

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université de Batna
Faculté des sciences de l'ingénieur
Département d'hydraulique
Laboratoire de recherche en hydraulique appliquée

Année : 2008

Mémoire :

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magistère en Hydraulique
Option : Mobilisation des ressources hydriques et son impact sur l'environnement

ETUDE DE L'EVALUATION DU FLUX AZOTE
AU NIVEAU DE LA PLAINE
DE SERIANA – ZANA EL BEÏDA

Par : ATHAMENA Ali
Ingénieur d'état en hydraulique

Jury:

Président :	Dr KADID Abdelkrim, MC. U. Batna
Rapporteur :	Pr BOUDOUKHA Abderrahmane, Pr. U. Batna
Examineur :	Pr NEMMOUCHI Abdelmalek, Pr. U. Constantine
Examineur :	Dr BOUMAZBER Abderrahmane, MC. U. Tébessa

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à toutes les personnes qui m'ont permis de mener à bien ce modeste travail.

Je remercie tout particulièrement monsieur BOUDOUKHA Abderrahmane, professeur à l'université de Batna, de m'avoir encadré et suivi mon travail de près avec sa rigueur scientifique et ses précieux conseils;

Je remercie également messieurs les membres du jury:

- ✓ Pr NEMOUCHI Abdelmalek, professeur à l'université de Constantine ;
- ✓ Dr KADID Abdelkrim, maître de conférence à l'université de Batna ;
- ✓ Dr BOUMAZBER Abderrahmane, maître de conférence à l'université de Tébessa.

Sans oublier également messieurs:

- ✓ Dr LAHBARI Noureddine, chef de département de l'hydraulique à l'université de Batna;
- ✓ Mr DJAÏZ Fouad, maître assistant à l'université de Batna.

Mes meilleurs remerciements à ma sœur Malika qui m'a encouragé et aider pour réaliser ce modeste travail.

Mes remerciements les plus vifs vont également 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 assister.

TABLE DES MATIERES

Pages

Remerciements

Introduction générale

Premier Chapitre

Généralités

I.1 Situation Géographique	1
I.2 Habitant	1
I.3 situation Socio-économique	2
I.4 Couvert végétal	2
I.5 Conclusion	5

Deuxième Chapitre

Géomorphologie

Introduction	6
II.1- Etude physique (Caractéristiques de forme)	6
II.1.1 Indice de compacité de GRAVELUS	6
II.1.2 Rectangle équivalent	7
II.1.3 Densité de drainage	7
II.2- Ensembles morpho-structuraux	7
II.2.1 Les massifs carbonatés du Crétacé et du Jurassique	9
II.2.2 La plaine	9
II.3 le réseau hydrographique	9
II.4 Conclusion	10

Troisième Chapitre

Géologie

Introduction	11
III.1 Cadre Géologique	11
III.2 Aperçu stratigraphique	13
III.2.1 Formation peu ou pas tectonisées	13
III.2.1.1 Quaternaire	13
III.2.1.2 Mio-Pliocène	13

III.2.2 Formation de l'ensemble Sud-sétifien	13
III.2.2.1.Aptien (n ^{5b})	13
III.2.2.2 Barrémo-Aptien (n ⁴⁻⁵)	14
III.2.2.3 Barrémien supérieur (n ^{4b})	14
III.2.2.4 Barrémien (n ^{4a})	14
III.2.2.5 Néocomien (n ¹⁻³)	14
III.2.2.6 Jurassique supérieur (j ⁶)	14
III.2.2.7 Trias (t)	14
III.3 tectonique	16
III.4.Aperçu structural	16
III.4.1 Phases tecto-orogéniques	16
III.4.2 Phase Atlasique	16
II.4.3 Phase Alpine	17
III.5 Conclusion	21

Quatrième Chapitre

Climatologie

Introduction	22
IV.1 Paramètres météorologiques	22
IV.1.1 Les précipitations	22
IV.1.2 Les températures	25
IV.2 Les indices climatiques	26
IV.2.1 Indice d'aridité de De Martonne	26
IV.2.2 Le quotient pluviométrique annuel de Moral	27
IV.3 Estimation des paramètres du bilan hydrologique	30
IV.3.1 Evapotranspiration potentielle	30
IV.3.1.1 Méthode de Thornthwaite	30
IV.3.1.2 Méthode de Blaney-Criddle	30
IV.3.2 Evapotranspiration réelle	31
IV.3.2.1 Méthode de Coutagne	32
IV.3.2.2 Méthode de Turc	32
IV.3.2.3 Méthode de Verdeil	33
IV.4 Bilan hydrologique	33
IV.4.1 Bilan hydrologique de Thornthwaite	33
IV.4.2 Bilan hydrologique de Blaney-Criddle	36
IV.4.3 Comparaison des deux bilans	36

IV.5 Calcul du ruissellement	38
IV.6 Calcul de l'infiltration	38
IV.7 Conclusion	40

Cinquième Chapitre

Géophysique

Introduction	41
V.1 Brève description de la prospection électrique	41
V.2 Objectifs des campagnes	44
V.2.1 Résultats obtenus	45
V.3. Etalonnage des mesures	45
V.3.1 Forage F55 de Zana (S.E Q7bis- étude de 1969)	45
V.3.2 Forage d'El Madher (S.E D2-étude de 1969)	45
V.4 Echelle des résistivités	45
V.5 Difficultés d'interprétation	46
V.6 Examen des résultats	49
V.6.1 Carte de résistivité en ligne AB = 3000m	49
V.6.2 Carte de résistivité en ligne AB = 1000m	49
V.6.3 Carte du recouvrement	49
V.6.4 Carte du substratum	52
V.6.5 carte tectonique schématique	52
V.6.6 Coupes géo-électriques	55
V.7 Stratigraphie des formations Crétacées et Jurassiques	59
V.7.1 Crétacé supérieur	59
V.7.2 Crétacé inférieur	59
V.7.3 Jurassique	59
V.8 Stratigraphie des formations du post-Crétacé	60
V.9 Conclusion	60

Sixième Chapitre

Hydrogéologie

Introduction	61
VI.1 Les formations aquifères	61
VI.1.1 Aquifère superficielle	61
VI.1.2 Aquifère karstique	61

VI.2 Etudes des différents aquifères	61
VI.2.1 Aquifère superficielle	61
VI.2.1.1 Inventaire des points d'eau	61
VI.2.1.2 Piézométrie	62
VI.2.1.3 Gradient hydraulique	62
VI.2.1.4 Battement de la fluctuation piézométrique	63
VI.2.2 Aquifère karstique	65
VI.2.2.1 Inventaire des points d'eau	65
VI.2.2.2 Géométrie de l'aquifère	65
VI.3 Interactions entre les aquifères	67
VI.4 Caractéristiques hydrodynamique	67
VI.4.1 Nappe superficielle	67
VI.4.1.1 Transmissivité	67
VI.4.1.2 Perméabilité	67
VI.4.1.3 Coefficient d'emmagasinement	67
VI.4.1.4 Bilan de la nappe	68
VI.4.2 Nappe profonde (Karst)	68
VI.4.2.1 Transmissivité	68
VI.4.2.2 Perméabilité	68
VI.5 Conclusion	68

Septième chapitre

Hydrochimie

Introduction	69
VII.1 Les travaux de terrain	69
VII.2 Les travaux de laboratoire	70
VII.3 Etude analytique des paramètres physiques	70
VII.3.1 Température	70
VII.3.2 Conductivité	70
VII.3.3 Le potentiel hydrogène (pH)	70
VII.4 Etude analytique des paramètres chimiques	70
VII.4.1 Le calcium	71
VII.4.2 Le magnésium	75
VII.4.3 Le sodium	75
VII.4.4 Le potassium	76
VII.4.5 Les chlorures	76

VII.4.6 Les sulfates	76
VII.4.7 Les bicarbonates	76
VII.4.8 Les nitrates	76
VII.5 Etude des rapports caractéristiques et origines des éléments dominants	76
VII.5.1 Rapports caractéristiques	83
VII.5.1.1 Rapport $r \text{ Mg}^{2+}/r \text{ Ca}^{2+}$	83
VII.5.1.2 Rapport $r \text{ SO}_4^-/r \text{ Cl}^-$	83
VII.5.1.3 Rapport $r \text{ HCO}_3^{2-}/r \text{ SO}_4^-$	83
VII.5.1.4 Rapport $r (\text{Na}^++\text{K}^+)/r (\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})$	83
VII.6 Faciès chimiques des eaux	83
VII.6.1 Représentation graphique	83
VII.7 Indices d'échange de base	99
VII.7.1 Interprétation des résultats	99
VII.8 Qualité des eaux	99
VII.8.1 Teneurs maximales admissibles pour l'A.E.P	99
VII.8.1.1 Calcium et Magnésium	99
VII.8.1.2 Sodium et Potassium	99
VII.8.1.3 Carbonates et Bicarbonates	99
VII.8.1.4 Les chlorures	100
VII.8.1.5 Les nitrates	100
VII.8.2 Aptitude de l'eau à l'irrigation	100
VII.8.2.1 Salinité	100
VII.8.2.2 Eaux peu salées	101
VII.8.2.3 Eaux à forte teneur en sodium	101
VII.8.2.4 Classification de l'eau d'irrigation selon le diagramme de Wilcox (1948)	102
VII.9 Analyse en composantes principales	107
VII.9.1 Introduction	107
VII.9.2 Projection des variables	107
VII.9.3 Etude de l'origine des éléments chimiques	110
VII.9.3.1 Couple $(\text{Na}^+/\text{Cl}^-)$	110
VII.9.3.2 Les éléments $(\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}/\text{HCO}_3^-)$	110
VII.9.3.3 Le rapport Conductivité électrique – $\text{HCO}_3^- / (\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})$	110
VII.10 Conclusion	113

Huitième Chapitre

Pollution

Introduction	114
VIII.1 Origine des éléments azotés	114
VIII.1.1 Origine atmosphérique	114
VIII.1.2 Origine anthropique	114
VIII.1.2.1 Les sources anthropiques des nitrates dans le sol.	115
VIII.2 La migration des nitrates	115
VIII.2.1 migration vers les nappes en profondeur	115
VIII.2.2 La migration dans la nappe	116
VIII.3 Elimination naturelle des nitrates	116
VIII.3.1 la pyrite	116
VIII.3.2 Toit imperméable	117
VIII.3.3 végétation	117
VIII.4 La nuisance des nitrates dans l'eau souterraine	117
VIII.5 Traitements	118
VIII.6 Pollution de la plaine de Zana-Chott Saboun	118
VIII.7 Conclusion	129
Conclusion générale	130
Références bibliographiques	132
Annexes	134

LISTE DES TABLEAUX

Tableau n°	Pages
Tableau IV.1 Caractéristiques des stations pluviométriques	23
Tableau IV.2 –Précipitations moyennes mensuelles interannuelles en mm.	23
Tableau IV.3– Températures moyennes mensuelles interannuelles en °C	25
Tableau IV.4 – Indices d’aridité de De Martonne	27
Tableau IV.5 – Indices d’aridité de Moral.	28
Tableau IV.6– Valeurs de l’ETR selon la méthode de Turc	33
Tableau IV.7 – Valeurs de l’ETR selon la méthode de Verdeil.	33
Tableau IV.8 – Bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite Station de Batna ville	35
Tableau IV.9 – Bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite Station de Batna Aéroport	35
Tableau IV.10 – Bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite Station de Ain Djasser	35
Tableau IV.11 – Bilan hydrologique selon la méthode de Blaney-Criddle Station de Batna ville	37
Tableau IV.12 – Bilan hydrologique selon la méthode de Blaney-Criddle Station de Batna aéroport	37
Tableau IV.13 – Bilan hydrologique selon la méthode de Blaney-Criddle Station de Ain Djasser	37
Tableau IV.14 – Le ruissellement selon la méthode de Tixeront et Berkaloff	38
Tableau IV.15– Les différents paramètres du bilan hydrologique	39
Tableau V.1 Echelle des résistivités	46
Tableau VI.1 Bilan estimatif de la nappe superficielle	68
Tableau VII.1 Paramètres mesurés in situ et appareillage utilisé	69
Tableau VII.2 Faciès chimiques des eaux selon le diagramme de Schöeller-Berkaloff	88
Tableau VII.3 Directives pour l’interprétation de la qualité d’une eau d’irrigation	100
Tableau VII.4 Baisse de rendements de certaines cultures en relation avec la salinité de l’eau d’irrigation (R.S.Ayers et D.W.Westcot)	101
Tableau VII.5 Degré d’aptitude à l’irrigation selon SAR	101
Tableau VII.6 Classification des eaux d’irrigation selon Wilcox	102
Tableau VII.7 Matrice de corrélation des variables.	108
Tableau VII.8 Corrélation facteurs-variables.	108
Tableau VIII.1 Teneur en NO_3^- , NO_2^- et NH_4^+ des points d’eaux analysés	126
Tableau VIII.2 Doses d’azote et de phosphore en fonction de la pluviosité	128
Tableau VIII.3 Fertilisation NPK de la pomme de terre dans cinq régions	128

LISTE DES FIGURES

Figure n°	Pages
Figure. I.1: Carte de situation de la zone d'étude	1
Figure°I.2 Carte des grands bassins versants	2
Figure. I.3 : Carte des sous bassins des hauts plateaux Constantinois	3
Figure. I.4 : Carte de position de la zone d'étude	4
Figure II.1 Classification morphologique du nord de l'Algérie	6
Figure II.2 Carte des sols dominants de l'Algérie	8
Figure II.3 Réseau hydrographique	10
Figure III.1 Ensembles géomorphologiques du nord de l'Algérie	12
Figure III.2 Carte gravimétrique de l'Algérie du nord	15
Figure III.3 Légende de la carte géologique	17
Figure III.4 Carte Géologique de la région	18
Figure III.5 Schéma structural de la région	19
Figure III.6 Coupes géologiques du bassin Zana	20
Figure V.1 Répartition des précipitations dans le nord de l'Algérie	22
Figure IV.2 Précipitations moyennes interannuelles des stations pluviométriques de l'ensemble Sud-sétifien (séries récentes)	24
Figure IV.3 Variation des précipitations moyennes mensuelles interannuelles	25
Figure IV.4 Variation des températures moyennes mensuelles interannuelles.	26
Figure IV.5 Indices d'aridité de De Martonne	29
Figure IV.6 Abaque de Verdeuil	34
Figure IV.7 Courbe de l'évapotranspiration mensuelle	39
Figure V.1 Plan de situation de la première étude (1969)	42
Figure V.2 Plan de situation de la deuxième étude (1972)	43
Figure V.3 Répartition des sondages électriques de l'étude 1972	44
Figure V.4 Forage F55 de Zana (étude 1969)	47
Figure V.5 Forage S.E D12 (étude 1969)	48
Figure V.6 Carte des équirésistivités (AB=3000m)	50
Figure V7 Carte des équirésistivités (AB = 1000m)	51
Figure V.8 Carte de recouvrement	52
Figure V.9 Carte du substratum	53

Figure V.10 Carte tectonique	54
Figure V.11 Coupes géoélectriques P, Q, R.	56
Figure V.12 Coupes géoélectriques, U, V, W	57
Figure V.13 Coupes géoélectriques X, A, B, C	58
Figure V.14 Légendes des coupes géoélectriques de l'étude géophysique (1969)	59
Figure VI.1 Carte de situation des sources et forages réalisés dans la plaine de Zana	62
Figure VI.2 Carte de positionnement des points d'eaux retenus (puits et forages)	63
Figure VI.3 Carte piézométrique (période des basses eaux)	64
Figure VI.4 Carte piézométrique (période des hautes eaux)	64
Figure VI.5 Schéma structural de la source de Zana (aquifère karstique)	66
Figure VI.6 Coupe hydrogéologique dans le Jurassique supérieur	66
Figure VII.1* Position des points d'eau retenus pour la piézométrie et les analyses chimiques	
69	
Figure VII.1 Carte de la température (°C) compagne des basses eaux	71
Figure VII.2 Carte de la température (°C) compagne des hautes eaux	72
Figure VII.3 Carte de la conductivité électrique (compagne des basses eaux)	72
Figure VII.4 Carte de la conductivité électrique (compagne des hautes eaux)	73
Figure VII.5 Carte de pH (compagne des basses eaux)	73
Figure VII.6 Carte de pH (compagne des hautes eaux)	74
Figure VII.7 Carte de Ca ⁺⁺ (compagne des basses eaux)	74
Figure VII.8 Carte de Ca ⁺⁺ (compagne des hautes eaux)	75
Figure VII.9 Carte de Mg ⁺⁺ (compagne des basses eaux)	77
Figure VII.10 Carte de Mg ⁺⁺ (compagne des hautes eaux)	77
Figure VII.11 Carte de Na ⁺ (compagne des basses eaux)	78
Figure VII.12 Carte de Na ⁺ (compagne des hautes eaux)	78
Figure VII.13 Carte de K ⁺ (compagne des basses eaux)	79
Figure VII.14 Carte de K ⁺ (compagne des hautes eaux)	79
Figure VII.15 Carte de Cl ⁻ (compagne des basses eaux)	80
Figure VII.16 Carte de Cl ⁻ (compagne des hautes eaux)	80
Figure VII.17 Carte de SO ₄ ²⁻ (compagne des basses eaux)	81
Figure VII.18 Carte de SO ₄ ²⁻ (compagne des hautes eaux)	81
Figure VII.19 Carte de HCO ₃ ⁻ (compagne des basses eaux)	82
Figure VII.20 Carte de HCO ₃ ⁻ (compagne des hautes eaux)	82
Figure VII.21 Carte de rapport r Mg ²⁺ /r Ca ²⁺ (compagne basses eaux)	84

Figure VII.22 Carte de rapport $r \text{Mg}^{2+}/r \text{Ca}^{2+}$ (compagne hautes eaux)	84
Figure VII.23 Carte de rapport $\text{SO}_4^{2-}/r \text{Cl}^-$ (compagne basses eaux)	85
Figure VII.24 Carte de rapport $r \text{SO}_4^{2-}/r \text{Cl}^-$ (compagne hautes eaux)	85
Figure VII.25 Carte de rapport $r \text{HCO}_3^-/r \text{SO}_4^{2-}$ (compagne basses eaux)	86
Figure VII.26 Carte de rapport $r \text{HCO}_3^-/r \text{SO}_4^{2-}$ (compagne hautes eaux)	86
Figure VII.27 Carte de rapport $r (\text{Na}^+ + \text{K}^+)/r (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ (compagne basses eaux)	87
Figure VII.28 Carte de rapport $r (\text{Na}^+ + \text{K}^+)/r (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ (compagne hautes eaux)	87
Figure VII.29 Répartition des faciès (compagne des basses eaux)	88
Figure VII.30 Répartition des faciès (compagne des hautes eaux)	89
Figure VII.31 Diagramme de Schöeller pour dix points (compagnes des basses eaux)	90
Figure VII.32 Diagramme de Schöeller pour dix points (compagnes des basses eaux)	91
Figure VII.33 Diagramme de Schöeller pour dix points (compagnes des basses eaux)	92
Figure VII.34 Diagramme de Schöeller pour dix points (compagnes des basses eaux)	93
Figure VII.35 Diagramme de Schöeller pour dix points (compagnes des hautes eaux)	94
Figure VII.36 Diagramme de Schöeller pour dix points (compagnes des hautes eaux)	95
Figure VII.37 Diagramme de Schöeller pour dix points (compagnes des hautes eaux)	96
Figure VII.38 Diagramme de Schöeller pour dix points (compagnes des hautes eaux)	97
Figure VII.39 Diagramme de Piper (compagne des basses eaux)	98
Figure VII.40 Diagramme de Piper (compagne des hautes eaux)	98
Figure VII.41 Diagramme du S.A.R (compagne des basses eaux)	103
Figure VII.42 Diagramme du S.A.R (compagne des hautes eaux)	104
Figure VII.43 Diagramme Wilcox (compagne des basses eaux)	105
Figure VII.44 Diagramme Wilcox (compagne des hautes eaux)	106
Figure VII.45 Cercle des corrélations, plan F1-F2.	109
Figure VII.46 Cercle des corrélations, plan F1-F3.	109
Figure VII.47 Echange de base	111
Figure VII.48 Origine du calcium	112
Figure VII.49 Origine de la salinité.	113
Figure VIII.1.1 Carte de NO_3^- (mg/l) (compagne n°01)	119
Figure VIII.1.2 Carte de NO_3^- (mg/l) (compagne n° 02)	119
Figure VIII.1.3 Carte de NO_3^- (mg/l) (compagne n° 03)	120
Figure VIII.1.4 Carte de NO_3^- (mg/l) (compagne n° 04)	120
Figure VIII.2.1 Carte de NH_4^+ (mg/l) (compagne n° 01)	121
Figure VIII.2.2 Carte de NH_4^+ (mg/l) (compagne n° 02)	121

Figure VIII.2.3 Carte de NH_4^+ (mg/l) (compagne n° 03)	122
Figure VIII.2.4 Carte de NH_4^+ (mg/l) (compagne n° 04)	122
Figure VIII.3.1 Carte de NO_2^- (mg/l) (compagne n° 01)	123
Figure VIII.3.2 Carte de NO_2^- (mg/l) (compagne n° 02)	123
Figure VIII.3.3 Carte de NO_2^- (mg/l) (compagne n° 03)	124
Figure VIII.3.4 Carte de NO_2^- (mg/l) (compagne n° 04)	124
Figure VIII.4 Schéma du cycle de l'azote	125
Figure VIII.5 Schéma du cycle de l'azote	127

Introduction

Le développement agricole, entraîne souvent une pollution rapide des eaux souterraines par les composés azotés, surtout celle des nitrates, en raison de leur grande solubilité et leur faible affinité aux échanges ioniques. Les autres formes de l'azote (nitrite et ammonium) apparaissent uniquement dans les milieux réducteurs. La présence de ces éléments dans les eaux souterraines est souvent liée à l'utilisation parfois abusive des engrais chimiques et naturels dans l'agriculture vu la faible épaisseur de la couche pédologique.

Plusieurs travaux ont été réalisés dans le monde, mettent en évidence l'impact de l'agriculture sur l'augmentation de la teneur des nitrates dans les eaux souterraines. Nous allons essayer d'étudier ce phénomène dans une région de l'Est Algérien, qui est celle de Seriana – Zana-El-Beïda, située dans la wilaya de Batna.

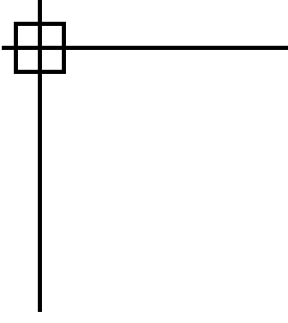
La plaine de Seriana - Zana-El-Beïda est située à quelques dizaines de kilomètres au Nord Ouest de Batna et appartient au bassin versant des hautes plateaux Constantinois, caractérisé par un relief diversifié, à faible altitude pour la plaine et accentué pour les massifs. Cette région est formée par un épais remplissage Miocène et Plio-Quaternaire dans les synclinaux et par des massifs du Jurassique et du Crétacé en position anticlinal. Le climat est semi aride avec un faible couvert végétal type steppe et armoise. Ce type de végétation est le signe d'une salinité assez élevée des terrains. L'autre partie est occupée par des cultures céréalières. La pollution azotée n'est pas visible, bien que la région est à vocation agricole à dominance céréalière où l'élevage des ovins et bovins est fort important.

La plaine abrite deux aquifères superposés et probablement communiquant entre eux :

- ✓ Un aquifère superficiel se trouvant dans les formations du Mio-Plio-Quaternaire;
- ✓ Un aquifère relativement profond dans les calcaires fissurés et karstifiés.

L'étude de ces aquifères se fera par l'intermédiaire des chapitres suivants :

- ✓ généralités ;
- ✓ Géomorphologie ;
- ✓ Géologie ;
- ✓ Climatologie ;
- ✓ Géophysique ;
- ✓ Hydrogéologie ;
- ✓ Hydrochimie ;
- ✓ Pollution.



Premier chapitre

Généralités

I.1 Situation Géographique

La plaine de Seriana–Zana-El-Beïda (partie Nord de Seriana) qu'on va appeler le long de ce travail plaine de Zana, fait partie de l'ensemble sud sétifien, elle est comprise entre la zone tellienne et l'atlas Saharien (monts des Aurès). Elle est située au nord-ouest de la wilaya de Batna à quelque dizaine de kilomètres du chef lieu de la wilaya. Figure I.1.

