
Zones éparses	6024	6950	8018
Commune	10564	12188	14061

V II.1.1.2 Estimation des besoins en eau potable

Les calculs des débits des eaux usées portent essentiellement sur l'estimation des quantités des rejets liquides provenant des zones urbaines et des équipements avec la perspective de développement de 20 ans, cette estimation est évaluée à partir des fortes consommations d'eau journalières de l'année sur une période de 24h. Il est important de signaler que l'évolution de l'habitat, du mode de vie et du confort sanitaire des usagers contribuent dans l'augmentation, dans le temps, de la consommation d'eau potable par conséquent l'augmentation du flux d'eaux usées rejetées. Les besoins domestiques, à l'horizon de calcul, seront évalués avec une dotation égale à 150 l/j/hab. (subdivision des ressources hydriques de la daïra de Seriana), quant à ceux des divers équipements ils seront pris égaux à 10 % de la consommation moyenne journalière domestique de chaque zone.

Tableau 7.2 : Besoins domestiques moyens

Année	**Population (habitant)**	**Dotation (l/j/hab)**	**Consommation domestique (l/s)**	**Consommation équipements (l/s)**	**Total (l/s)**
2018	6950	150	12.07	1.21	13.28
2038	14061		24.41	2.44	26.85

V II.1.1.3 Calcul de l'effluent au rejet des eaux usées

L'effluent au rejet des eaux usées est égal à 80% du débit du moyen d'eau potable :

$$E_{eu} = 0{,}8 \times Q_m$$

Où :

E_{eu}: effluent au rejet des eaux usées (l/s) ;

Q_m: débit moyen d'eau potable (l/s).

Tableau 7.3 : Effluent au rejet des eaux usées

Désignation	Q_{moy} (l/s)	E_{eu} (l/s)	E_{eu} (m^3/j)
2018	13.28	10.62	917.6
2038	26.85	21.48	1855.9

Ainsi le volume total de l'effluent rejeté à l'exutoire annuellement sera de l'ordre de 334.9 x 10^3 m^3 l'an 2018 et il sera de l'ordre de 677.4 x 10^3 m^3 l'an 2038.

VII.1.2 Pollution agricole

Son influence apparaît par l'effet de l'utilisation intensive des produits fertilisants (chimiques ou organiques) sur les terrains perméables, ces derniers permettant une infiltration directe de la forme azotée (nitrate) vers la nappe. Le taux des nitrates devient constant à partir d'un certain seuil,le surplus des nitrates va etre entrainé par les pluies ou l'eau d'irrigation et pollue par conséquent les eaux souterraines (Soudi et all.,1999). Le bassin d'alimentation de la nappe superficielle de Zana qui couvre 21395 ha, Fig. 7.1, dont seulement 7.25 % ha en superficie destiné à autre usage (urbanisation, routes, servitude, etc.), est occupé principalement par des grandes étendues destinées à l'agricuture.

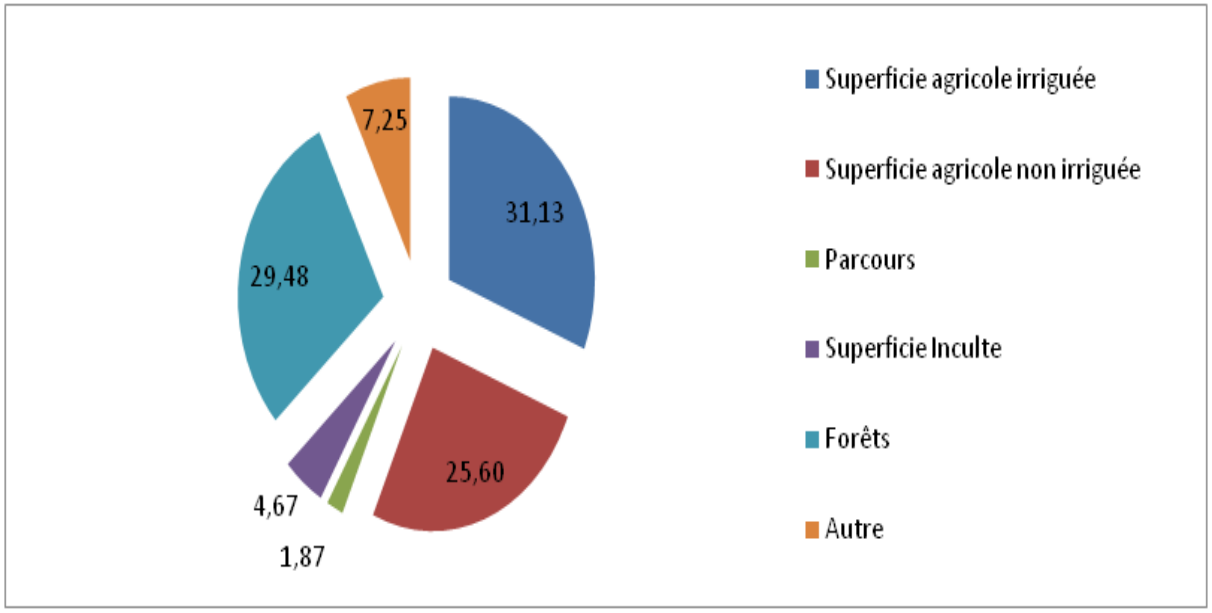


Fig. 7.1 : Distribution générale des terres de la commune de Zana (Direction des services agricoles de la wilaya de Batna, 2015)

VII.2 Impact de l'activité agricole dans la région de Zana

La plaine de Zana est à vocation agricole, la superficie agricole totale est estimée à 13537 ha, Tableau 7.5. La superficie agricole utile (SAU) est de 12 137 ha, dont 6660 ha sont irrigués, représentant 54.87% du SAU (Direction des services agricoles de la wilaya de Batna). L'activité agricole est pratiquée en extension dans la région soit en regroupement soit individuellement. Sept exploitations agricoles collectives (EAC) occupent une surface de 1500 hectares et 331exploitations agricole individuelle (EAI) occupent 2744 hectares et 319 fellahs exploitent 8293 hectares. Seul la taille des exploitations est dominées par de petites superficies de un à deux hectares. Cette évolution de l'activité agricole se fait de nos jours dans le cadre d'un double processus de diminution du nombre des exploitants et augmentation de la superficie par exploitation, photos N° 05 et 06.

La rotation biennale céréales-jachère, production des légumes et élevage de bovins, ovins, caprins et volailles la sont les pratiques culturelles dominantes dans la région. La prédominance des cultures céréalières est clairement visible, Tableau 7.6, pratiquée largement au niveau de la plaine et occupe 5700 hectares irriguées par des forages captant la nappe superficielle.

Tableau 7.4: Répartition générale des terres de la commune de Zana

Désignation	**Superficie agricole totale**				**Forêts**
	SAU		**Parcours**	**Terres incultes**	
	Irriguées	**Non irriguées**			
Superficie en hectares	6660	5477	400	1000	6307

Les cultures fourragère se classe en deuxième et occupe 3100 hectares. Le secteur du maraîchage couvre une superficie de 840 hectares et les vergers ont commencé à se développer. 461 hectares ont été utilisés pour ce type de culture sur tout le territoire de la plaine, Tableau 7.5.

Tableau 7.5 : Occupation des sols pour l'année 2015-2016

Cultures	**Céréalicultures**	**Fourrages**	**Maraîchages**	**arboriculture**	**Parcours**	**Sperficie au repos**
Superficie (Ha)	5700	3100	840	461	400	2036
%	45.47	24.73	6.70	3.68	3.19	16.24

La production ovine, bovine, caprine et avicole bien pratiquée et bien développée dans cette région est un soutien à l'agriculture et un revenu moyen pour les résidents, Tableau 7.6. On dénombre 09 batteries pour la volaille avec une capacité totale de 46500 unités, 42 batteries de poules d'une capacité totale de 210400 unités, 02 hangars pour l'élevage total de dindes 7000 unités, 3600 vaches, 32000 moutons et 11500 chèvres. Ces activités agricoles sont rendue possible grâce à au potentiels du sous-sol qui offrent des possibilités aquifères intéressantes. Nous avons identifié dans la plaine une trentaine de forages qui captent l'aquifères jurassique et crétacé profonds (étatique et privé) et une centaine de forages qui captent l'aquifère superficiel, dont une partie peu profond (puits traditionnels) sont aujourd'hui à secs en raison de la sécheresse sévère de ces dernières années et au sur pompage.

Tableau 7.6 : Répartition de l'élevage année 2015-2016

Elevage	**Bovins**		**Ovins**	**Caprins**	**Avicole**			**Apiculture**
	Viande	**Lait**			**Viandes**	**Oeufs**	**Dindes**	
Têtes	3600	1433	32000	11500	46500	210400	7000	100 ruches

En général, les gains céréaliers moyens dans la région de Zana, en agriculture irriguée, tournaient autour de 6 à 10 q / ha (DSA, Batna). Les besoins d'intensification de la production conduisent à rechercher des moyens d'augmenter ces gains. Ainsi, l'introduction des entrants (engrais minéraux, produits chimiques et pesticides) et mécanisation de la culture apparaissent. L'observation sur le terrain révèle que la voie technique de la culture céréalière pratiquée n'est pas du tout maîtrisée. Afin d'avoir un lit de la meilleure graine possible, les sols sont intensivement travaillé à une humidité inappropriée (trop sec) qui augmente la fragmentation et l'érosion du sol qui sera soumis à l'érosion hydrique (sillons parallèles à la pente) avec les premières pluies, d'où la naissance d'une migration des entrants ajoutés à l'exutoire (Chott et Merdja) et lixiviation par percolation au sous-sol.

VII.2.1 Production des nutriments

L'azote est l'élément nutritif le plus déficient dans les systèmes de production agricole. La croissance de la plupart des cultures exige l'apport d'azote, particulièrement les variétés modernes à haut rendement (Gouaidia, 2008). Une large part de l'azote apporté est rejetée dans l'environnement et s'accumule dans l'air, dans l'eau et dans les sols. Les pertes azotées sont aujourd'hui devenues une des menaces environnementales les plus préoccupantes à l'échelle planétaire (Godinot, 2014). Les principales sources d'azote sont : Les amendements organiques comme le fumier, lisier et purin, soit les engrais azotés. Ces derniers donnent

naissance aux nitrates par les processus de nitrification qui correspondent à l'oxydation biologique de l'azote ammoniacal en azote nitrique NO_3^-. Les étapes successives de la nitrification se font par l'intermédiaire de deux familles de bactéries principalement présentes dans les sols : *Nitrosomonas* pour la nitritation (transformation de NH_4^+en NO_2^-) et *Nitrobacter* pour la nitratation (transformation de NO_2^- en NO_3^-).

Dans la plaine de Zana, les teneurs en nitrates au niveau de la nappe superficielle du Mio-Plio-Quaternaire sont moyennement élevées et dépassent les normes de l'OMS dans plusieurs points d'eaux, Tableau 7.8. De même pour les nitrites et l'ammonium, certains points d'eaux dépassent largement les valeurs guides émises par l'OMS de l'ordre respectivement 0.3 mg/l et 0.41 mg/l.

Tableau 7.7 : Teneurs en composés azotés dans les eaux souterraines de Zana

Variable	Unité	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	C.V
NO_3	mg/l	0.2	108	21.64	26.25	1.21
NH_4		0	5.16	0.461	1.217	2.64
NO_2		0	0.275	0.0072	0.025	3.47

VII.2.1.1 Elevage

L'élevage des animaux (ovins, bovins et volailles) produit environ 9075 kgN/an d'azote, d'après une estimation utilisant un Coefficient d'azote, Tableau 7.9. A l'exception des produits d'élevage avicole, la majeur partie des déjections animales est utilisée après compostage (fumiers) comme fertilisants.

Tableau 7.8 : Estimation de l'apport annuel en azote à partir de l'élevage.

Cheptel	Effectif	Coef. azote Kg/an	Azote produit q/an
Vaches laitières	3600	85	3060
Bovins viandes	1433	72	1031.76
Ovins	32000	10	3200
Caprins	11500	10	1150
Volailles	263900	0.24	633.36
Total d'azote			**9075.12**

VII.2.1.2 Activité agricole

En raison de l'insuffisance de la fixation biologique de l'azote, l'agriculteur doit suppléer la fourniture du sol par des apports de fertilisants minéraux ou organiques. Le recours à des engrais azotés est actuellement une pratique courante. Les doses recommandées d'utilisation de ces engrais azotés et de fumiers vont dépondre de la pluviométrie, de la nature du sol et du type de culture. Le potentiel irrigable global de la région de Zana est de 6660 hectares.

VII.2.1.3 Engrais azotés

Pour améliorer et intensifier quantitativement et qualitativement les cultures, les agriculteurs font recours à l'enrichissement de leurs sols aléatoirement, notamment en engrais azotés de synthèse sans aucune étude, ni contrôle des services concernés par ce volet. Les doses d'engrais recommandées dépendent de la pluviosité, du type de culture et de la nature pédologique du sol. L'utilisation de ces composés chimiques n'est pas sans conséquences sur l'environnement. Depuis les années 60, la pollution par les nitrates est presque exclusivement imputée à l'activité agricole. L'épandage des cultures fournit des doses massives d'engrais azotés. Les nitrates étant très solubles dans l'eau, s'ils ne sont pas consommés par les plantes, s'infiltrent facilement dans le sol et atteignent progressivement les eaux souterraines, Hallouche B. (2017). Dans la région de Zana, les minéraux entrants couramment utilisés pour les grains sont en moyenne 33 unités d'azote (01 q/ha de nitrate d'ammonium 33,5%). En moyenne les doses en engrais azotés appliquées varient de 100 à 300 kg/ha, et ce selon la culture utilisée et la nature du sol. Les engrais les plus utilisés sont : l'ammonitrate (à 33,5% d'azote) et sulfate d'ammoniaque (à 21% d'azote) et parfois : TSP 15/16%, PK 0.20.25, NPK 15.15.15 (N 15%, P_2O_5 15%, K_2O_5 15%)et DAP (phosphate d'amoniaque). Lors de l'irrigation, ces engrais se décomposent pour fournir aux plantes les nutriments nécessaires pour le développement des cultures, suivant les réactions suivantes :

Ammonitrate (teneur en azote est 33.5%) :$NH_4NO_3 \rightarrow NH_4^+ + NO_3^-$

Sulfates d'ammoniaque (teneur en azote est 21%): $(NH_4)_2SO_4 \rightarrow 2NH_4^+ + SO_4^{2-}$

VII.2.1.4 Fumier

Les fumiers sont utilisés comme amendements par épandage sur le sol pour améliorer sa structure et composition. Ils augmentent l'activité biologique et contribuent à maintenir l'humus du sol. Dans les cultures maraîchères, le fumier est souvent utilisé comme fertilisant.

L'élevage dans la région de Zana est précaire, ce qui ne permet pas souvent une production importante de fumier. Une grande partie du cheptel, surtout ovin et caprin, passe

la nuit dans des enclos temporaires (zriba), où la récupération du fumier est très rare, voire parfois impossible. Cet état de fait laisse le fumier sur place et à chaque phénomène pluvieux le fumier est transporté avec les eaux de ruissellement, ce qui explique certaines teneurs élevées en nitrates dans les puits près des enclos. Compte tenu du manque de données se référant à la fertilisation par l'utilisation des engrais organiques dans la région de Zana. On s'est adressé aux agriculteurs pratiquant les différentes cultures (céréalières et maraîchères) pour estimer la quantité de fumier utilisée. La quantité de fumiers utilisés serait de l'ordre de 250 kg/ha.

VII.3 Effluents urbains

Chott Saboun, Merdja Zana et les dépressions naturelles existantes dans la région sont les principaux exutoires d'eau drainant les eaux de pluie et les eaux usées domestiques. Les rejets urbains y déversent une charge polluante considérable et néfaste, photos N° 07 et 08. Ces exutoires naturels possèdent des échanges hydrauliques permanents avec la nappe superficielle, ce qui permet la migration des contaminants vers cette dernière. On extrapolant les concentrations moyennes des nitrates dans les eaux usées des différents rejets de la région à partir des travaux d'études touchant une région limitrophe, aux même conditions topographiques et socio-économiques (Etude de faisabilité de procédés épuratoires naturels « le lagunage »), on a pu estimer l'apport annuel de nitrates qui se déverse dans la plaine, tableau 7.9.

Tableau 7.9 : Estimation de l'apport annuel en nitrates provenant des eaux usées domestiques

Population /Année	**Ouvrage de rejet**	**C_{moy} de NO_3^- (g/l)**	**Population**	**Dotation (l/j/hab)**	**Volume effluent (10^3 m^3/an)**	**Apport annuel de NO_3^- (10^3 g)**
Chef-lieu	Bassin de décantation	12.8	2265	150	124.01	1.59
Ouled-Sbaâ	Fosse septique	12.8	2260		123.74	1.58
Theniet Sedra	Bassin de décantation	12.1	713		39.04	0.47
Zones éparses	Fosses individuelles	10.0	6950		380.51	3.81
Total Commune					667.30	7.45

Tous les ouvrages de rejets érigés à la fin des collecteurs principaux d'assainissement dans la région sont défaillants et ne joue aucun rôle d'épuration primaire. Or les rejets d'effluents urbains, qui se déversent dans la plaine sans subir aucun traitement, sont chargés de matières azotées de nature essentiellement organique (protéines, urée,…..), matières organiques et

minérales, phosphates et détergents et de nombreux micro-organismes pathogènes (bactéries, virus, algues). Ces charges nuisibles produisent des nitrates suivant un processus de transformation naturel. Cette transformation se fait selon les processus décrits par B. Nicolardot et al (2000), Fig.7.2

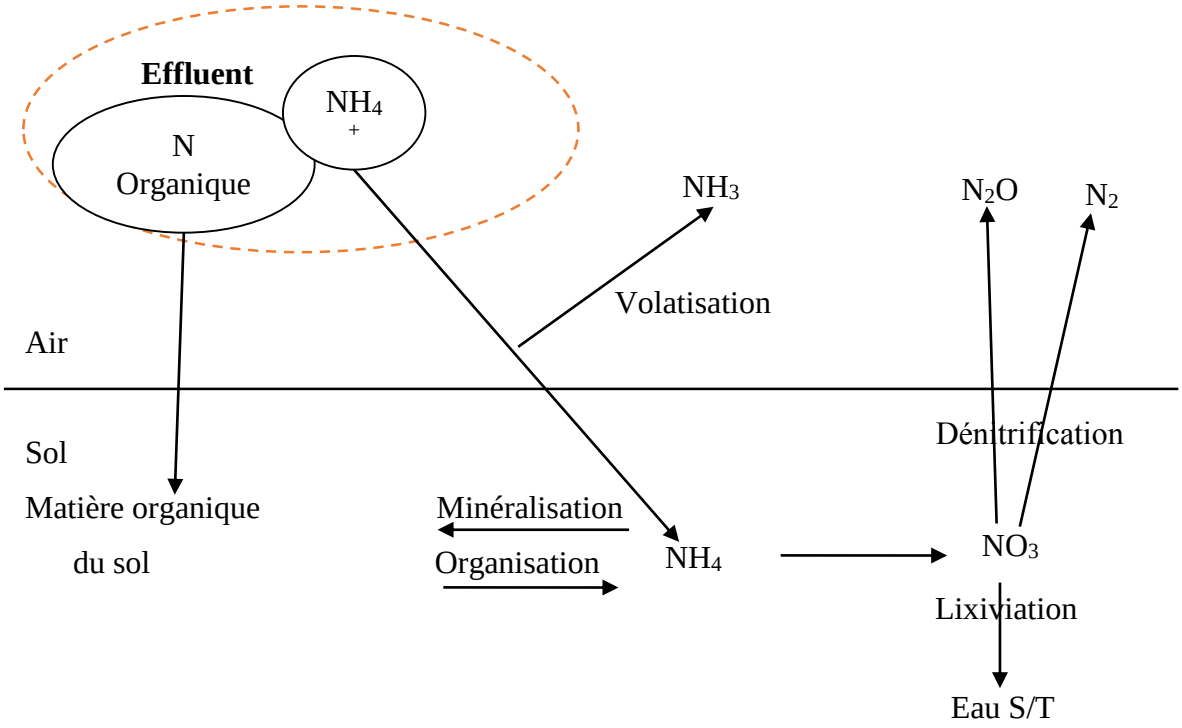


*Fig. 7.2 : Principaux Processus de transformation des formes d'azote contenu dans les effluents et déchets (*B. Nicolardot et al, 2000)

VII.4 Etude de l'évolution de teneurs des nitrates :

En absence de pollution, les eaux souterraines présentent des teneurs en nitrates très faibles (de l'ordre du mg/l) ; les nitrates peuvent avoir plusieurs origines. L'accroissement de l'élevage, intensification des cultures, les rejets domestiques et industriels et les précipitations atmosphériques augmentent davantage le taux des nitrates dans les aquifères. De ce fait, la présence des nitrates dans les eaux souterraines provient non seulement des sources ponctuelles, mais de sources diffuses.

L'azote est un des principaux éléments de la matière vivante dans laquelle il se trouve associé à des molécules organiques plus ou moins élaborées. Dans les eaux, l'azote peut être présent, soit sous la forme de composés organiques, soit sous des formes minérales plus simple : ion ammonium (NH_4^+), nitrites (NO_2^-), nitrates (NO_3^-), ce dernier qui est un ion stable peut se transformer sous des conditions physico-chimiques ou biochimiques favorables en ion nitrite (NO_2^-), les concentrations élevées des nitrates dans les eaux souterraines est néfaste pour la

santé humaine et déconseillée pour l'utilisation de ces eaux à des fins alimentaires. En effet, les nitrates constituent le premier maillon d'une chaine de transformation biologique et chimique qui aboutit à la formation de composés toxiques dans l'organisme.

La flore bactérienne présente dans la cavité buccale et d'un pH plutôt neutre compris entre 6,4 et 8 sont favorable à la transformation des nitrates ingérés en nitrates instables dans le tube digestif.

Les nitrites ont un effet toxique sur l'organisme humain, il transforme l'hémoglobine présente dans nos globules rouges en molécule non fonctionnelle : la méthémoglobinémie se traduit par des difficultés respiratoires et des vertiges. Lorsque plus de 5% de l'hémoglobine se transforment en méthémoglobine chez l'enfant, une cyanose peut être observée et si la conversion dépasse 50 %, la mort est possible (Pratt et Jury, 1984).

Dans l'estomac, les nitrates peuvent réagir avec des amines secondaires et tertiaires apportées par notre alimentation et former les nitrosamines ayant un pouvoir cancérogène (Zilliox, 1990). La pollution nitrique présente un danger réel et illustre le processus de la contamination de la chaîne biologique, Fig. 7.3, (Fristsh et saint Blanqua, 1985).