Faisant partie du bassin versant des hauts plateaux Constantinois et plus précisément du sous bassin versant Merdja Zana. Figure N° I.2 et I.3, 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°.50' N et 39°.60' N. S'étalant sur une superficie de 369 Km² environ elle est délimitée topographiquement comme suit :

- ❖ Au Nord par Djebel Azrouat Nord et Sud culminant respectivement à 951m et 952m ;
- ❖ Au Sud par Djebel Mestaoua culminant à 1621m ;
- ❖ A l'Est par Djebel Merzeguene et Tizourite culminant respectivement à 822m et 1048m ;
- ❖ A l'Ouest par Djebels Roknia et Zana culminant respectivement à 1241m et 1280m.

La plaine de Zana -Chott Saboun se positionne topographiquement comme une suite à la plaine d'Ain Djasser (ex Bourzhel) au Nord-Ouest et la plaine de Bir Chouhada (ex Levasseur) au Nord-est et elle est suivie par la plaine de Gadaïne à l'Est.



Figure. I.1: Carte de situation de la zone d'étude

I.2 Habitant

La quasi-totalité des habitants de la plaine sont concentrés dans les centres urbains tels que le centre de Seriana totalisant 12000 habitants environ, Zana El Beïda avec 9000 habitants et l'Azrou avec 4000 habitants (recensement 1998). Le reste de la population est dispersé dans les Mechtas parsemées dans la plaine tels Taga, Feltene, Zana Ouled Sbaâ,...etc.

I.3 situation Socio-économique

La plaine apparait comme une plate forme à vocation agricole céréalière (blé, orge, avoine, maïs) d'une surface totale estimée à 24453 ha. La surface agricole utile représente 8365 ha, dont 2722 ha irrigués, autrement dit environ 48% de la surface totale de la région. Cette réduction vient du fait de la salure des terres.

L'élevage des bovins et ovins est très développé ce qui a amélioré la production laitière de la région, aussi quelques batteries d'élevage de poulet apparaissent.

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.

Il reste à signaler la présence de culture de tabac et de quelques îlots d'arbres fruitiers.

I.4 Couvert végétal

Les reliefs carbonatés de la région sont pratiquement nus et présente une rare couverture végétal qui se résume en quelques genévriers et de pin d'Alep dans le Mestaoua. Les glacis sont recouverts d'une maigre steppe à armoise (chih et halophyte), diss et alfa, tandis que la plaine est cultivée en majorité.

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

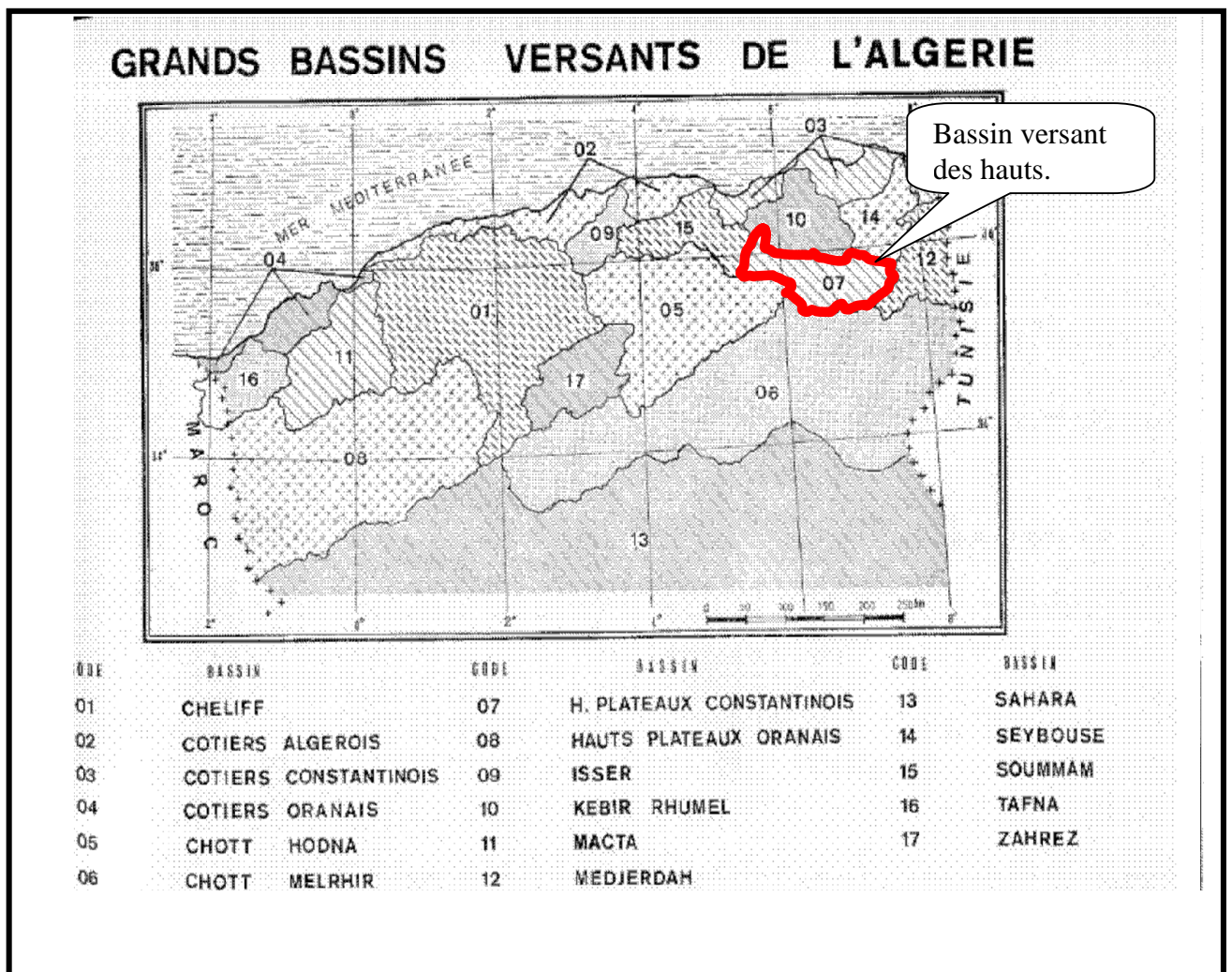


Figure. I.2 : Carte des grands bassins versants

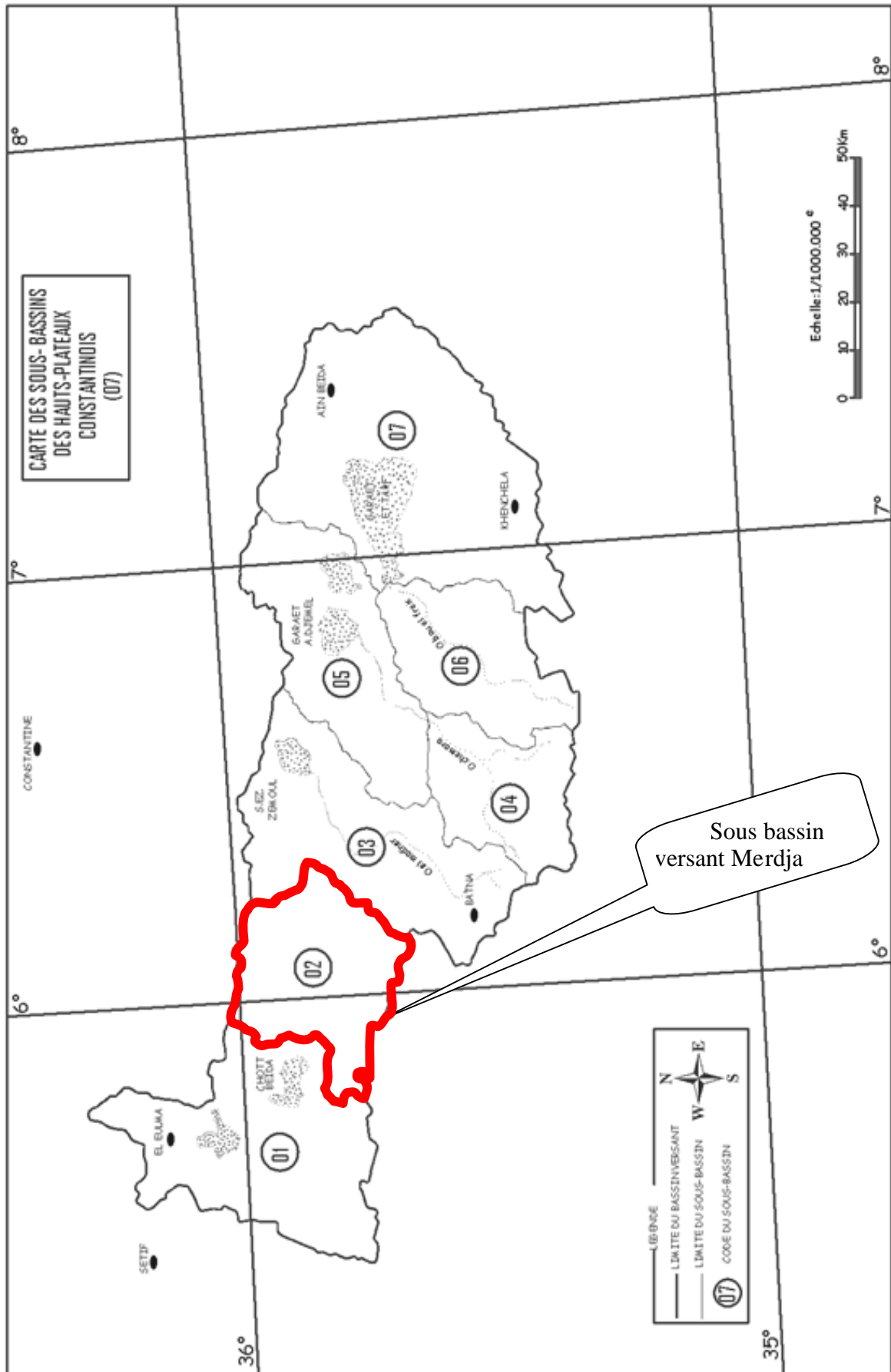
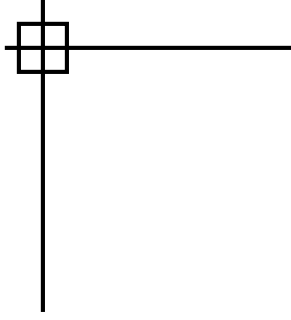


Figure. I.3 : Carte des sous bassins des hauts plateaux Constantinois

I.5 Conclusion

La plaine de Zana située au nord-ouest de la wilaya de Batna est caractérisée par un relief diversifié formé de massifs et de piedmonts, de la plaine et de Chott. Cette morphologie à faible altitude dans la plaine est accentuée pour les massifs, ce qui donne l'impression que la plaine est une dépression plane fermée par ces massifs.

Le couvert végétal maigre est le résultat direct de la faible pluviométrie et de la salinité des eaux et sols.



Deuxième chapitre

Géomorphologie

Introduction

L'étude des caractéristiques morphométriques en plus de l'analyse hydrologique d'un bassin versant constitue une plate forme pour la compréhension du comportement du bassin versant. La forme, la superficie, le relief et les pentes influent sur l'infiltration et le ruissellement superficiel dans un bassin versant.

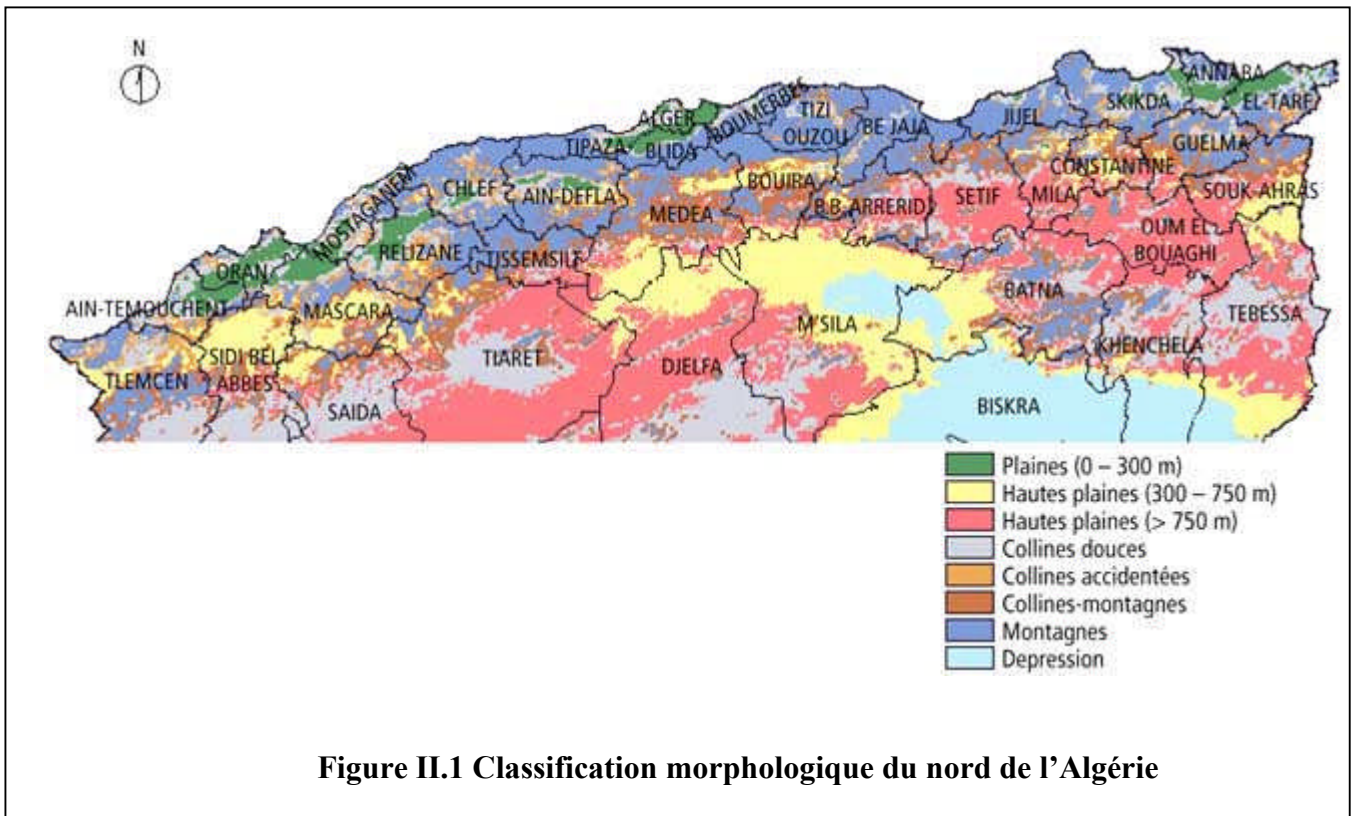
La conjonction des facteurs géographiques et climatiques ont donnée naissance à un écoulement endoréique ; l'eau s'écoule à l'intérieur de la plaine vers le Chott qui constitue le principal exutoire.

II.1- Etude physique : Caractéristiques de forme

La superficie du bassin versant est de l'ordre de 369 Km² et son périmètre est égal à 96 Km. Ces données sont déterminées à l'aide d'un planimètre et d'un curvimètre.

Le point le plus culminant du bassin de Seriana-Zana est le Mestaoua avec 1596, et le plus bas correspond au Chott avec 800m d'altitude. L'altitude a un effet sur la pluviosité. En outre, une dissymétrie très nette existe entre les versants. Les versants exposés au nord sont les mieux arrosés, les versants exposés au sud sont les plus secs.

Les grandes régions écologiques en Algérie se distinguent relativement bien voir figure II.1. Au nord, se trouve la zone de culture (littoral, les plaines sublittorales, les plaines intérieures, les hautes plaines, etc.), au centre la zone steppique et de parcours et, au sud le Sahara avec ses Oasis.



II.1.1 Indice de compacité de GRAVELUS

La forme d'un bassin versant influence fortement l'écoulement global et l'allure de l'hydrogramme d'une pluie donnée. Un bassin versant très allongé ne réagira pas de la même manière qu'un bassin versant ramassé si les autres conditions sont égales.

On exprime la caractéristique de forme par le coefficient de GRAVELUS (K_c), il est égal au rapport du périmètre du bassin considéré et celui d'un cercle qui aurait la même surface. Plus cet indice se rapproche de 1 plus le bassin aura la forme ramassée et plus le temps de concentration sera court.

Cet indice est donné par l'expression suivante.

$$K_c = 0.28 * \frac{P}{\sqrt{S}}$$

$$K_c = 0.28 * \frac{96}{\sqrt{369}} = 1,399 \approx 1,4$$

$K_c > 1,12$ donc notre bassin versant à une forme allongée.

II.1.2 Rectangle équivalent

C'est un moyen de comparaison des bassins versants entre eux vis-à-vis de l'écoulement de surface.

On suppose que l'écoulement sur un bassin versant donné est le même que sur un rectangle de même superficie, ayant le même indice de GRAVELUS, la même répartition hypsométrique et la même distribution des sols, de la végétation, la densité de drainage etc.

C'est une transformation géométrique car le bassin versant devient un rectangle de même périmètre.

Ce rectangle a les dimensions suivantes :

$$L = \frac{K_c * \sqrt{S}}{0.28} * \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right] = 38,42 \text{ Km}$$

$$l = \frac{K_c * \sqrt{S}}{0.28} * \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right] = 9,605 \text{ Km}$$

II.1.3 Densité de drainage

Elle présente le rapport entre la longueur de tous les cours d'eau drainant le bassin versant et la surface de ce dernier

$$D_d = \frac{\sum L_x}{S} = \frac{306}{369} = 0,83 \text{ Km} / \text{Km}^2$$

Avec

D_d densité de drainage ;

L_x la longueur totale cumulée des talwegs d'ordre x en Km ;

S la surface du bassin versant.

II.2- Ensembles morpho-structuraux

La répartition des sols présente une zonation qui reflète celle du climat. Cependant, elle est largement modifiée par l'influence de la nature des roches mères, du relief, de l'eau, de la végétation, ainsi que des facteurs biotiques et anthropogènes. On rencontre différents types de sols :

- ❖ Sols bruns lessivés et sols bruns calcaires dans les bioclimats humides et subhumides (Luvisols, Calcisols) ;

- ❖ Sols châtaîns et bruns iso-humiques, souvent avec des accumulations calcaires en profondeur, dans les bioclimats semi-arides et arides (Kastanozems, Calcisols) ;

- ❖ Sols gris subdésertiques, minéraux bruts d'érosion ou d'apport, ainsi que des sols salins aux bioclimats arides et désertiques (Regosols, Solonchaks).

Pour la région de Seriana-Zana les sols sont châtaîns et bruns iso-humiques, souvent avec des accumulations calcaires en profondeur voir figure II.2 et la morphologie de la plaine présente deux éléments principaux ;

- ❖ les massifs carbonatés crétacé et jurassique ;

- ❖ les formations du recouvrement Mio-Plio-Quaternaire

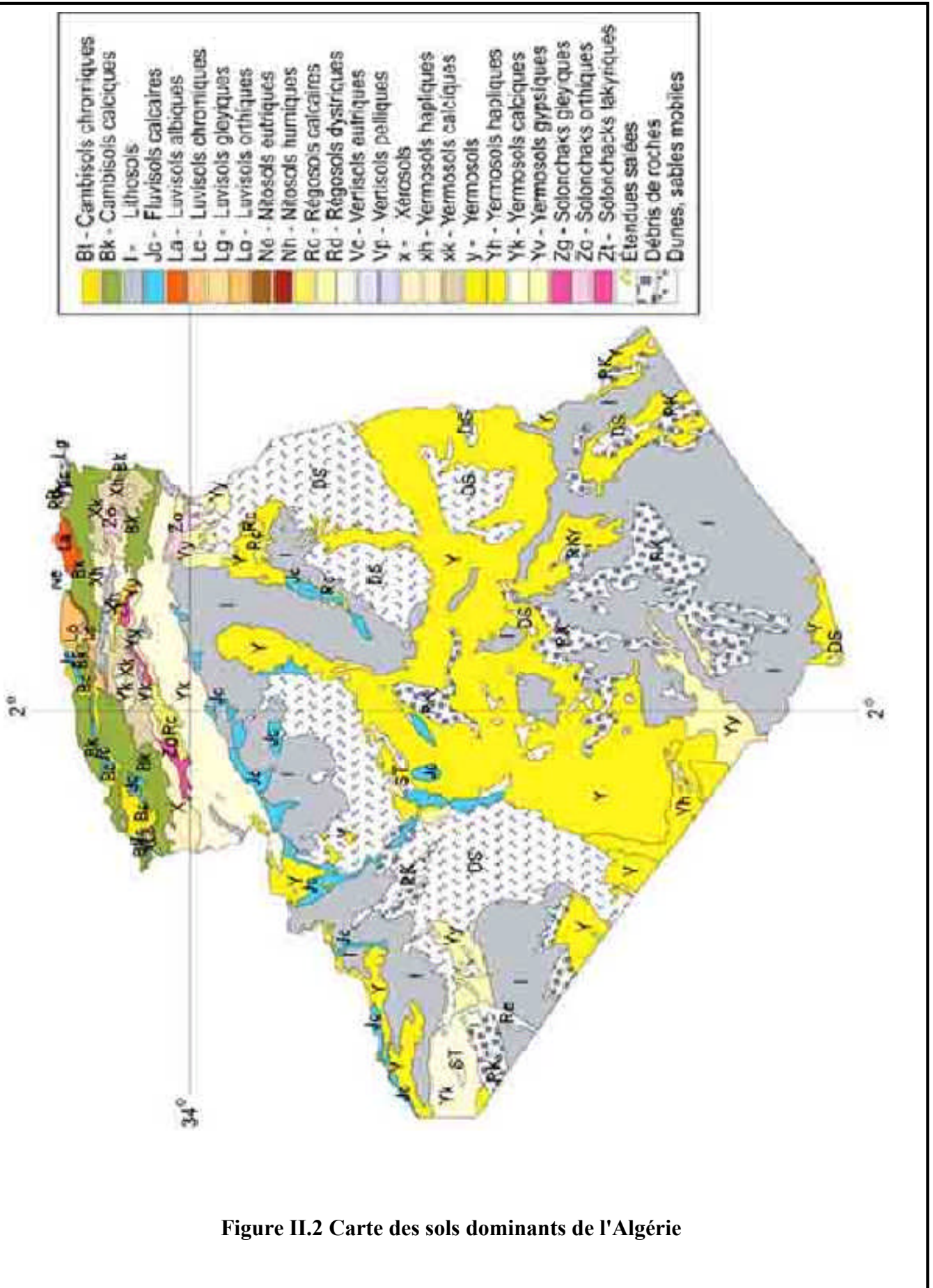


Figure II.2 Carte des sols dominants de l'Algérie

II.2.1 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 îlots 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 disparaît 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 1280m et 1241 et qui représente le prolongement septentrional du Mestaoua;
- ❖ Le groupe Azrouat Sud et Nord avec une altitude respective de 952m et 822m ;
- ❖ L'ensemble montagneux de Mestaoua et Djebel Metrassi culminant à 1621m et à 1061m ;
- ❖ Le massif Merzguène et Tizourite culminant respectivement à 822m et à 1048m;

II.2.2 La plaine

Constitué essentiellement par les dépôts du Mio-Plio-Quaternaire elle a une altitude moyenne de 930m. La plaine est reliée aux massifs par des glacis et des éboulis. Les glacis sont très ravineaux en période de pluie et acheminent les eaux de pluie vers la plaine. Le centre de la plaine est formé par une Merdja 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

II.3 le réseau hydrographique

A part l'Oued Titaouine qui prend naissance à Djebel Mestaoua et coule sur une longueur de 20 Km environ avant de se déverser 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 le débit est nul en période d'étiage. Ces cours d'eau présentent des pertes d'eau par infiltration aux niveaux de leur lit ; comme l'Oued Tizourite et les cours d'eau de Azrouat et autres massifs.

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

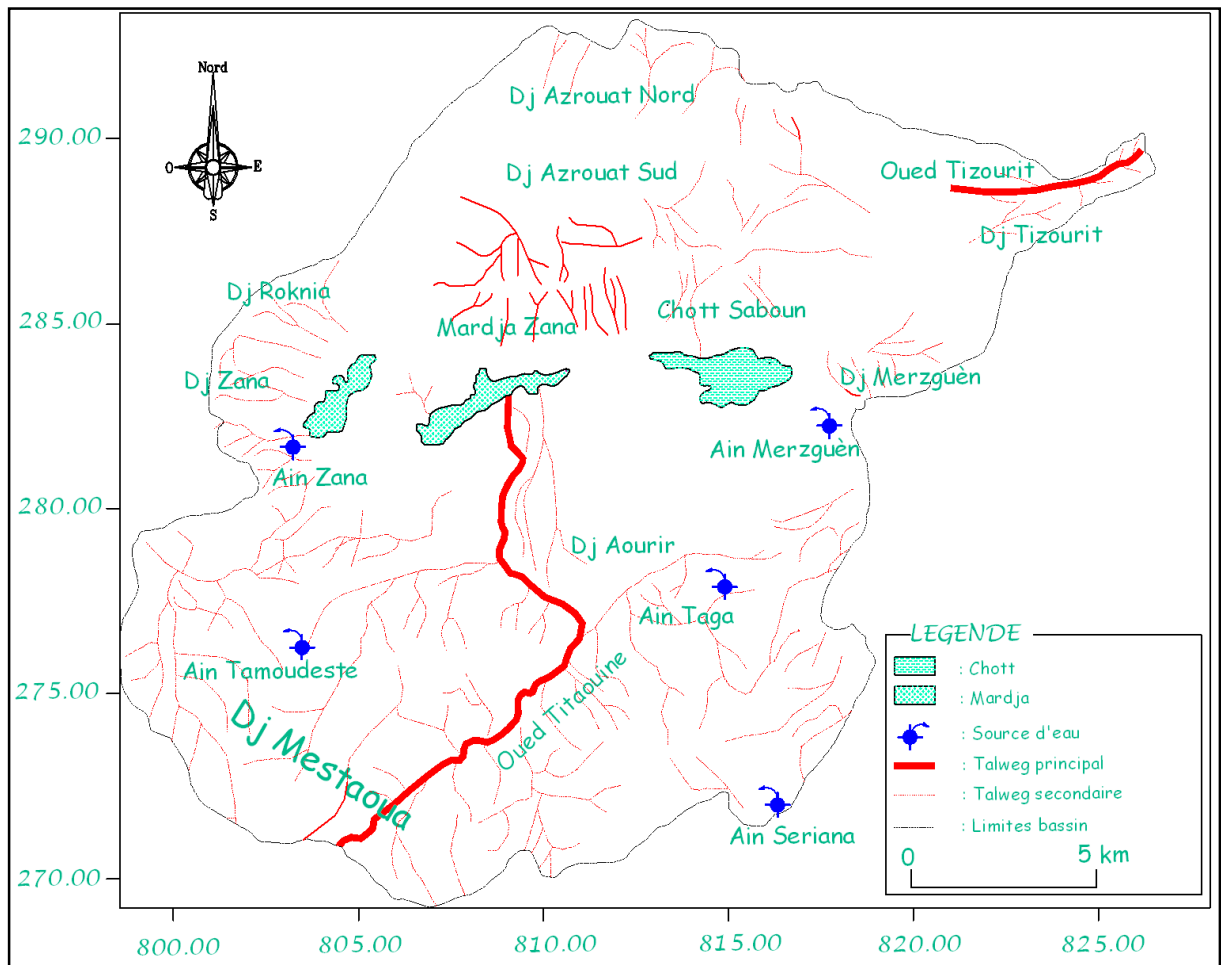
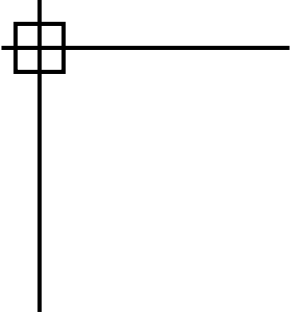


Figure II.3 Réseau hydrographique

II.4 Conclusion

A travers l'étude géomorphologique, il apparaît que le bassin de Seriana-Zana draine une superficie de 369 Km² et de forme allongée. Il est caractérisé par un réseau hydrographique non développé et une pente faible à douce. Généralement le couvert végétal est faible, 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.

On distingue deux ensembles structuraux, le secteur des massifs qui présente des caractéristiques morphométriques 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.



Troisième chapitre

Géologie

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 faille sud-atlasique (flexure saharienne):

- ❖ Le Nord de l'Algérie portant l'empreinte de la tectonique alpine ;
- ❖ La plate-forme saharienne, relativement stable, est caractérisée par une tectonique moins prononcée.

Le domaine septentrional est constitué par des reliefs jeunes, modelés au cours du Tertiaire par les mouvements alpins. L'Algérie alpine est composée du Nord au Sud par les ensembles structuro-sédimentaires suivants :

- ❖ Le plateau continental algérien réduit, à dépôts tertiaires et quaternaires (1000 à 3500m), qui repose sur un socle métamorphique;
- ❖ L'Atlas tellien est le domaine des nappes, avec des bassins de type intra montagneux, dont la série sédimentaire s'étend du Jurassique au Miocène;
- ❖ Le Hodna est un bassin d'avant-fosse dont la séquence de remplissage débute par des dépôts continentaux d'âge Eocène et Oligocène qui se poursuit par un Miocène marin;
- ❖ Les hauts plateaux, avant-pays alpin, à couverture sédimentaire réduite, où les processus locaux de distension ont permis la formation des bassins;
- ❖ L'Atlas saharien est né d'un long sillon subsident pincé entre les hauts plateaux et la Plate-forme Saharienne. Au Mésozoïque, ce sillon fut comblé par une puissante série sédimentaire (7000 à 9000 m). Durant le Tertiaire, une tectonique compressive réactive les structures extensives antérieures en failles et structures inverses aboutissant à la formation de cette chaîne montagneuse ;
- ❖ Les bassins du Chott Melhrir dans le SE constantinois, structurés au Tertiaire, à remplissage crétacé (5000 m).

III.1 Cadre Géologique :

La région de Seriana-Zana-El-Beïda fait partie de l'Algérie Alpine et du domaine Tellien. Il s'agit de l'ensemble Crétacé Jurassique 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 Azrouat Nord et Sud ;
- ❖ A l'Ouest Djebels Roknia et Zana ;

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

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

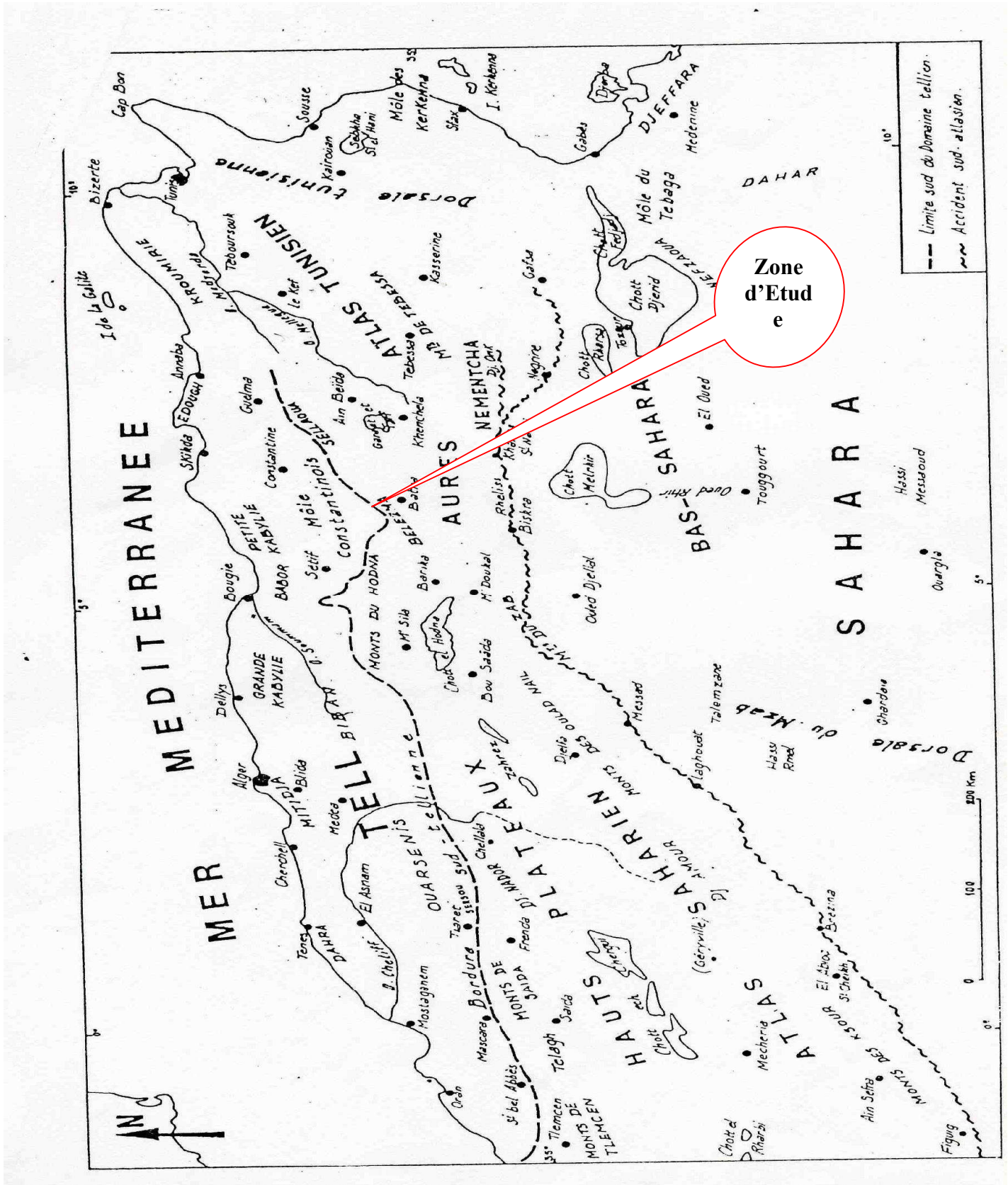


Figure III.1 Ensembles géomorphologiques du nord de l'Algérie
 (Réf. Evolution post-triasique de l'avant pays de la chaîne alpine en Algérie, René GUIRAUD)

III.2 Aperçu stratigraphique :

D'après les cartes géologiques et leurs notices au 1/50 000 de Bourhzel (145) et au 1/200 000 de Sétif (N°-0_3_4) rédigées par M^{er} J. M. VILA en 1977, on peut établir un aperçu stratigraphique de la région d'étude.

III.2.1 Formation peu ou pas tectonisées

III.2.1.1 Quaternaire

❖ Eboulis à blocs (e)

Les seuls éboulis importants constituent deux vastes cônes sur le versant Est du Djebel Zana, remis en mouvement à chaque gros orage.

❖ Sebkha (s)

Il s'agit de la zone marécageuse de la Merdja de Zana et du Chott Saboun alimentées en permanence par l'exurgence d'Ain Zana.

❖ Sols salés (Q^s)

La partie Sud Est et bled El Merdja présente de vastes zones incultes qui sont remplies 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 sont 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 Azrouat,

❖ 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 prononcé. 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.

III.2.1.2 Mio-Pliocène :

❖ Mio-Pliocène continental (mp)

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

III.2.2 Formation de l'ensemble Sud-sétifien :

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 Azrouat représentent la couverture crétacée du Jurassique calcaire du Djebel Zana.

III.2.2.1. Aptien (n^{5b})

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

III.2.2.2 Barrémo-Aptien (n⁴⁻⁵)

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

III.2.2.3 Barrémien supérieur (n^{4b})

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

III.2.2.4 Barrémien (n^{4a})

distinguée au Djebel Roknia et au Djebel Azrouat Sud. Il s'agit de 200m environ d'une série à grosses barres de calcaires graveleux, oolithiques à sommet micritique avec de petits niveaux dolomitiques roux et rares joints argileux.

III.2.2.5 Néocomien (n¹⁻³)

C'est une série à dominance argileuse bariolée qui forme une vire caractéristique à Djebel Zana. L'épaisseur n'excède pas une centaine de mètres.

III.2.2.6 Jurassique supérieur (j⁶)

Ce sont des masses de calcaire massif en gros bancs, son épaisseur atteint 300m au Djebel Zana et 350 m au djebel Mestaoua. Ils sont disposés en bancs plurimétriques à aspect superficiel très caractérisés (peau d'éléphant).

III.2.2.7 Trias (t)

C'est une formation complexe composée d'argile et de marnes bariolées gypsifères à glaçons calcaro-dolomitiques. L'important affleurement du Trias dans cette zone se trouve à Drâa Djebbas qui peut jalonner un contact plat entre Djebel Mestaoua et Djebel Messaouda. L'ensemble à un faible pendage vers le Nord.

III.3 tectonique

La partie algérienne de la chaîne Alpine peut être subdivisée en plusieurs domaines plus ou moins parallèles présentant des styles tectoniques différents.

Pour notre domaine qui est le Tellien (môle Constantinois) divers travaux ont contribué à l'amélioration des connaissances sur la tectonique du môle Constantinois, en particulier (J. Savorin 1920, J. Glaçon 1967, J.M. Vila 69-71-1972). De ces travaux il ressort que le môle Constantinois 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.

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 où les assises du Crétacé étaient émergées.

III.4.Aperçu structural

Au Nord, les massifs présentent des plis de direction Atlasique tronqués par des failles, ce qui entraîne par endroits la présence des structures monoclinales. Au sud le chevauchement des écaillés sur le para-autochtone aurésien redresse les contacts presque à la verticale. De cela l'ensemble Zana, Roknia et Azrouat 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 (extrême bas du Burdigalien). Cette période est caractérisée par une érosion qui a conduit à la formation de relief accentué.

L'affleurement de Drâa El-Djebbs, d'une surface de 1 Km² environ, isolé dans la plaine, 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. 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.

III.4.1 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 chaîne 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.

III.4.2 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 calcaire-dolomitique de formation affectées par des failles.

II.4.3 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 incompetentes subissent des contraintes donnant des structures complexes.

Après cette phase vient une phase de distension où 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.

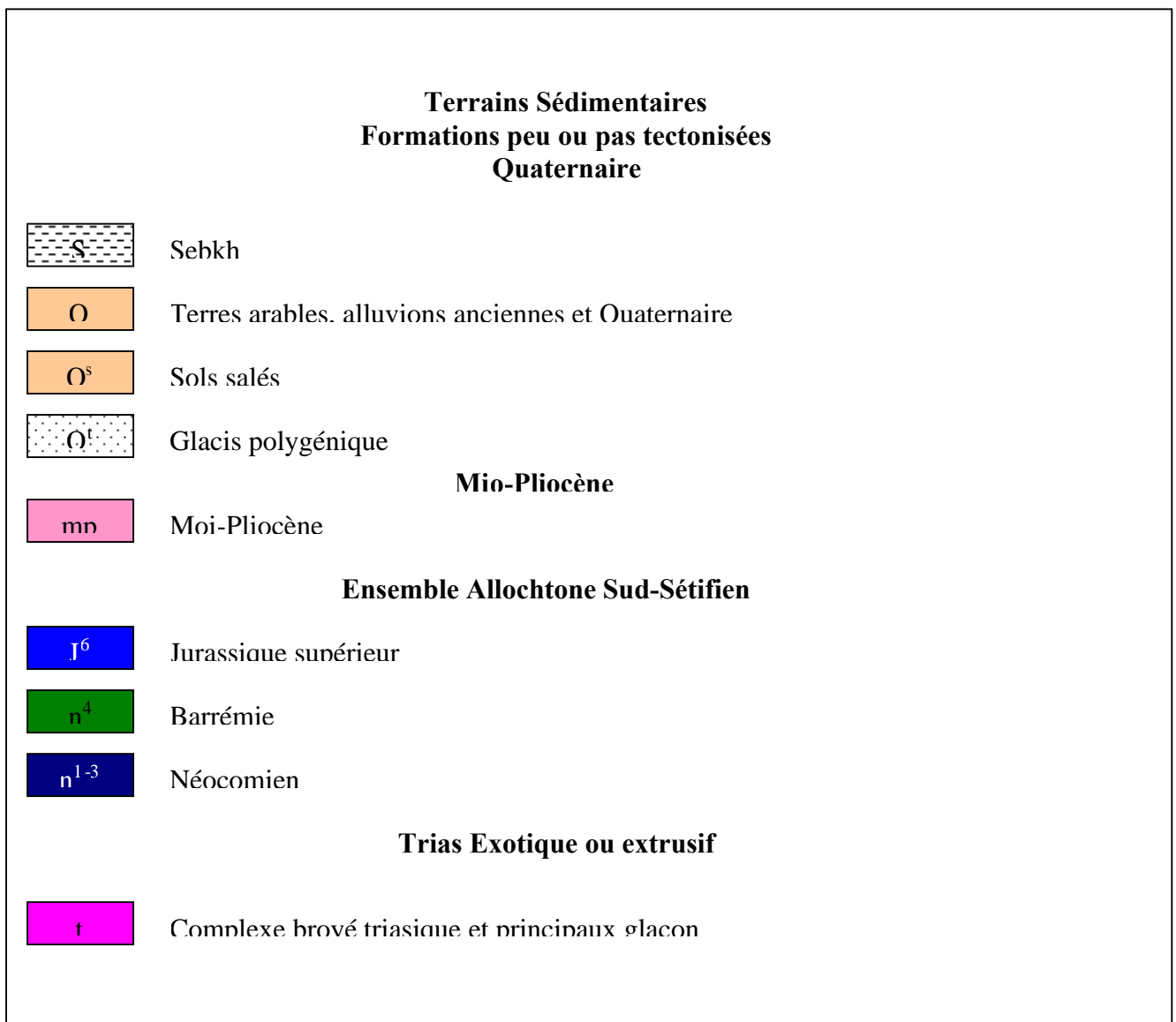
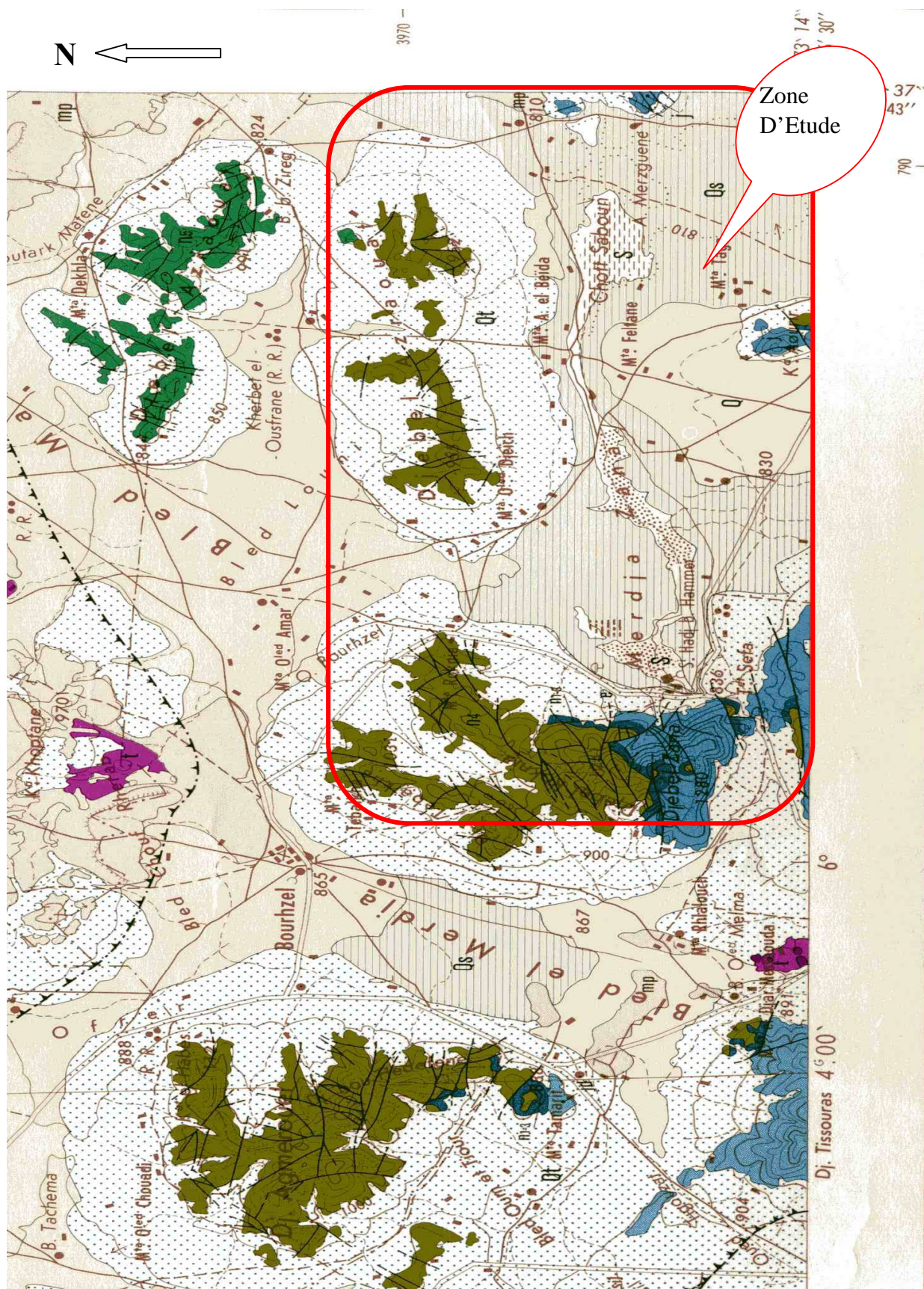
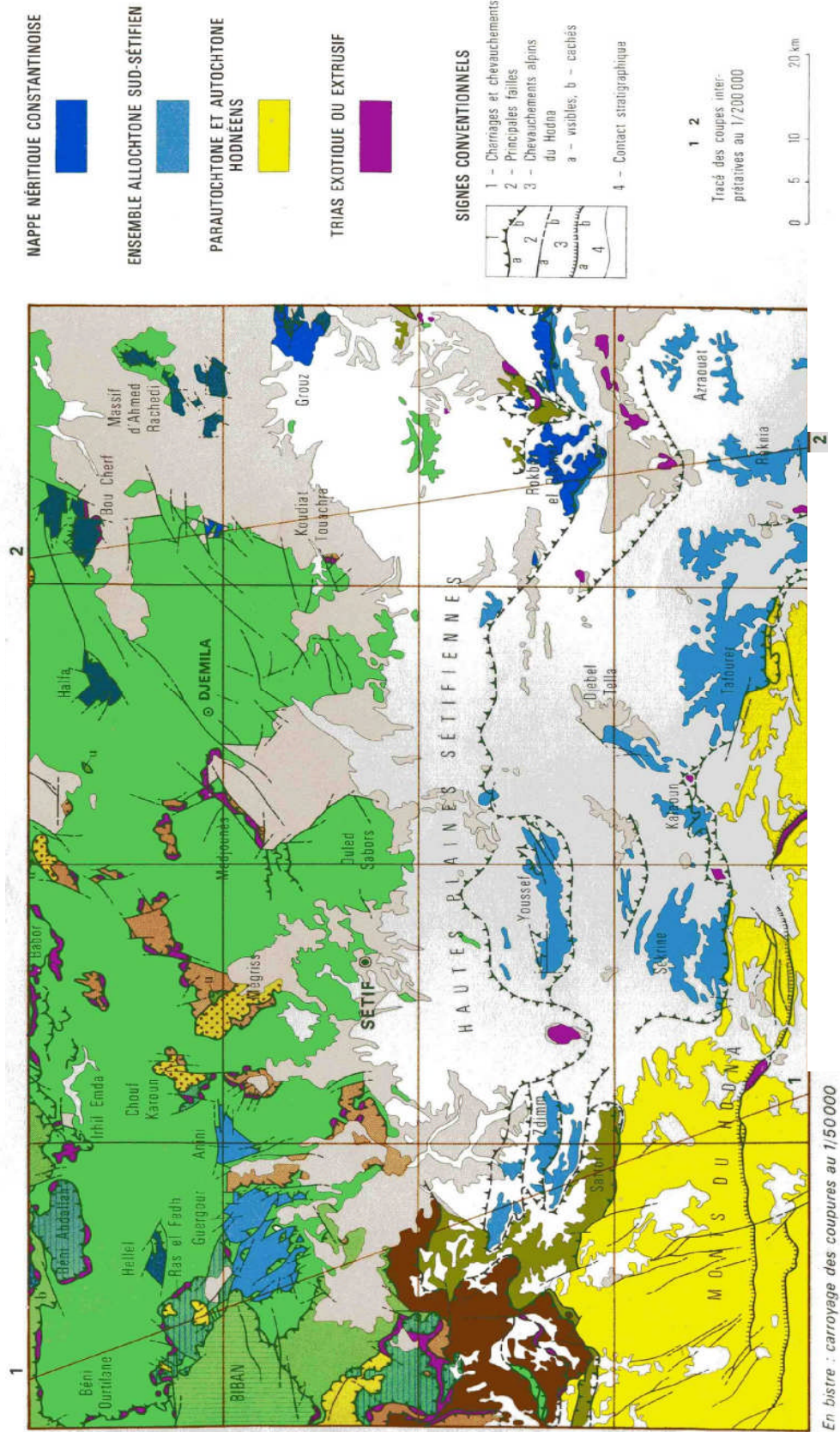