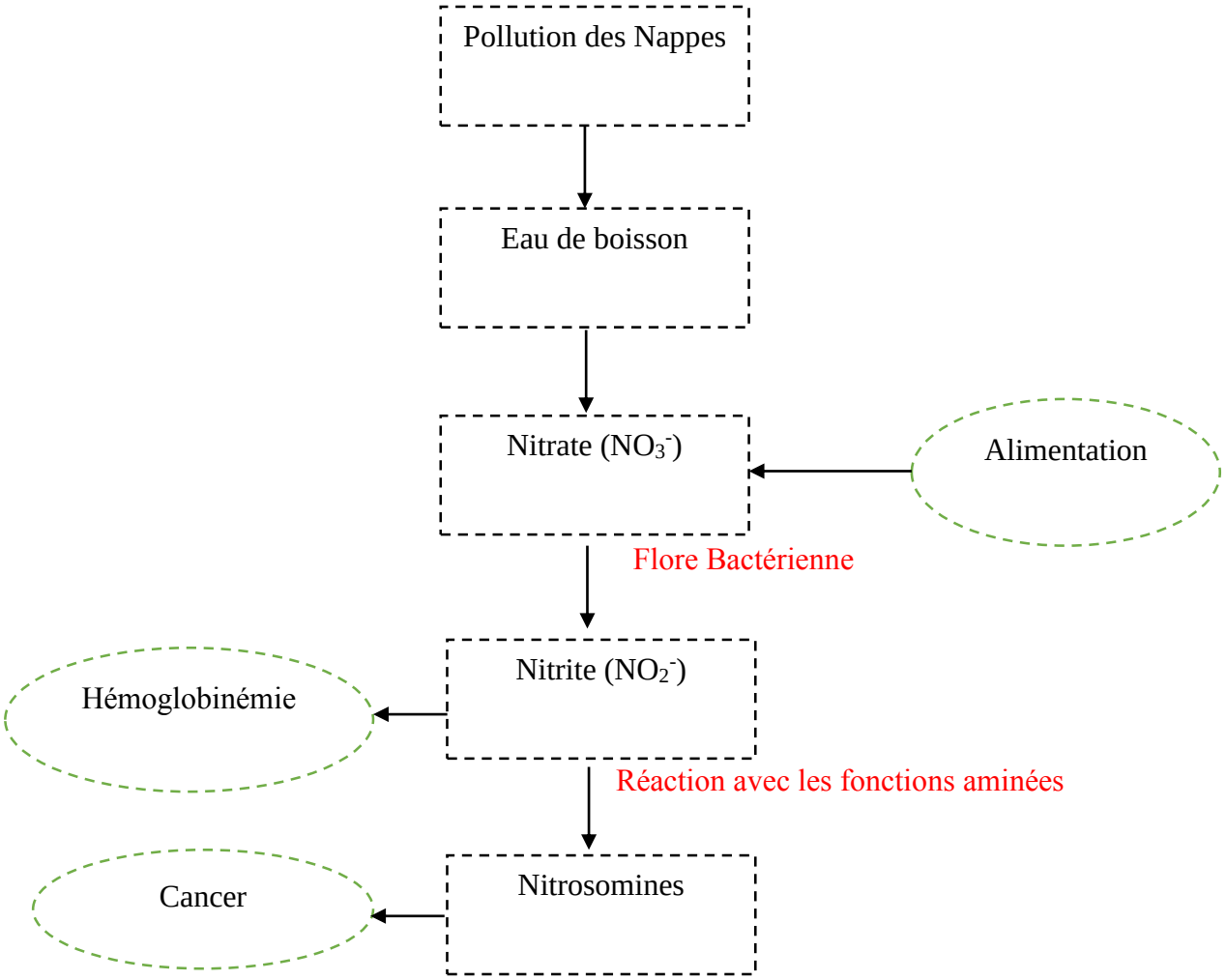


Fig. 7.3 : Chaine de transformation des Nitrates dans l'organisme (Zilliox, 1990)

Pour améliorer quantitativement et qualitativement les rendements de cultures, l'agriculture moderne utilise des doses d'engrais élevées, en particulier, les engrais azotés. A partir d'un certain seuil naturel, le taux des nitrates devient constant et le surplus va être entrainé par les eaux de pluies ou d'irrigation en profondeur, par conséquent, les eaux souterraines s'enrichissent d'avantage par cet élément et seront polluées par les nitrates. Les pertes des nitrates par lixiviation se caractérisant par deux principaux facteurs. Le premier se heurte à la présence effective de nitrates avant la période hivernale, provenant soit, d'un excès de bilan mal contrôlé, soit d'une minéralisation d'automne. Le deuxième est lié à la texture et la profondeur du sol (Remy, 1974). Les pertes par voie hydrique sont les plus fréquentes dans les sols agricoles, elles concernent essentiellement la forme nitrique dissoute dans la solution du sol.

Autres sources de nitrates, que la minéralisation de l'azote organique qui s'accumule dans le sol, c'est la fixation d'azote atmosphérique par les bactéries libres dans le sol (asymbiotique) ou par les légumineuses vivant en symbiose avec la rhizobiumas (bactéries fixatrices d'azote) qui peuvent fixer entre 50 à 200 kgN/ha/an (Belan, 1979).

Par ailleurs, la pollution atmosphérique, les effluents industriels et urbains et surtout l'apport d'engrais (fumures azotées minérales et organiques) et la déjection des animaux d'élevage constituent des apports considérables qui excédent la quantité globale utilisée par les plantes pour leur croissance. La fraction non utilisée par la plante est recyclée en azote gazeux par des bactéries dénitrifiâtes, mais la majeure partie de cet excès pénètre dans les sols par lessivage et atteint la nappe superficielle, voir même la nappe profonde. A l'état naturel, les concentrations en nitrates dans les eaux souterraines sont faibles. On admet généralement qu'une teneur supérieure à 10 mg/l traduit un apport anthropique (Blum et *al*. 2002).

La répartition des teneurs en nitrates dans la plaine de Zana à vocation agro-pastorale est liée aux facteurs polluants signalés précédemment, et en particulier à l'activité agricole et à la nature lithologique des couche. Les teneurs en nitrates présentent de fortes variations. Les variations vont de 0,2 mg/l à 108 mg/l, Tableau 7.8. La cartographie des concentrations, Fig. 7.4 montre que les zones de dépression et d'accumulation de eaux souterraines et de surface, qui se trouve au centre de la plaine, sont beaucoup plus exposée à la pollution, car les ions nitrates lixiviés avec les eaux de surface ou souterraines convergent rapidement et on y enregistre des teneurs dépassant 50 mg/l. Au contraire, les teneurs enregistrées sont faibles et ne dépassent pas 20 mg/l aux bordures de la nappe. L'interprétation de la figure 7.4 montre que les ions nitrates évoluent de la même manière pendant toute la période d'observation. Cependant, on peut dire que l'année 2016, les teneurs enregistrées sont plus élevées et plus répondu sur la plaine, ce qui explique que la région commence à enregistrée un état alarmant

du phénomène de pollution par les nitrates. Les teneurs des nitrites et ammonium progressent de la même manière que les nitrates et témoignes de l'intensité des phénomènes du processus de transformation des formes de l'azote, Fig. 7.5 et 7.6.

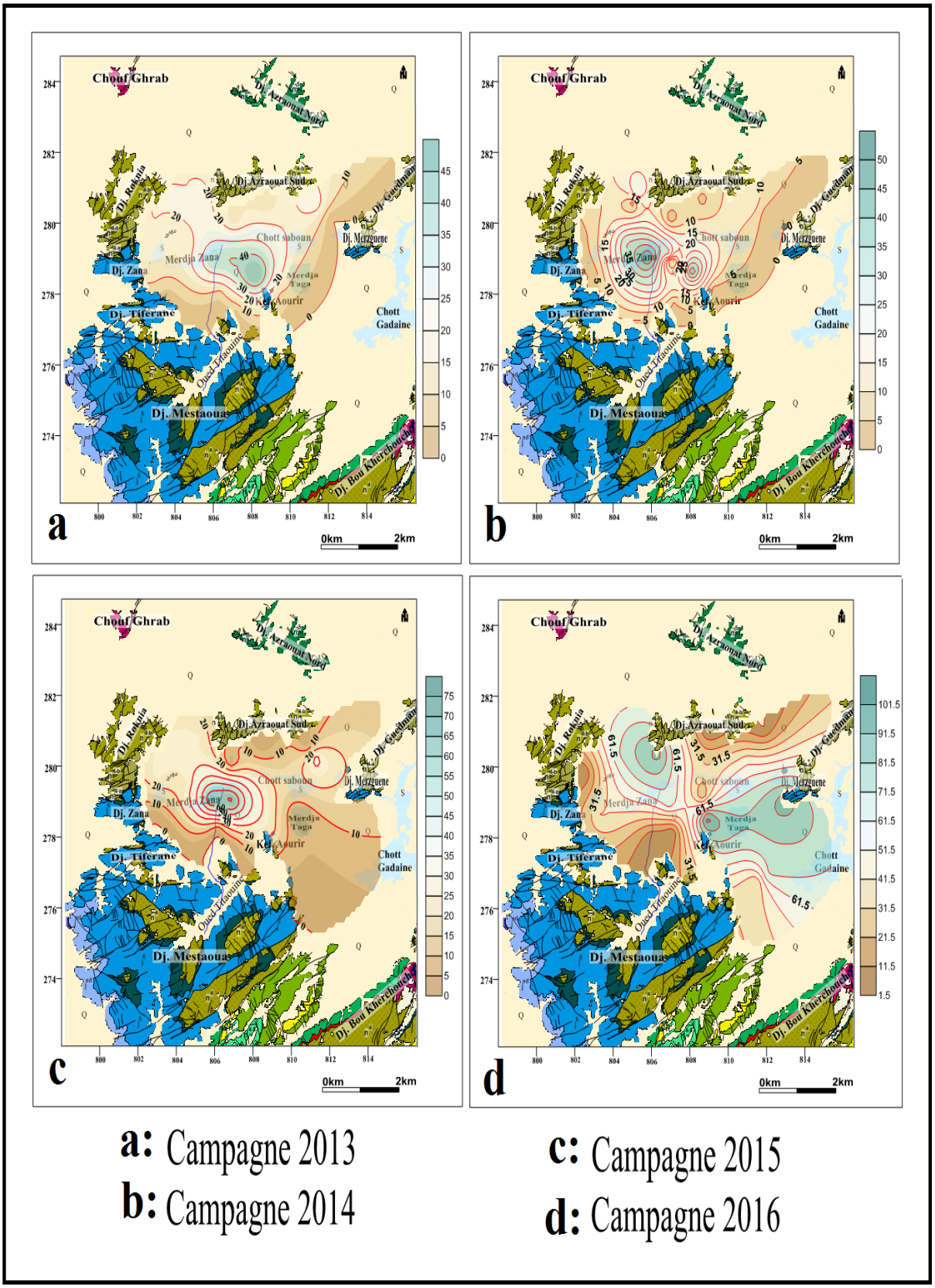


Fig. 7.4 : variation spatio-temporelle des nitrates dans les eaux souterraines de Zana (mg/l).

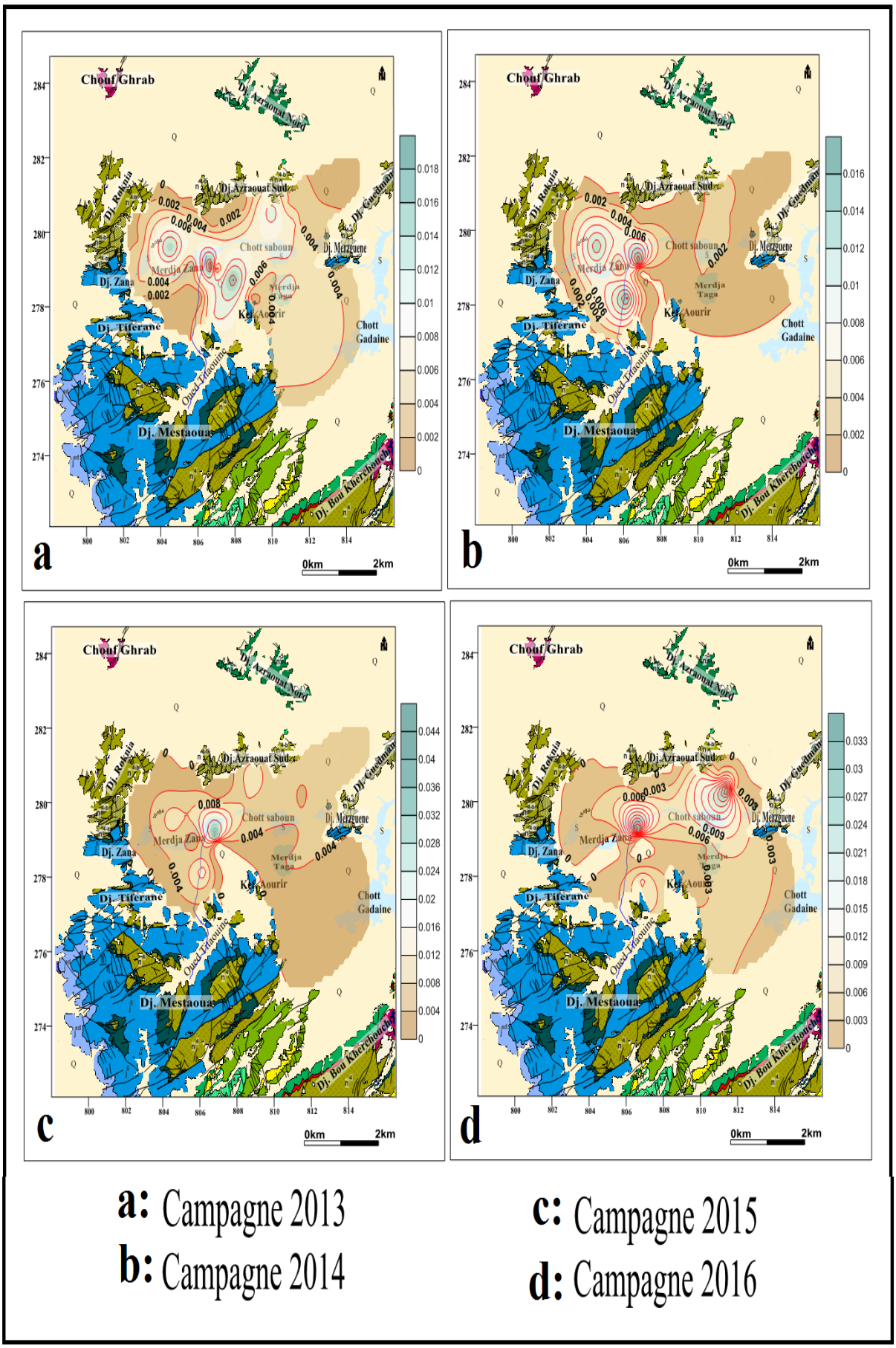


Fig. 7.5 : variation spatio-temporelle des nitrites dans les eaux souterraines de Zana (mg/l).

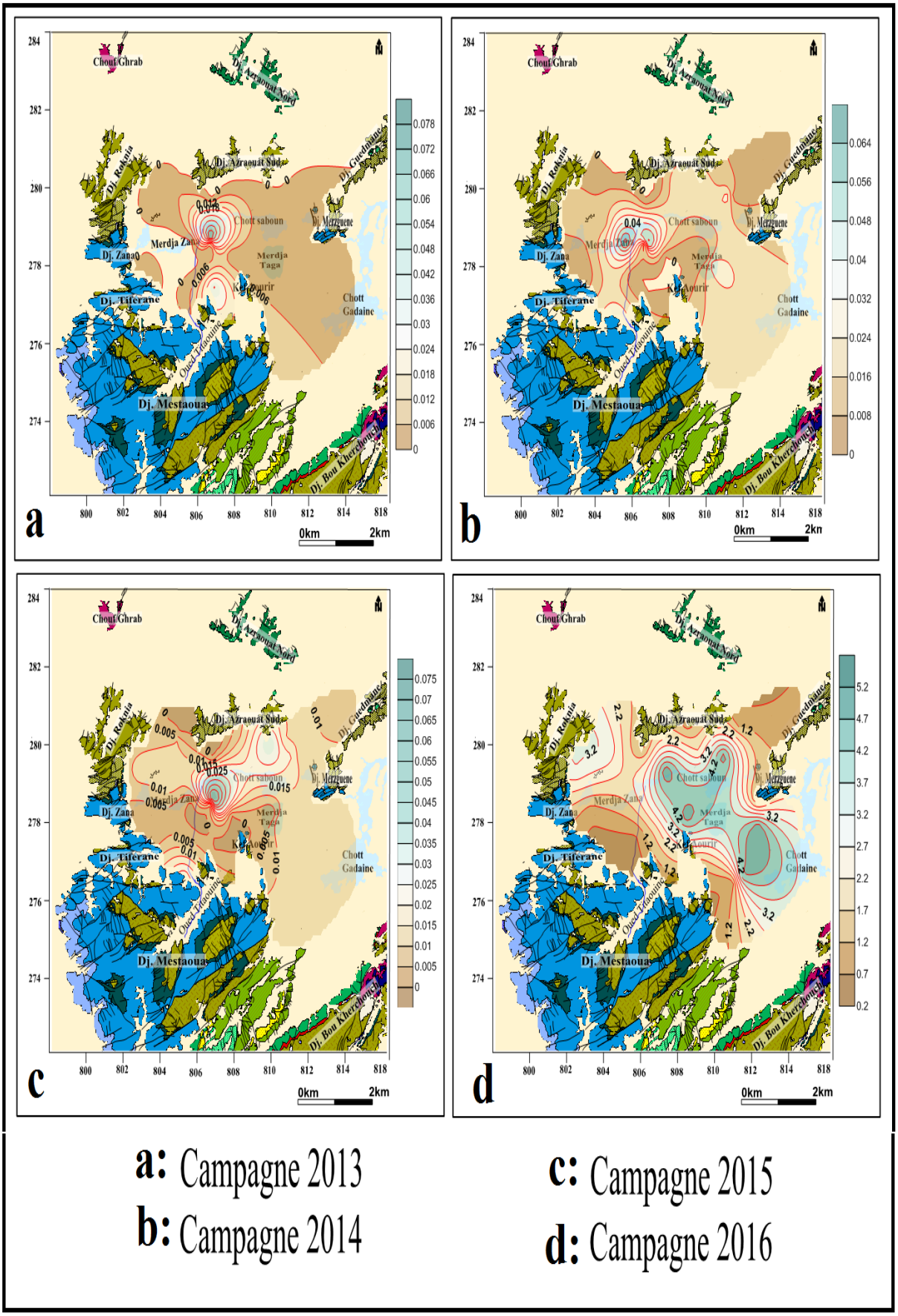


Fig. 7.6 : variation spatio-temporelle de l'ammonium dans les eaux souterraines de Zana (mg/l).

Dans toute la région de Zana, les quantités d'engrais apportées sont variables aussi bien dans le temps que dans l'espace. Durant cette période, ces quantités n'étaient, en aucun cas, définies ni en fonction des quantités d'éléments présentes dans le sol, ni en fonction des quantités préconisées pour les plantes.

VII.4.1 Origine des nitrates

En plus des traitements statistiques dans le chapitre précédent (ACP et CAH) qui dévoile une dissociation nette des nitrates des autres éléments, ce qui témoigne d'une origine anthropique des nitrates, on va essayer de mieux cerner l'origine des nitrates dans les eaux souterraines de la plaine de Zana par un autre rapport.

La présence du calcium et du magnésium dans les eaux souterraines est souvent due à la décomposition des roches avec les pluies acides, et/ou l'agressivité des eaux vis-à-vis de celles-ci (Gourouza et al, 2009). Les faibles coefficients de corrélation nitrate-calcium et nitrate magnésium, Tableau 7.11 montrent que l'excès de nitrate dans les eaux souterraines de la plaine de Zana ne provient pas essentiellement de la dégradation de roches contenant du calcium et du magnésium, mais plutôt un apport exogène, par contre les nitrates sont moyennement corréler avec les chlorures (r=0.40). Le comportement chimique des chlorures dans les eaux naturelles est conservatif car il n'est pas sujet aux processus physiques, chimiques ou biologiques. C'est pourquoi le rapport NO_3^-/Cl^- peut être utilisé pour mettre en évidence des phénomènes de mélange ou de processus biologiques responsables de la distribution des concentrations en NO_3^- dans le bassin versant. Les engrais chimiques sont généralement caractérisés par des teneurs élevées en azote et faible teneurs en chlorures. Les effluents domestiques et les ceux des animaux présentent, au contraire, des concentrations en Cl^- élevées et des rapports NO_3^-/Cl^- faibles. Il faut noter également que le rapport NO_3^-/Cl^- diminue en cas de dénitrification ou de consommation des nutriments par les plantes sans que cela ne modifie les concentrations en Cl^- (Briand, 2014).

La figure 7.7 présente les variations du rapport molaire NO_3^-/Cl^- en fonction des concentrations molaire en Cl^- des eaux souterraines de la plaine de Zana et des différents pôles et vecteurs potentiels de nitrates. Cette figure confirme l'origine agricole des nitrates dans les eaux souterraines de la nappe superficielle de Zana. En se référant à la figure ci-dessous, on constate que l'année 2016 peut être classée parmi les années d'excédant structurale, c'est à dire la zone commence à dépasser les capacités d'absorptions naturelles. Le coefficient de corrélation (r=0.86) entre concentration NO_3^-/Cl^- et Cl^- témoigne de la liaison étroite entre les nitrates et les chlorures et de leurs probable origine exogène.

Tableau 7.10 : Corrélation des nitrates avec calcium et magnésium

Eléments	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO_4	HCO_3	NO_3	Conductivité
NO_3	0.11	0.23	0.24	0.18	**0.40**	0.15	0.26	1.00	0.26

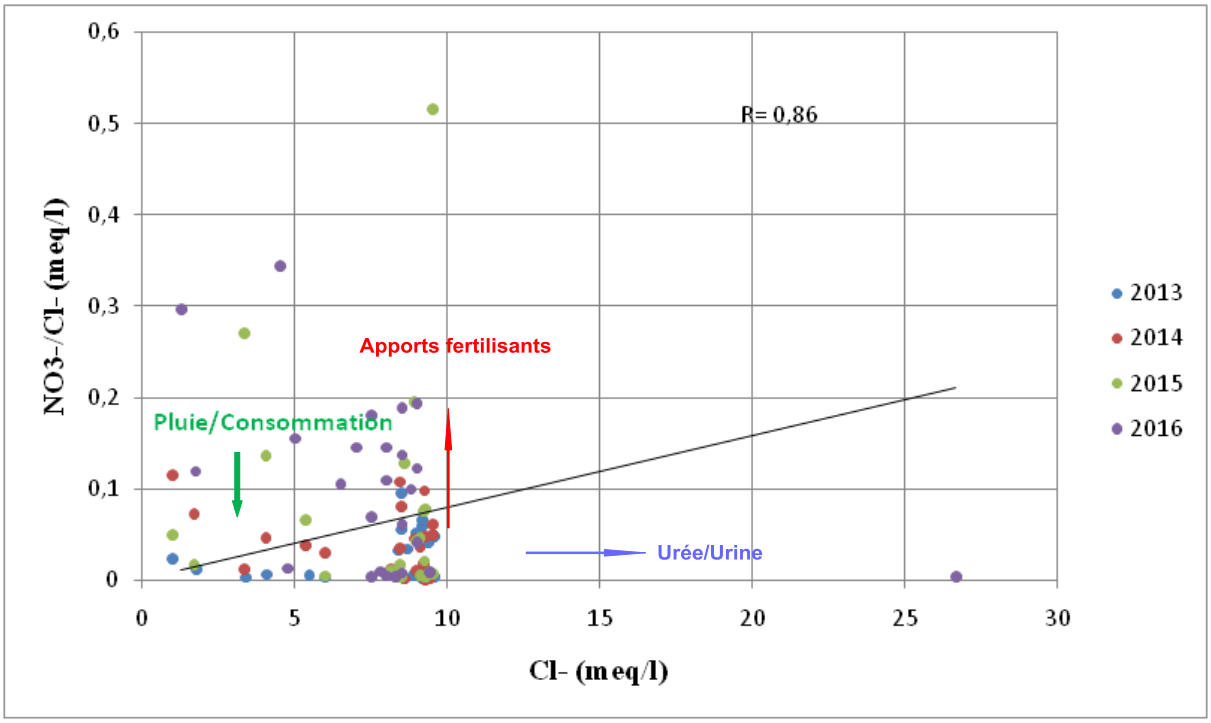


Fig.7.7 : Relation NO_3^-/Cl^- vs Cl^-

VII.4.2 Relation Nitrate-Oxygène dissout / Profondeur

L'observation des teneurs des nitrates mesurées dans les eaux souterraines de la nappe superficielle de Zana en fonction de la teneur de l'oxygène dissoute et en fonction de la profondeur est très significative.

En fait, les ions nitrates et l'oxygène dissout, tout comme avec le niveau statique de l'eau, sont bien corrélés (r=0.68 et 0.91 respectivement), ce qui témoigne de l'existence d'une liaison étroit entre ces éléments.

L'évolution des ions nitrates se fait d'une manière inverse avec la profondeur du toit de la nappe (niveau statique de l'eau). Même constat est remarqué avec l'oxygène dissout dans les eaux souterraines, Fig. 7.8 et 7.9.

La diminution de l'oxygène dissout avec profondeur restreint considérablement le processus de nitrification (nitritation et nitratation) ammonium-nitrites-nitrates et l'azote prend sa forme réduite.

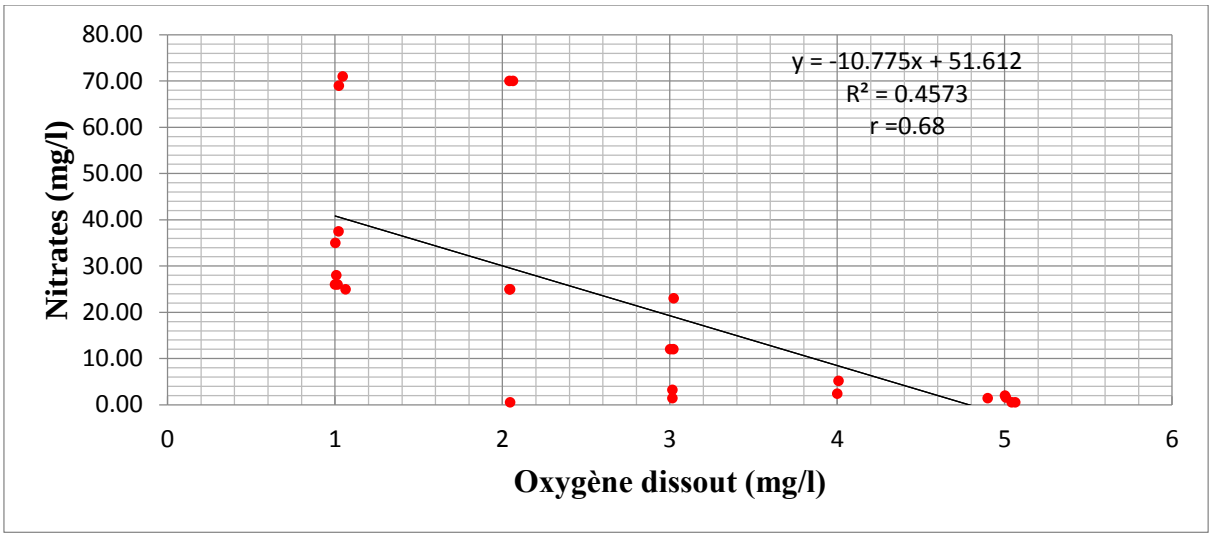


Fig. 7.8 : Evolution des nitrates en fonction de l'oxygène dissout

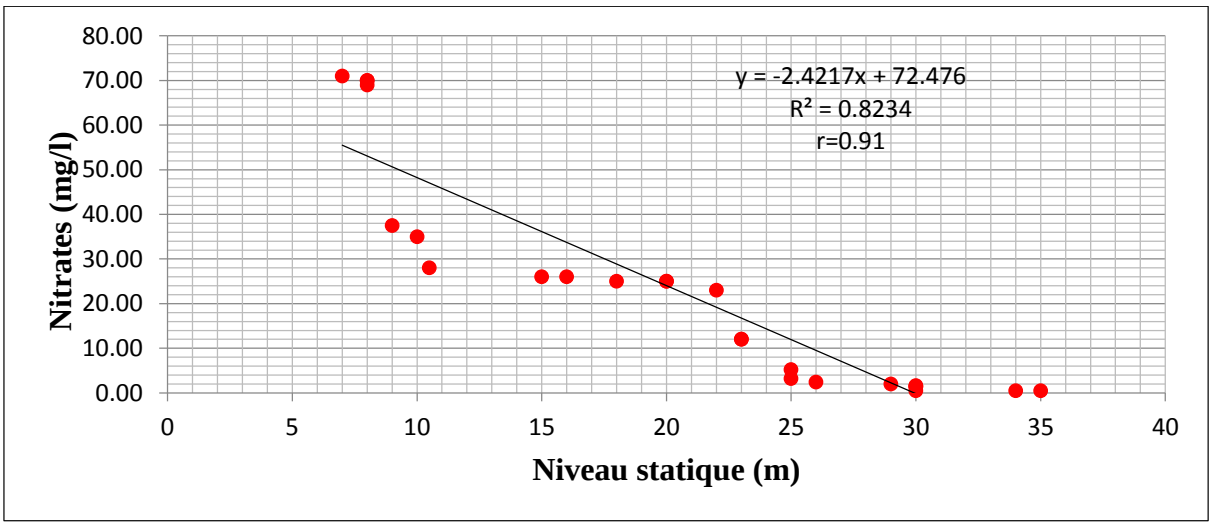


Fig. 7.9 : Evolution des nitrates en fonction du niveau statique de la nappe

VII.5 Evaluation et cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines de la plaine de Zana à la pollution

Le volet littérature développé dans ce sous-chapitre touchant la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution est tiré à partir des travaux bibliographiques réalisés par Nezha el Mahmouhi (2004).

VII.5.1 Historique du concept de la vulnérabilité des eaux souterraine

Les premiers concepts et la méthodologie des cartes de vulnérabilité des eaux souterraines ont été développés en Europe dans le milieu des années 1960 (Zaporozec& Vrba, 1994b). II procédait principalement à montrer que la protection naturelle des nappes est variable suivant la localisation et d'identifier les aires pour lesquelles des mesures de protection devaient être

envisagées. A la fin des années 1960 et au cours des années 1970, des cartes de vulnérabilité ont été initiées dans plusieurs pays européens (en France, Tchécoslovaquie et Allemagne) et aux USA. Le concept de décrire au moyen de cartes et illustrations les degrés de vulnérabilité des eaux souterraines face aux divers contaminants en fonction des conditions hydrogéologiques, a été conçue dans un effort de procréer la prise de conscience face au danger de la contamination des eaux souterraines (Margat ,1968 ; Albinet, 1970). Margat (1968), a introduit l'expression de «vulnérabilité des eaux souterraines à des contaminations». La définition d'Albinet et Margat (1970) a été l'une des premières reconnues et généralement utilisées : la vulnérabilité d'un aquifère est la possibilité qu'a un contaminant de percoler et de diffuser depuis la surface jusqu'au réservoir d'eau dans les conditions naturelles. Une dizaine d'années plus tard, Villumsen et al. (1983) proposent que la vulnérabilité des eaux souterraines soit définie comme le risque qu'a une substance chimique, utilisée ou entreposée sur le sol.

Selon ces auteurs, la vulnérabilité des eaux dépend d'une série de paramètres dynamique et statique, ils insistent sur le fait que la composition chimique d'une eau souterraine peut être utilisée comme indicateur de la vulnérabilité et proposent que les analyses chimiques des eaux soient utilisées pour vérifier les cartes de la vulnérabilité.

Notant que l'idée de vulnérabilité est basée sur l'hypothèse que l'environnement physique peut constituer une protection de l'eau souterraine vis-à-vis d'un contaminant qui pénètre en surface. Le matériel rocheux de l'aquifère peut agir comme un filtre naturel pour éliminer certains contaminants. Alors le résultat escompté par cette idée de vulnérabilité était de démontrer que la protection est fournie par l'environnement naturel change à différents emplacements et pour identifier des zones où les mesures de protection étaient la plupart nécessaires (Margat et Suais-parascandola, 1987).

Irrémédiablement la visualisation des données par des cartes est avérée être une voie appropriée de fournir l'information aux décideurs et aux responsables pour prendre les mesures adéquates et nécessaire pour la sauvegarde et la protection des ressources hydriques très prisés et très rare par endroits. Ce document, associé également à d'autres, doit permettre de prendre une décision définitive. Cela nécessite que le document ait une précision suffisante, adaptée aux enjeux des décisions à prendre (Matten, 2016).

Margat et Suais-Parascandola (1987) proposent que les cartes soient basées sur des facteurs hydrogéologiques fondamentaux, tels que la profondeur de la nappe, perméabilité des dépôts sous-jacents, relation entre les eaux de surface et souterraines, vitesse moyenne des écoulements souterrains.

De cela on remarque que la reconversion des conditions hydrogéologiques en termes de vulnérabilité était qualitative et n'a pas impliqué les processus de migration de contaminants de

la surface jusqu'aux eaux souterraines superficielles et voir même profondes. Albinet et Margat (1970) ont défini la vulnérabilité de l'aquifère comme la possibilité de percolation et de diffusion des contaminants de la surface du sol vers les réservoirs de l'eau. Olmer et Rezac (1974) ont suggéré que la vulnérabilité des eaux souterraines soit « le degré de mettre en danger, déterminé par des conditions normales et indépendantes de la source actuelle de Pollution ». En Allemagne, Vierhuff et al. (1987) basent la vulnérabilité d'un aquifère sur deux aspects principaux : le degré de protection par les couches supérieures contre les contaminations venant de la surface et le potentiel de purification des eaux contaminées d'un aquifère.

D'après ces auteurs la vulnérabilité dépend dans la zone non saturée, de la perméabilité verticale et dans la couche aquifère du gradient hydraulique et de la vitesse de l'écoulement d'eaux souterraines, Nezha el Mahmouhi (2004). Vrana (1984) a défini la vulnérabilité de couche aquifère comme « complexe des conditions naturelles de surface et de sub-surface influençant le mouvement d'un polluant vers l'aquifère ».

Certains auteurs ont proposé des définitions directes, d'autres ont seulement indiqué sur quoi la vulnérabilité d'eaux souterraines devrait être basée, Nezha el Mahmouhi (2004).

Bachmat et collin (1987) ont défini la vulnérabilité d'eaux souterraines à la contamination de surface comme « sensibilité de sa qualité aux activités anthropiques ». Sotornikova et Verba (1987) interprètent la vulnérabilité d'un système hydrogéologique comme « capacité de ce système de faire face à des impacts naturels et anthropogènes qui affectent son état dans le temps et dans l'espace ». Benacchio et al. 1988,ont défini le degré de vulnérabilité intrinsèque comme possibilité d'infiltration et de percolation des contaminations à travers la zone non saturée.

Certains auteurs ont bien spécifiés des facteurs responsables : Goosens et Van Damme (1987) ont considéré que les facteurs statistiques et dynamiques doivent être de même importance. Selon Friesel (1987), le facteur important était la recharge. Pour Klauco (1987), le facteur essentiel était la variation de l'écoulement d'eaux souterraines. Vrba (1991) a présenté l'échelle de temps dans la définition de la vulnérabilité. Il a suggéré que la « vulnérabilité à l'échelle du temps humaine soit une propriété intrinsèque normale inchangeable des parties insaturées d'un système d'eaux souterraines et elle dépend de la capacité ou non du système de faire face aux processus normaux et aux impacts humains ».

Le concept de la vulnérabilité d'eaux souterraines à progressivement évolué de la seule évaluation des conditions hydrogéologiques à l'évaluation du risque de contamination des aquifères par les activités humaines, Nezha el Mahmouhi (2004).

Une définition basée l'interaction entre la vulnérabilité normale d'une couche aquifère et le contaminant, a était proposé par Foster (1987). Le terme « vulnérabilité de pollution des

aquifères » est utilisé pour représenter les caractéristiques intrinsèques qui déterminent la sensibilité de diverses parties d'un aquifère à être soumis à un contaminant (Foster, 1987). Selon Palmquist (1991), la vulnérabilité d'eaux souterraines est définie comme « la mesure du risque des eaux souterraines par des activités humaines et par la présence des contaminants » et par conséquent sans aucune présence des contaminants, même les eaux souterraines les plus susceptibles ne sont pas en danger, et ainsi, elles ne sont pas vulnérables. Adams et Foster (1992) ont défini la vulnérabilité d'un aquifère à la contamination en tant qu'une fonction, d'une part, de l'inaccessibilité de la zone saturée, dans un sens hydraulique, à la pénétration des contaminants et d'autre part, de la capacité d'atténuation des couches recouvrant la zone saturée en raison de la conservation ou de la réaction physico-chimique des contaminants.

Cependant, toutes les définitions proposées jusque-là sont uniquement basées sur les paramètres physiques du système considéré, et ne donnent donc pas de description « physique » du concept de la vulnérabilité. Afin de pallier à ce manque, Popescu et al. (2008) proposent une définition généraliste, basée sur une approche de type « Pression-Etat-Impact» (Gardin et al, 2006), et dotée d'une signification physique plus claire : le concept généraliste de la vulnérabilité de l'eau souterraine reflète la facilité avec laquelle un système aquifère (l'état) transforme une pression (en amont) en un impact (en aval).

VII.5.2 Concept de vulnérabilité

Le concept de vulnérabilité peut conduire à trois situations :

- ✓ Aptitude d'un système aquifère à être contaminé ;
- ✓ Aptitude des eaux souterraines à propager et à conserver la contamination ;
- ✓ Assimilation des caractéristiques polluantes du contaminant.

Ce qui fait appel aux nouveaux concepts de normes et de seuils de toxicité (Lafrance et al, 1989). Pour être plus précis le terme de vulnérabilité regroupe deux idées majeures, la vulnérabilité spécifique et intrinsèque.

La vulnérabilité spécifique fait combiner, les paramètres naturels et les propriétés relatives au contaminant lui-même, aux activités humaines. Selon Aubre (1992), il s'agit de l'évaluation du danger de contaminer les eaux souterraines. En effet, un même contaminant peut réagir de manière différente selon le milieu tout comme certains contaminants réagiront différemment au contact d'un même milieu du fait de la variabilité des propriétés physico-chimiques des substances chimiques (Vrba et Zaporozec, 1994). La vulnérabilité spécifique est évolutive et ne caractérise qu'un instant précis. L'évaluation de la vulnérabilité spécifique fait intervenir un grand nombre de données, dont la compilation peut s'avérer pénible et le traitement de

l'ensemble des données est complexe et couteux. Ce type d'étude vise à évaluer l'impact d'activité à l'échelle locale.

La Vulnérabilité intrinsèque décrit l'hypersensibilité des eaux souterraines à être affectée par une pollution de surface, diffuse ou ponctuelle. Conjugué avec les activités exogènes humaines, elle pourra donc permettre d'évaluer le risque de pollution auquel les eaux souterraines sont soumises. En outre, la vulnérabilité intrinsèque peut être considérée comme invariante dans le temps. La vulnérabilité intrinsèque traduit en fait la capacité de la première matrice réservoir souterraine à recevoir les eaux de surface. Civita (1990) décrit la vulnérabilité intrinsèque comme l'aptitude d'un aquifère à absorber ou à diffuser un polluant transporté par l'eau. Pour d'autres auteurs (Aube (1992), Vrba et Zaporozec,(1994), la notion de vulnérabilité intrinsèque dépend de la sensibilité qu'ont les systèmes aquifères aux impacts humains, naturels et ne font intervenir que les conditions hydrogéologiques du site sans tenir compte des propriétés des contaminants (Valerie Murat, 2000).

D'après Nezha el Mahmouhi (2004), « l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines et des méthodes et des techniques de sa représentation graphique et/ou numérique est essentielle dans la compilation des cartes de vulnérabilité. La Vulnérabilité des eaux souterraines est relative, non mesurable et sans dimensions. L'exactitude de l'évaluation de la vulnérabilité dépend essentiellement de la quantité et de la qualité des données, sans pour autant oublier la fiabilité de ces données représentatives. De telles données ne sont pas toujours disponibles. Plus la quantité de données est riche, plus la fiabilité de l'évaluation de la vulnérabilité d'eaux souterraines est évidente. La sélection des méthodes et des données d'évaluation dépend du résultat escompté de l'évaluation. La vulnérabilité est le plus souvent évaluée en termes de qualité de l'eau ».

VII.5.2.1 Evaluation de la vulnérabilité intrinsèque

La cartographie et la classification de la vulnérabilité des eaux souterraines, constitue la méthode d'expression la plus pratique aux regards des utilisateurs. La cartographie de la vulnérabilité est définie comme une technique de quantification de l'estimation de la vulnérabilité et comme technique de visualisation d'une manière utile et pratique dans les processus de prise de décision (Bachmat et Collin, 1987 *in* Vrba et Zaporozec, 1994). La carte de vulnérabilité est une carte exprimant le degré de risque de contamination de l'eau souterraine dans les aquifères supérieurs, par les contaminants arrivant à la surface (Goossenset Van Damme, 1987 *in* Vrba et Zaporozec, 1994). En fait, les cartes de vulnérabilité ne peuvent pas être produites sans considération des différents facteurs qui déterminants l'homogénéité des zones d'étude et leur capacité pour atténuer des contaminants Nezha el Mahmouhi (2004). La

carte intrinsèque de vulnérabilité est basée sur l'évaluation de divers attributs et paramètres en provenance de diverses sources :géologique (le sol), hydrogéologique (la zone non saturée et les propriétés de l'aquifère), pédologiques, climatiques et autres, qui entrent dans la détermination de la vulnérabilité des eaux souterraines. Ces paramètres sont ensuite combinés en divers indices relatifs de vulnérabilité.

VII.5.2.1.1 Paramètres d'importance primaire

Les principaux paramètres de la vulnérabilité intrinsèque d'eaux souterraines incluent la recharge, les propriétés de sol et les caractéristiques de la zone non saturée.

- ✓ **La recharge**

La recharge est la quantité d'eau qui traverse la zone non saturée dans un système aquifère pendant une période donnée pour gagner la zone saturée. Ce paramètre est déterminé en fonction du taux de précipitations qui s'infiltre et percole vers la surface libre. Elle est habituellement exprimée en tant que recharge nette annuelle. La quantité et la qualité de la recharge affectent de manière significative les processus physiques et chimiques dans le système sol-roche. La recharge se fait, en milieu non confiné, de manière saisonnière, et subit les influences climatiques (Freeze et Cherry, 1979).

La recharge peut être évaluée sur la base des mesures de terrain (lysimètres), être dérivée de l'équation d'équilibre de l'eau où on a besoin des données climatiques, telles que la précipitation, la température de l'air et l'évaporation, qui influencent de manière significative la quantité de recharge (Vra et Zoporozec, 1994). La recharge est souvent utilisée pour l'établissement des cartes de vulnérabilité des Etats–Unis (Johnston, 1988) et son utilisation est considérée plutôt importante par exemple, poids 4 dans le système DRASTIC (Aller et al. ,1987). Plusieurs auteurs européens ont incorporé la recharge dans l'évaluation de la vulnérabilité (Breeuwsma et al. 1986 ; Civita, 1990 ; Josopait et Schwerdfteger, 1979 ; Marcolongo et Pretto, 1987).

Andersen et Gosk (1987) ont utilisé la recharge dans leur concept de la capacité de restauration d'une couche aquifère. Cette capacité est définie comme le volume d'eaux souterraines contenues dans l'aquifère exprimé en (m^3) divisé par la cadence de la recharge (m^3/an). La recharge a été également appliquée comme paramètre en traçant la vulnérabilité d'eaux souterraines à la contamination dans la région de Munich-Harlaching (Hafen et al. 1989). Le potentiel annuel de la recharge a été utilisé en tant qu'un des paramètres principaux dans l'évaluation de la sensibilité des aquifères européennes aux dépôts acides (Holmberg et al. 1987).

- ✓ **Type de sol**

Le sol représente la couche supérieure de la zone non saturée et caractérisé par une activité biologique significative. La capacité à atténuer et faire migrer le contaminant change en fonction du type de sol. En effet, la composition, la texture et la structure des sols sont trois propriétés qui influencent l'intensité des processus d'atténuation (Aller et al, 1987, Fagnan, 1998). Ainsi, il ne suffit pas de savoir qu'un sol est argileux pour affirmer que l'infiltration de contaminant est moindre, il faut également déterminer le degré de cohésion, la présence de fissures et de microorganismes (Vrba et Zaporozec, 1994). Les principaux paramètres du sol liés à la vulnérabilité incluent : la texture, la structure, l'épaisseur et la teneur en matiére organique et en argiles. S'il est développé, le sol forme habituellement une couche continue, mais la variation spatiale de ses propriétés physico-chimiques et biologiques est grande. Le sol a une fonction importante d'atténuation (Zaporezec, 1985) et constitue un paramètre critique quand la vulnérabilité d'eaux souterraines à la diffusion des sources de contamination est évaluée. La fonction du sol comme filtre protecteur naturel dans le retardement et la dégradation des contaminants peut être relativement facilement altérée. Ces atteintes peuvent mener à la perte de son contrôle de qualité d'eaux souterraines. Donc, l'évaluation des propriétes du sol dervrait toujours prendre en compte si le sol dans la zone d'étude est en conditions naturelles ou sous l'effet des activités agricoles, du dépots acide, etc…Le sol a également un impact sur la recharge puisque si les propriétés du sol ne se prêtent pas à l'infiltration, il n y a pas de recharge.

- ✓ **La zone non saturée**

Ce paramètre détermine l'épaisseur de la matrice (matériaux) que doit traverser un contaminant avant de gagner la nappe. Il permet de déterminer le temps de contact avec le milieu d'où l'influence du milieu et l'efficacité des processus chimiques, de dégradation et d'atténuation d'un contaminant sont tirés. De plus, les propriétés du milieu telles que la perméabilité relative des horizons traversés, la porosité, la hauteur de sol, la hauteur de la zone non saturée vont interagir avec ces processus (Murat 2000).

La zone non saturée est très importante dans la protection des eaux souterraines particulièrement dans les régions où le profil du sol est moins dévloppé (régions montagneuses). Alors, plus cette zone est grande plus le temps de passage sera long. Les principaux paramètres de la zone non saturée inclus dans l'évaluation de la vulnérabilité sont l'épaisseur, la lithologie et la perméabilité verticale. L'épaisseur dépend de la position du toit du substratum qui est variable. Pour cette raison, une analyse des fluctuations piezomètriques devrait etre incluse dans l'évaluation de la vulnérabilité.