Figure III.3 Légende de la carte géologique



Carte III.4 Carte Géologique de la région
(Extrait de la carte géologique de Sétif 1/200 000)



Carte III.5 Schéma structural de la région
 (Extrait de la carte géologique de Sétif 1/200 000)

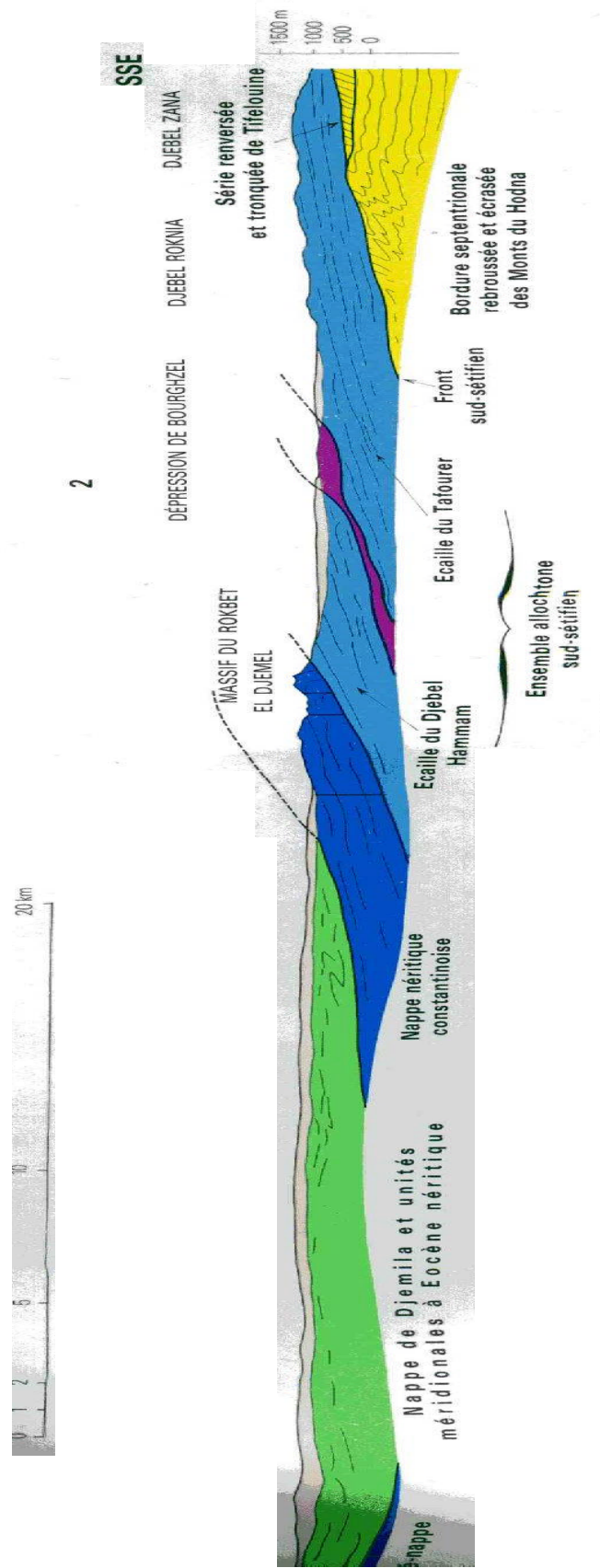


Figure III.6 Coupes géologiques du bassin Zana

III.5 Conclusion

La plaine de Zana et la partie Nord de Seriana font parties de l'ensemble Sud sétifien. Elles apparaissent comme une plate forme remplie de formations du Mio-Plio-Quaternaire, cernée par des massifs carbonatés fortement plissés et tectonisés composés de calcaire massif d'âge Jurassique et Crétacé.

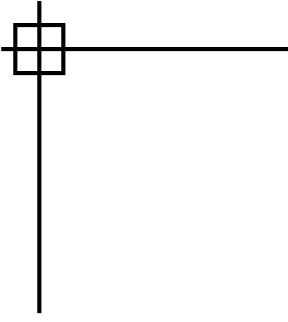
La plaine apparait comme une plate forme qui s'est déplacée sur la couverture triasique. Cette plate forme constitue un anticlinal dont le flanc Nord plonge sous l'échelle de Djebel Hammam, qui fait lui-même partie du front de la nappe néritique constantinoise. Pour le flanc Sud, l'anticlinal butte contre 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 entraîne une limite hydrogéologique étanche.

Cette structure a engendré deux horizons aquifères :

❖ la plaine proprement dite comblée par des sédiments récents du Mio-Plio-Quaternaire qui présente un aquifère superficiel alimenté essentiellement par les glaciaires qui nappent les reliefs. Il est exploité par de nombreux puits situés en général à la périphérie de ces derniers ;

❖ 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'exurgences à fort débit comme Ain Zana qui avait permis l'implantation de l'antique Diana Veteranorum. C'est cette source qui entretient en permanence les marécages de l'Oued Saboun.

En fin, il reste à signaler que ces deux ensembles se trouvent en contact direct dans plusieurs endroits ce qui donne la possibilité d'une communication intra-aquifère. Cette relation doit faire l'objet de plus de détails dans le chapitre géophysique pour la mettre en évidence ou l'infirmier.



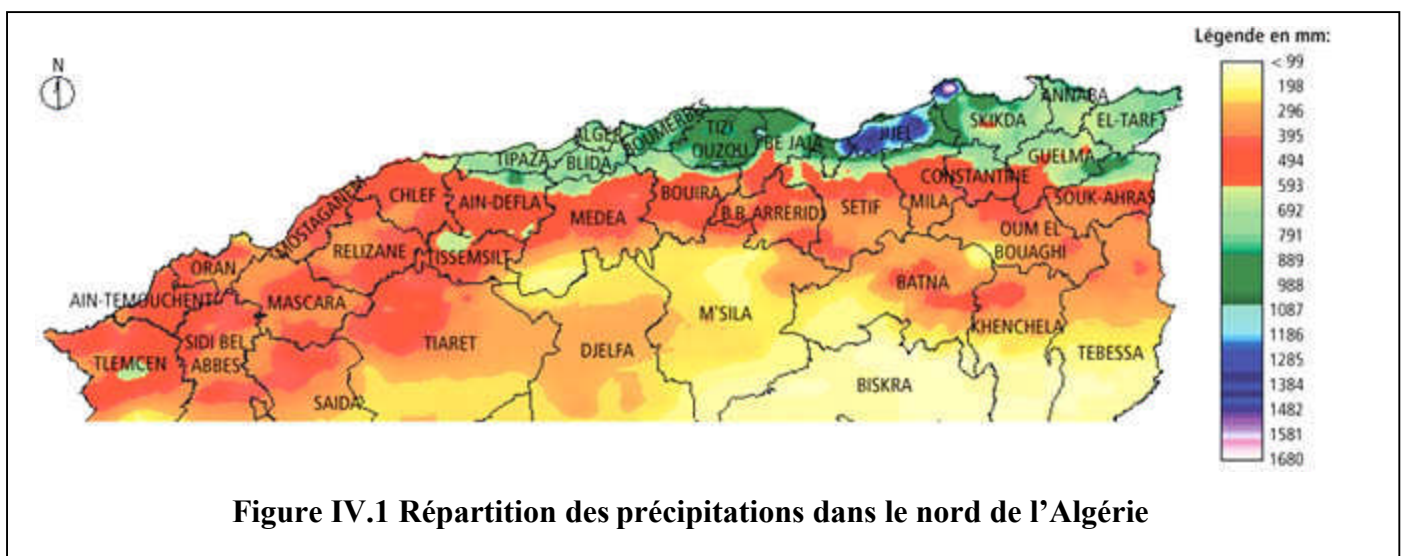
Quatrième chapitre

Climatologie

Introduction

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, voir Figure IV.1 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. Dans la région de Seriana-Zana, le climat est de type méditerranéen semi aride suivant la classification bioclimatique d'Emberger , 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.



IV.1 Paramètres climatiques

IV.1.1 Les précipitations

L'objet du présent chapitre sera l'étude de la variabilité des précipitations sur la base des données pluviométrique de trois stations pluviométriques (Tableau IV.1) implantées dans cette zone. L'examen des données relatives à ces stations ont permis de constater que:

- la répartition spatiale des stations pluviométriques est irrégulière;
- les séries pluviométriques mises à notre disposition sont très hétérogènes (variabilité dans le temps);

Tableau IV.1 – Caractéristiques des stations pluviométriques.

N°	Nom de la station	X (Km)	Y (Km)	Longitudes	Latitudes	Altitude (m)
01	Batna Ville	-	-	-	-	-
02	Batna Aéroport	814.22	255.70	6°10'5" E	35°33' N	1052
03	Ain Djasser	798.85	289.10	6°01'8" E	35°51'25" N	865

Tableau IV.2 – Précipitations moyennes mensuelles interannuelles en mm.

Station	Période	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Total
Batna Ville	1929-2006	36	30	36	38	35	30	35	40	37	23	8	16	364
Batna Aéroport	1996-2007	42	23	33	40	35	25	28	41	44	16	6	16	349
Ain Djasser	1967-2002	27	24	19	29	25	22	27	30	29	13	7	15	267

A l'échelle mensuelle on remarque que les mois les moins pluvieux sont ceux de juin, juillet et août avec un minimum de 06 mm enregistré au mois de juillet à la station de Batna Aéroport et un maximum de 23 mm enregistré au mois de juin à la station de Batna ville. Par contre les mois les plus pluvieux sont ceux de décembre, janvier, février, mars, avril et mai et avec un minimum de 22 mm enregistré au mois de février à la station de Ain Djasser et un maximum de 44 mm enregistré au mois de mai à la station de Batna Aéroport. Tableau IV.2 et figure IV.3.

A l'échelle spatiale, on constate que la région de Ain Djasser au Nord de la plaine de Zana-Chott Saboun reçoit les plus faibles précipitations, avec un maximum de 30 mm au mois d'avril et un minimum de 07 mm au mois de juillet par contre la partie Sud à la plaine de Zana-Chott Saboun, reçoit plus de précipitations avec 44 mm au mois de mai à la station de Batna aéroport et avec un minimum de 06 mm au mois de juillet enregistré à la même station. Tableau IV.2.

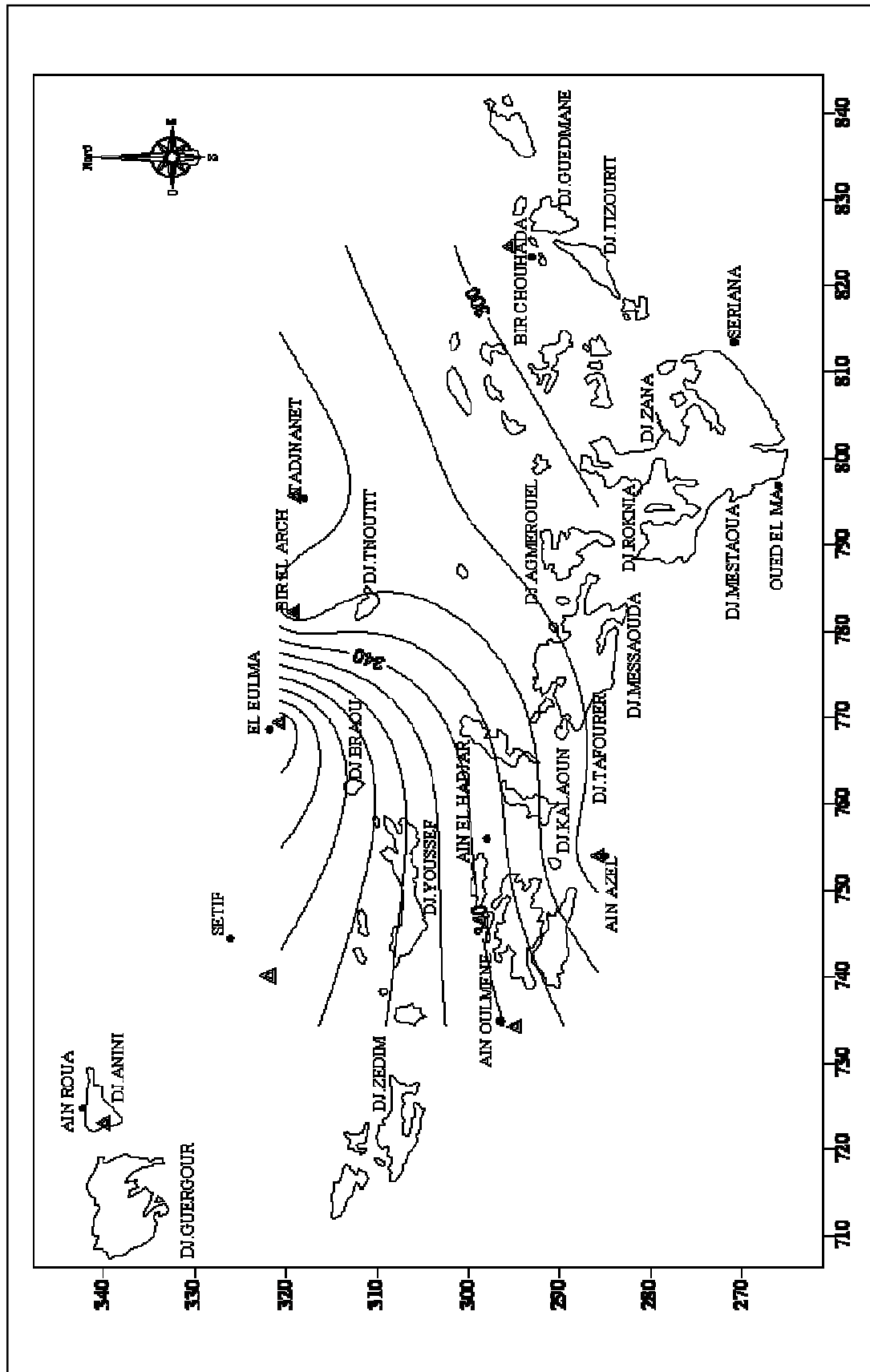


Figure IV.2 - Précipitations moyennes interannuelles des stations pluviométriques de l'ensemble Sud-sétifien (séries récentes) Boudoukha A. (1998) : Hydrogéologie des hautes plaines Sétifiennes et qualité chimique des eaux souterraines

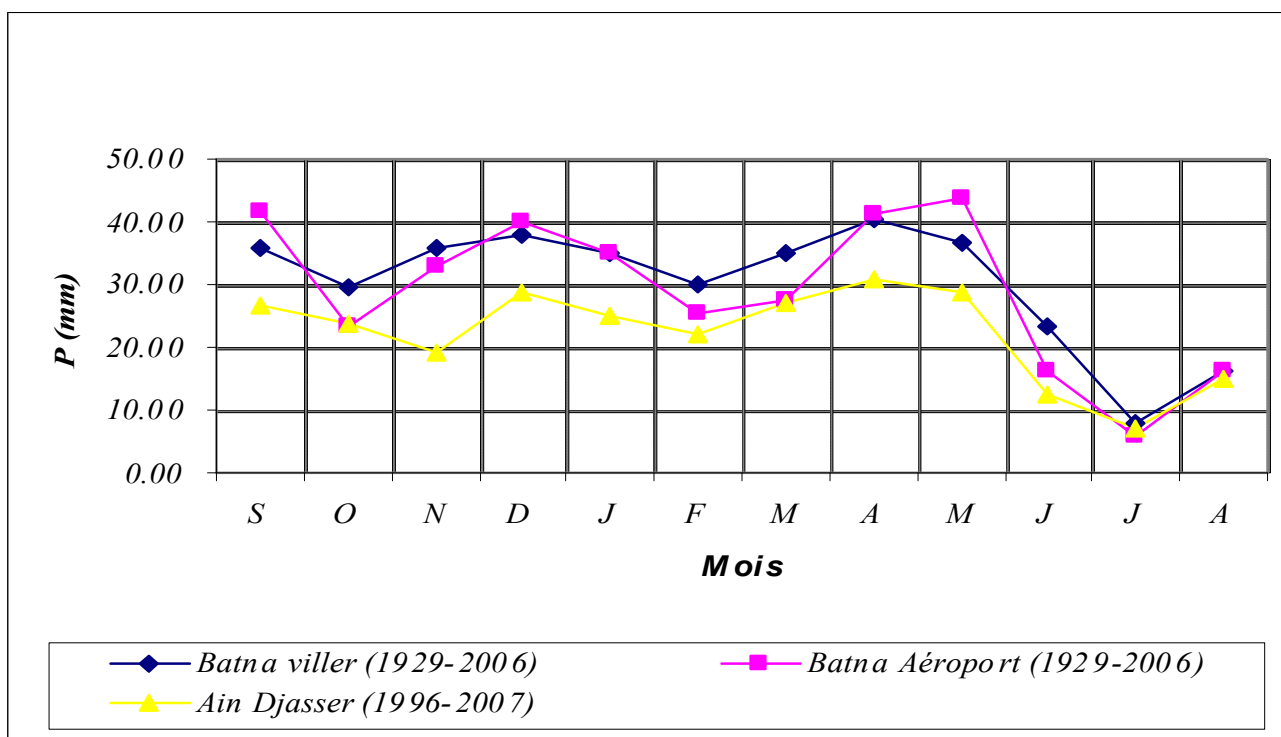


Figure IV.3 – Variation des précipitations moyennes mensuelles interannuelles

IV.1.2 Les températures

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 profonds et agit sur le chimisme de l'eau

Dans le présent paragraphe nous examinerons d'une manière générale les températures qui ont été enregistrées pendant les périodes anciennes et récentes. Ces températures concernent les stations de Batna Ville, Batna Aéroport et Ain Djasser. Tableau IV.3 et figure IV.4.

Tableau IV.3– Températures moyennes mensuelles interannuelles en °C.

Station	Période	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Moy
Batna Ville	1929-2006	21	15	10	6	5	6	9	12	16	22	25	26	14
Batna Aéroport	1996-2007	21	17	11	7	6	7	10	14	19	24	27	26	16
Ain Djasser	1967-2002	22	17	11	8	7	8	11	13	19	24	27	27	16

L'examen de ces données montre que les températures moyennes interannuelles diffèrent légèrement d'une station à l'autre. Celles-ci diminuent au fur et à mesure que l'on s'éloigne du centre de la zone d'étude. 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 du reste des mois, elles sont plus élevées. La température moyenne minimale est enregistrée au mois de janvier à la station de Batna ville avec 5°C et la température moyenne maximale est enregistrée au mois de juillet à la station de Ain Djasser avec 27°C.

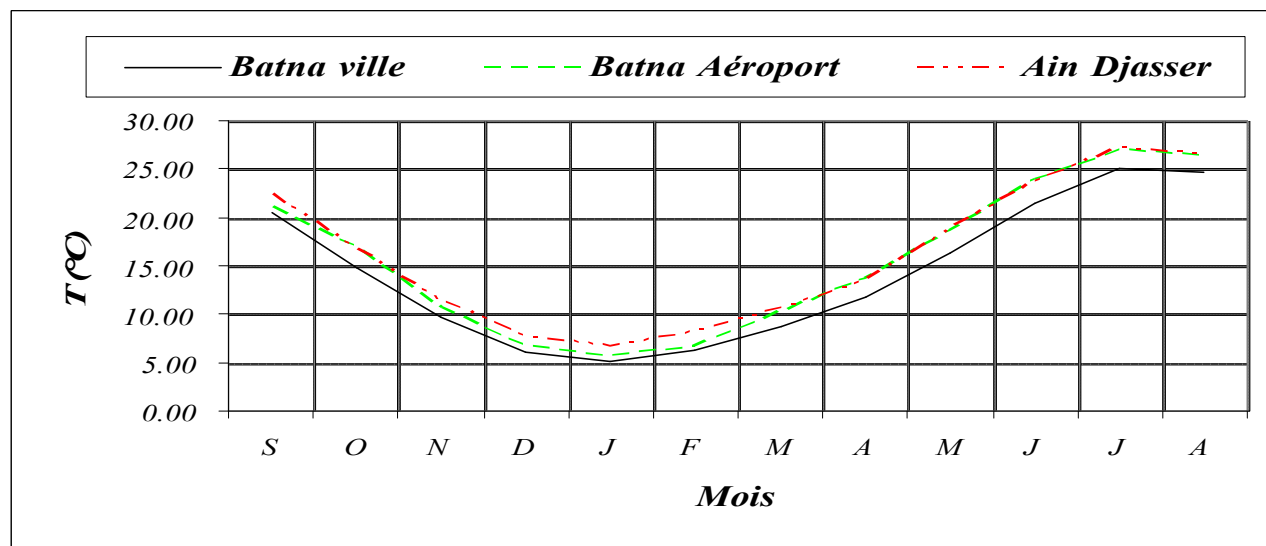


Figure IV.4 – Variation des températures moyennes mensuelles

IV.2 Les indices climatiques

Dans le présent paragraphe nous essayerons d'évaluer les indices climatiques et de classer la zone d'étude selon ces indices. 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 l'indice pluviométrique annuel de Moral et cela en se basant sur les températures mesurées dans les trois stations.

IV.2.1 Indice d'aridité de De Martonne

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 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 IV.4.

Tableau IV.4 – Indices d'aridité de De Martonne.

Station	Période	P (mm)	T (°C)	I	Type de Climat
Batna ville	1929-2006	364	14	15	Semi aride
Batna Aéroport	1996-2007	349	16	14	Semi aride
Ain Djasser	1967-2002	267	16	10	Semi aride

La valeur la plus élevée est observée dans la station de Batna ville et Aéroport et la faible valeur est observée à la station de Ain Djasser. Selon cet indice la zone d'étude est une zone ayant un climat semi aride.

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.

Un abaque donné par De Martonne permet de représenter les différentes stations. Figure IV.5. L'ensemble des stations étudiées se trouve dans la zone à régime semi aride à écoulement temporaire.

IV.2.2 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 IV.5

Tableau IV.5 – Quotient pluviométrique annuel de Moral.

Station	Période	P (mm)	T (°C)	I_A
Batna ville	1929-2006	364	14	1.38
Batna Aéroport	1996-2007	349	16	1.20
Ain Djasser	1967-2002	267	16	0.89

La valeur la plus élevée est observée dans la station de Batna ville, et la valeur minimale est observée dans la station d'Ain Djasser. Selon l'indice de la station d'Ain Djasser la zone d'étude est une zone ayant un climat semi aride.