- ✓ **Type d'aquifère**

Un aquifère constitue un système hétérogène présentant une lithologie et une perméabilité variables. D'après Vrba et Zaporozec (1994), ce paramètre réfère aux matériaux de l'aquifère, à la porosité effective, à l'épaisseur et au type d'aquifère (confiné ou non). Sa vulnérabilité est variable en fonction de l'espace et de la profondeur. La vulnérabilité de l'aquifère doit etre différenciée horizontalement (zones de recharge et décharge) et verticalement (zone d'oxydation et de réduction). La définition des conditions de confinement (semi-confiné, confiné ou non confiné) est très importante et doit etre considérée lors de l'évaluation de la vulnérabilité de l'aquifère, car le système d'écoulement est affecté par le milieu.

Les principaux paramètres pour l'évaluation de la vulnérabilité des aquifères incluent la nature et la géométrie de cet aquifère, la porosité, la conductivité hydraulique, la transmissivité équivalente et le sens d'écoulement des eaux souterraines. L'importance de la conductivité hydraulique est particuliérement soulignée, elle intervient sur la rapidité du contaminant à migrer. L'acquisition des données représentatives sur les paramètres de l'aquifère est techniquement exigeante en comparaison avec les données sur le sol et la zone non saturée . des forages d'exploration et de surveillance, des essais hydrauliques, des analyses de zone et de laboratoire et des bases de données relatives sont nécessaires pour exécuter une évaluation fiable de la vulnérabilité (Vrba et Zaporozec, 1994).

VII.5.2.1.2 Paramètres d'importance secondaire

Les paramètres naturels d'importance secondaire incluent : la topographie, relation eau superficielle-eau profonde et l'intrusion d'eau de mer. Leur importance pour l'évaluation de la vulnérabilité varie suivant les zones. La topographie comme exemple influence le devellopement des sols d'où indirectement l'importance de l'atténuation d'un contaminant par le sol. Les pentes qui procurent des conditions favorables à l'infiltration, et donc un faible coefficient de ruissellement des polluants seront considérés comme fortement vulnérables (Murat, 2000). Dans certaines zones comme les zones plates de recharge, l'infiltration à travers la surface vers les eaux souterraines ainsi que la capacité d'échange ionique entre les eaux de recharge et l'aquifère peu profond sont élevés. La recharge est plus faible dans d'autres zones de pente raides, où la capacité d'échange ionique est faible entre l'aquifère et les couches superficielles.

VII.5.2.2 Elaboration de la carte de vulnérabilité

Les cartes de vulnérabilité d'eaux souterraines sont classées en tant que cartes interprétatives d'eaux souterraines, dérivant des cartes hydrogéologiques générales (Zaporzec,

1985).La cartographie de la vulnérabilité est définie comme une technique de quantification de l'estimation de la vulnérabilité et comme technique de visualisation d'une manière utile et pratique dans les processus de prise de décision (Bachmat et Collin, 1987 *in* Vrba et Zaporozec, 1994). La carte de vulnérabilité est une carte exprimant le degré de risque de contamination de l'eau souterraine dans les aquifères supérieurs, par les contaminants arrivant à la surface (Goossenset Van Damme, 1987 *in* Vrba et Zaporozec, 1994). La carte de vulnérabilité d'eaux souterraines est considérée de plus ou moins subjective de la capacité de protéger les eaux souterraines, principalement,en terme de qualité de l'eau. Elle est subjective parce que le contenu de la carte doit répondre à des besoins suivant les critères de l'utilisateur de la carte. En fait, ce sont des cartes qui peuvent autant servir d'outil de dépistage d'éventuelles contaminations que d'aide à la prévention. Les cartes de vulnérabilité d'eaux souterraines sont généralement utilisées pour la planification, la prise de décision, la gestion et la protection d'eaux souterraines. elles appartiennent à la catégorie des cartes environnementales.

Ce qui engendre que les cartes doivent être interprétées avec beaucoup de précaution car d'après des auteurs tels qu'Andersen (in Foster et Hirata, 1991), le concept de «vulnérabilité générale à un polluant universel pour un scénario de pollution typique» ne veut rien dire. Le but essentiel de la carte est une subdivision d'une région en plusieurs classes montrant le potentiel différentiel pour un but et un usage indiqué. A la différence des cartes hydrogéologiques, les cartes de vulnérabilité d'eaux souterraines sont dépendants du temps, constamment exigeant la mise à jour pour montrer des changements des caractéristiques du système d'eaux souterraines et de l'emplacement et de la nature des sources potentielles de contamination. Une carte de vulnérabilité devrait fournir à son utilsateur l'évaluation la plus précise et la plus instructive de la sensibilité de couche aquifère aux impacts résultants des activités humaine, permettre la comparaison de la sensibilité relative de la couche aquifère entre différentes zones et utiliser toutes les données disponibles et convenables en faisant la meilleure interprétation (Vrba et Zaporozec, 1994).

L'élaboration de la carte de vulnérabilité consiste à combiner plusieurs cartes thématiques des facteurs physiques choisis de ressources; dans une carte de vulnérabilité d'eaux souterraines, on identifie différentes zones de la sensibilité des eaux souterraines aux impacts naturels et humains. Le tracé de vulnérabilité a été défini par Bachmat et Collin (1987) comme technique d'évaluation et d'affichage de la vulnérabilité en fonction du lie et du temps, d'un modèle jugé utile et commode pour l'application réelle dans le processus exprrimant le degré de risque pour la contamination des eaux souterraines en couche aquifère supérieure par des contaminats entrant de la surface.

VII.5.2.2.1 Elaboration de la carte de vulnérabilité avec la méthode DRASTIC

Une des premières méthodes du groupes pondéré PCSM (Point Count System Models) a été développée par l'Agence de Protection de l'Envirenement des Etats-Unis en 1985 par Aller et al. (1987), avec l'acroyme DRASTIC, pris des lettres initiales de sept paramètres employés pour évaluer la vulnérabilité intrinsèque des couches aquifères.

D : profondeur à l'eau ou épaisseur de la zone non saturé ;

R : recharge ;

A : nature du milieu aquifère saturé ;

S : nature du sol ;

T : topographie ;

I : impact ou nature de la zone non saturée ;

C : conductivité hydrique ou perméabilité de l'aquifère.

Le caractère relatif de poids est variable de 1 à 5, Tableau 7.11. Les paramètres les plus significatifs ont des poids de 5, les moins significatifs un poids de 1. l'index se compose par la somme de l'éstimation de produits des notes et des poids des sept paramètres.

Tableau 7.11 : Notion et poids des paramètres de la méthode DRASTIC,

(Aller et *al*. 1987)

Paramètres	poids
Profondeur de la nappe (D)	5
La recharge (R)	4
La nature lithologique de la zone saturée (A)	3
La texture du sol (S)	2
Topographie (T)	1
impact de la zone non saturée (I)	5
conductivité hydraulique (C)	3

Achaque paramètre est donnée une plage d'estimation de 1 à 10, Tab. 7.12, la valeur de 1 désigne le degré de vulnérabilité relatif le plus faible , la valeur 10 renseigne sur le degré de vulnérabilité relatif le plus élevé. Le résultat final est sous forme de valeur numérique obtenu à partir de l'équation :

$$Id = Dr\,Dw + Rr\,Rw + Ar\,Aw + Sr\,Sw + Tr\,Tw + Ir\,Iw + Cr\,Cw$$

Avec

Id :index DRASTIC

r: note

w: poid

une fois que l'index DRASTIC est calculé, il est possible d'identifier les zones qui sont vulnérables, donc à la contamination des eaux souterraines. Plus l'index DRASTIC est élevé , plus le potentielde contamination d'eaux souterraines est grand. L'index DRASTIC fournit seulement un outil relatif d'évaluation et n'est pas conçu pour fournir des réponses absolues.

L'index DRASTIC est, donc un système cartographique qui fournit une voie systématique pour des planificateurs, administrateurs et les gestionnaires à l'adresse de la vulnérabilité relative des eaux de l'aquifère à la contamination, en prenant les décisions qui peuvent agir en faveur de la protection des ressources d'eaux souterraines. L'établissement de la carte de vulnérabilité à l'aide de la méthode DRASTIC consiste à combiner plusieurs cartes thématiques et à calculer l'index. Cette étape consiste en l'utilisation d'un système d'information géographique (SIG).

Tableau 7.12 : Plage d'estimation des paramètres

Paramètre	Poids (w)	Plage de valeurs de notation	Plage des paramètres
D : Profondeur de la nappe (m)	5	1 - 10	10 - > 34
R : Recharge (mm)	4	1 - 3	0 - 4.5
A : Nature de zone saturée	3	1 – 8	Argiles, Argiles-Limoneux, Marnes, Sables et Graviers, Conglomérats et Calcaires Lacustres
S : Nature du sol	2	1 – 10	Glacis polygénique, Sols Salés, Terres arables et Sols de Sebkha
T : Topographie (pente en %)	1	6 - 10	0 – 2%
I : Lithologie de la couche vadose	5	1 - 10	Argiles, calcaires lacustres, sables et Graviers, Calcaires
C : Conductivité hydraulique (m/s)	3	1 – 1 0	02×10^{-4} - 12×10^{-5}

VII.5.3 Etablissement de la carte de vulnérabilité de la nappe superficiellede Zana

VII.5.3.1 Méthodologie de travail

La nécessite de connaitre l'aspect qualitative des eaux souterraines exploitées dans la région d'étude a conduit à l'élaboration d'une carte de vulnérabilité à la pollution.

Les données nécessaires pour la compilation de la carte de vulnérabilité par la méthode DRASTIC ont été collectées auprès des organismes concernés. Les différentes données sont digitalisées à l'aide du logiciel Map Info. Les données numériques sont saisies sur Excel. Après cette étape la compilation des cartes thématiques et leur traitement est faite moyennant le un logiciel SIG, le Surfer 10.

VII.5.3.2 Etablissement des cartes thématiques

VII.5.3.2.1 Carte de la profondeur de l'eau (D)

C'est l'un des paramètres les plus importants de la méthode DRASTIC. Il donne une idée de la distance que doit parcourir le polluant avant d'atteindre la nappe. Cette carte a été élaborée par superposition de la carte piézométrique de l'année 2016, et la carte correspondant à la topographie de la plaine et la déduction des différences de côtes. Les cartes sont, d'abord géo-référencées et digitalisées avec le logiciel Map Info. Le logiciel Surfer calcule la différence entre les deux valeurs (piézométrie et topographie) au niveau de chaque maille. Une fois la carte finale de profondeur est déterminée, on a attribué la notation DRASTIC à ce paramètre suivant la profondeur de la nappe. La note la plus faible correspond à des profondeurs d'eau supérieures à 45 m. Les notes les plus élevées sont situées dans les zone superficielle, est correspondent à des profondeurs de10 m et moins, Fig. 7.10.

Le choix de la piézométrie de 2016 est motivé par le but d'obtenir une meilleure fiabilité de la vulnérabilité car durant cette année la surface piézométrique est plus basses (rabattement). Plus la surface de l'eau est plus basse, plus le contaminant met de temps à atteindre la surface piézométrique.

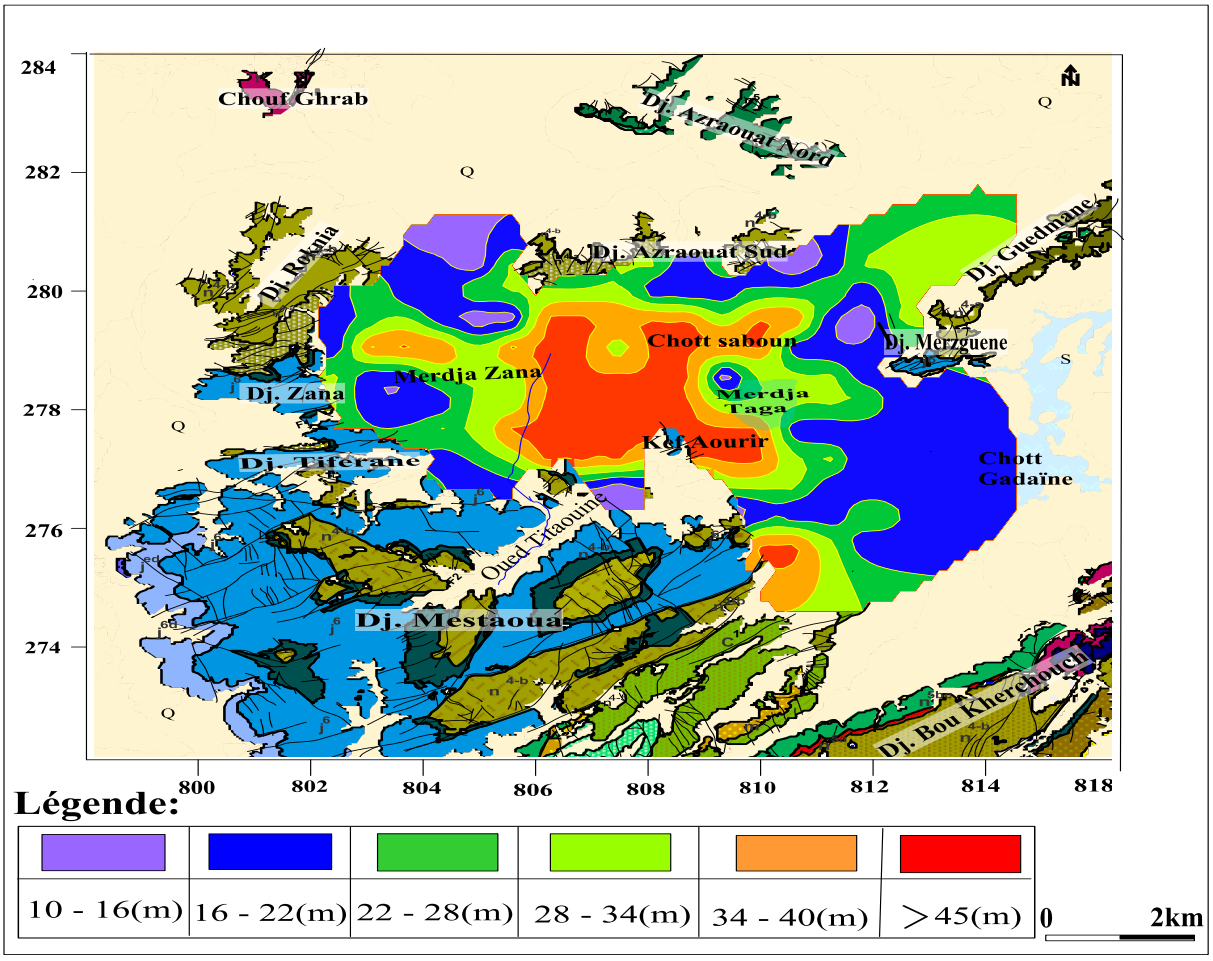


Fig. 7.10 : Carte de la répartition des profondeurs

VII.5.3.2.2 Carte de recharge (R)

Elle concerne la quantité d'eau qui franchit la surface du sol pour atteindre les réserves d'eau souterraines et entretenir le débit de l'écoulement souterrain, après circulation dans l'aquifère. Elle facilite le transport vertical des polluants vers les nappes. Plus la recharge est importante, plus le potentiel de contamination est important et plus la note qui lui est attribuée est importante. Ce paramètre est estimé à 4.5 mm sur l'ensemble du bassin. Cette valeur est prise à partir d'une étude pédologique couvrant la partie Nord-Est de la wilaya (DSA Batna).A chaque intervalle de recharge, on a attribué une note suivant la méthode DRASTIC, les notes les plus élevés correspondent à une recharge supérieure à 3, notées au niveau des bordures de la plaine, les valeurs les plus faibles sont enregistrées au centre de la plaine, Fig. 7.11.

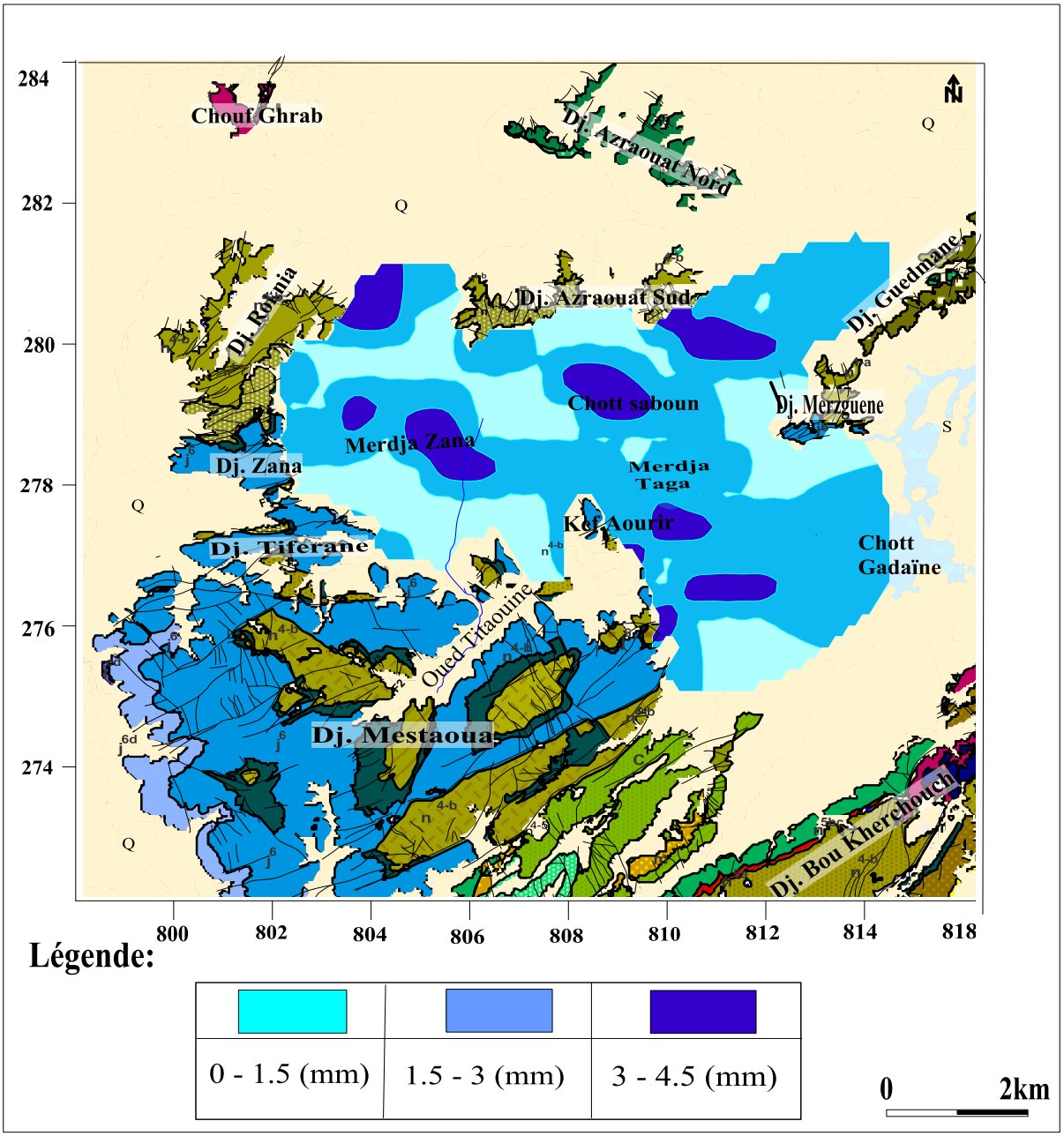


Fig. 7.11 : Carte de la recharge de la nappe superficielle

VII.5.3.2.3 Carte des faciès géologiques de la zone saturée (A)

Cette carte a été digitalisée à partir de la carte géologique et complétée par des logs-stratigraphiques des forages recueillies auprès de la direction des ressources en eau de la wilaya de Batna. Ces documents ont montré que le matériau aquifère de la nappe de Zana est constitué essentiellement de gravier, conglomérat, sables, sables argileux et calcaires lacustres. La carte, Fig. 7.12 montre une hétérogénéité de faciès géologiques de la zone saturée. A chaque lithologie, nous avons attribué des classes suivant la notion DRASTIC. Les notes les plus élevées sont attribuées aux formations perméables, les valeurs les plus faibles sont affectées aux formations imperméables.

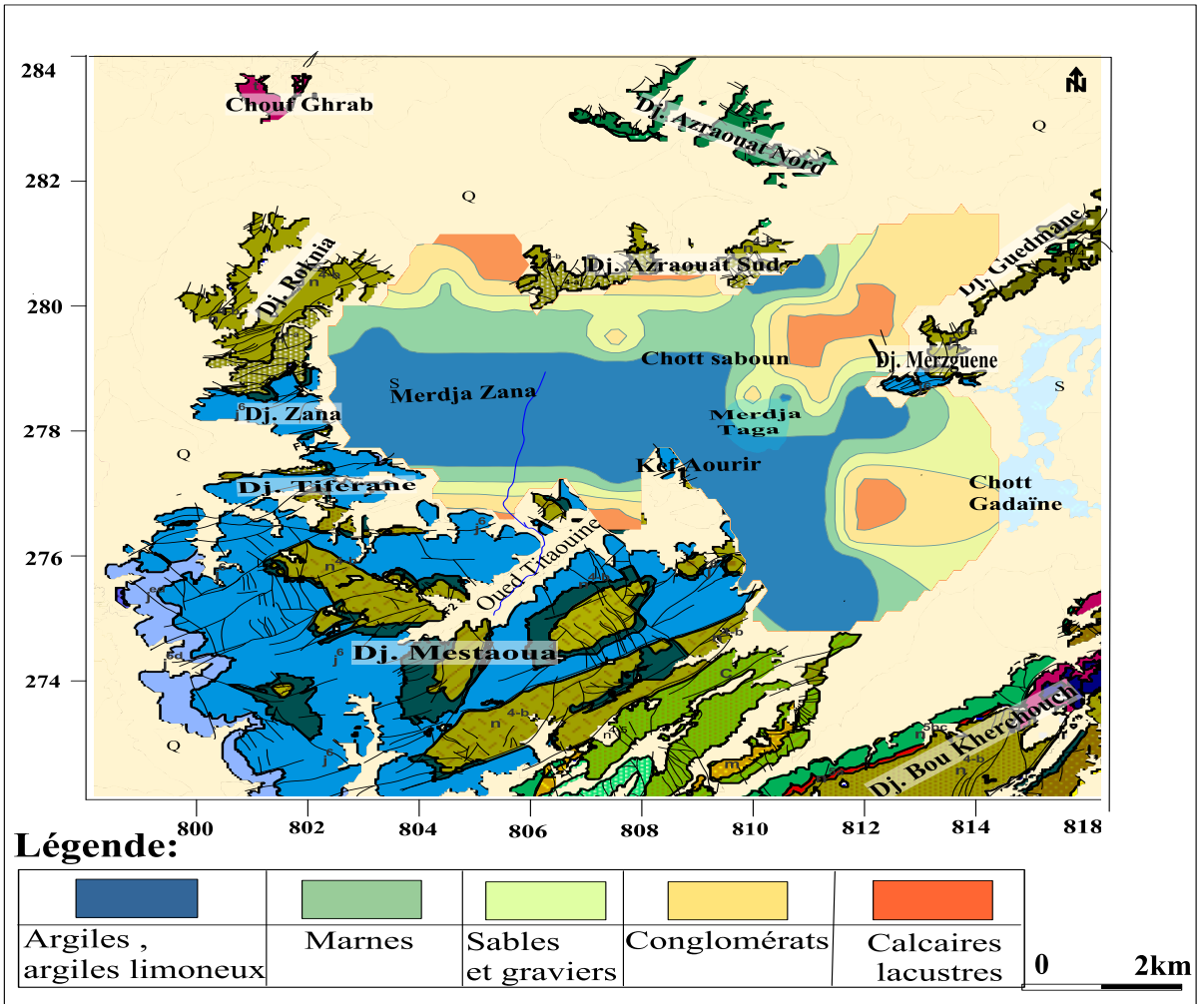


Fig. 7.12 : Carte de répartition des faciès géologiques de la zone saturée de la nappe

VII.5.3.2.4 Carte des sols (S)

La nature du sol a un impact considérable sur la contamination des nappes phréatiques par les polluants provenant de la surface. Elle peut réduire, retarder ou accélérer le processus de propagation de polluant vers l'aquifère. Plus le sol est riche en argile, plus l'absorption des polluants est importante, et plus la protection des eaux souterraines est grande. Pour

l'élaboration de la carte des sols, nous avons procédé à une digitalisation sur Map-Info d'une carte pédologique, carte géologique et logs des forages. L'examen de la carte ainsi établie permet de distinguer les sols suivants :

- ✓ Sols de Sebkha ;
- ✓ des sols salés remplie par des limons salés à sols hydromorphes ;
- ✓ des sols bruns, parfois à traces d'hydromorphie, installés sur des limons et des graviers sombre ;
- ✓ Glacis polygéniques.

Achaque type de sol, on a attribué une notation suivant la méthode DRASTIC, Fig. 7.13

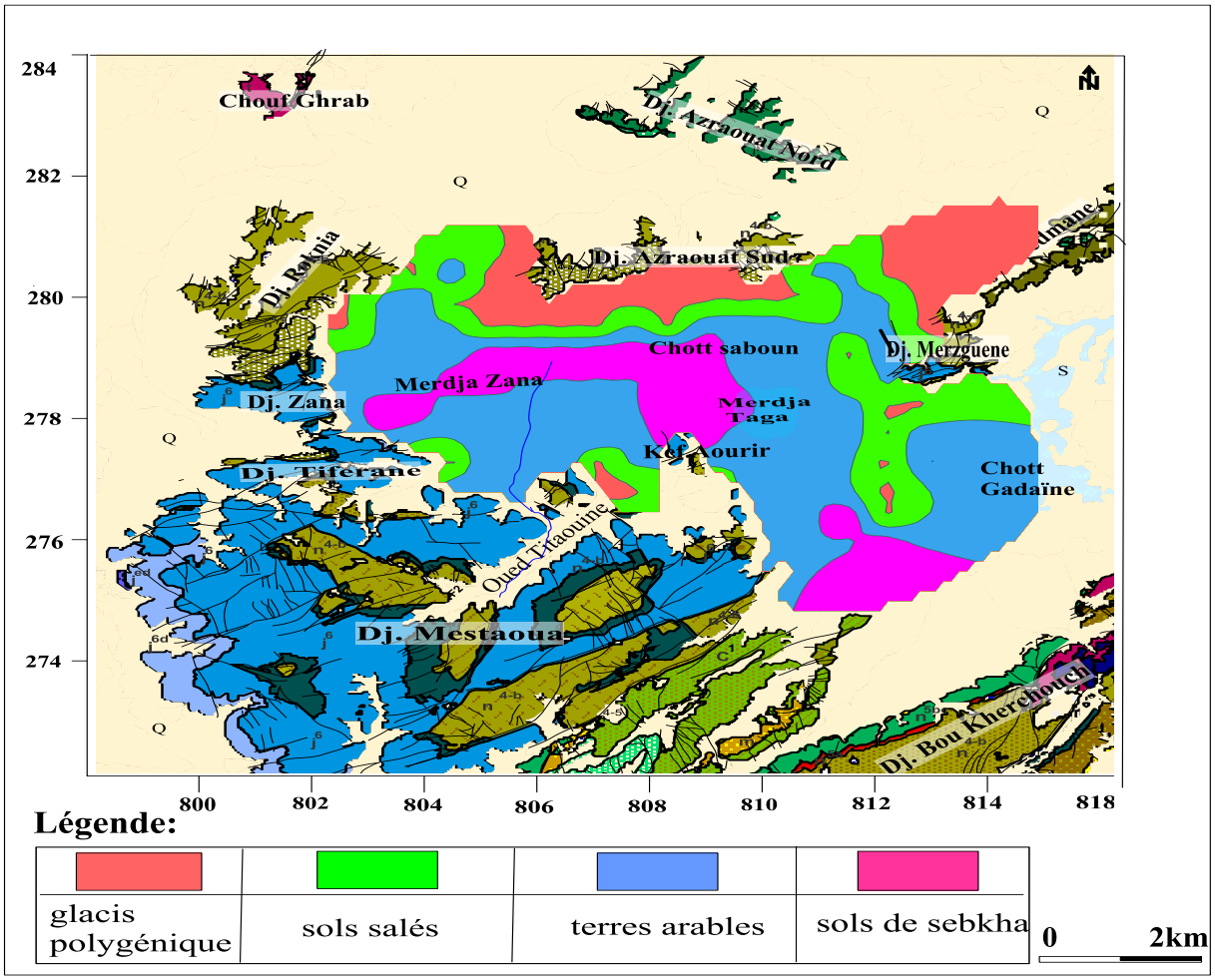


Fig. 7.13 : Carte des textures des sols

VII.5.3.2.5 Carte des pentes (T)

Le paramètre topographie est représenté dans la méthode DRASTIC par les valeurs de la pente en pourcent (%) qui traduisent l'aptitude au ruissellement et à l'infiltration des eaux superficielles vers la nappe. Autrement dit il reflète la capacité des eaux à introduire des éléments polluants vers la nappe. Le mode de ruissellement des eaux de surface est influencé

par la pente du terrain. Ainsi, les ruissellements deviennent importants lorsque la pente de terrain est forte, ce qui mène à une évacuation rapide des eaux et une réduction du potentiel de contamination des nappes d'eau. Par contre, les zones à faibles pentes ont tendance à retarder l'évacuation des eaux et d'augmenter par conséquent les chances aux agents contaminants de migrer en profondeur vers les eaux souterraines.

L'élaboration de cette carte à été faite à partir des cartes topographiques à 1/50 000 de Batna et Souk Naâmane. La répartition des pentes est généralement homogène sur tout le périmètre, à l'exception des bordures,où on note la présence de quelques collines. Les valeurs de pentes inférieures à 2% sont les plus dominantes, Fig. 7.14. D'après la notation DRASTIC la topographie de notre zone est favorable à une pollution de la nappe (le temps de séjours des contaminants est plus grand).

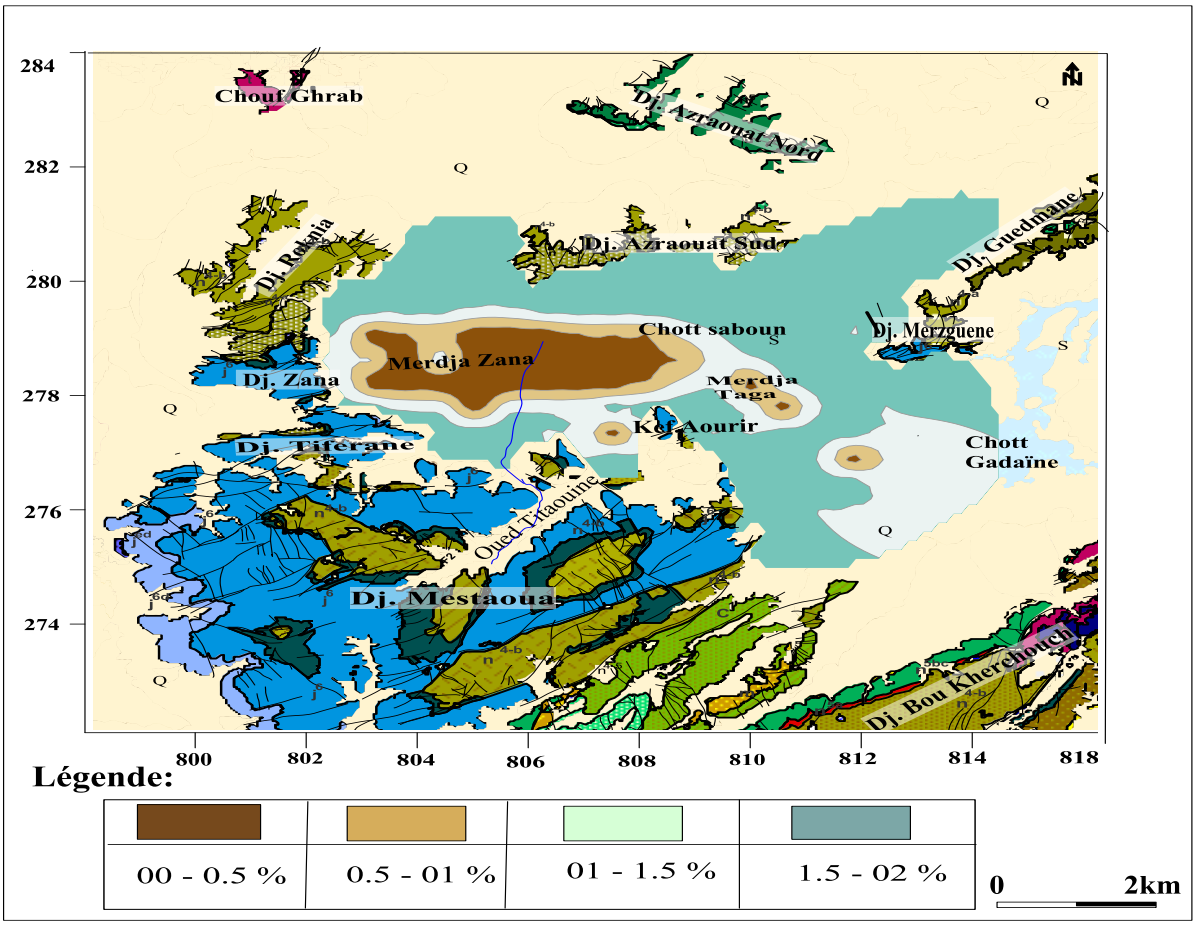


Fig. 7.14 : Carte de répartition des pentes

VII.5.3.2.6 Carte de la lithologie de la zone non saturée (I)

La couche non saturée, appelée également zone vadose, joue un rôle déterminant dans la protection des nappes contre l'intrusion de contaminants. La perméabilité de cette zone non saturée contrôle la circulation des polluants et leur arrivée à la nappe. La plupart des processus

physico-chimiques qui ont lieu dans cette zone sont influencés par son épaisseur. L'infiltration et la dispersion des contaminants sont guidées par les caractéristiques lithologiques des couches qui contrôlent leurs chemins et leurs trajectoires en sub-surface. Ce paramètre est obtenu à partir de données de surface (couverture géologique) et de données de sub-surface (logs des forages). Les différentes classes obtenues sont pondérées de 1 à 9 selon le modèle DRASTIC.

Cette carte a été établie à partir de l'exploitation des plusieurs points d'eau disposant de coupes géologiques. L'analyse des différents points met en évidence un contraste d'épaisseur et de lithologie de la zone non saturée. Aux bordures de la plaine, l'épaisseur de la zone non saturée est faible et la lithologie est semi perméable à imperméable , ce qui a pour conséquent un retard de la propagation des polluants vers la nappe ou bien piégeage des polluants par les argiles. Après avoir distingué les différents faciès, on a attribuè à chaque classe une note suivant la méthode utilisée. Les notes les plus élévées sont attribuées aux formations perméables étendues sur les bordures du bassin. Les eaux souterraines situées en dessous des fortes épaisseurs sont supposées êtres à l'abri des contaminations immédiates et directes. Ainsi, on leur a attribué les notes les plus faibles, Fig. 7.15.

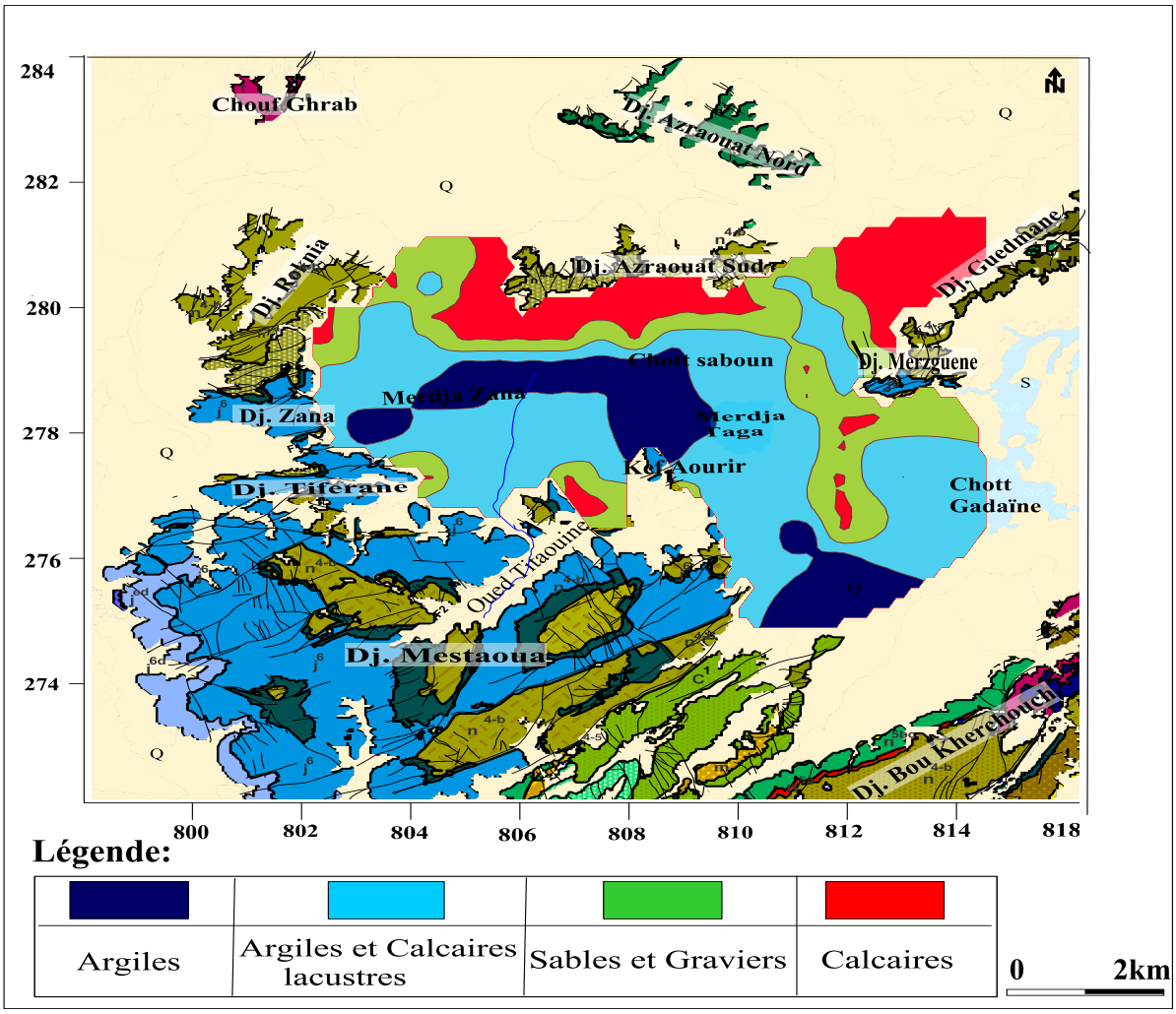


Fig. 7.15 : Carte de la lithologie de la zone non saturée de la nappe superficielle

VII.5.3.2.7 Carte de la perméabilité (C)

Par définition, la perméabilité correspond à la capacité d'une formation géologique d'un aquifère à laisser passer un fluide sous l'effet d'un gradient de pression. Elle joue un rôle important dans la migration et la dispersion des contaminants depuis la surface du sol, jusqu'à la zone saturée. Les terrains à perméabilité élevée facilitent la propagation des agents polluants. Pour le calcul du degré de vulnérabilité à la pollution, les valeurs de la perméabilité ont été estimées à partir des travaux antérieurs. Les notes les plus élevées sont localisées dans les zones des pieds monts, tandis que les notes faibles sont fréquentes vers le centre du bassin, Fig. 7.16.

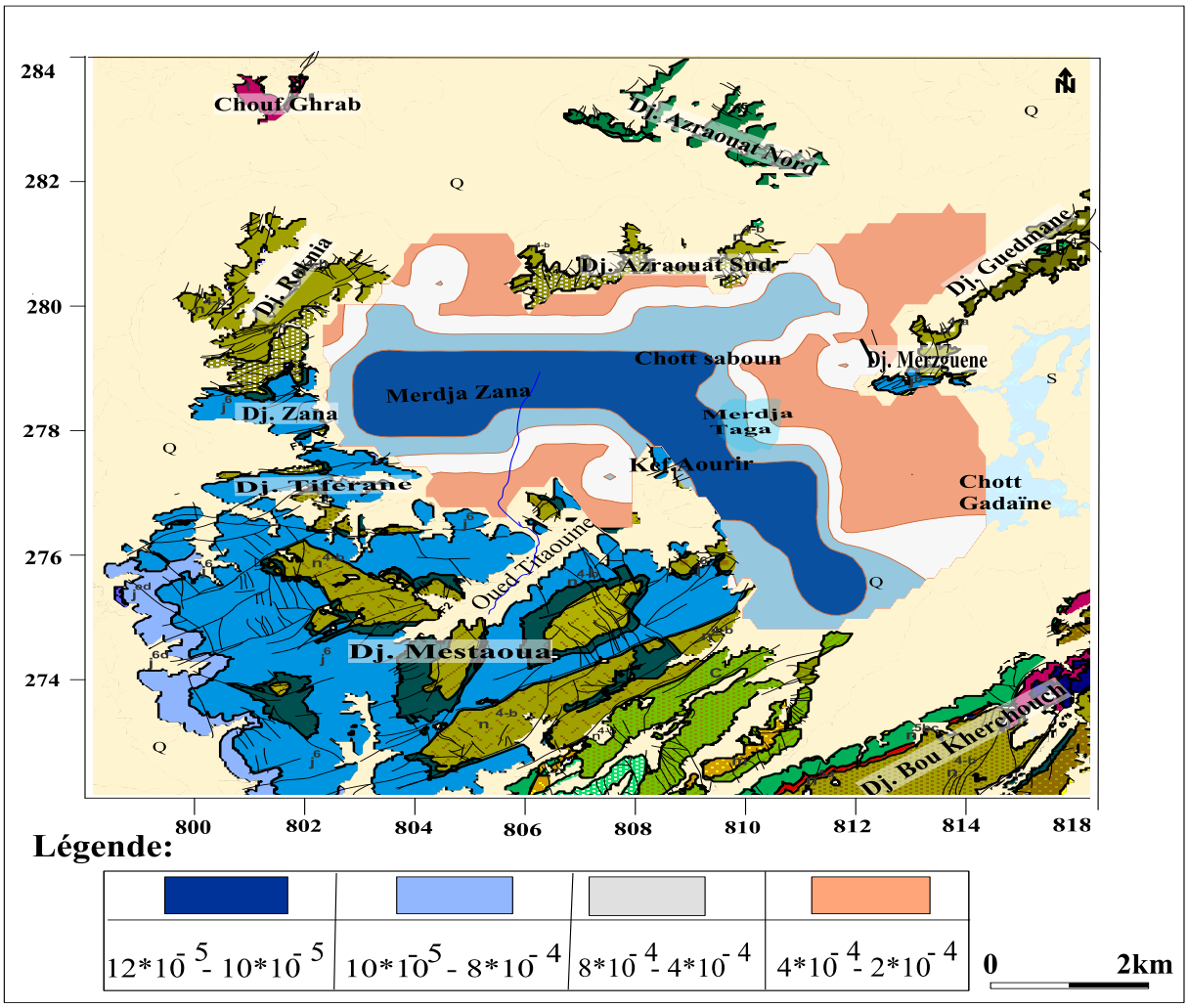


Fig. 7.16 : Carte des perméabilités de la nappe superficielle

VII.5.3.3 Interprétation de la carte de vulnérabilité

L'estimation des différents paramètres et leur combinaison ont abouti à l'évaluation des indices de vulnérabilité par la méthode DRASTIC. Ces indices peuvent donner une idée sur le degré de risque à la contamination des nappes d'eau souterraines. Dans la méthode dite ''DRASTIC'', cet indice varie de 23 qui représente un risque de vulnérabilité nul (0%) à

226 où le risque devient fort (100%). La compilation de l'ensemble des cartes et le calcul de l'indice DRASTIC (ID) au niveau de chaque maille se fait à l'aide du logiciel Surfer10, les résultats obtenus sont présentés sous forme d'une carte appelée carte de vulnérabilité. La répartition des valeurs obtenues permet de distinguer cinq zones selon la grandeur de vulnérabilité, Fig. 7.17. La remarque essentielle qu'on peut tirer de cette carte de synthèse est : les zones vulnérables à très vulnérables, dont l'indice dépasse 140 sont particulièrement localisées au centre de la plaine (Chott Saboun) et à l'Ouest Merdja Zana, cependant on retrouve également quelques petites zones très vulnérables éparpillés au Sud-Est de la plaine prés de Merdja de Taga. Cette forte vulnérabilité coincide les depressions naturelles (zones d'accumulations des eaux de surface et souterraines) où la topographie est quasi-plane. Ces zones ont une recharge importante et un sol très peu développé. Ces zones coincide sensiblement avec la répartition spatiale des teneurs en nitrates. Cela prouve la vulnérabilité de la nappe en ces zones.

Les zones de vulnérabilité faible à moyenne, occupent la majorité de la nappe aquifère où l'indice de vulnérabilité varie de 90 à 140 et qui est due essentiellement en partie à la faible profondeur de la surface piézométrique et à la nature de la couche vadose.

Les zones de faible vulnérabilité, qui se localise au Nord (bordure de Djebel Azraouat) et au Nord-Est de la plaine, mais s'étend sur une surface limitée. Son indice de vulnérabilité est inférieur à 90.