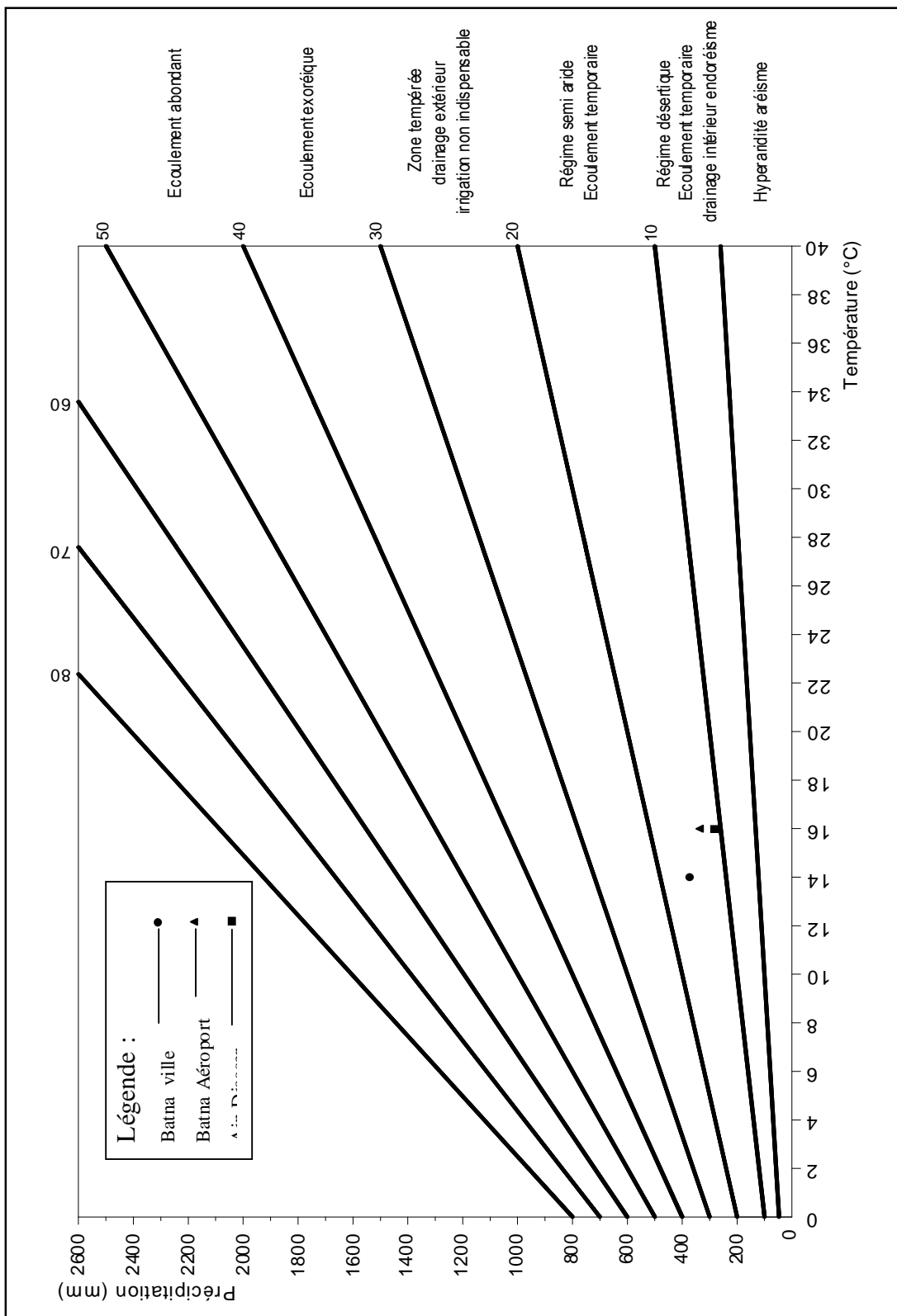


Figure IV.5 - Indice d'aridité de De Martonne.

IV.3 Estimation des paramètres du bilan hydrologique

IV.3.1 Evapotranspiration potentielle (ETP)

IV.3.1.1 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 répandue est celle de C.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.

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

Où :

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

ETPc: évapotranspiration potentielle corrigée (mm);

K : facteur de correction.

IV.3.1.2 Méthode de Blaney-Criddle

Cette méthode est l'une des plus utilisée pour estimer les besoins en eau de la production agricole. Une adaptation de cette méthode, aux zones arides et semi arides, est suggérée par la FAO.

Le calcul de l'ETP, selon cette méthode, s'effectue en deux étapes; la première concerne le terme climatique de l'ETP et la deuxième concerne l'ETP des cultures.

$$ETP_{\text{clim}} = aF + b$$

Où :

ETP_{clim} : l'ETP climatique (mm);

F : force évaporante de Blaney-Criddle (mm/mois);

a et b: coefficients de correction en fonction des trois paramètres climatiques: l'humidité relative, la vitesse du vent et l'insolation moyenne effective (rapport des heures d'insolation et de la durée astronomique du jour). Annexe I.

La force évaporante de Blaney-Criddle se calcule par la formule ci-dessous :

$$F = p * (8,13 + 0,46 * t)$$

Où :

F: force évaporante de Blaney-Criddle (mm/mois);

p: pourcentage journalier moyen des heures de jour pour un mois et une latitude donnée;

t: température moyenne mensuelle (°C).

l'ETP se calcul alors à l'aide de la formule suivante

$$ETP = K_c * F$$

Où :

ETP: évapotranspiration mensuelle (mm);

K_c : coefficient cultural, il varie de 0,50 à 1,20 pour différentes cultures et diverses zones climatiques;

F: force évaporante de Blaney-Criddle (mm/mois).

Les différentes valeurs de l'ETP calculée selon la méthode de Thornthwaite ainsi que celle de Blaney-Criddle, pour les différentes stations de la région, seront reportées ultérieurement dans les tableaux IV 11 à 13.

IV.3.2 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.3.2.1 Méthode de Coutagne

C'est une méthode qui fait intervenir les précipitations moyennes annuelles et les températures moyennes annuelles à l'aide de la formule suivante :

$$E.T.R = P - \lambda P$$

Où :

ETR: évapotranspiration réelle (mm);

P : précipitation moyenne annuelle (mm);

λ : facteur dépendant de la température moyenne annuelle;

$$\lambda = \frac{1}{(0,8 + 0,14T)}$$

Cette formule est applicable pour les précipitations comprises entre $1/8 \lambda$ et $1/2 \lambda$, cette condition n'est pas vérifiée pour nos stations par conséquent elle ne peut pas être appliquée.

IV.3.2 .2 Méthode de Turc

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 IV.6

Tableau IV.6– Valeurs de l’ETR selon la méthode de Turc

Station	Période	P (mm)	T (°C)	ETR (mm)
Batna ville	1929-2006	364	14	384.
Batna Aéroport	1996-2007	349	16	368
Ain Djasser	1967-2002	267	16	281

IV.3.2 .3 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. Figure IV.6

Cet abaque permet de calculer les différentes valeurs du déficit d’écoulement qui correspond en gros à l’ETR pour les différentes stations. Tableau IV.7.

Tableau IV.7 – Valeurs de l’ETR selon la méthode de Verdeil.

Station	Période	P (mm)	T (°C)	ETR (mm)
Batna ville	1929-2006	364	14	344
Batna Aéroport	1996-2007	349	16	328
Ain Djasser	1967-2002	267	16	254

IV.4 Bilan hydrologique

IV.4.1 Bilan hydrologique de Thornthwaite

Le bilan hydrologique établi mensuellement selon la méthode de C.W. Thornthwaite a l’avantage d’estimer pour chaque mois: l’évapotranspiration réelle ETR, la réserve facilement utilisable RFU, le déficit agricole D_a et l’excédent Ex . La réserve facilement utilisable RFU est calculée par la formule de Hallaire (1960) donnée ci-dessous :

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

Où :

RFU: la réserve facilement utilisable (m);

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

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

P_r : 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 chaque station sont portés dans les tableaux IV.8 à IV.10

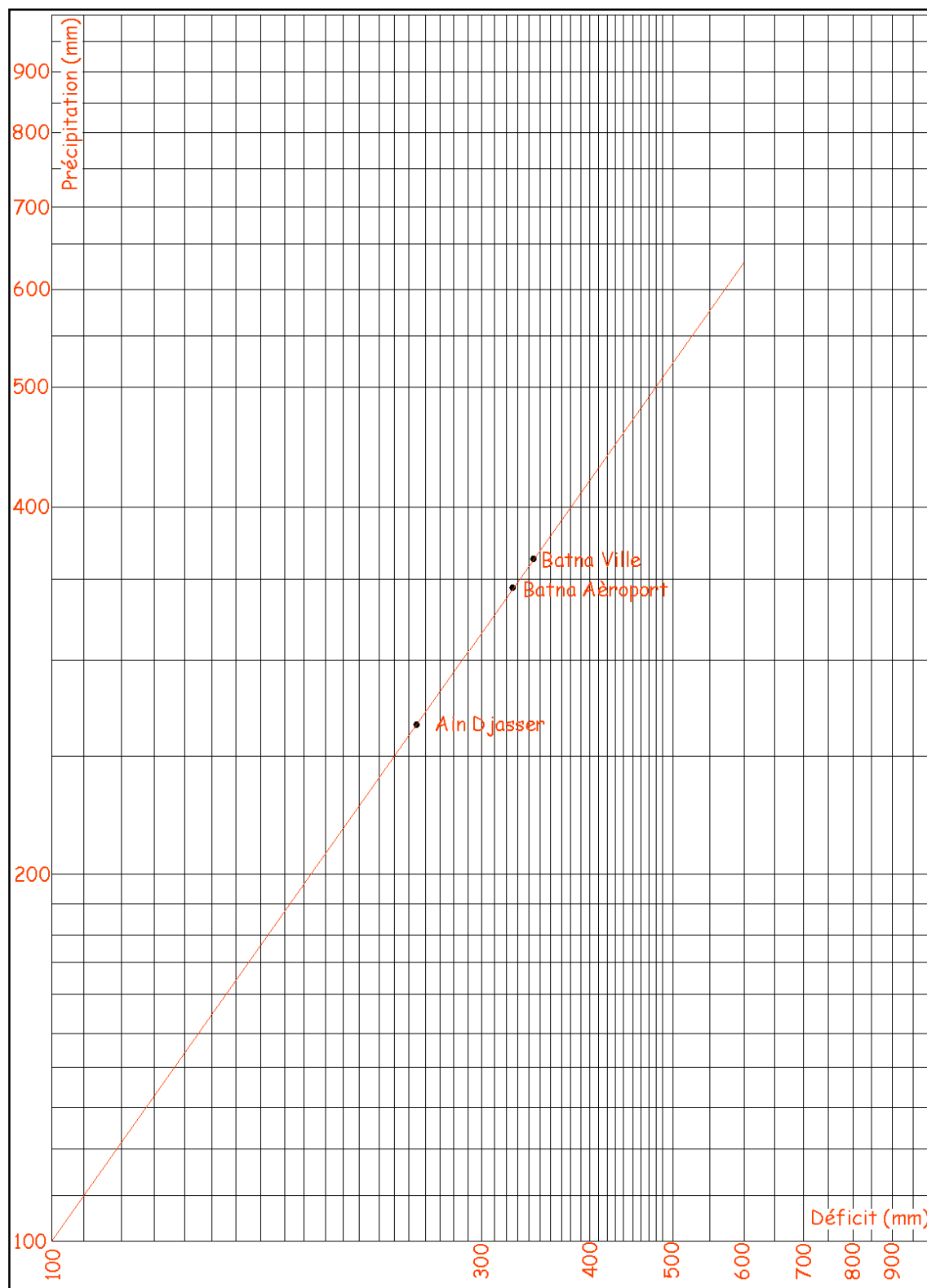


Figure IV.6 Abaque de Verdeil.

Tableau IV.8 – Bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite
Station de Batna ville

Désignation	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Année
T (°C)	21	15	10	6	5	6	9	12	16	22	25	26	14
I	9	5	3	1	1	1	2	4	6	9	11	12	66
a	1,5												
ETP	97	58	31	14	11	14	26	41	64	104	127	135	721
K	1,03	0,97	0,68	0,85	0,87	0,85	1,03	1,09	1,21	1,21	1,23	1,16	—
ETPc	100	56	21	12	9	12	27	44	77	126	156	157	797
P	36	30	36	38	35	30	35	40	37	23	8	16	364
P-ETP	-64	-26	15	26	26	18	8	-4	-40	-103	-148	-141	—
RFU	0	0	15	41	56	56	56	52	12	0	0	0	—
Da	64	26	0	0	0	0	0	0	0	91	148	141	470
Ex	0	0	0	0	11	18	8	0	0	0	0	0	37
ETR	36	30	21	12	9	12	27	44	77	35	8	16	327

Tableau IV.9 – Bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite
Station de Batna Aéroport

Désignation	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Année
T (°C)	21	17	11	7	6	7	10	14	19	24	27	26	16
I	9	6	3	2	1	2	3	5	8	11	13	12	74
a	1,7												
ETP	93	65	31	15	11	15	27	47	78	116	141	133	771
K	1,03	0,97	0,68	0,85	0,87	0,85	1,03	1,09	1,21	1,21	1,23	1,16	—
ETPc	95	63	21	12	10	12	27	51	95	140	174	154	854
P	42	23	33	40	35	25	28	41	44	16	6	16	349
P-ETP	-53	-40	12	28	25	13	1	-10	-51	-124	-168	-138	—
RFU	0	0	12	40	56	56	56	46	0	0	0	0	—
Da	53	40	0	0	0	0	0	0	5	124	168	138	528
Ex	0	0	0	0	9	13	1	0	0	0	0	0	23
ETR	42	23	21	12	10	12	27	51	90	16	6	16	326

Tableau IV.10 – Bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite
Station d'Ain Djasser

Désignation	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Année
T (°C)	23	17	11	8	7	8	11	13	19	24	27	27	16
I	10	6	3	2	2	2	3	4	8	11	13	13	77
a	1,7												
ETP	106	63	30	17	14	17	30	40	76	115	141	141	788
K	1,03	0,97	0,68	0,85	0,87	0,85	1,03	1,09	1,21	1,21	1,23	1,17	—
ETPc	110	61	20	15	12	15	31	43	93	139	173	164	876
P	27	24	19	29	25	22	27	30	29	13	7	15	267
P-ETP	-83	-37	-1	14	13	7	-4	-13	-64	-126	-166	-149	—
RFU	0	0	0	14	27	34	30	17	0	0	0	0	—
Da	83	37	1	0	0	0	0	0	47	126	166	149	609
Ex	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ETR	27	24	19	15	12	15	31	43	46	13	7	15	267

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 surestimés 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).

IV.4.2 Bilan hydrologique de Blaney-Criddle

Le bilan hydrologique établi mensuellement selon la méthode de Blaney-Criddle permet d'avoir une idée sur l'étendue des périodes sèches, et notamment sur les seuils critiques au delà desquels l'irrigation devient indispensable. Ce bilan nous permet aussi d'estimer pour chaque mois: l'évapotranspiration réelle ETR, la réserve facilement utilisable RFU, le déficit agricole D_a et l'excédent Ex . La réserve facilement utilisable RFU est calculée par la formule de Hallaire (1960) exposée dans la méthode précédente.

Les bilans hydrologiques établis mensuellement selon la méthode de Blaney-Criddle, pour chaque station sont portés dans les tableaux IV.11 à IV.13

On constate que les bilans hydriques culturels, des différentes stations de la région, établis en tenant compte des ETP calculées au pas mensuel, sont déficitaires. Seule une analyse au pas journalier permet de développer un bilan proche de la réalité.

IV.4.3 – Comparaison des deux bilans

On constate que les valeurs de l'ETP calculées par les deux méthodes sont différentes pour l'ensemble des stations de la région. La superposition des graphiques de l'ETP calculée par les deux méthodes, pour les trois stations de la région, illustre cette différence qui est très accusée en été et qui résulte sans doute du fait que chaque méthode est adaptée pour un milieu bien déterminé.

En l'absence de mesures expérimentales qui auraient permis de prononcer le choix de la méthode la plus appropriée pour le calcul de l'ETP dans notre région, nous nous permettons de dire que la formule de Thornthwaite semble être la plus convenable.

Tableau IV.11 – Bilan hydrologique selon la méthode de Blaney-Criddle**Station de Batna ville**

Désignation	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Année
T (°C)	21,0	15,0	10,0	6,0	5,0	6,0	9,0	12,0	16,0	22,0	25,0	26,0	14,4
P (%)	8,37	7,86	6,94	6,80	6,99	6,90	8,34	8,83	9,81	9,81	9,96	9,40	8,33
F (mm/mois)	148,90	118,14	88,35	74,05	72,91	75,14	102,33	120,53	151,96	179,03	195,51	188,85	—
a	1,25	1,14	0,96	0,96	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,59	1,59	1,59	—
b	-1,84	-1,84	-1,66	-1,66	-1,84	-1,84	-1,84	-1,84	-1,84	-1,84	-2,11	-2,11	—
ETP _{clim.} (mm)	184	133	83	69	81	84	115	136	171	283	309	298	1946
K _c	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	1,1	1,1	1,1	—
ETP _{cult.} (mm)	104	83	62	52	51	53	72	84	106	197	215	208	1287
P (mm)	36	30	36	38	35	30	35	40	37	23	8	16	364
P-ETP (mm)	-68	-53	-26	-14	-16	-23	-37	-44	-69	-174	-207	-192	—
RFU (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	—
Da (mm)	68	53	26	14	16	23	37	44	69	174	207	192	923
Ex (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ETR (mm)	36	30	36	38	35	30	35	40	37	23	8	16	364

Tableau IV.12 – Bilan hydrologique selon la méthode de Blaney-Criddle**Station de Batna aéroport**

Désignation	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Année
T (°C)	21,0	17,0	11,0	7,0	6,0	7,0	10,0	14,0	19,0	24,0	27,0	26,0	15,8
P (%)	8,37	7,86	6,94	6,80	6,99	6,90	8,34	8,83	9,81	9,81	9,96	9,40	8,33
F (mm/mois)	148,90	125,37	91,54	77,18	76,12	78,32	106,17	128,65	165,49	188,06	204,68	188,85	—
a	1,25	1,14	0,96	0,96	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,59	1,59	1,59	—
b	-1,84	-1,84	-1,66	-1,66	-1,84	-1,84	-1,84	-1,84	-1,84	-1,84	-2,11	-2,11	—
ETP _{clim.} (mm)	184	141	86	72	85	87	119	145	187	297	323	298	2026
K _c	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	1,1	1,1	1,1	—
ETP _{cult.} (mm)	104	88	64	54	53	55	74	90	116	207	225	208	1338
P (mm)	42	23	33	40	35	25	28	41	44	16	6	16	349
P-ETP (mm)	-62	-65	-31	-14	-18	-30	-46	-49	-72	-191	-219	-192	—
RFU (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	—
Da (mm)	62	65	31	14	18	30	46	49	72	191	219	192	989
Ex (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ETR (mm)	42	23	33	40	35	25	28	41	44	16	6	16	349

Tableau IV.13 – Bilan hydrologique selon la méthode de Blaney-Criddle**Station d'Ain Djasser**

Désignation	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Année
T (°C)	23	17	11	8	7	8	11	13	19	24	27	27	16
P (%)	8,37	7,86	6,94	6,80	6,99	6,90	8,34	8,83	9,81	9,81	9,96	9,40	8,33
F (mm/mois)	156,60	125,37	91,54	80,31	79,34	81,49	110,00	124,59	165,49	188,06	204,68	193,17	—
a	1,25	1,14	0,96	0,96	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,59	1,59	1,59	—
b	-1,84	-1,84	-1,66	-1,66	-1,84	-1,84	-1,84	-1,84	-1,84	-1,84	-2,11	-2,11	—
ETP _{clim.} (mm)	194	141	86	75	89	91	124	140	187	297	323	305	2052
K _c	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	1,1	1,1	1,1	—
ETP _{cult.} (mm)	110	88	64	56	56	57	77	87	116	207	225	212	1355
P (mm)	27	24	19	29	25	22	27	30	29	13	7	15	267
P-ETP (mm)	-83	-64	-45	-27	-31	-35	-50	-57	-87	-194	-218	-197	—
RFU (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	—
Da (mm)	83	64	45	27	31	35	50	57	87	194	218	197	1088
Ex (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ETR (mm)	27	24	19	29	25	22	27	30	29	13	7	15	267

IV.5 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.

Les valeurs du ruissellement selon la méthode de Tixeront et Berkaloff sont portées dans le tableau IV.14

Tableau IV.14 – Le ruissellement selon la méthode de Tixeront et Berkaloff

Station	Période	P (mm)	ETP (mm)	R (mm)
Batna ville	1929-2006	364	797	25
Batna Aéroport	1996-2007	349	854	19
Ain Djasser	1967-2002	267	876	8

IV.6 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 IV.15

Tableau IV.15– Les différents paramètres du bilan hydrologique

Station	Période	P (mm)	ETR (mm)	R (mm)	I (mm)
Batna Ville	1929-2006	364	327	25	12
Batna Aéroport	1996-2007	349	326	19	4
Ain Djasser	1967-2002	267	267	0	0

On constate que l'infiltration directe à partir du sol est pratiquement nulle pour la station d'Ain Djasser et positive pour la station de Batna Ville (12 mm) et Batna aéroport (4 mm).

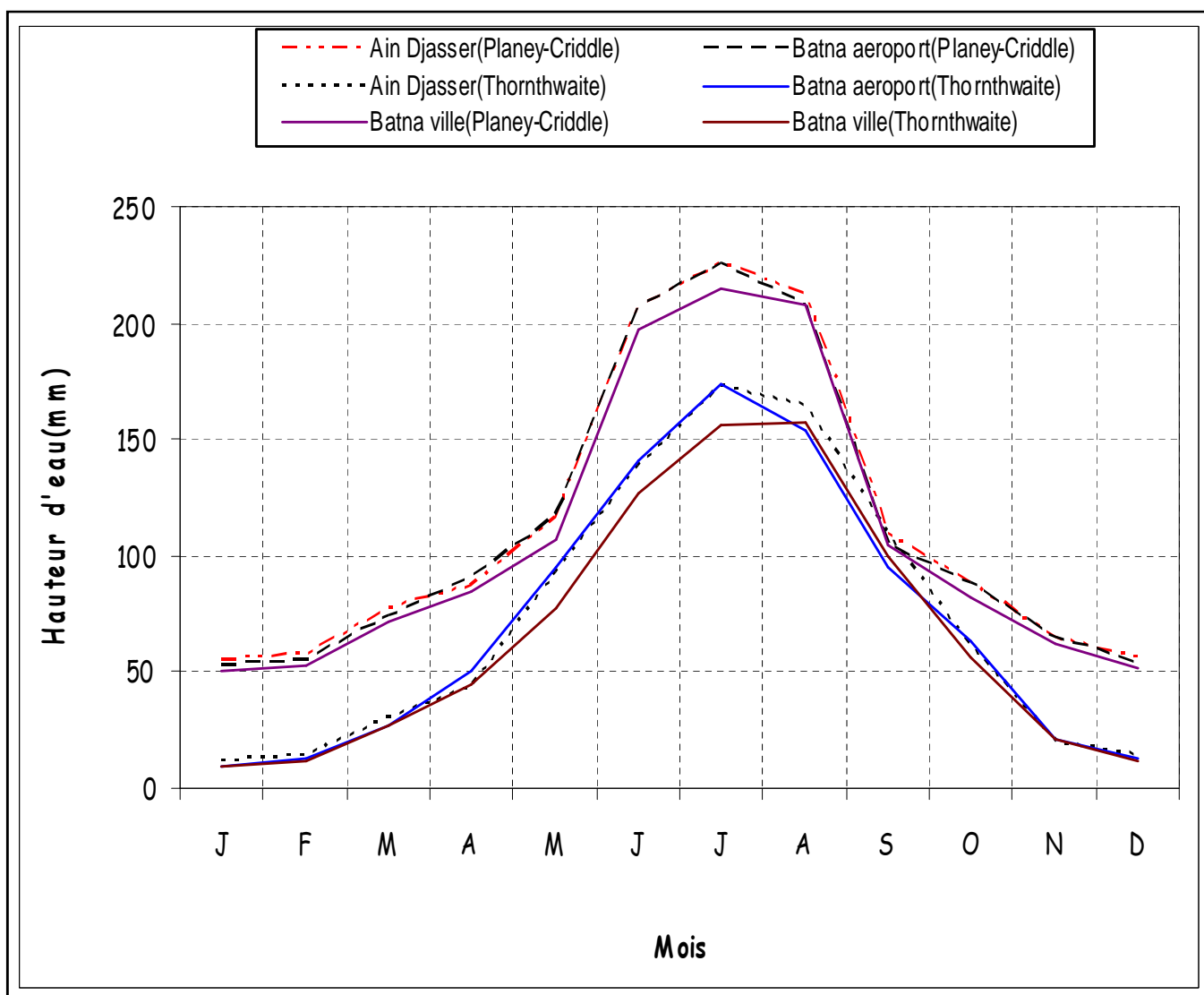


Figure IV.7– Courbes de l'évapotranspiration mensuelle

IV.7 Conclusion

L'étude climatologique a abouti aux conclusions suivantes :

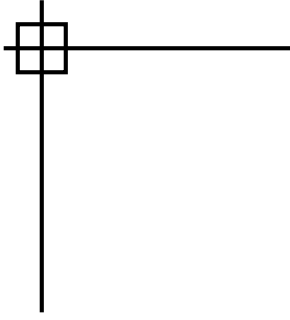
- les hauteurs moyennes interannuelles des précipitations varient légèrement d'une station à l'autre, elles sont plus importantes dans les stations situées en haute altitude, elles décroissent du Nord vers le Sud (Batna ville, Batna aéroport et Ain Djasser);

- les températures moyennes interannuelles diffèrent légèrement entre les trois stations, elles diminuent au fur et à mesure que l'on se dirige vers le Nord Ouest.