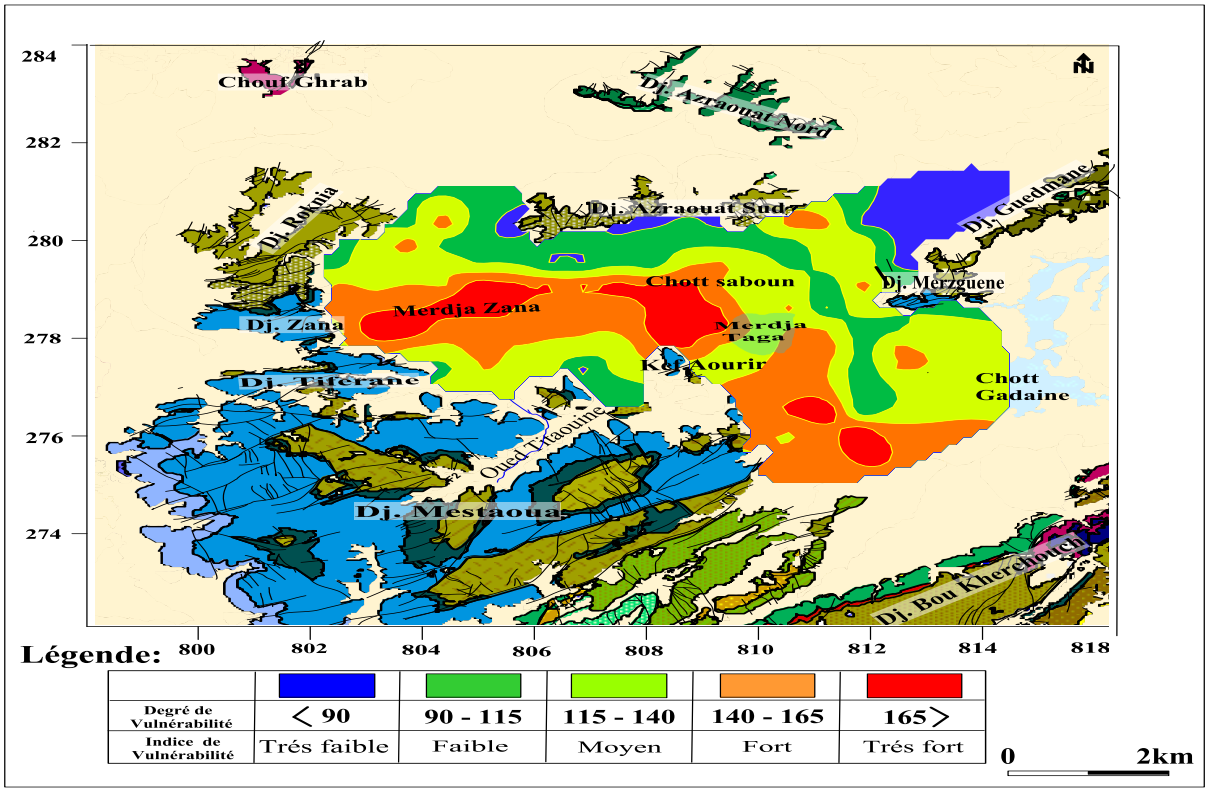


Fig. 7.17 : Carte de la vulnérabilité de la nappe superficielle de Zana

VII.6 Devenir des nitrates

Quatre-vingt-quinze pourcent de l'azote organique du sol se minéralise en deux étapes : d'abord par ammonification, ensuite par nitrification. L'ammonification est la transformation de l'azote organique en azote ammoniacal (NH_4^+), faiblement mobile en présence de bactéries et de champignons. La nitrification transforme l'azote ammoniacal en azote nitrique. Elle se subdivise en :

- ✓ Nitritation : c'est l'oxydation de l'azote ammoniacal en azote nitreux en présence des bactéries particulièrement les nitrisomonas suivant la réaction :

$$NH_4^+ + \frac{3}{2} O_2 \longrightarrow NO_2^- + 2H^+ + H_2O$$

- ✓ Nitratation : c'est l'oxydation des nitrites en nitrates par des bactéries de type Nitrobacter. Les nitrates présentent le stade de la minéralisation :

$$NO_2^- + \frac{1}{2} O_2 \longrightarrow NO_3^-$$

Les nitrates produits ont quatre principales destinations :

L'absorption par les plantes, la dénitrification, la réorganisation et la lixiviation au-delà de la zone racinaire. L'importance de la minéralisation d'azote dépend de plusieurs facteurs tels que la population microbienne, l'aération du sol, la température, le pH, l'humidité et rapport C/N (Martin, 1979 ; Chiang et al, 1983).

VII.6.1 Migration vers les nappes en profondeur

Produits naturellement dans le sol superficiel, ou apportés sous forme d'engrais, les nitrates en excès vont être entraînés vers la profondeur par l'eau de pluie qui s'infiltre dans les sols. Cette infiltration va se faire en hiver parce que la pluie qui tombe au printemps et en été ne s'infiltre en général pas en profondeur, elle est reprise rapidement par la végétation et évaporée. Les nitrates descendent donc vers la profondeur, mais cette migration est lente. Cette lenteur s'explique parce que le sol contient déjà de l'eau, maintenue sur le profil vertical par capillarité, et que l'eau nouvelle doit donc pousser vers le bas et remplacer l'eau existante. Mais cette lente migration vers le bas est inexorable, une fois en route, les nitrates poursuivent leur migration vers le bas sous les sols, ils ne sont en général ni retenus ni dégradés dans ces milieux qui sont en contact avec l'atmosphère.

En ce qui concerne la nappe superficielle du Mio-Plio-Quaternaire de Zana, les teneurs en ions nitrates ne cessent d'augmenter d'une année à une autre, Fig. 7.18, cela témoigne de l'inexorabilité de ces ions et leur aptitude à prendre le dessus par rapport au pouvoir auto-épuratif de l'environnement encaissant. Ce résultat dramatique n'est le résultat directe que de l'utilisation abusif et sans contrôle des fertilisants et éléments nutritifs en agriculture d'une part. D'autre part la défaillance totale ces dernières années des ouvrages d'assainissement réalisés

pour atténuer de l'ampleur des rejets sauvages dans les exutoires (bassin de décantation du chef-lieu et Theniet Sedra, fosse septique de Zana-Ouled–Sbaâ et zones éparses). Ajoutant à cela le constat amer de la pratique de location des parcelles de terrains à des personnes tiers qui a vu le jour ces dernières années dans la région de Zana et commence à devenir une pratique généralisé. Ces pseudos néo-fellahs, abuse de l'utilisation des éléments nutritifs pour augmenter la production et rentabiliser au maximum la location.

Ces facteurs conjugués ont fait grimper la moyenne des teneurs en nitrates jusqu'à une valeur alarmante et inquiétante sur le devenir des eaux de l'aquifère de Zana. La question qui se pose avec pertinence et d'une manière imminente est : comment assurer, dans l'eau sous la zone racinaire, un taux minimal de nitrate qui ne dépasse pas les dizaines de milligramme par litre ?

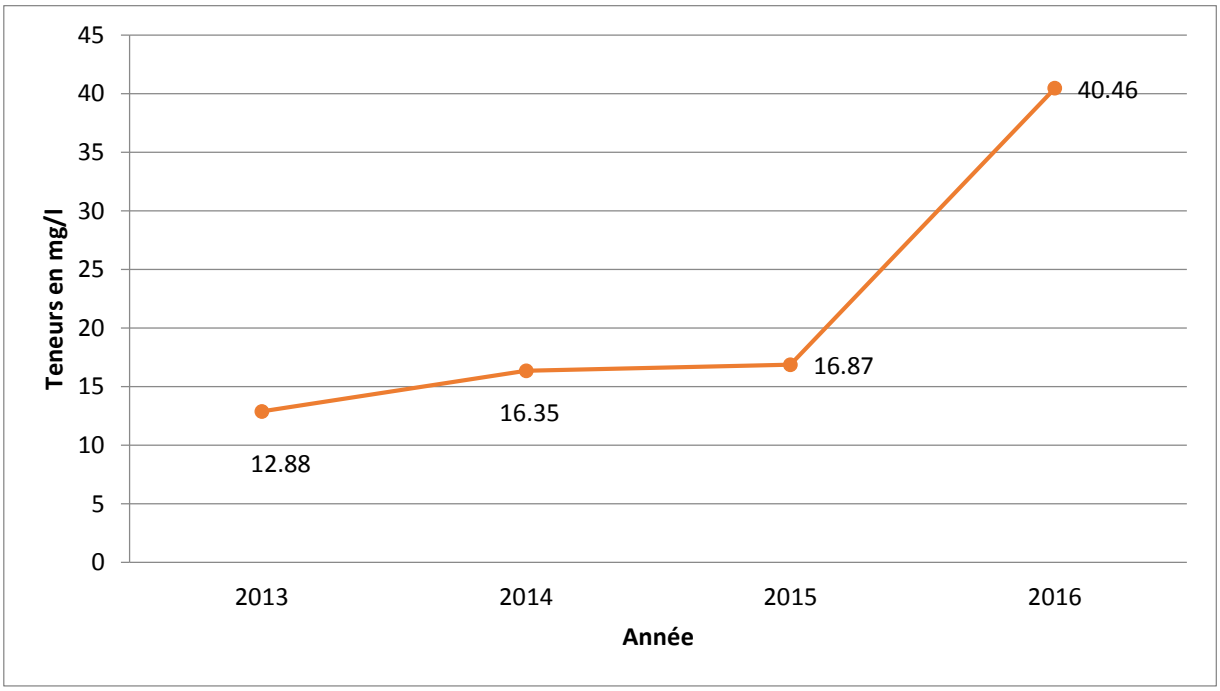


Fig. 7.18 : Profil des teneurs moyennes annuelles des nitrates (mg/l)

VII.6.2 La migration dans la nappe

Une fois arrivées dans la nappe, les eaux d'infiltration s'écoulent des points hauts vers les points bas. Ces points bas sont les sources, ou encore les forages de captages. Les vitesses de migration des eaux dans les nappes sont également lentes, de l'ordre du mètre par jour ou moins. Il faut donc plusieurs années pour que les nitrates qui sont transportés par l'eau progressent de l'amont à l'aval. Rien d'étonnant dès lors que l'on constate que la concentration en nitrates dans les nappes continue à croître, alors que l'apport de la fertilisation azotée artificielle a véritablement commencé à se généraliser depuis plusieurs années.

La synthèse des analyses chimiques à l'échelle de la plaine de Zana, montre que la qualité des eaux souterraines est remarquablement dégradée par les fortes concentrations en nitrates qui dépassent largement la norme OMS (50 mg/l). Dans cette zone les sols argilo-sableux et la faible profondeur de la nappe rendent la zone plus vulnérable à la lixiviation des nitrates. Les concentrations élevées en nitrates se trouvent dans les zones fortement irriguées où l'utilisation des engrais est excessive.

La superposition de la cartes de distribution spatio-temporelle des nitrates durant l'année 2016 avec la carte de vulérabilité, Fig. 7.19, fait ressortir une coincidence remarquable entre les zones vulérables et fortement vulnérables avec les teneurs maximales des nitrates mesurés dans les eaux souterraines de la plaine de Zana. Cette synthèse dégage une idée sur le devenir par endogénéisation des nitrates exogènes au départ. Cette coincidence met en évidence la migration des nitrates au sein de la nappe superficielle du Mio-Plio-Quaternaire de la plaine de Zana suivant le sens d'écoulement convergent au centre de la plaine.

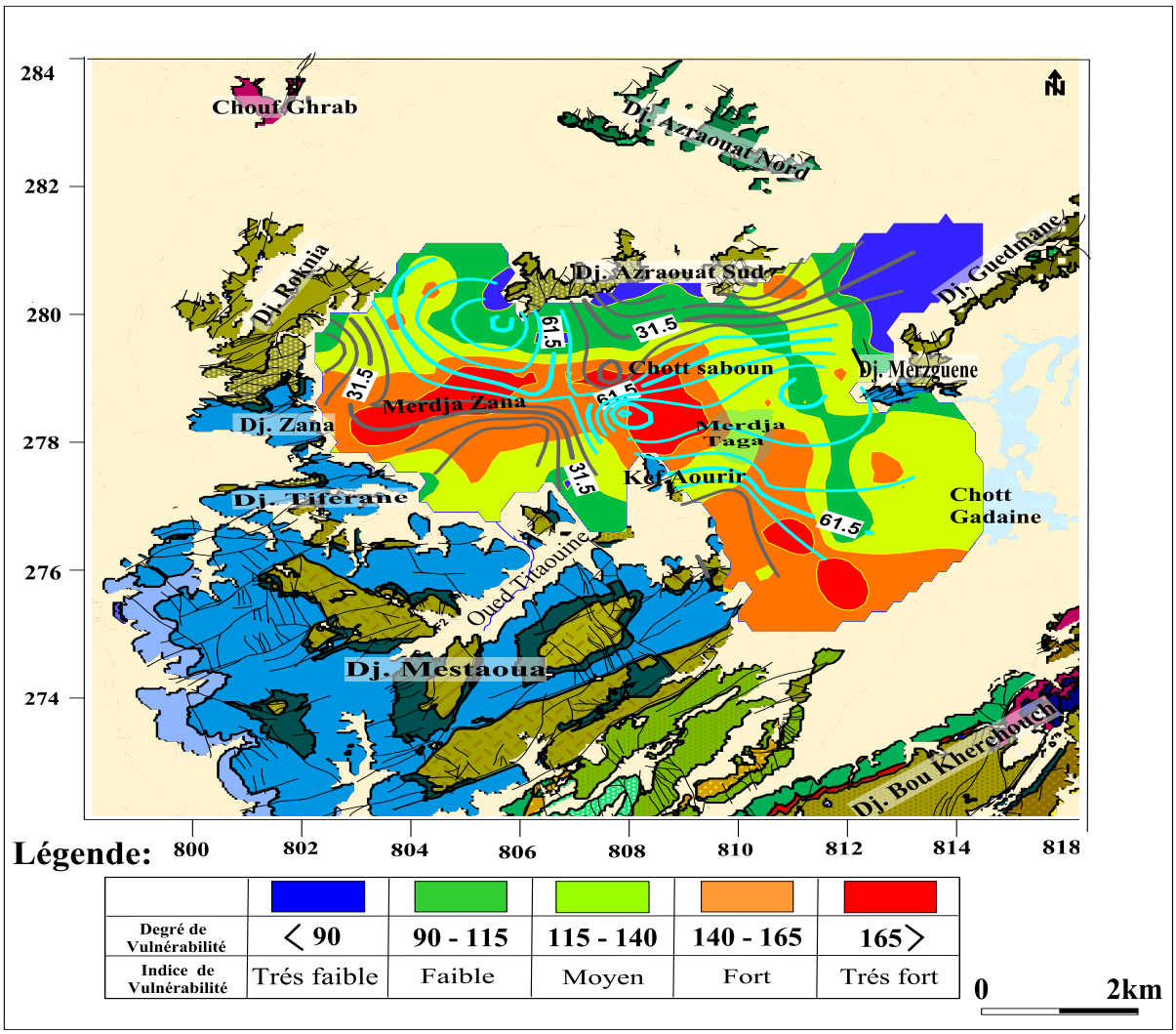


Fig. 7.19 : Carte de synthèse de la répartition spatio-temporelle des nitrates- vulnérabilité de la nappe superficielle de Zana

VII.7 Conclusion

Au long de ce chapitre, le problème de pollution des eaux de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire de Zana a été abordé. En raison de la vocation agricole de la région, nous avons axé notre travail sur la pollution de type agricole, liée à l'utilisation abusive et sans contrôle des entrants nutritifs. Les teneurs en nitrate dans la région sont alarmants et dépasses les normes OMS par endroits, le reste de la plaine sollicite plus d'attention, car les teneurs sont élevées et se rapproches des teneurs limites recommandées. Pour tenter d'évaluer et de cartographier les zones vulnérables relatives à la nappe de Zana, la méthode DRASTIC a été appliquée. La mise en œuvre de cette méthode a nécessité l'utilisation du Système d'Information Géographique (S.I.G) qui fournit une interface efficace pour les analyses des données spatiales. La carte de synthèse, nous a permis de mettre en évidence une tendance de vulnérabilité à la pollution très forte, indiquant ainsi une menace par infiltration des polluants à partir de la surface du sol. La répartition spatiale selon les classes de vulnérabilité de la nappe de Zana montre des indices DRASTIC les plus élevés dans les zones centre et l'Ouest ainsi que la zone Sud–Est, où on trouve la présence de Chott saboun et de Merdja Zana et Taga. La carte de vulnérabilité de Zana est un outil facilement utilisable. Elle présente des informations utiles pour la prise de décision pour la protection de l'eau et pour le diagnostic initial des impacts de la contamination accidentelle.

Les zones à risque coincident avec les aires très vulnérables qui connaissent une mise en valeur agricole intensive et une augmentation de la population péri-urbaine (Zana-Ouled Sbaâ et Taga) exceptionnellement rapide et brutale et sans équilibre avec la croissance économique. Les moyens d'assainissement souvent inadaptés aux conditions et au mode de vie représentent, un risque majeur pour la qualité des eaux souterraines dans cette région.

Enfin, la comparaison de la carte DRASTIC de vulnérabilité avec l'évolution spatiale des nitrates a fait ressortir la bonne coïncidence entre les deux cartes. Ceci, nous a permis de valider la carte DRASTIC de vulnérabilité à la pollution de la nappe de Zana.

Conclusion Générale et Perspectives

Conclusion Générale et Perspectives

I. Conclusion générale

La présente étude, qui a porté sur l'aquifère superficielle du Mio-Plio-Quaternaire de la plaine de Zana, située au Nord-Est de l'Algérie, a abouti aux conclusions suivantes :

La région de Zana est relativement plane, caractérisée par un relief modéré (pente douce à très faible pente) avec une altitude moyenne de 935 m, appartenant au bassin versant des hautes plaines constantinoises et plus précisément au sous bassin versant Merdja Zana (07.02), elle est soumise à un climat semi-aride. Cette semi aridité favorise une agressivité climatique qui se traduit par une insuffisance en eau due essentiellement à l'irrégularité des précipitations et provoque une absence de couverture végétale, ce qui expose la région à une augmentation des températures, de l'évaporation et à une érosion plus ou moins intense. Le réseau hydrographique est peut développer et de type endoréique avec un écoulement temporaire.

L'étude géologique en corrélation avec les données de la prospection géophysique met en évidence l'existence de deux formations. La première de surface d'âge Mio-Plio-Quaternaire est formée par des niveaux sableux, de graviers, de calcaire lacustre et des intercalations argileuses. La deuxième formation est carbonatée et formée essentiellement par des calcaires du Crétacé inférieur et du Jurassique supérieur de l'ensemble sud setifien et du parautochtone aurésien. Le recouvrement de surface atteint dans certains endroits les 200 m d'épaisseur notamment au milieu de la plaine et une faible épaisseur en bordure de la plaine et au voisinage des massifs.

L'étude climatologique a abouti à la confirmation de l'appartenance de la région au climat semi-aride influencé par les courants humides de la méditerrané en hiver et chauds du Sahara en été. Quant au bilan hydrologique ; on constate qu'il est déficitaire pour les deux stations étudiées et enregistre un déficit de plus de 500 mm. L'infiltration directe à partir du sol est pratiquement nulle, ce qui pose le problème de l'infiltration directe au niveau de la plaine (nappe du Mio-Plio-Quaternaire).

L'aperçu hydrogéologique de la plaine montre que les formations du Crétacé inférieur et du Jurassique supérieur peuvent offrir des possibilités aquifères très intéressantes de même que la formation superficielle, elle présente des potentialités aquifères non négligeables. Les deux aquifères sont superposés et en communication par endroits. L'aquifère superficiel contenu dans le remplissage du Mio-Plio-Quaternaire d'une épaisseur pouvant atteindre les 200 m d'épaisseur est alimentée par les massifs carbonatés qui l'entoure et son exutoire principal est le Chott Saboun et la Merdja de Zana et Taga. L'aquifère profond karstique contenu dans

les massifs calcaires et dolomitiques du Crétacé inférieur et du Jurassique supérieur dont l'exutoire naturel est l'ensemble de sources qui émergent en surface est alimentée à partir des précipitations efficaces sur leur affleurement. Les eaux pénètrent dans les fissures et les pores communicants pour aboutir à un véritable réseau souterrain pouvant acheminer de grands volumes d'eau. Ce réseau se manifeste en profondeur par une perte totale ou partielle lors du fonçage de forages.

La surface piézométrique garde la même morphologie suivant la topographie et montre une convergence vers les dépressions de Merdja de Zana et le Chott Saboun, qui représentent des exutoires naturels de la nappe. La fluctuation piézométrique enregistrée est en liaison directe avec la pluviométrie

L'étude hydro-chimique a permis d'attribuer l'origine évaporitique aux éléments Na^+, Mg^{2+}, K^+, Cl^-, SO_4^{2-}, quant à l'élément HCO_3^-,il est issu des formations carbonatées et l'élément Ca^{2+} provient à la fois des formations carbonatés et évaporitique. La comparaison des concentrations des éléments chimiques qui caractérisent les formations géologiques principales de la plaine de Zana, a mis en relief la dominance des ions gypsifères et salifères par rapport à ceux carbonatés dans l'acquisition de la salinité. Les différentes campagnes d'analyses effectuées montrent que les eaux ont le même faciès hydro-chimique qui est du type sulfaté et chloruré magnésien ou on a une dominance de l'anion SO_4^{2-} sur Cl^- et HCO_3^-et du cation Mg^{2+} et Ca^+ sur Na^+ est K^+. Le calcul de l'indice de saturation des minéraux carbonatés et gypsifères a montré que les premiers ont tendance à s'équilibrer avant les seconds, ce qui explique les teneurs importantes des éléments chimiques provenant de la dissolution des gypses. Les eaux de la plaine sont plus sulfatées que chlorurés à cause du lessivage des terrains riches en sulfates et au engrais à base de sulfates utilisés pour l'agriculture. Les classifications de Richards et celle de Wilcox ont montré que la majorité des points d'eau de la plaine de Zana sont acceptables et peuvent être exploitées pour l'irrigation.

Quant à l'aspect environnemental, En se référant aux résultats d'analyses chimiques, la pollution azotée des eaux souterraines de la plaine de Zana commence à se ressentir et dépasse dans plusieurs points la teneur maximale recommandée. Les investigations sur les sources de pollution de la nappe superficielle de la plaine de Zana, ont fait apparaître une moyenne contamination de celle-ci par des nutriments agricoles, qui sont utilisés sans aucune maîtrise préalable, ce qui contribue à la dégradation de la qualité des eaux. L'interprétation de l'évolution des nitrates en fonction de la lithologie et de l'hydrodynamique des eaux souterraines a montré que la contamination de la nappe est très accentuée au centre de la plaine. Le sens d'écoulement des eaux de ruissellement, la nature lithologique de la couche vadose et

celle de la couche aquifère ont favorisé la contamination de cette dernière et ont joué un rôle sur la répartition des nitrates dans la plaine. L'examen de la carte de vulnérabilité de l'aquifère de plaine de Zana nous a permis d'identifier un indice DRASTIC qui met en évidence une nappe à vulnérabilité faible à la pollution sur les reliefs et les piedmonts surplombants la plaine et un indice moyen à très fort au centre de la plaine.

II. Perspectives

Et en raison de l'intensification de l'exploitation agricole, de la densité croissante de la population et des unités d'élevage, un programme de contrôle et de recherche devra être élaboré pour les prochaines saisons pour un suivi rigoureux. La meilleure façon de se protéger des nitrates est d'abord d'en moins utiliser en agriculture, éventuellement d'en moduler les apports en fonction des propriétés locales des sols. Donc une optimisation de l'usage des engrais suivant le type de culture, la nature du sol, sa capacité d'échange cationique et sa richesse en argiles, le type de semoir, la période de fertilisation et le type d'engrais. Des doses précises d'engrais devront être recherchées par un autre travail plus précis et les résultats utiles doivent être communiqués aux collectivités locales et aux agriculteurs.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

Adams B. and Foster S.S.D (1992). Land-surface zoning for groundwater protection. Jour. Institution of Water and Environmental Management, n°6, p.312-320.

Albinet M.and Margat J .(1970). Cartographie de la vulnérabilitéà la pollution des nappes d'eau souterraines. Orléans, France, Bull. BRGM 2éme série, section 3, n .4, p.13-22.

Aller L., Bennet T., Lehr J.H., Petty R.J., and Hachett G. (1985). DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeology settings. U.S. Environmental Protection Agency, EPA/600/2-87-036,455p.

Aller L., Bennet T., Lehr J.H., Petty R.J., and Hachett G. (1987). DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeology settings. U.S. Environmental Protection Agency, Ada, OK, EPA/600/2-87-036.

Andersen L.J. and Gosk E. (1987). Applicability of vulnerability maps. Environmental Geology and Water Sciences, 13/1, p. 39-43.

Athamena A., Menani M.R. (2018). Nitrogen flux and hydrochemical characteristics of the calcareous aquifer of the Zana plain, northeast of Algeria. Arabian Journal of Geosciences 11 :356.

Athamena A. (2008). Etude de l'évaluation du flux azoté au niveau de la plaine de Seriana - Zana el Beida. Mémoire. Magister. Départ. d'Hydraulique, Univ. de Batna, 147 p.

Athamena. M (2006). Etude des ressources thermales de l'ensemble allochtone sud setifien. Mémoire de Magistère, Départ. d'Hydraulique, Univ. de Batna, 131 P.

Bachmat Y. and Collin M. (1987). Mapping to asses groundwater vulnerability to pollution. TNO Committee on Hydrological Research, The Hague, Proceedings and Information N°.38,p.297-307.

Bagnouls F. & H. Gaussen (1953)- Saison sèche et régime xérothermique. Documents pour les cartes des productions végétales, t. III, vol. I, art. 8, 47 p.

Bellion J .C. (1973) : Etude géologique et hydrologique des monts de Bellezma .Thèse de doctorat, Université de Paris.

Benaabidate L, (2000). Caractérisation du bassin versant de Sebou : Hydrogéologie, qualité de l'eau et géochimie des eaux thermales. Thèse d'Etat, faculté. Sciences techniques Fes-Saiss.

Benacchio S. et al (1988). Difesa degli acquiferi dell'alta pianura veneta, stato di inquinamento e vulnerabilità dell acque soterranee del bacino del Brenta. Vol.5 : Vulnerabilità dei corpi idrici soterranei all'inquinamento. Monography G.N.D.C.I.- C.N.R.n°207, Venice,21p ,2 maps , 1 :50 000 and 1 :25 000.

Benbouih H.(2000). Contribution à l'évaluation de la pollution métallique des zones humides de la région du Ghrab-cas du lac Fouarat. Thèse de doctorat, université Ibn Tofail Kenitra. Maroc.

Belan J. (1979). Influences des pratiques culturales sur le lessivage de l'Azote. Essais d'évolution du lessivage par un modèle pratique de l'azote Mém. Agence financière de bassin. Service-Normandie. G.E.A.R.A, Station Agronomique de l'Aisne.20pp.

Berkaloff, E (1938). - Notice explicative concernant le diagramme logarithmique de la composition chimique des eaux (Rapport inédit, Direction des Travaux Publics Tunis).

Blum A., Chery L., Barbier J., Baudry D. & Petelet-Giraud E. (2002) - Contribution à la caractérisation des états de référence géochimique des eaux souterraines. Outils et méthodologie. Rapport BRGM/RP-51549-FR, 5 volumes.

Bouillin J.-P, (1986). Le bassin maghrébin : une ancienne limite entre l'Europe et l'Afrique à l'ouest des Alpes, Bull. Soc. géol. France 8 (4) 547–558.

Breeuwsma A., Wosten J.H.M., Vleeshouwer J.J., Van Slobbe A.M., and Bouma J.(1986). Derivation of land quality to assess environmental problems from soil surveys. Jour. Soil Sci. Soc. Of America 50,p.186-190.

Bouchnan R. (2015). Vulnérabilité des aquifères fracturés : méthode F-DRASTIC et aspect dynamique. Applications aux aquifères d'Angad et de Bou-Areg (Maroc). Thèse, Univ. Abdelmalek Essaadi, Tanger, 165 P.

Castany G. (1963) : Traité pratique des eaux souterraines. Edit. Dunod. Paris. 657 pages

Castany G. (1968) : Prospection et exploitation des eaux souterraines. Edit. Dunod. Paris.717 pages.

Castany G. (1982) : Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Edit. Dunod. Paris. 236 pages.

Chabour N. (1993) : Etude hydrogéologique de la plaine d'Ain Djasser (Bourhzel). Mémoire de Magistère, Institut sciences de la terre, Univ. de Constantine, 198 P.

Chabour N. (1997) : Etude hydrogéologique de la plaine d'Ain Djasser-Zana. Mémoire d'ingéniorat, Univ. de Constantine, 200 P.

Chadi M. (2004) : Cadre géologique et structural des séries crétacées néritiques du Constantinois (Est- Algérien). Thèse doctorat d'état, Départ. Science de la terre, Univ. Constantine, 219 P.

Chapuis Robert P. (2007) . Guide des essais de pompage et leurs interprétations le service de l'aménagement et des eaux souterraines du ministère de développement durable, Québec, 111p.

Chebah L. (2004). Etude hydrogéologique de la plaine de Zana-Chott Saboun (W de Batna Est Algérien). Mémoire de Magistère, Départ. d'Hydraulique, Univ. de Batna.

Chiang C.F, Soudi B. and Mereno A. (1983). Soil nitrogen minéralization and nitrification under moroccan conditions .proc. in the Coll. inst .Potash, Institue, Bern pp129-139.

Civita M. (1987a). La previsione e la prevenzione del rischion d'inquinamento delle acque sotteranne alivello regionale mediante le carte di vulnerabilià. Proc. Congr. « Inquinamento delle acque Sotterranee : Previsione e Prevenzione », Mantova, p.1-27.

Civita M.(1990a). La valutazione della vulnerabilità degli aquiferi all'inquinamento. Proc. 1st Conv.Naz. « Protezione e Gestione delle Aque Sotterane : Metodologie, Techologie e Obiettivi », Marano sul Panaro, v.3,p.39-86.

Civita M.(1990b). Legenda unificata per le carte della vulnerabilità all'inquinamento dei corpi idrici sotteranei. G.ND.C.I.-C.N.R. Pubbl. n 276, Pitagora Editrice Bologna, 13p.

Civita M. (1993). Groundwater vulnerability maps: a review. Proc. IX Symp. On pesticide Chemistry «Degradation and Mobility of Xenobiotics », Piacenza, Italie, October 11-13, 1993,p. 587-631.

Criaud A. &Fouillac C. (1986) - Study of CO2- rich thermomineral waters from the central French massif. 2. Behavior of some trace-metals, arsenic, antimony and germanium: Geoch. Cosmoch. Acta, vol. 50, pp. 1573–1582.

Datta P.S. &Tyagi S.K. (1996). Major ion chemistry of groundwater in Delhi area: Chemical weathering processes and groundwater flow regime: J. Geol. Soc. India, vol. 47: pp 179-188.

Debieche T.H. (2002). Evolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle, Application à la basse plaine de la Seybouse - Nord-Est algérien. Thèse de Doctorat. Univ. Franche-Comté. Besançon. France. 235 pages.

Debye P. &Hückel E (1923). Zur Theorie der Electrolyte. Phys. Z., 24: 185-208.

Dercourt J. et Paquet J. (1978). Géologie objet et méthodes. Edit. Dunod. Paris. 329 pages.

Demdoum .A. (2010). Etude hydrogéochimique et impact de la pollution sur les eaux de la région d'el Eulma. Thèse doctorat d'état, Université Mentouri Constantine.

Dubreuil P. (1974). Initiation à l'analyse de l'hydrologie. Edit. Masson. Paris. 210 pages.

Durand-Delga M., Fonbote J. M, (1980). Le cadre structural de la méditerranée occidentale, in : j. aubouin, j. debelmas, m. latreille (EDS.), Géologie des chaînes alpines issues de la Téthys, Colloque no 5, 26e Congrès géologique international, Paris, Mém. BRGM 115 67–8.

Emberger, L., (1971).- Travaux de botanique et d'écologie. Masson et Cie, Paris, 520p.

Favreau G., Leduc C. & Marlin C. (2000) - Représentativité de Echantillonnage géochimique et hydrodynamique en nappe libre de milieu semi-aride. J. Afric. Eart Sci, vol. 31, n°3, pp. 669-678.

Fisher, R. A. (1922). – On the mathematical foundations of theoretical statistics. Philos. Trans. A 222, pp. 309-368.

Foster S. and Hirata R. (1988). Groundwater pollution risk assessment. Pan American Center for Sanitary Engineering and Environmental Sciences, Lima, Peru, 79 p.

Foster S.S.D. (1987). Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. TNO Committee on Hydrological Research. The Hague, Proceedings and Information N.38, P. 69-86.

Foucault A. et Raoult J.E (1980). Dictionnaire de Géologie Masson&cie édit. Paris, 334pages.

Freeze RA. et Cherry JA. 1979. Groundwater. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey: 604

Friesel P. (1987). Vulnerability of groundwater in relation to subsurface behavior of organic pollutants. TNO Committee on Hydrological Research. The Hague, Proceedings and Information N.38, P. 729-740.

Fritsh P.et Saint blanquat G. (1985). La pollution par les nitrates. La recherche : Revue mensuelle n°169, septembre 1985. pp1106-1115.

Gardin N., Wojda P. et Brouyère S. (2006). Stress factors and generalized physically based groundwater vulnerability assessment FP6 GABARDINE EU Project. Unpublished Work.

Glaçon J. (1967) . Recherches sur la géologie et les gites métallifères du Tell Sétifien Bull. serv. géol. Alger, 2 volumes ; cartes.

Gouaidia L., Influence de la lithologie et des conditions climatiques sur la variation des paramètres physico –chimiques des eaux d'une nappe en zone semi-aride, cas de la nappe de Meskiana, nord-est algérien. Thèse de doctorat. Université de Badji Mokhtar, Annaba. 130 p.

Guiraud R. (1971). Aperçue sur les principaux traits structuraux du Hodna et des régions voisines, Public. Serv. Géologique de l'Algérie, Alger 45 à 49 P.

Guiraud R. (1990). Evolution Post-Triasique de l'avant pays de la chaine Alpine en Algérie, Public. Office national de la géologie, Alger 259 P.

Goosens M. and Van Damme M. (1987). Vulnerability mapping in Flanders, Belgium. TNO Committee on Hydrological Research. The Hague, Proceedings and Information N.38, P.355-360.

Hafen U., Merkel B., and ullsperger I. (1989). Computer aided design of hydrogeological maps. Memoirs of the Intl. Symp. On Hydrogeological maps and tools for Economic and social Development, Hannover, May 30-June 2, 1989, p. 567-575.

Hallouche, B., (2017). Bassin versant de la haute Mekrra (NW Algérien) : Hydrologie, Géochimie et Pollution. Thèse doctorat d'état, Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen. p 284.

Holmberg M., Johnston j., and Maxe L. (1987). Assessing aquifer sensitivity to acid deposition. In vulnerability of soil and groundwater to pollutants (W. van Duijvenbooden and H.G. van Waegeningh, eds.), TNO Committee on Hydrological Research, The Hague, Proceedings and Information n. 38,P. 373-380.

Johnston R.H. (1988). Factors affecting groundwater quality. National Water Summary 1986-Hydrologic Events and Ground-Water Quality, U.S. Geolo.

JORA N° 18 (23 Mars 2011). Décret exécutif n° 11-125 du 17 Rabie Ethani 1432 correspondant au 22 mars 2011 relatif à la qualité de l'eau de consommation humaine.

Josopait V. and Schwerdtfeger B. (1979). Geoscientific map of naturel environment potential of Lower Saxony and Bremen. CC3110 Bremerhaven-Grundwasser. Niedersachsischenlandesamt fur Bodenforschung, Hannover, map 1:200 000.

Khemoudj K. (2001) : Impact de la pollution industrielle, urbaine et agricole sur les eaux de la nappe superficielle de la région d'El-Eulma (wilaya de Sétif), Mémoire de Magistère, Départ. de Chimie, Univ de Annaba, 196 P

Klauco S. (1987). Motion of pollutants in the groundwater as of their vulnerability. TNO Committee on Hydrological Research. The Hague, Proceedings and Information N .38, P. 403-407.

Kloppmann W., Bourhane A. &Asfirane F. (2011) - Méthodologie de diagnostic de l'origine de la salinité des masses d'eau. Emploi des outils géochimiques, isotopiques et géophysiques. Rapport BRGM/RP-60026-FR, 37P.

Campagne Générale de Géophysique (1969). Prospection géophysique des Chotts Gadaïne et Saboun et de la plaine d'El Madher, 39 P

Laffite R. (1939) : Etude géologique de l'Aurès (Algérie). Thèse 3e cycle, faculté des sciences d'Alger, 451 P.

Marcolongo B. and Pretto L. (1987). Vulnerabilità degli acquiferi nella pianura o nord di Vicenza. Pubbl. G.N.D.C.I-C.N.R.n.28, 13p. map 1 :25 000.

Margat J. (1968). Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution. Base de la cartographie, BRGM, 68 SGL 198 HYD, Orléans, France.

Margat J. et Suais-Parascandola MF. 1987. Mapping the vulnerability of groundwater to pollution. Some lessons from experience in France. In: Duijvenbooden W and Waegeningh HG. Vulnerability of soil and groundwater to pollutants: international conference Noordwijkaan Zee, The Netherlands, In: Proceedings and information/TNO Committee on Hydrological Research. The Hague: TNO, 1987.

Martin G. (1979). Le problème de l'azote dans les eaux. Techniques et Documentation, 279 p.

Maya A.L. &Loucks M.D. (1995). Solute and isotopic geochemistry and groundwater

flow in the Central Wasatch Range, Utah; Hydr. J., vol. 17, n°2, pp. 31-59.

Menani M.R. (1991). Etude hydrogéologique de la plaine d'El Madher : géologie, climatologie, hydrogéologie et modélisation des écoulements souterrains. Thèse de doctorat nouveau régime, Université de Nancy 1, France. 410 p.

Menani M.R. (2001). Evaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution de l'aquifère alluvionnaire de la plaine d'El Madher, Nord-Est algérien, selon la méthode Drastic. Science et changements planétaires/Sécheresse, vol. 12(2), 95-101.

Meyer De Stadelhofe C. Application de la géophysique aux recherches d'eau. Exposé à l'université de Lausanne. 183 P.

Murat V. 2000. Etude comparative des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères à la pollution : application aux aquifères granulaires du piémont laurentien. Mém. Présenté pour l'obtention du grade de maître ès sciences (M. Sc.).Univ. du Québec INRS-Géoressources. P191.

Nezha el Mahmouhi. (2004). Les ressources en eau souterraine de la plaine de Gharb : Hydrogéochimie et Vulnérabilité. Thèse de doctorat. Université de Mohammed V-Agdal, Rabat.205 p.

Olmer M. et Rezac B. (1974). Methodical principles of maps for protectio of groundwater in Bohemia and Moravia, Scale 1 :200 000 .Intl Assoc Hydrogeologists, Memoires, Tome X, Congress de Montpellier,1.

O. N. M de Batna : Données climatologiques de la station d'Ain Skhouna et Ain Djasser.

Palmquist R.C. (1991). Ground water vulnerability: a DRASTIC approach. Washington Department of Ecology, Olympia, WA 98504, Air & Water Management Assoc., Vancouver, BC, Canada, june 16-21, 1991,16p.

Parkhurst D.L. &Appelo, C.A.J. (1999) - User's guide to PHREEQC (version 2)-A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. US Geol. Survey, Water-Resour. Inv. Rep. 99-4259, 312 p.

Plagnes V. (2000). Structure et fonctionnement des aquifères karstiques. Caractérisation de la géochimie des eaux. Thèse de Doctorat. Univ. Montpellier II. France. 376 pages.

Pratt, P.F and Jury, W.A (1984). Pollution of unsaturated zone with nitrate, in Yaronb and Dagan. G (ed) .Pollutants in porous media p: 52-67. Ecological stadies vol 47.

Remmèneras G. (1986) : Hydrologie de l'ingénieur. Edit. Eyrolles. Paris. 183 pages.

Remy, J.C. (1974). Dynamique de l'azote minéral dans le sol INRA-chaire d'agriculture cycle supérieur d'agronomie. Paris.

Roche M. (1963) - Hydrologie de surface. Ed. Gauthier-Villars, 430 p.

Roche M., (1986). - Dictionnaire français d'hydrologie de surface avec équivalents en anglais, espagnol, allemand, Masson Editeur, 288 p.

Rodier J., (1978) - L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires et eaux de mer. 6ème édition. Ed. Dunod technique, Paris, 1125 p.

Rouabhia .A., 2006. Vulnérabilité et risque de pollution des eaux souterraines de la nappe des sables miocènes de la plaine d'El Ma El-Abiod Nord – Est Algérien. Université Badji Mokhtar-Annaba.

Savornin J. (1920). Etude géologique de la région du Hodna et du plateau setifien. Thèse de Doctorat. Sc. Nat. Univ. Lyon. France. 502 pages.

Schoeller H. (1959) : Hydrologie des régions arides progrès récents. UNESCO. 126 pages.

Schoeller H. (1964)- La classification géochimique des eaux. IASH, n° 64, pp. 16–24.

Schoeller, M. (1969). – Les teneurs mensuelles et annuelles en chlore de l'eau de pluie dans le bassin d'Aquitaine. Ass. int. Hydr. Scientifique, assemblée Helsinki. p.343-350.

Schoeller. H. (1962)- Les eaux souterraines. Ed. Masson et Cie, Paris, 642 p.

SONATRACH : Géologie de l'Algérie, Division exploration, centre de recherche et développement Service géologique de l'Algérie (1966) : Travaux des collaborateurs (1965), bulletin 33,96P.

Sotornikova R. and Vrba J. (1987). Some remarks on the concept of vulnerability maps. TNO Committee on Hydrological Research, The Hague, Proceedings and Information N°38, p. 471-476.

Soudi B.C. Chiang M., Badraoui. M., Agbani et Marcoen J.M. (1999). Rapports annuels du projet IAV Hassan II, Etude de l'impact d'intensification agricole sur la qualité des sols et des eaux dans le périmètre irrigué des Doukkala.

Subyani, A.M. (2005). Hydrochemical identification and salinity problem of groundwater in Wadi Yalamlam basin, Western Saudi Arabia. J. Arid. Envir. N° 60, pp. 53-66.

Thornthwaite, C.W., (1948). An approach toward a rational classification of climate: Geographical Review, v. 38, p. 55–94.

Tixeront, J. & .Berkaloff, E. (1956) – Méthodes d'étude et d'évaluation de l'érosion en Tunisie (10ème Assemblée UGGI, Rome). AIHS. N° 36, pp.172-177.

Turc, L. (1961) – évaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. Ann. Agronomique INRA, vol. 12 n°1, pp. 13-49.

Verdeil P. (1988). – abaque pour le calcul du déficit d'écoulement en Algérie. 2ème sém. Sc. de la terre, Alger.

Vierhuff F. (1981). Classification of groundwater resources for regional planning with regard to their vulnerability to pollution. Elsevier, Amsterdam, Studies in Env .Sci.1, p.1101-1105.

VILA J. M. (1977). Notices explicatives des cartes géologiques 1/50 000 de Bourhzel. Ministère de l'énergie. Algérie.

VILA J.M. (1980) : La chaine Alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro-Tunisiens. Thèse de Doctorat es Science naturelle, Univ. Pierre et Marie Curie Paris VI. 665 P.

Villumsen A., Jacobsen O.S., and Sounerskov C. (1983). Mapping the vulnerability of groundwater reservoirs with regard to surface pollution. Geological Survey of Denmark, Yearbook 1982, Copenhagen, p.17-38.

Vrana M. (1984). Methodology for construction of ground water protection maps. Hydrogeological Principles of Groundwater Protection, UNESCO/UNEP, Moscow, vol.1, P 147-149.

Vrba J. et Zoporozec A. (1994). Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability. International contributions to hydrogeology; Vol. 16.130 p.

Vrba J. (1991). Mapping of groundwater vulnerability. Assoc. of Hydrogeologists. Ground Water Protection Commission, an unpublished working pater for meeting in Tampa, USA, 35p.

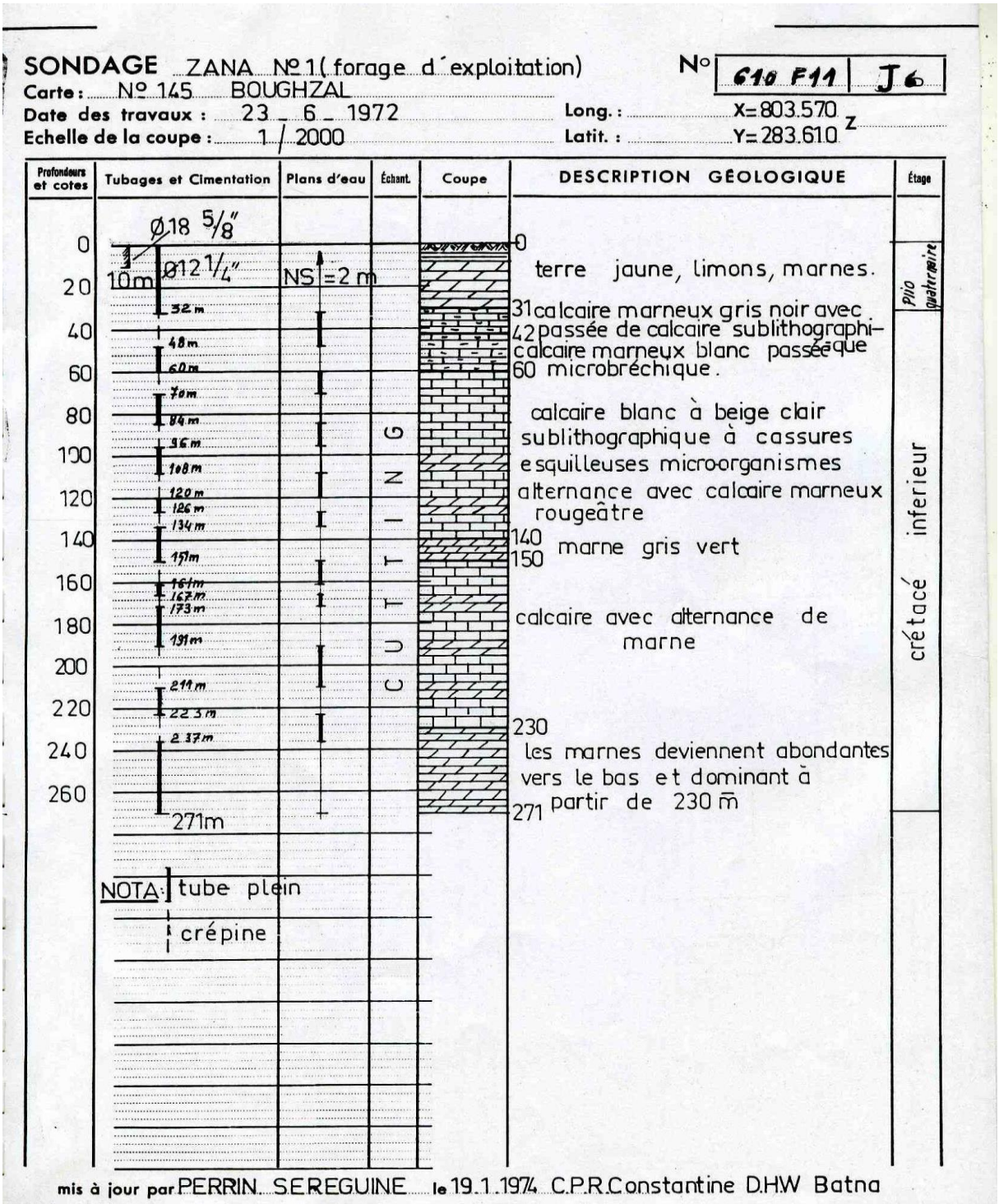
Wilcox L. V (1955) - Classification and Use of Irrigation Water, Washington: US Department of Agriculture. Circular, n° 969, 19 p.