- l'étude des indices climatiques a confirmé l'appartenance de la zone d'étude au climat semi aride influencé par les courants humides de la méditerranée en hiver et chauds du Sahara en été;

- quant au bilan hydrologique ; on constate qu'il est déficitaire pour l'ensemble des stations étudiées.

- L'infiltration directe à partir du sol est pratiquement nulle pour la station d'Ain Djasser et positive pour la station de Batna ville et Batna Aéroport, ce qui pose le problème de l'infiltration directe au niveau de la plaine (nappe du Mio-Plio-Quaternaire).



Cinquième chapitre

Géophysique

Introduction

Dans ce chapitre nous étudierons la géométrie de l'aquifère par la prospection électrique. Plusieurs campagnes ont permis de mieux comprendre la structure du sous sol grâce à l'étude des résistivités électriques des formations qui le composent.

Notant que ce but ne peut être atteint que si les conditions suivantes sont remplies :

- ❖ les diverses formations lithologiques doivent être 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.

Une étude géophysique par prospection électriques a été effectuée par la compagnie 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 août 1969 touchant les plaines d'El Madher, Gadaïne et de Zana (Chott Saboun). Figure V.01.

Une autre étude géophysique par prospection électriques a été effectuée par la compagnie générale de géophysique (C.G.G) pour le compte du secrétariat d'état à l'hydraulique, direction des études du milieu et de la recherche hydraulique dans la plaine d'Ain Djasser (ex Bourzhel) durant la période allant du 29 décembre 1971 au 20 février 1972. Figure V.02.

V.1 Brève description de la prospection électrique

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 et de mesurer une différence de potentielle ΔU entre deux électrodes M et N de cuivre ou de plomb donc non polarisables. Ces paramètres permettent la mesure de résistivité électrique des différentes couches du sous sol dont la profondeur est fonction de la distance maximale entre les électrodes A et B. Le report de la résistivité apparente en ohm.m en fonction de la demi-distance AB (le dispositif étant symétrique) permet d'avoir dans un système d'axe bilogarithmique, une courbe de sondage électrique verticale (SEV) en question. L'interprétation de la courbe permet de connaître les caractéristiques géoélectriques 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.

Le dispositif de Schlumberger est le plus adopté. Le maillage le plus adapté pour l'hydrogéologie est une maille de 200m de côté. Bien que son taux de réussite est élevée (près de 90%), elle n'est pas garantie étant donné que l'hydrogéologie est une science naturelle.

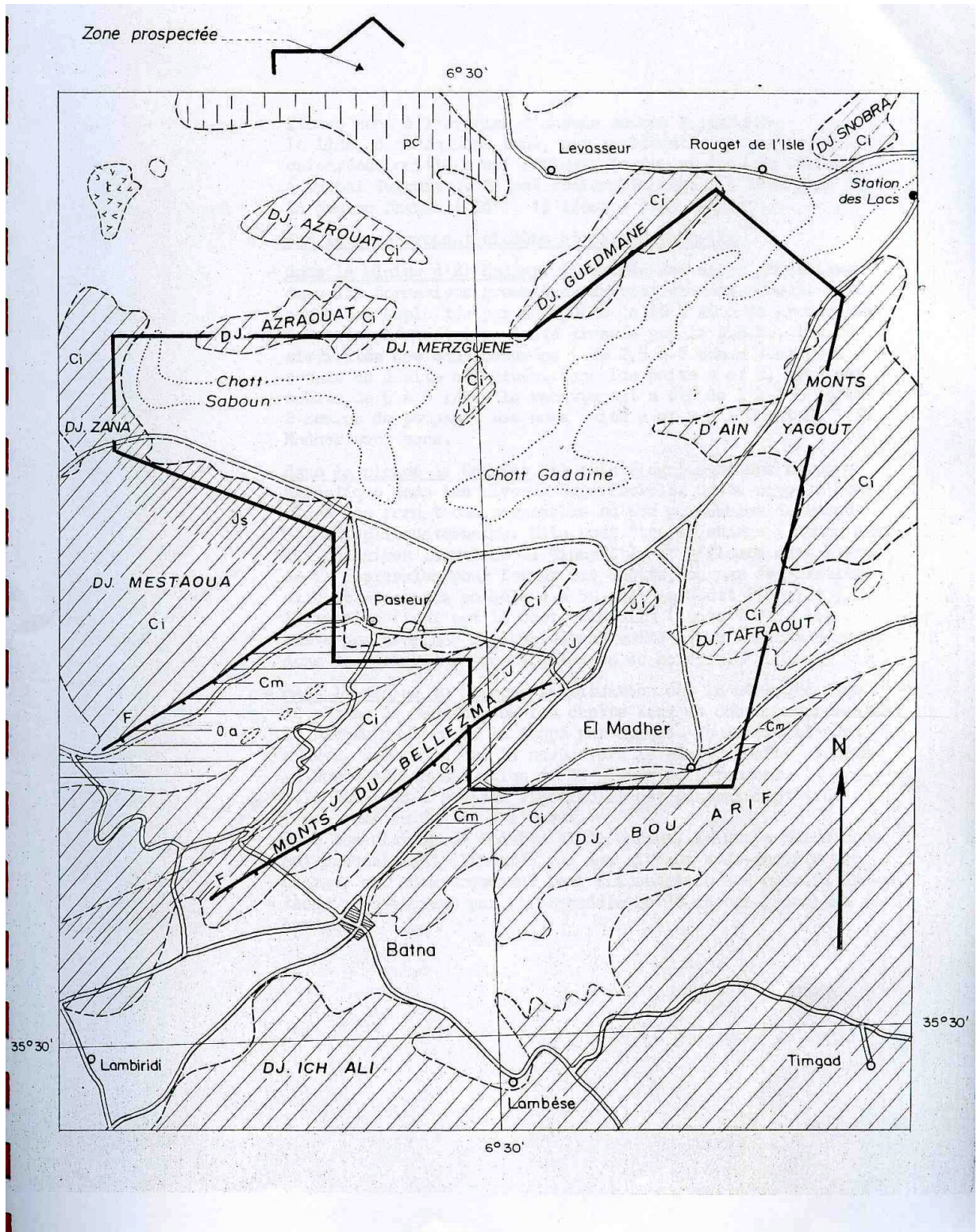


Figure V.1 Plan de situation de l'étude géophysique par la C.G.G en 1969

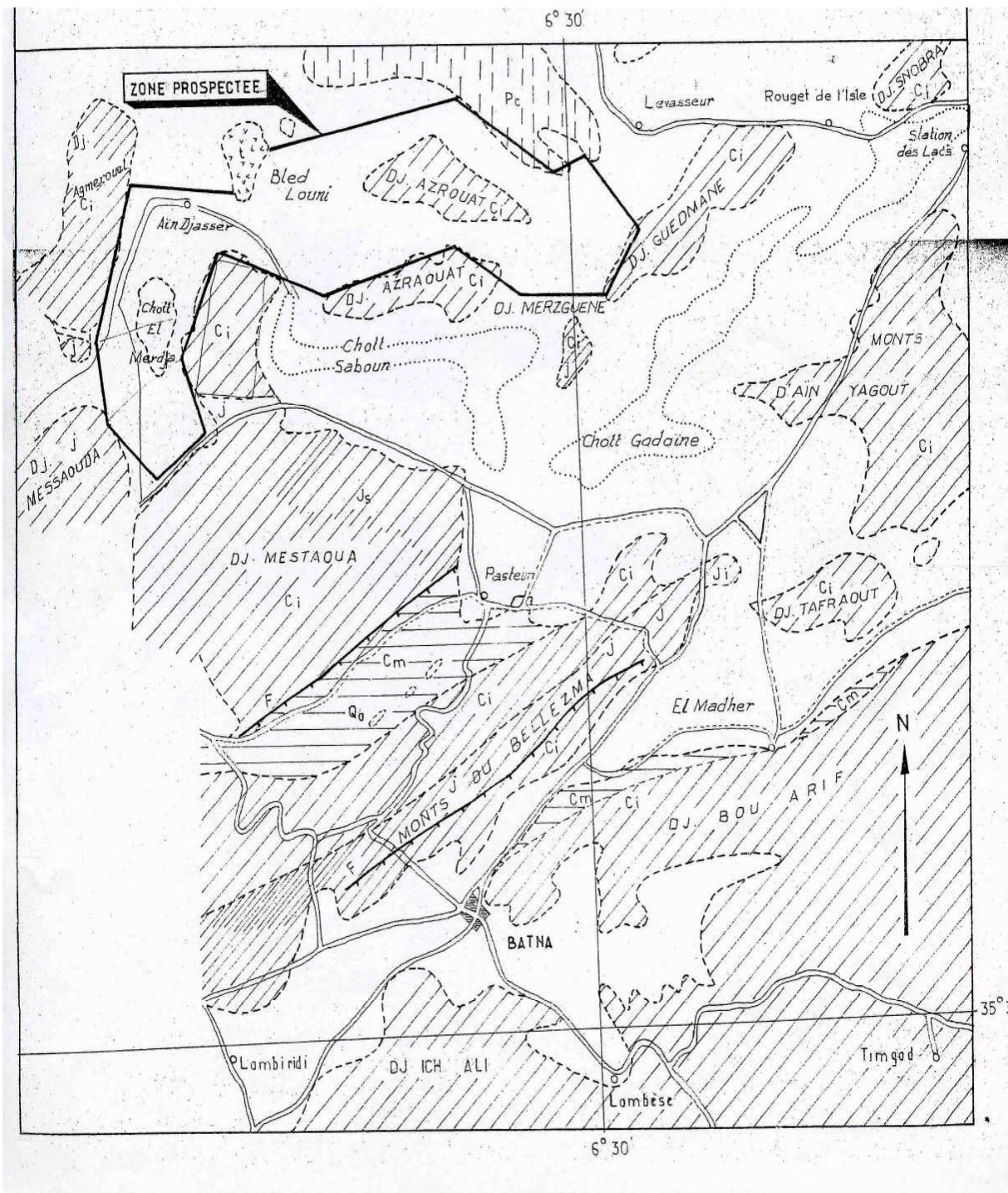


Figure V.2 Plan de situation de l'étude géophysique par la C.G.G en 1972

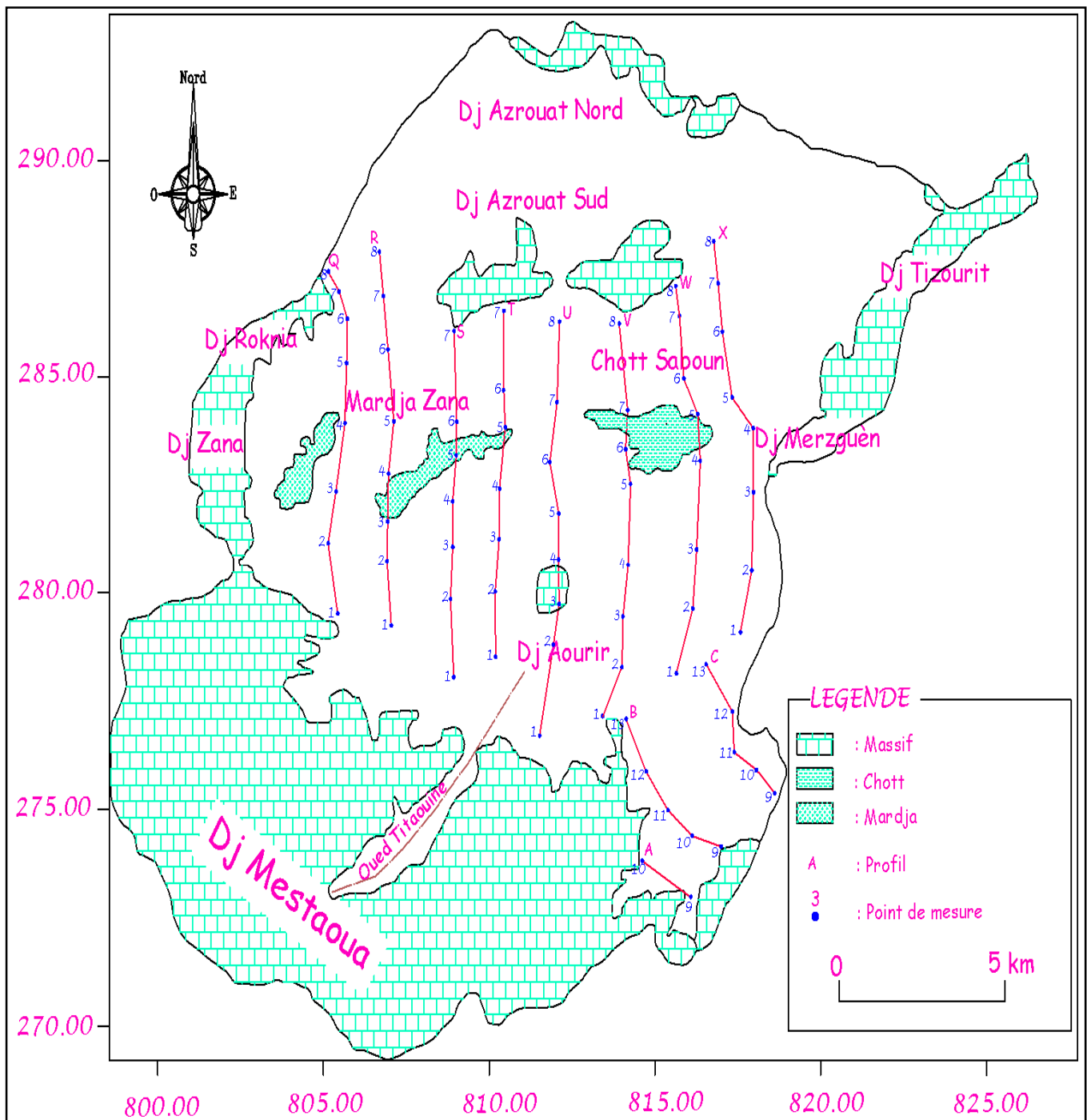


Figure V.3– Répartition des sondages électriques de l'étude géophysique par la C.G.G en 1969

V.2 Objectifs des campagnes

Les deux campagnes de géophysiques réalisées avaient pour objectifs :

- ❖ Détecter la profondeur du substratum susceptible d'être aquifère et alimenté par les massifs ;
- ❖ 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.

V.2.1 Résultats obtenus

La première étude a permis 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 = 3000m 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.

Quant à la deuxième étude, elle a permis l'établissement de :

- ❖ 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.

V.3. Etalonnage des mesures

Nous reprendrons l'essentiel des données d'étalonnage fournies par les deux études.

V.3.1 Forage F55 de Zana (S.E Q7bis- étude de 1969)

Ce forage est situé entre les profils Q de l'étude de 1969 et J de l'étude de 1971-72). 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, figure V.4

V.3.2 Forage (S.E D2-étude de 1969)

Le carottage électrique qui est y réalisé permet de fixer les valeurs des résistivités suivantes, figure N° 05, :

- ❖ De 0 à 23m – argile = 20 ohm.m ;
- ❖ De 23 à 29m – galets = 100 ohm.m ;
- ❖ De 29 à 35m – argiles et galets = 50 ohm.m ;
- ❖ De 35 à 87m – galets et argiles = 50 ohm.m avec un pic de 150 ohm.m ;
- ❖ De 87 à 133m – galets avec passées argileux = 200 à 50 ohm.m ;
- ❖ De 133 à 170m – marnes = 10 à 12 ohm.m.

L'examen de l'ensemble des étalonnages réalisés au cours des deux campagnes permet d'obtenir l'échelle de résistivité ci-dessus

V.4 Echelle des résistivités

Les étalonnages, les mesures paramétriques et l'estimation statistique déduite de l'ensemble des S.E permettent d'obtenir l'échelle des résistivités citée dans le tableau V.1 :

Tableau V.1 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	100-150

V.5 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 salées 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.

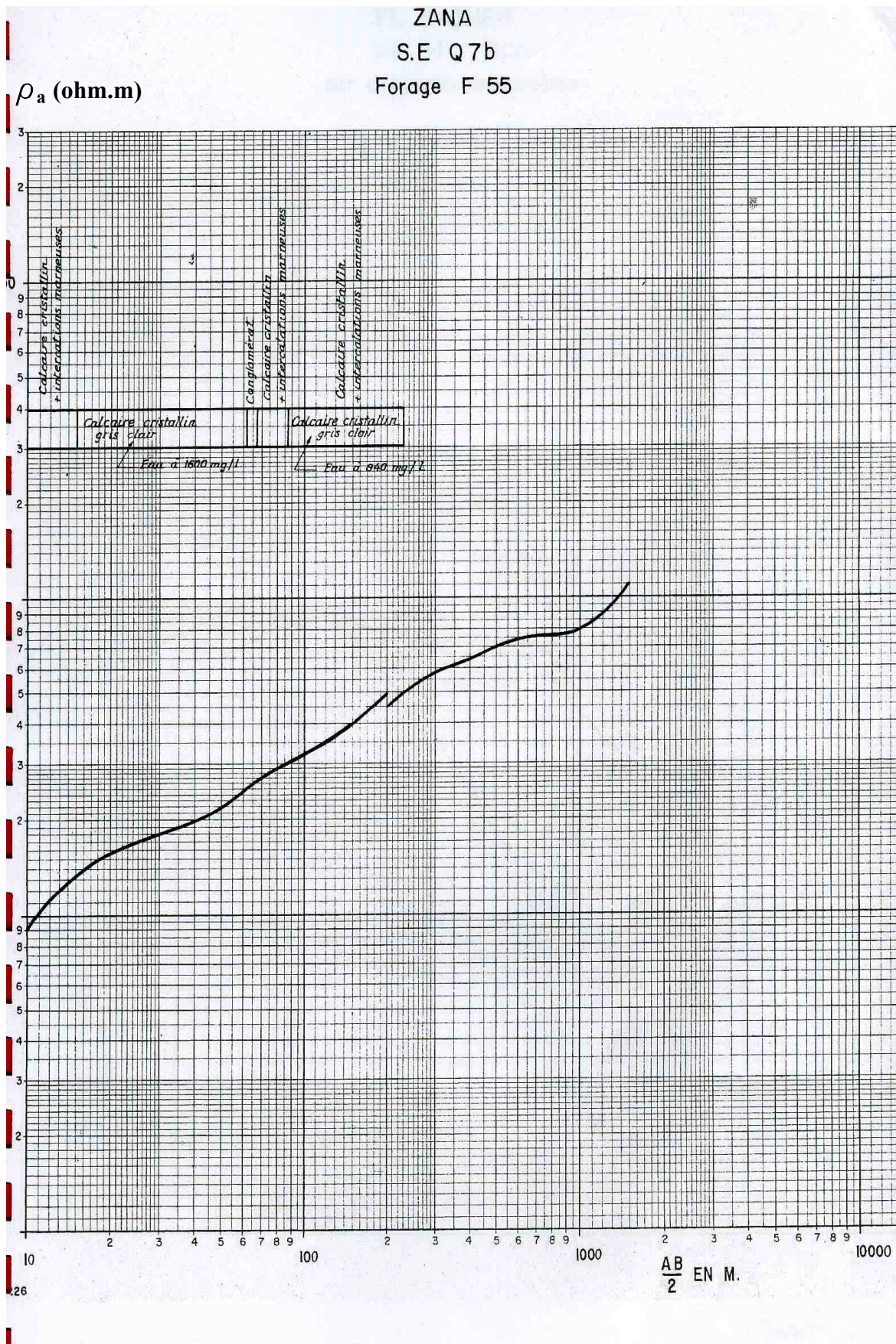


Figure V.4– Courbe du SEV au niveau du forage F55 de Zana (étude 1969)

S.E D12, J7
sur terrains salés des chotts

ρ_a (ohm.m)

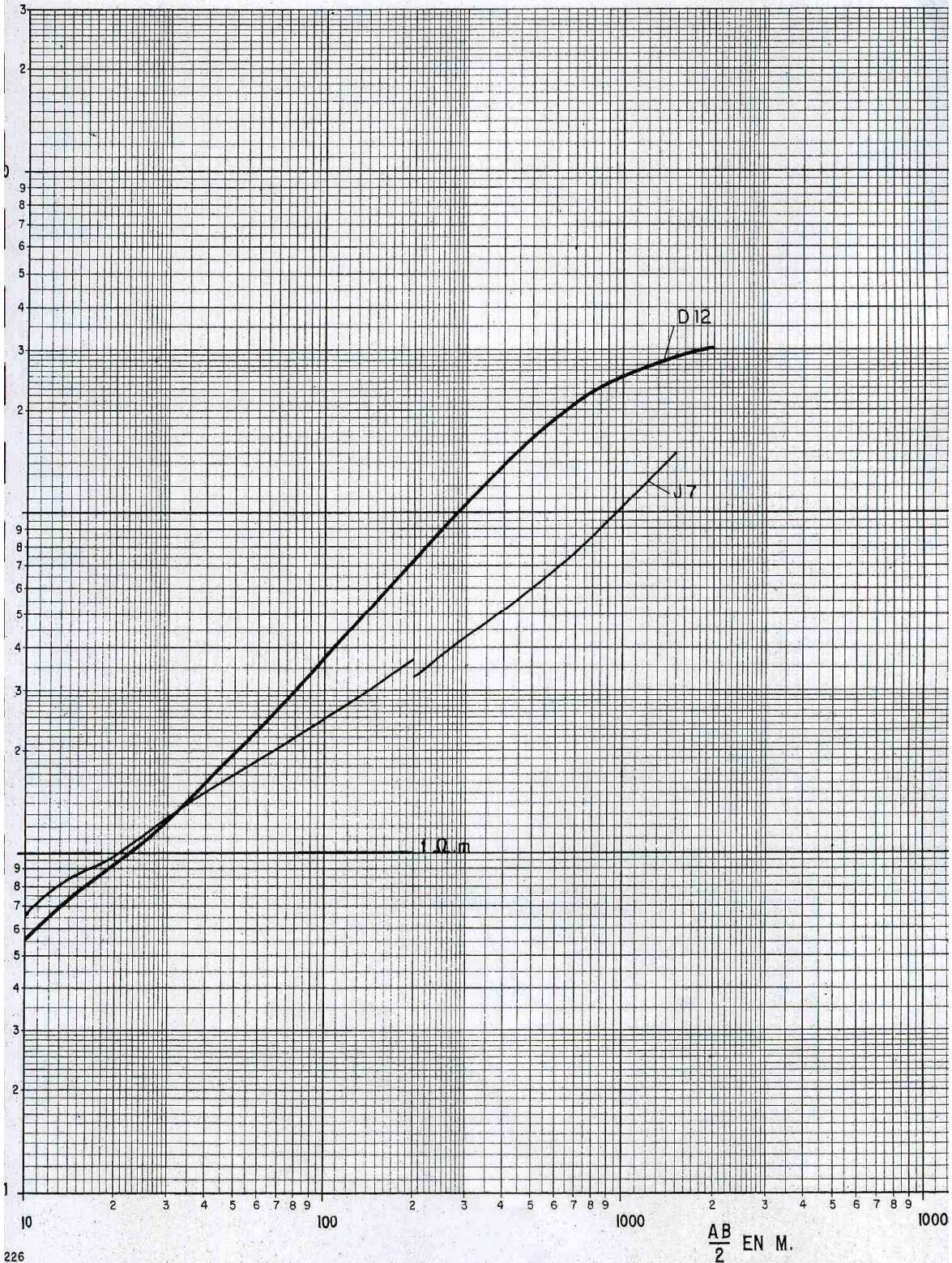


Figure V.5- Carottage électrique au niveau du forage S.E D12 (étude 1969)

V.6 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.