Zilliox L(1990). Pollution par les nitrates, quelques remèdes. Supplément de la recherche N° 227.pp 19-21.

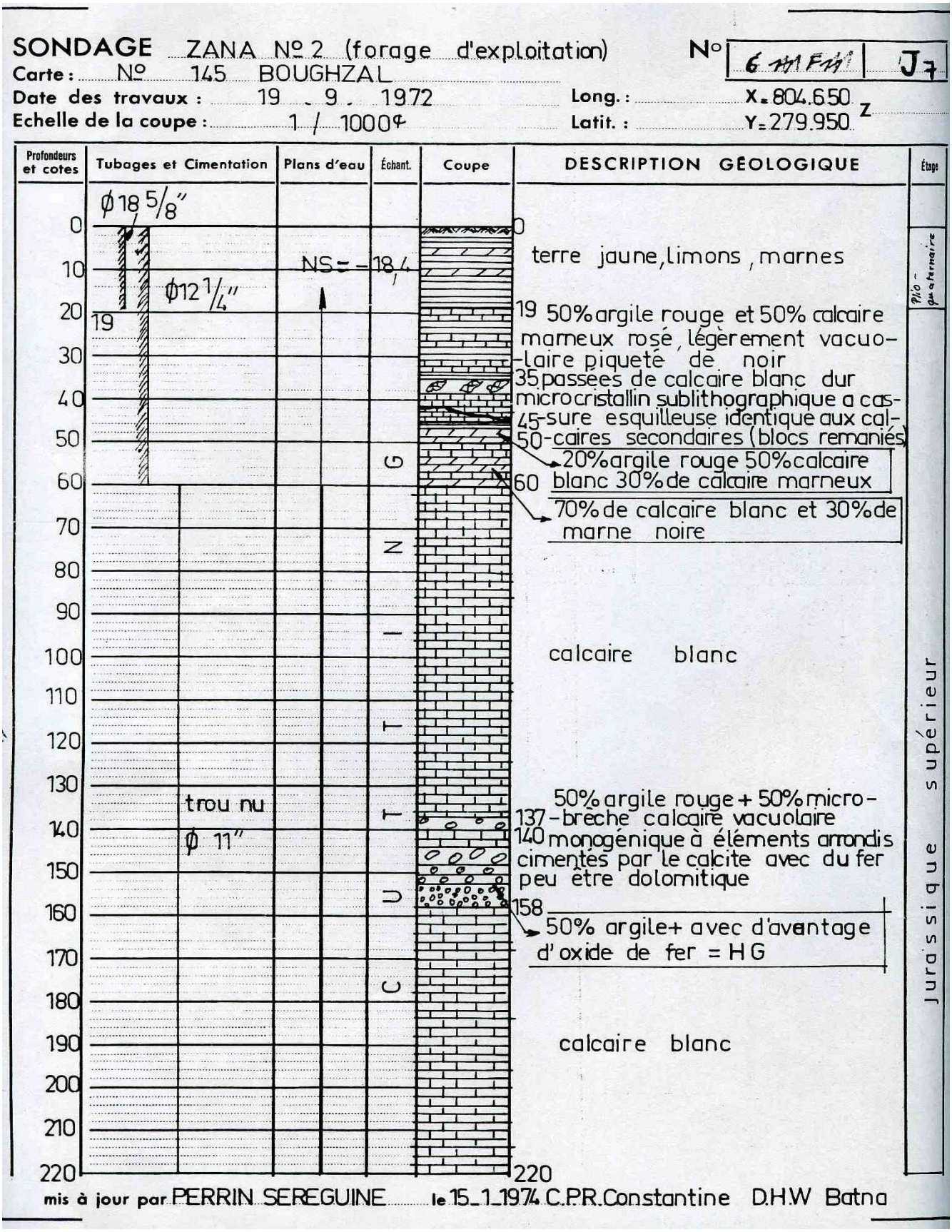
Annexes

Annexes

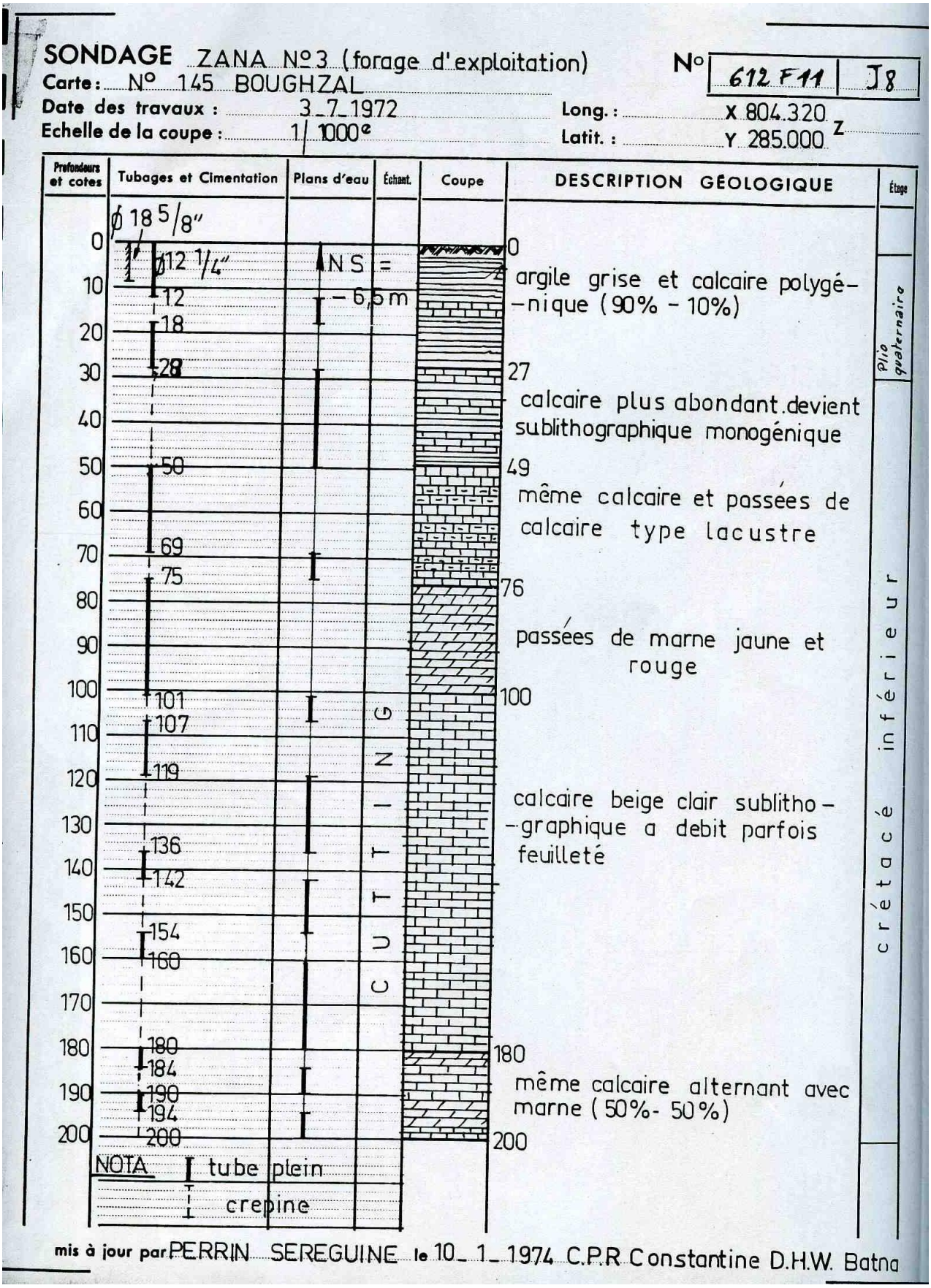
Log du forage de Zana J6 (DRE Batna)



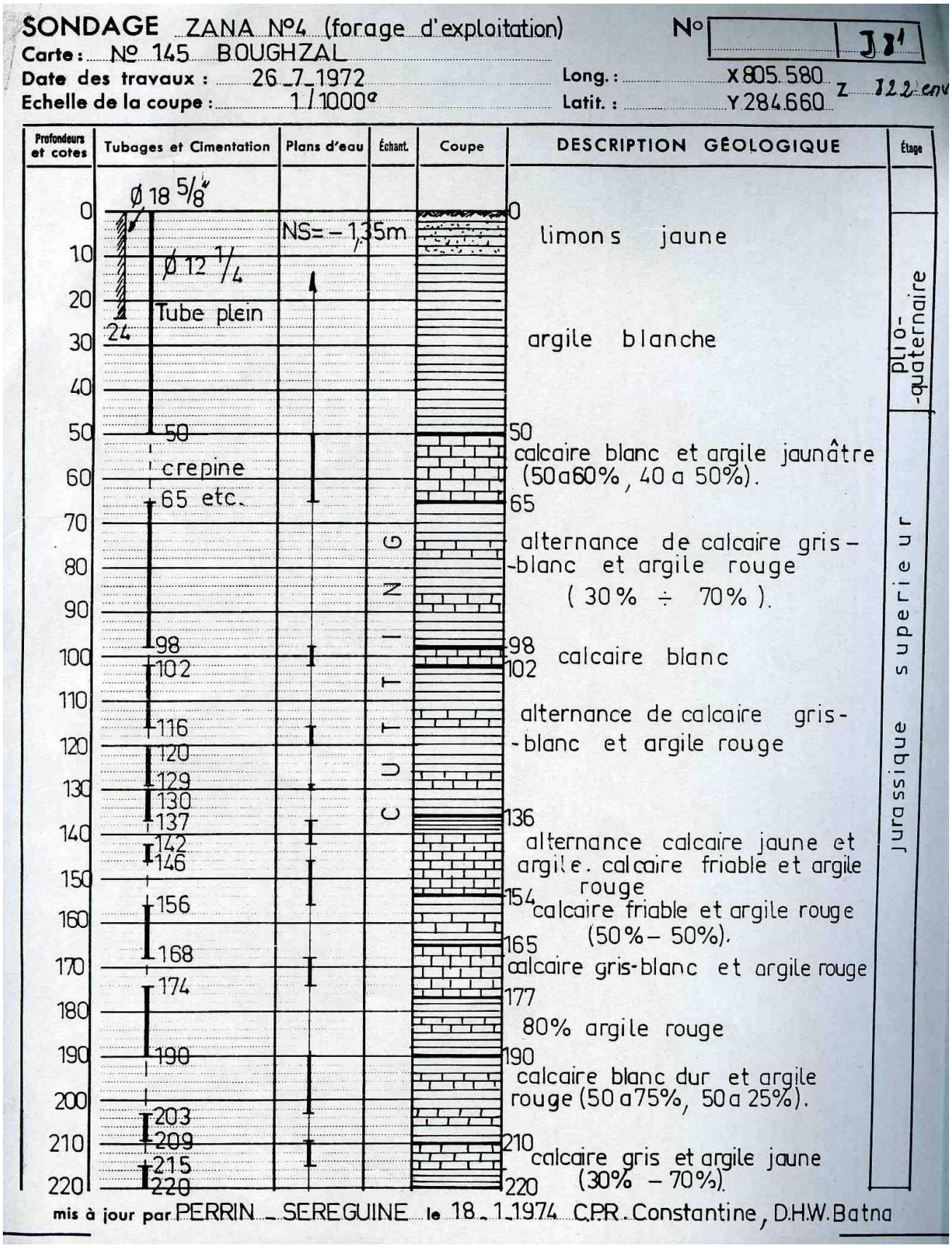
Log du forage de Zana J7 (DRE Batna)



Log du forage de Zana J8 (DRE Batna)



Log du forage de Zana J8' (DRE Batna)



Log du forage de Zana J9 (DRE Batna)

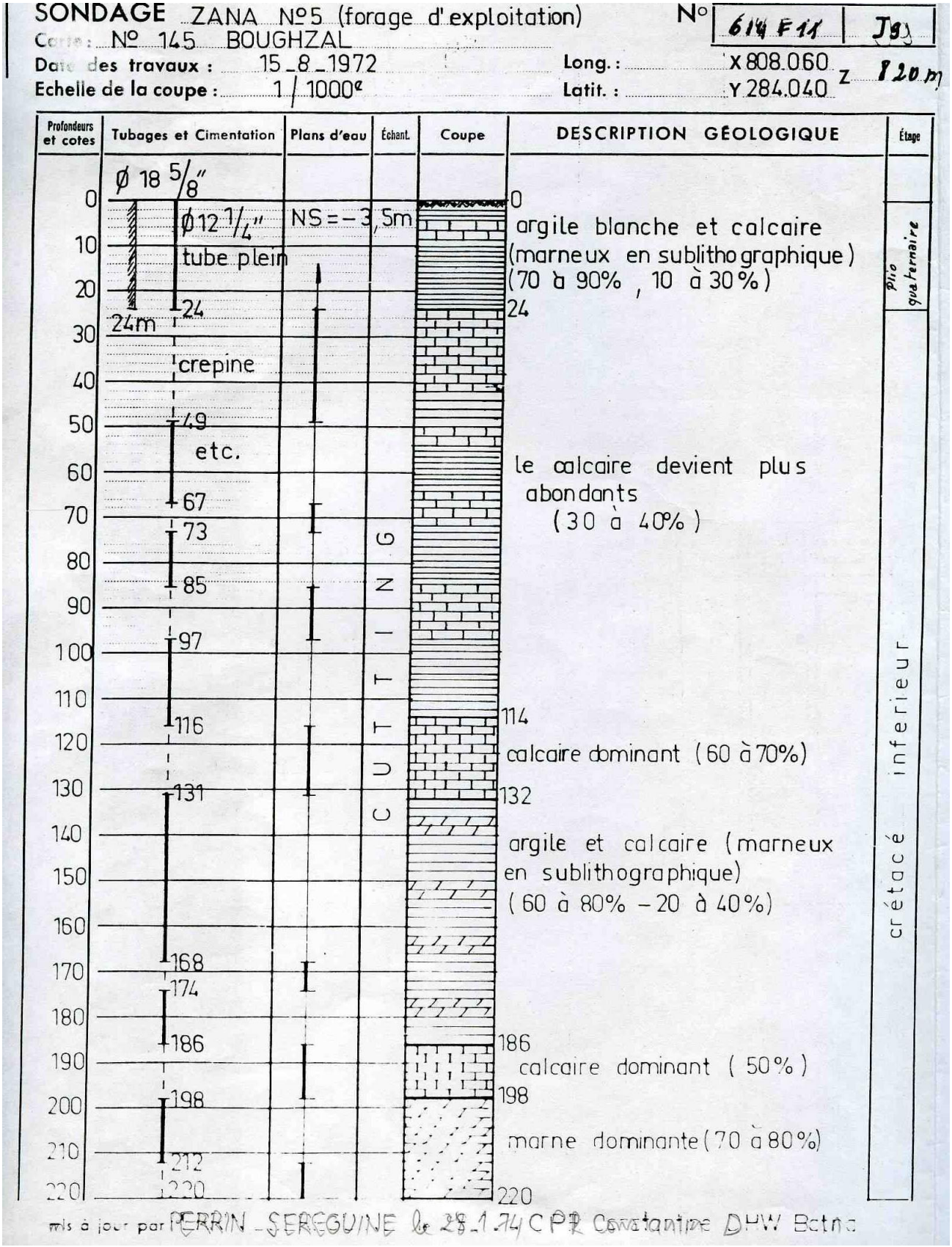


Tableau : Estimations des paramètres de la qualité de l'eau à l'irrigation (%Na et SAR)

Points d'eau	2013		2014		2015		2016	
	% Na	SAR	% Na	SAR	% Na	SAR	% Na	SAR
P89	24,66	1,49	24,44	1,46	12,11	0,66	16,69	1,37
P45	25,93	1,55	26,08	1,53	26,93	2,04	29,22	1,85
P46	18,71	0,95	17,17	0,85	32,43	1,80	19,55	1,33
P47	15,93	0,77	14,15	0,66	27,15	3,04	18,81	1,46
P80	20,99	1,37	19,85	1,28	16,78	0,71	24,50	1,72
P3	19,32	1,96	19,14	1,91	19,20	0,80	31,08	1,94
P43	19,24	2,33	19,41	2,30	38,07	2,48	22,17	1,25
P76	17,61	1,55	18,19	1,57	35,35	2,25	29,87	1,85
P57	14,03	1,02	14,72	1,07	41,30	2,50	15,56	1,11
P55	29,12	1,86	28,13	1,77	36,72	2,68	14,56	0,99
P49	11,21	1,23	10,93	1,20	32,87	2,01	26,72	1,78
P84	13,90	1,44	13,97	1,44	24,76	1,16	25,96	1,75
P85	34,24	2,99	34,72	3,02	34,48	1,95	16,95	1,49
P82	32,07	2,92	31,28	2,84	43,16	2,55	29,25	2,15
P93	24,31	1,85	24,71	1,86	43,87	3,13	16,80	1,38
P75	15,27	1,11	14,97	1,10	20,41	0,79	17,60	1,28
P91	18,30	1,50	18,58	1,51	16,67	0,70	26,12	1,58
P54	31,36	2,55	31,92	2,58	17,89	0,73	16,13	1,04
P50	14,18	1,16	15,06	1,22	50,34	3,92	20,26	1,42
P51	17,98	1,72	18,28	1,74	36,47	2,79	18,65	1,44
P44	29,31	2,00	48,10	4,27	46,34	4,89	45,24	3,54
P53	35,47	3,05	35,83	3,03	24,28	1,60	20,98	1,72
P67	49,36	5,44	48,54	5,23	21,14	1,68	26,42	1,96
P70	14,07	1,10	13,41	1,05	26,59	1,88	37,36	2,00
P73	17,83	1,15	19,38	1,26	39,26	2,97	19,32	1,96

Tableau : Précipitation et températures moyennes interannuelles enregistrées à la station Ain Skhouna-Aéroport et la station Ain Djasser

Points d'eau	Précipitations en mm		Températures en °C					
	Ain Djasser	Ain Skhouna-Aéroport	Ain Djasser			Ain Skhouna-Aéroport		
			Min	Max	Moy	Min	Max	Moy
1969	361.10	-	-	-	-	-	-	-
1970	66.09	-	-	-	-	-	-	-
1971	358.10	-	-	-	-	-	-	-
1972	277.50	-	-	-	-	-	-	-
1973	190.70	-	-	-	-	-	-	-
1974	269.60	-	-	-	-	-	-	-
1975	319.30	-	-	-	-	-	-	-
1976	255.60	-	-	-	-	-	-	-
1977	133.60	-	-	-	-	-	-	-
1978	169.20	-	-	-	-	-	-	-
1979	232.50	-	-	-	-	-	-	-
1980	285.90	-	-	-	-	-	-	-
1981	361.10	-	-	-	-	-	-	-
1982	149.90	-	-	-	-	-	-	-
1983	193.20	-	-	-	-	-	-	-
1984	207.40	-	-	-	-	-	-	-
1985	233.20	-	-	-	-	-	-	-
1986	292.90	-	-	-	-	-	-	-
1987	178.90	-	-	-	-	-	-	-
1988	368.40	-	-	-	-	-	-	-
1989	251.00	234.00			-	8.16	22.65	15.19
1990	352.20	456.70	-	-	-	8.61	22.03	15.28
1991	374.70	300.30	-	-	-	7.14	21.03	14.03
1992	248.30	445.10	-	-	-	6.97	21.38	14.05
1993	150.10	188.00	-	-	-	7.56	22.25	14.78
1994	276.80	215.50	-	-	-	8.35	23.34	16.02
1995	364.80	283.60	-	-	-	7.75	22.34	15.12
1996	194.30	393.70	-	-	-	8.01	21.58	14.89
1997	342.90	379.00	-	-		8.63	22.96	15.77
1998	260.30	269.40	7.44	23.13	10.81	7.80	22.48	15.01
1999	329.50	311.10	8.28	23.45	15.70	9.13	23.7	16.25
2000	168.70	292.80	7.29	23.72	15.37	8.03	23.74	15.66
2001	136.70	230.10	8.06	23.24	15.89	8.84	24.08	16.26
2002	347.80	287.00	8.06	22.35	15.65	8.72	23.48	15.88
2003	481.20	503.00	8.61	22.27	15.48	8.73	22.74	15.89
2004	353.20	596.80	7.28	22.71	14.77	7.77	22.53	14.98
2005	376.80	252.00	7.40	23.44	15.05	7.89	22.89	15.29
2006	254.30	377.40	8.13	22.63	15.78	8.56	23.54	15.96

2007	338.70	293.80	7.53	21.23	15.08	8.29	23.01	15.58
2008	390.89	348.40	7.66	22.88	14.45	8.38	23.03	15.63
2009	319.60	349.80	7.14	22.99	15.01	7.74	22.99	15.36
2010	387.80	280.60	8.32	22.69	15.65	8.88	23.28	16.04
2011	215.00	462.00	7.87	24.13	15.28	8.43	22.73	15.48
2012	244.50	207.20	7.53	23.13	15.83	7.68	23.97	15.87
2013	292.50	363.40	-	-	-	8.33	22.86	15.52
2014	296.30	275.90	-	-	-	8.58	23.83	16.20

Tableau : Valeurs critiques du coefficient de corrélation critique selon (A. Mangin)

Valeurs critiques du coefficient de corrélation selon A. Mangin.

Individus	Corrélation critique		Individus	Corrélation critique	
	Au seuil de 5%	Au seuil de 1%		Au seuil de 5%	Au seuil de 1%
5	0,992	0,997	25	0,684	0,750
6	0,979	0,991	30	0,638	0,705
7	0,961	0,981	35	0,600	0,667
8	0,943	0,969	40	0,568	0,643
9	0,926	0,955	45	0,541	0,606
10	0,903	0,941	50	0,518	0,580
11	0,883	0,926	60	0,477	0,539
12	0,864	0,912	70	0,445	0,505
13	0,846	0,889	80	0,419	0,476
14	0,828	0,883	90	0,397	0,449
15	0,811	0,869	100	0,378	0,429
16	0,797	0,854	125	0,341	0,391
17	0,782	0,843	150	0,313	0,359
18	0,766	0,828	200	0,272	0,314
19	0,754	0,818	250	0,244	0,290
20	0,741	0,804	300	0,223	0,258

Photos N° 01 et 02 : *Plans d'eau durant la période des hautes eaux (Chott et Merdja).*
Photos ATHAMENA Ali, Mars 2015

Photos N° 03 et 04 : *Affleurement des argiles gypseuses (Trias) suite aux travaux d'excavation au pied mont de Djebel Rokia, photos ATHAMENA Ali, 2016*

Photos N° 05 et 06 : *Exploitation intensive et extensive jusqu'aux abords des plans d'eau (Chott et Merdja), photos ATHAMENA Ali, Mars 2015*

Photos N° 07 et 08 : *Urbanisation croissante aux voisinage des plans d'eau (Risque des rejets d'assinissement), Photos ATHAMENA Ali, Mars 2015*