V.6.1 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 diminue) suite à l'effet de convention mais conserve les grandes lignes structurales.

Au Nord-Ouest de la plaine de Zana les résistivités dans l'ensemble sont élevées sauf à l'endroit du Chott Saboun. 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 Merzguène, Tizourite et Guedame sur un compartiment de 1 à 2 Km de large limité apparemment par le prolongement de la grande faille du Djebel Mestaoua.

Le synclinal Cénomaniens de Seriana (ex Pasteur) se prolonge vers le Nord-est et semble se fermer au niveau du Chott Gadaïne, par une large plage de très basses résistivités qui indiquerait la remontée de calcaire du Crétacé inférieur.

La structure d'ensemble apparaît comme une plate forme 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 anticlinale dans l'ensemble et pénéplanées.

V.6.2 Carte de résistivité en ligne AB = 1000m

Cette carte a pour but de localiser les niveaux résistants du recouvrement entre des profondeurs allant de 100m et 250 m.

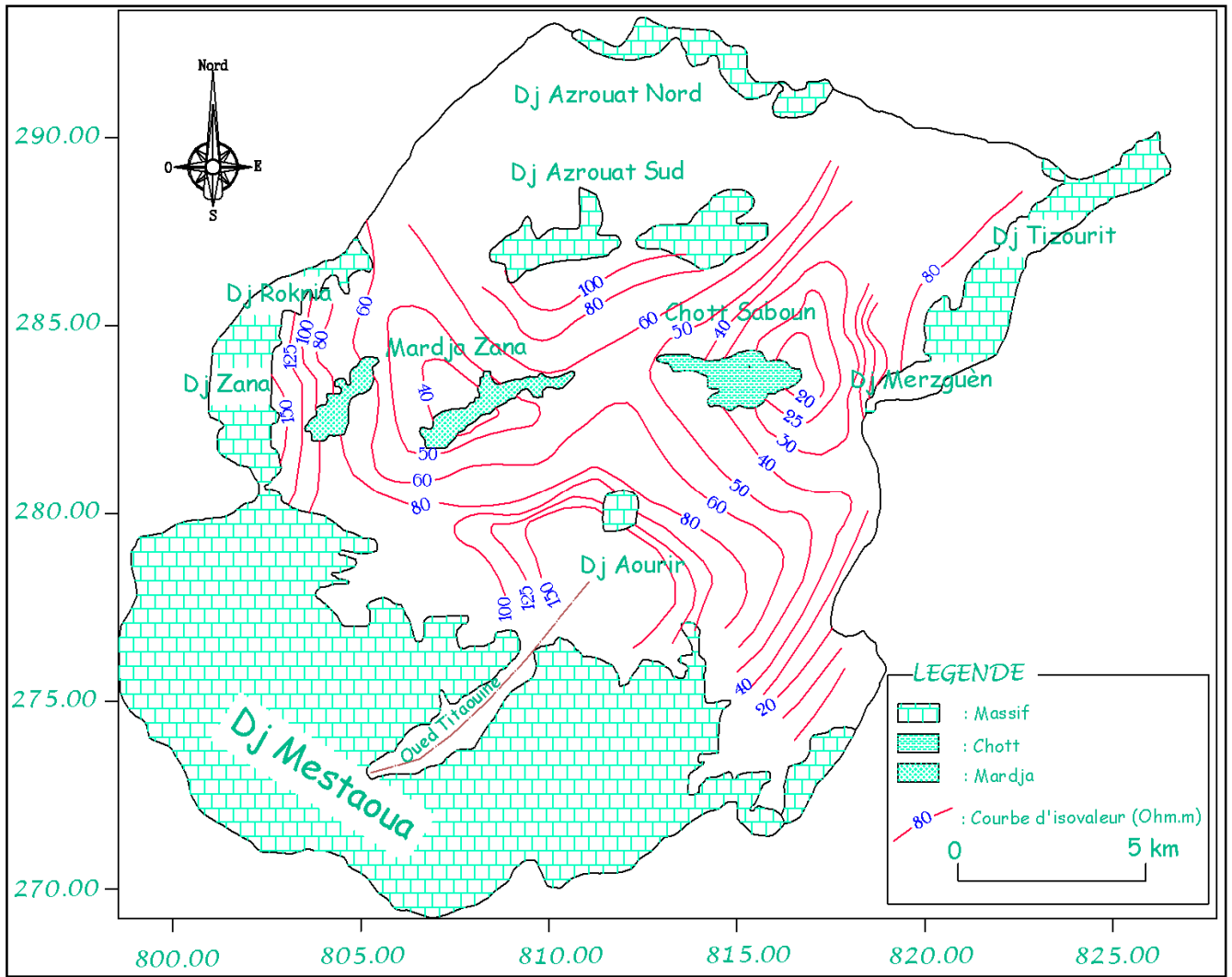
En fait cette carte est influencée par les massifs calcaires peu profonds de bordure. Ainsi dans la plaine de Zana, une large plage résistante aux abords du Djebel Aourir qui avance jusqu'au Chott Saboun. Ainsi cette carte permet la délimitation parfaite des affleurements résistants avec un seuil mettant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

V.6.3 Carte de recouvrement

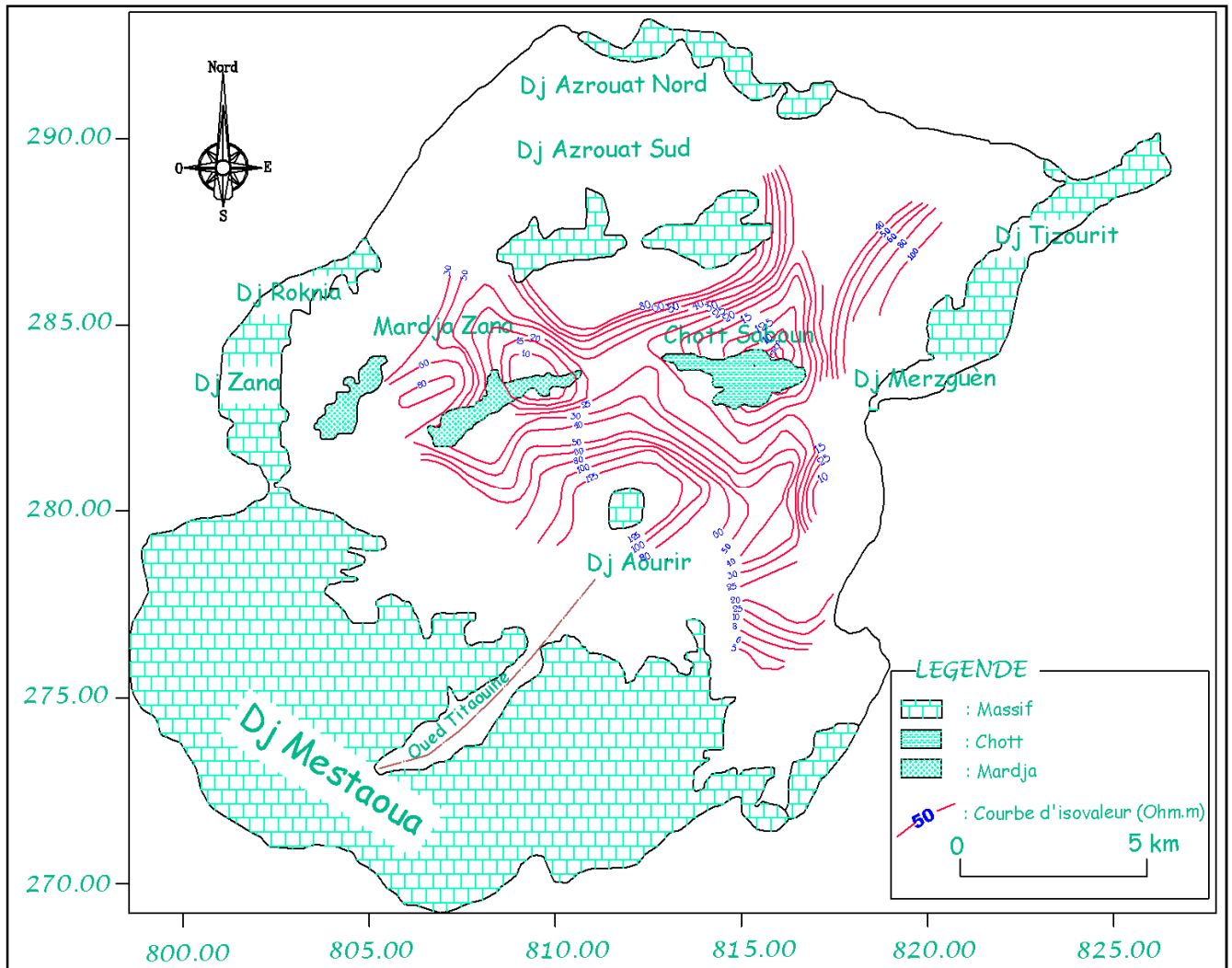
Sur cette carte schématique sont reportées les courbes de niveau du mur des niveaux résistants que l'on peut sans grand risque d'erreur rattacher au recouvrement du Quaternaire. Cette carte permet de délimiter les niveaux perméables, ou supposés tels, les plus importants et les plus épais.

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. 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.

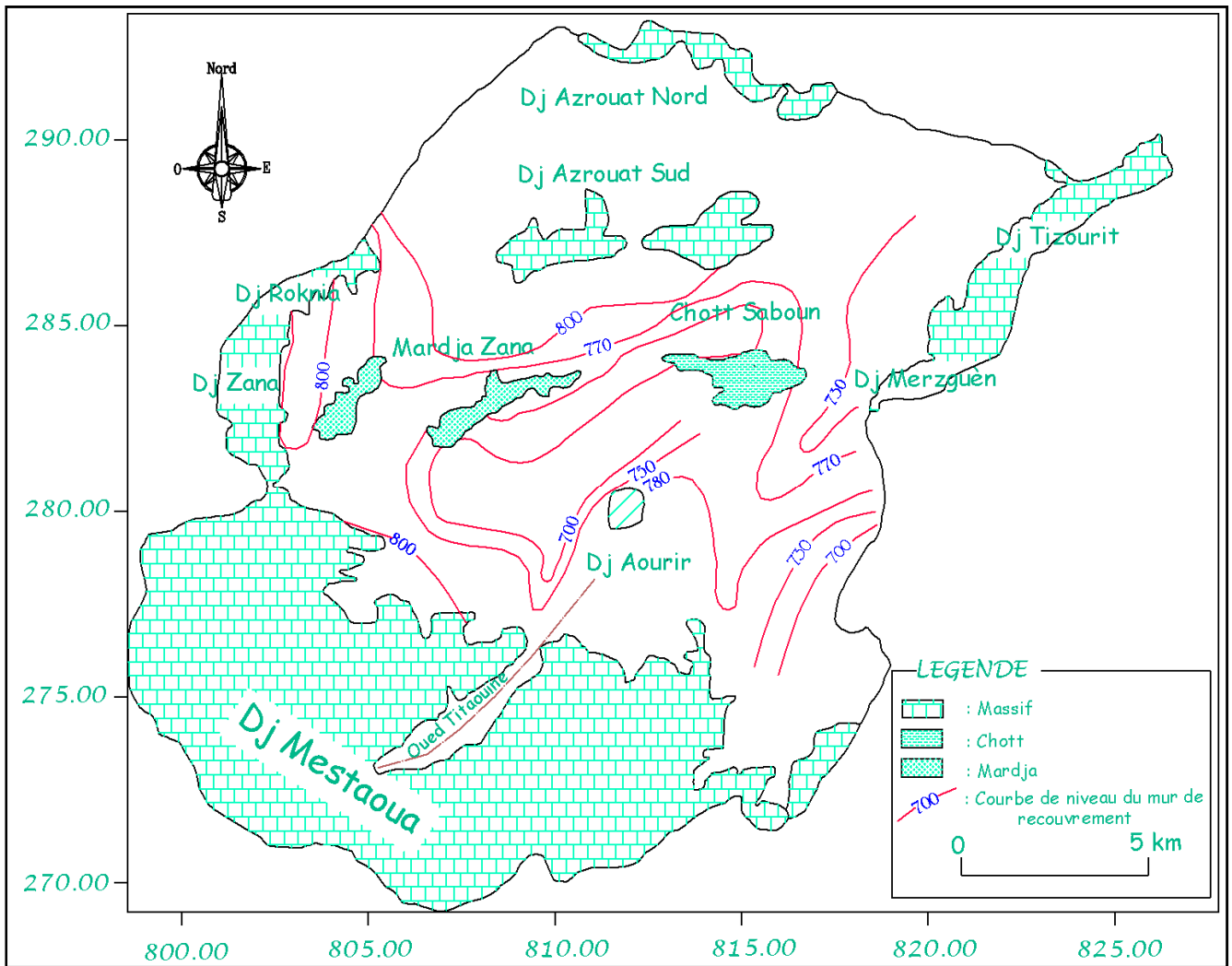
Il est probable que ces dépôts résistants soient bien alimentés et le recouvrement représente probablement un bon aquifère.



**Figure V.6– Carte des équirésistivités (AB = 3000m)
Etude géophysique par la C.G.G en 1969**



**Figure V.7– Carte des équirésistivités (AB = 1000m)
Etude géophysique par la C.G.G en 1969**



**Figure V.8– Carte de recouvrement
Etude géophysique par la C.G.G en 1969**

V.6.4 Carte du substratum

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

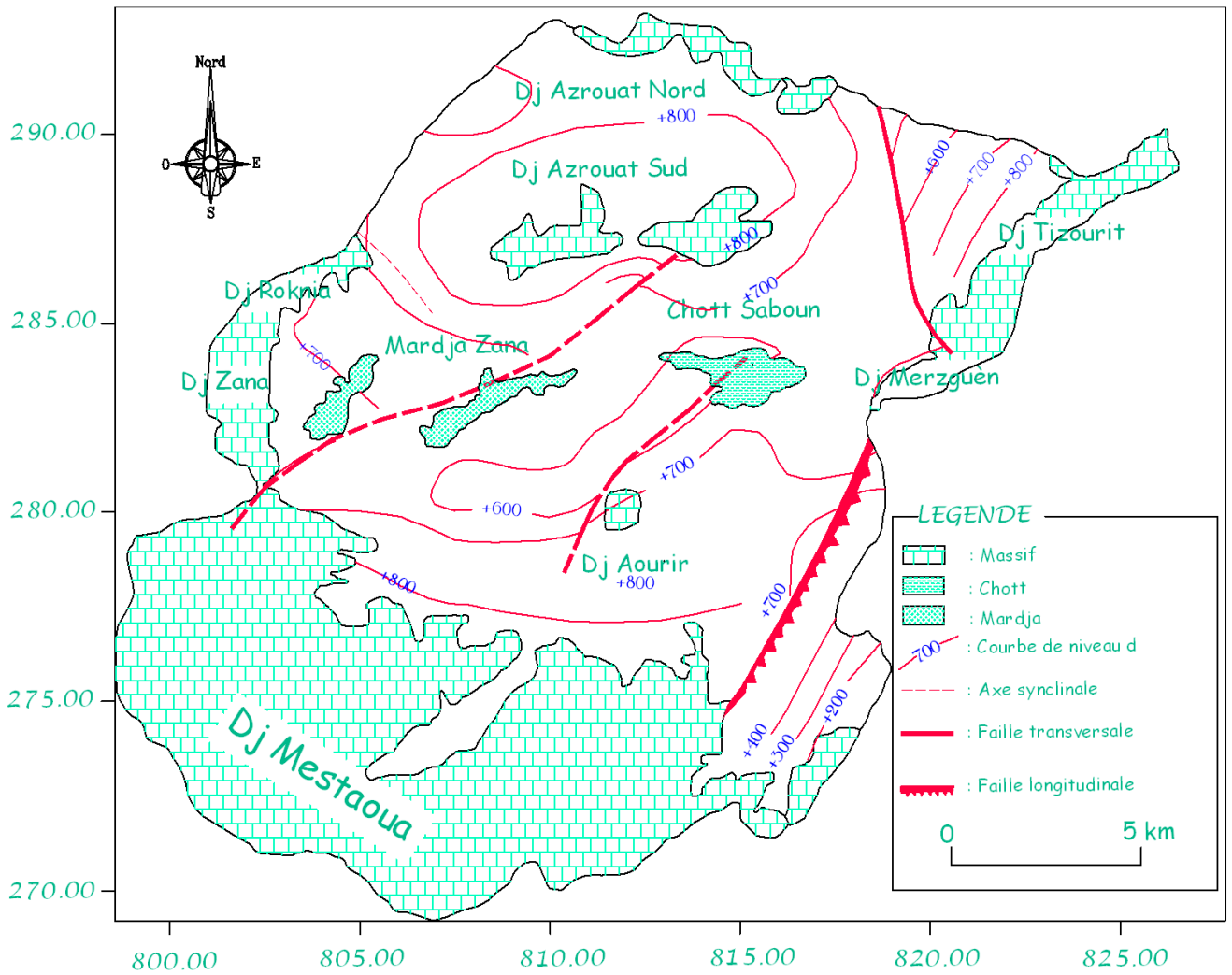
En ce qui concerne la plaine de Zana et la bordure Sud des Djebels Merzguène et Tizourite, le problème est simplifié du fait que l'on a probablement affaire à une surface d'érosion et que de toutes façons les structures atteignant le Jurassique et le Crétacé peuvent être difficilement mises en évidence à cause de leur résistivité qu'on peut confondre avec celle des formations avoisinantes.

De façon générale la plaine de Zana montre un substratum relativement peu profond, inférieur à 300m 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 Merzguène, Tizourite et Guedame.

V.6.5 carte tectonique schématique

Cette carte schématise les résultats de l'étude structurale; en mettant en relief les zones de moindre profondeur des formations résistantes et épaisses du substratum (cotes du toit supérieur à + 500 m) c'est-à-dire généralement profondeurs inférieures à 300 -400 m dans la plaine de Zana-Chott Saboun, et dans le synclinal de Seriana la cotes 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 des ces compartiments



**Figure V.9– Carte du substratum
Etude géophysique par la C.G.G en 1969**

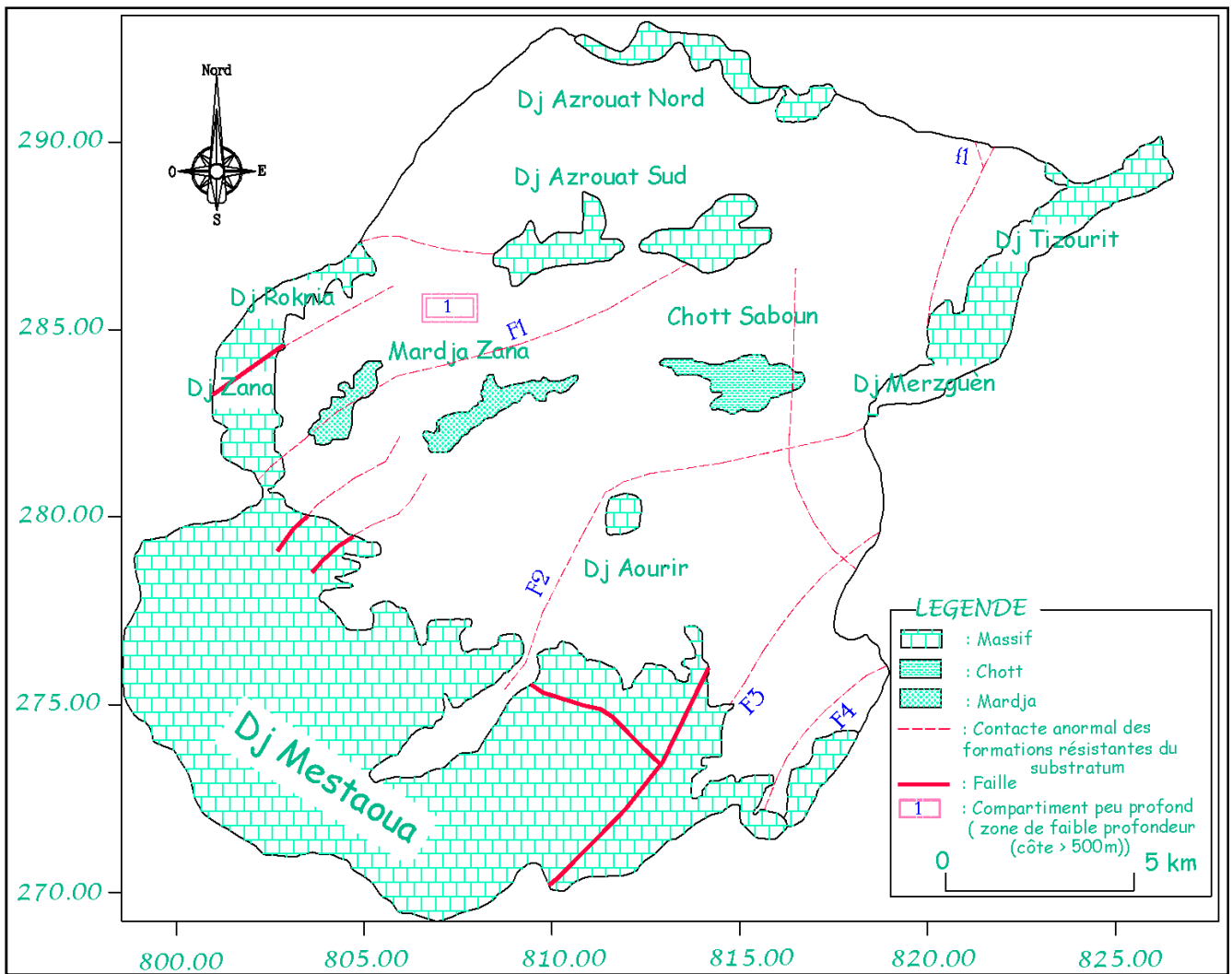


Figure V.10 Carte Tectonique
Etude géophysique par la S.G.G en 1969

V.6.6 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 que dans la partie Nord :

- ❖ 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 100m à 150m 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 ;
- ❖ Les formations du Crétacé inférieur et du Jurassique en majorité très résistants sont en position anticlinale dans l'ensemble et pénéplanées. Les coupes V et W traduisent bien cette allure et le substratum est peu profond en général (350m au maximum).

Dans la partie Sud on remarque la présence de l'anticlinale de Seriana et les coupes géo-électriques dévoile ce qui suit :

- ❖ Le synclinal de Seriana est très important. On voit s'y dessiner les calcaires du Cénomaniens. Les marnes cénomaniennes sous-jacentes, ont ici une résistivité de 2 à 3 ohm.m et qui peut atteindre les 300 à 400m d'épaisseur.
- ❖ Le recouvrement est en majorité conducteur (3 ohm.m) est très épais atteignant probablement 400m à 600m au cœur du synclinal. On touche probablement le substratum Jurassique ou des formations de la base du Crétacé en atteignant la plate forme de Zana (S.E B13 et V2) ;
- ❖ 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 ;
- ❖ L'existence des formations triasiques dans le Djebel Sarif provoquent un plan de charriage important dont il recouvre probablement les calcaires du cénomaniens et même le recouvrement (Profil C)

En générale les coupes géo-électriques dévoilent que :

- ❖ L'épaisseur du recouvrement augmente en allant des affleurements vers le centre de la plaine qui atteint 600m d'épaisseur au synclinal de Seriana ;
- ❖ Le recouvrement est en général assez régulier ;
- ❖ Le substratum est relativement peu profond (300m en général), il s'agit du Crétacé inférieur ou du Jurassique dans le prolongement de Mestaoua.

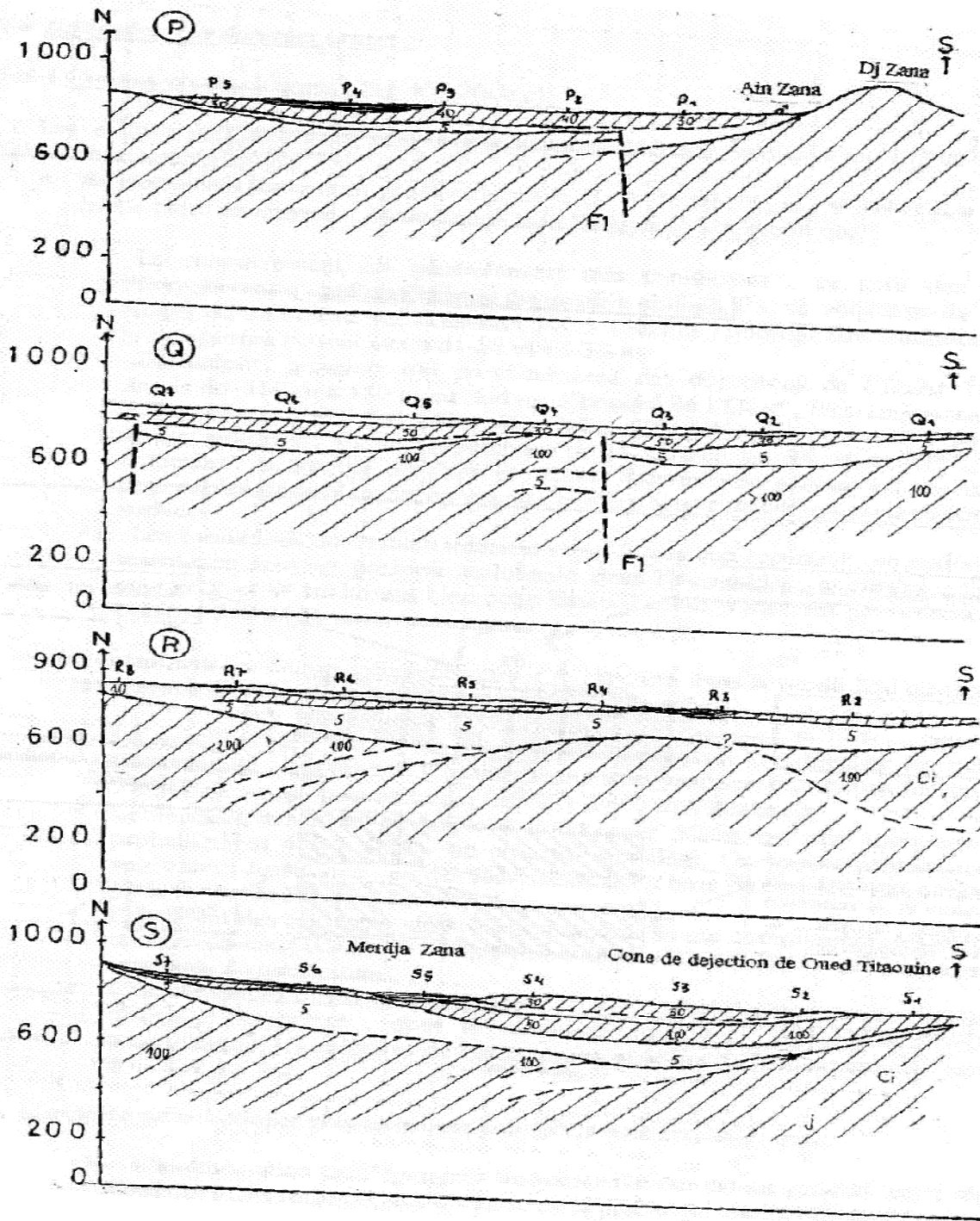


Figure V.11 Coupes géo-électriques P, Q, R et S de l'étude géophysique de la C.G.G en 1969

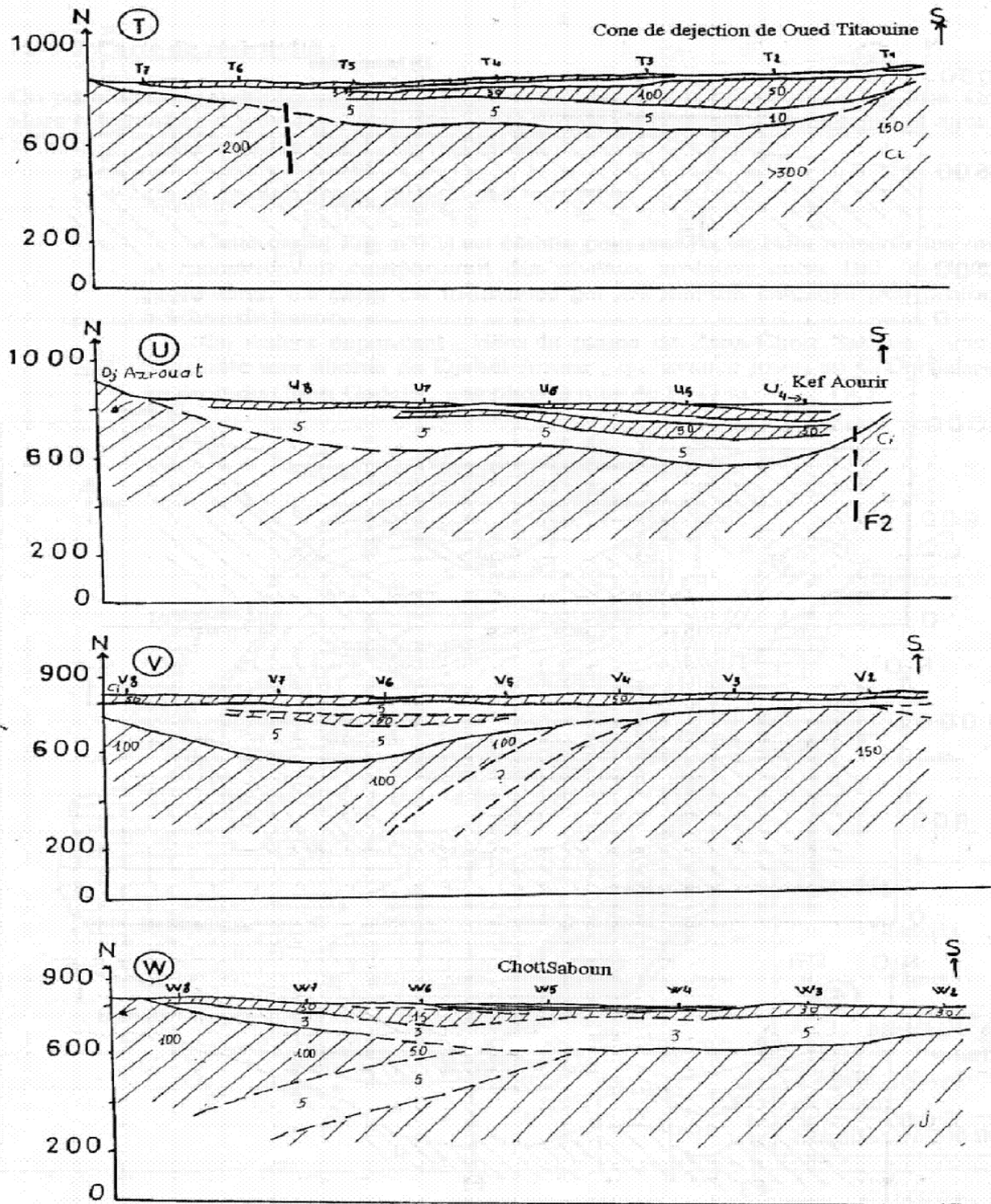


Figure V.12 Coupes géo-électriques T, U, V et W de l'étude géophysique de la C.G.G en 1969

Légende des coupes géoélectriques:

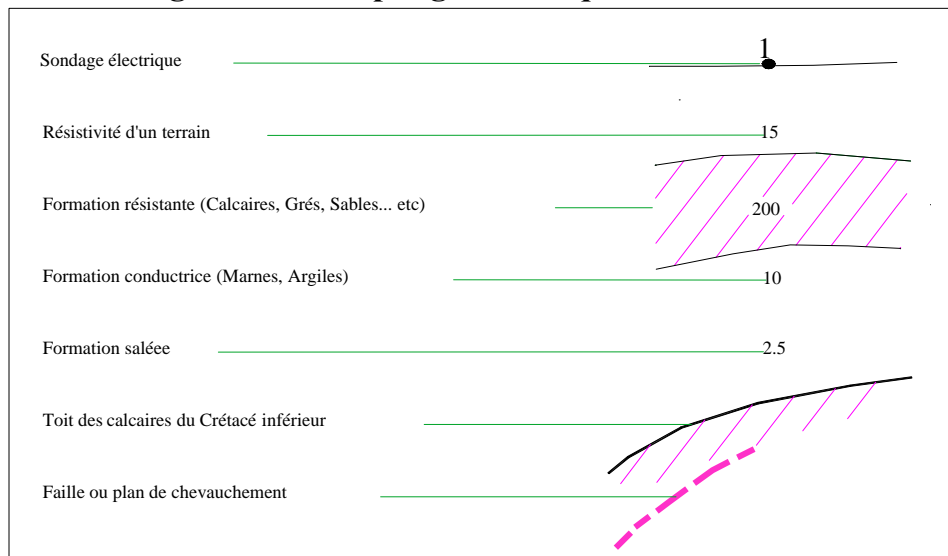


Figure V.14 Légendes des coupes géo-électriques de l'étude géophysique de la C.G.G en 1969

V.7 Stratigraphie des formations du Crétacé et du Jurassique

La documentation géologique existante ne permet pas de cartographier avec précision les divers étages, néanmoins nous avons distingué les formations cénomaniennes des autres formations Crétacé inférieur et Jurassique

V.7.1 Crétacé supérieur

- ❖ Le Sénonien est formé par des marnes noires ;
- ❖ Le Turonien est formé par des calcaires au sommet et des marnes, l'ensemble a une épaisseur de 400 m ;
- ❖ Le Cénomaniens est formé par des calcaires de 100 à 200 m d'épaisseur et par des marnes très épaisses 400 m au minimum.

V.7.2 Crétacé inférieur

- ❖ L'Albien est formé par des calcaires et des marnes, l'ensemble à une épaisseur de 100m ;
- ❖ L'Aptien est formé par des marno-calcaires de 100 à 200 m d'épaisseur;
- ❖ Le Barrémien est formé par des marno-calcaires de 200 m d'épaisseur ;
- ❖ *L'Hauterivien est formé par des marno-calcaires de 100 m d'épaisseur ;
- ❖ Valanginien est formé par des calcaires et des marnes bariolées de 100 m d'épaisseur.

V.7.3 Jurassique

- ❖ Le Dogger et le Malm est formé par des calcaires coralliens très blancs, très dolomités, de 300 à 400 m d'épaisseur;

❖ Le Lias (Trias) est formé par des marnes bariolées du gypse, des cargneules en positions diapiriques, d'épaisseur probable de 200 m.

Etant donnée la tectonique très accidentée de la région, toutes ces formations souvent très pentées, sont susceptibles de constituer le substratum du recouvrement Miocène transgressif ou Plio-Quaternaire des plaines.

V.8 Stratigraphie des formations du Post-Crétacé.

Il semble que la majeure partie du recouvrement soit constituée par des formations du Miocène et du Plio-quaternaire. Les forages réalisés définissent les différentes formations :

- ❖ Brèche de piedmont, conglomérats et gravier ;
- ❖ Calcaires lacustres gréseux de 20 à 30 m d'épaisseur ;
- ❖ Marne grises souvent gypseuse ;
- ❖ Marnes rouges sableuses ;

V.9 Conclusion

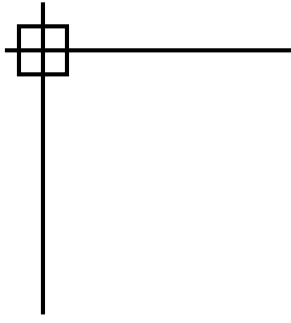
L'étude géophysique de la plaine de Zana a dans l'ensemble atteint les objectifs qui lui ont été assignés.

Dans l'ensemble, l'étude géophysique a montré que la zone étudiée présente des possibilités assez importantes. Les résultats obtenus sont particulièrement intéressants non seulement en ce qui concerne le substratum mais aussi et surtout en ce qui concerne le remplissage sur lequel au début on fondait peu d'espoirs. 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'amincit 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 300m en général) et qui, en outre, sont en liaison avec les massifs affleurants.



Sixième chapitre

Hydrogéologie

Introduction

Le mouvement de l'eau dans le sol et le sous-sol est une étape d'un grand circuit sur la terre. La source d'alimentation de l'eau souterraine 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 réservoirs souterrains et acquies une certaine composition chimique par son circuit dans les aquifères qui lui donne un certain faciès chimique.

Pour notre zone d'étude, on peut dire qu'il existe deux aquifères superposés :

- Un aquifère superficiel se trouvant dans les formations du Mio-Plio-Quaternaire de la plaine ;
- Un aquifère relativement profond des calcaires karstifiés.

VI.1 Les formations aquifères

L'étude géologique et hydrogéologique ont permis de bien cartographier la géométrie et la nature de l'aquifère. On peut distinguer deux systèmes :

VI.1.1 Aquifère superficiel

Il existe une nappe superficielle dans les niveaux superficiels. Cette nappe a pour siège les formations perméables ou peu perméables du recouvrement Mio-Plio-Quaternaire. Elle affleure dans l'axe de la dépression pour former le Chott et la Merdja. Cette dernière est alimentée par les glaciaires nappant les reliefs et par les niveaux sous-jacents en charge, eux même recevant leur alimentation des massifs du Crétacé par l'intermédiaire des dépôts grossiers de bordure. Le Chott et la Merdja représentent l'affleurement de la nappe superficielle, toute fois il peut y avoir un écoulement de la nappe vers Chott Gadaïne au Sud-est et même au Nord-est vers la plaine de Bir Chouhada. Les puits peu profonds qui exploitent cette nappe restent souvent dans les alluvions très argileuses de surface.

VI.1.2 Aquifère karstique

Les massifs sont entièrement calcaires et ne comportent aucuns bancs marneux. Ils sont d'une épaisseur puissante allant jusqu'à 800m d'épaisseur et affleurent sur une grande superficie (Djebels Mestaoua, Mesaouda, Zana, Azrouat, Merzguène, Roknia et Guedame). L'excellence du réservoir est confirmé par les sources tels Aïn Zana, Aïn Taga et Aïn Merzguène (dont le débit total est de 100 l/s) qui naissent probablement à la faveur d'accidents et par les forages tels Zana N° 01 (56 l/s) , Zana N° 02 (42 l/s), Zana N° 03 (55 l/s), Zana N° 04 (39 l/s) et Zana N° 05 (14 l/s); figure VI.1, voir log stratigraphique en annexes III, IV, V, VI et VII.

VI.2 Etudes des différents aquifères

VI.2.1 Aquifère superficiel

Au Nord-Ouest la nappe est contenue dans les alluvions du Quaternaire et elle est le prolongement de la plaine d'Aïn Djasser, 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.

Au Sud-est elle est contenue dans une plage résistante d'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

VI.2.1.1 Inventaire des points d'eau

L'inventaire des points d'eaux captant cette nappe nous permet de constater que la majorité des ouvrages sont des puits traditionnels peu profonds. Les campagnes sont effectuées en deux périodes et ont permis de mesurer les niveaux piézométriques et les paramètres physico-chimiques in situ

(conductivité, température et pH). Quarante vingt points d’eau ont été inventoriés, mais seul vingt cinq points (la majorité est au centre de la plaine) sont retenus pour le suivi piézométrique et les analyses des éléments fondamentaux. Ce choix intervient du fait que la plaine est divisée en deux parties par le Chott qui joue le rôle de limite à potentiel imposé.

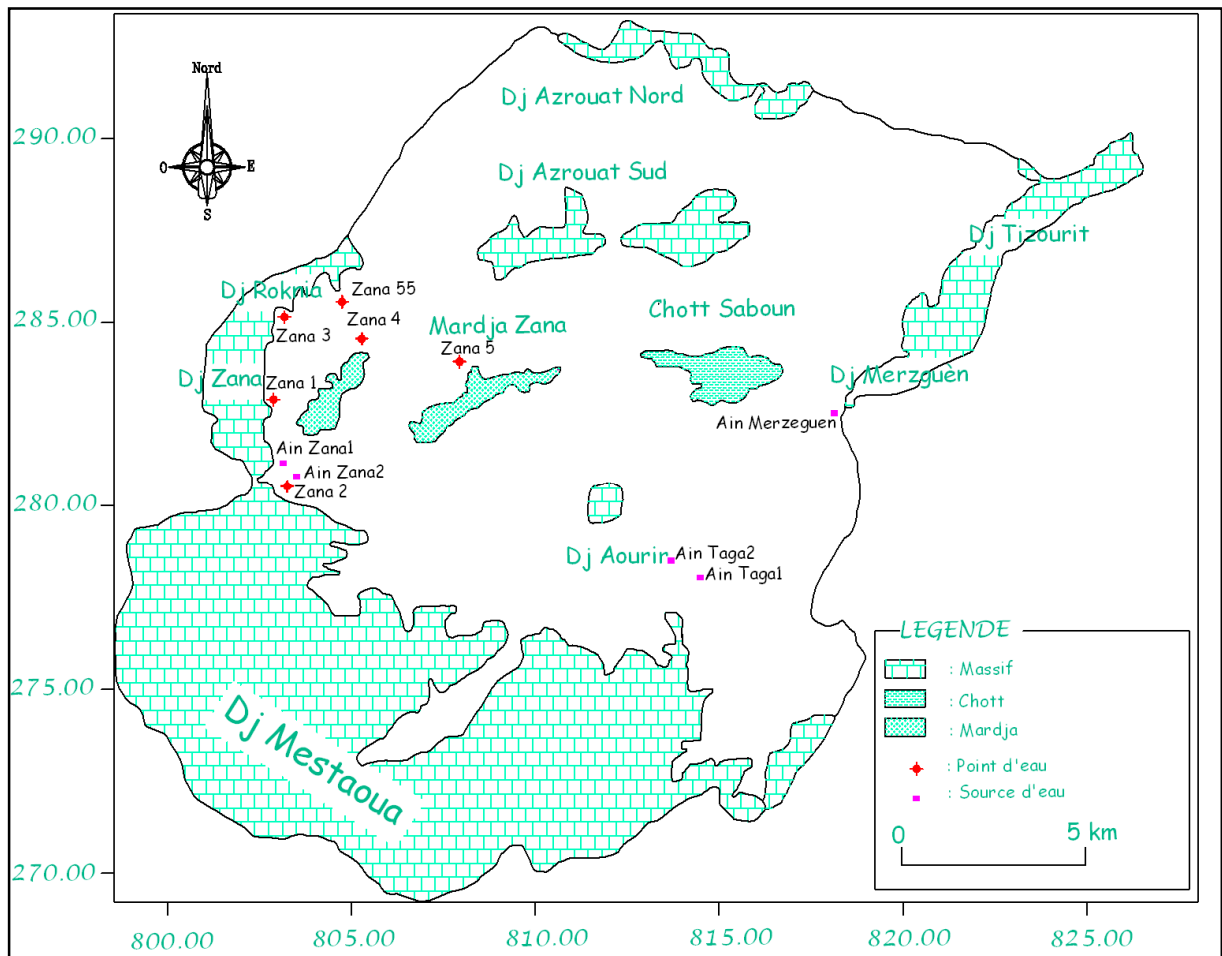


Figure VI.1 Carte de situation des sources et forages réalisés dans la plaine de Zana

VI.2.1.2 Piézométrie

Les deux campagnes piézométriques nous permettent de faire une analyse détaillée sur la morphologie de la surface piézométrique.

Dans la partie Nord les courbes iso-pièzes convergent vers la zone de drainage de Chott Saboun et la Merdja de Zana avec une orientation générale du Nord-Ouest vers le Sud-est.

Dans la partie Ouest l’écoulement s’effectue de l’Ouest vers l’Est et du Sud Est vers le Nord avec une convergence vers la Merdja de Zana, figure IV.3 et IV.4

La différence entre les deux campagnes réside par une diminution légère du niveau piézométrique dans toute la plaine, cette réaction est la résultante aux aléas de la nature (sécheresse prononcée cette année).

VI.2.1.3 Gradient hydraulique

L’écoulement souterrain est orienté généralement vers le centre de la plaine où se trouve les zones de drainage (Chott Saboun et Merdja de Zana), le gradient hydraulique est très variable de l’Est à l’Ouest. A l’Est le gradient a une valeur moyenne de 0.005 par contre dans la zone Ouest il est de l’ordre de 0.004.

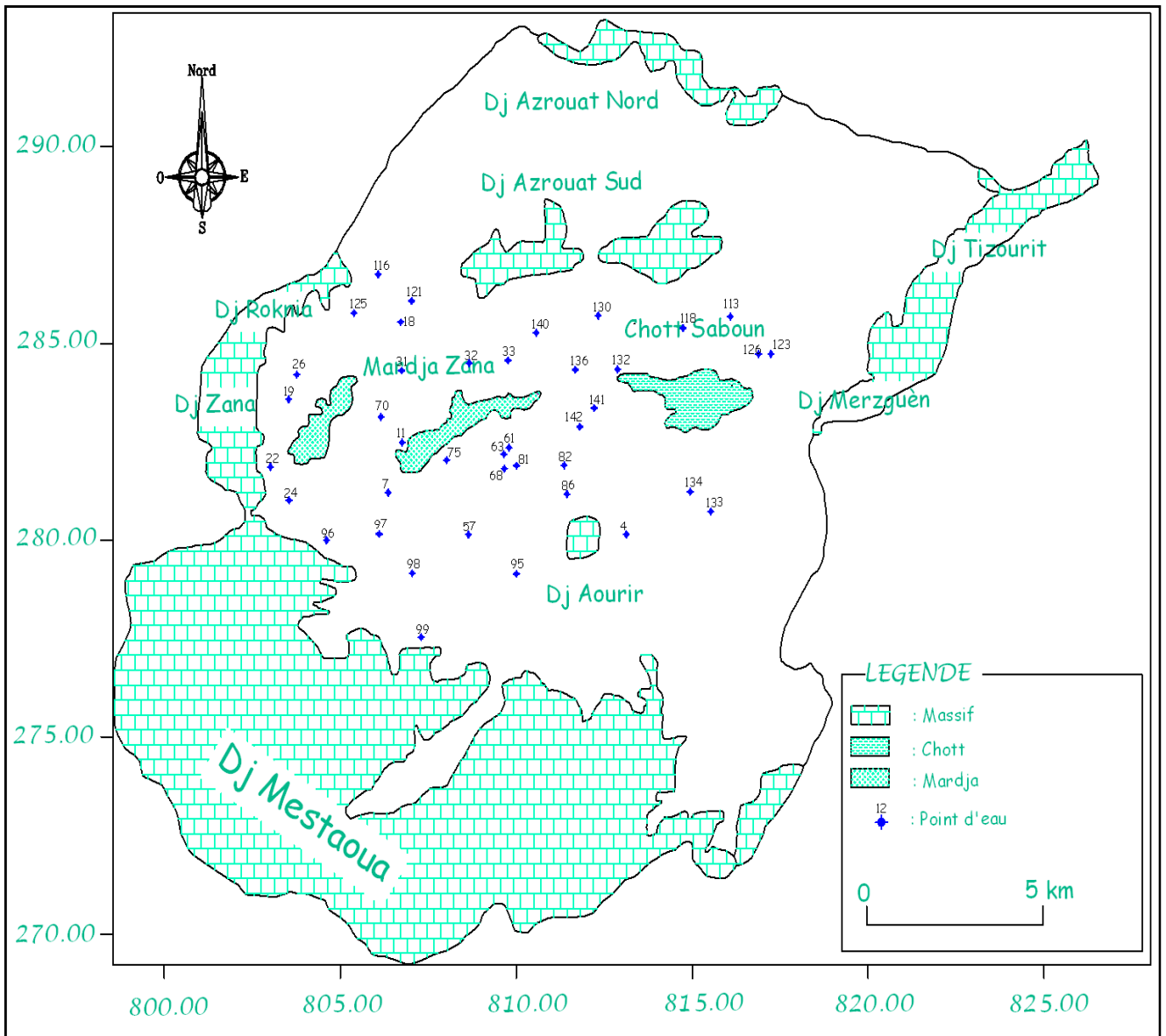


Figure VI.2. Carte de positionnement des points d'eaux retenus (puits et forages)

VI.2.1.4 Battement de la fluctuation piézométrique

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 diminution du niveau piézométrique durant la deuxième campagne est due aux faibles précipitations et l'exploitation intense de la nappe. 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.

La superposition des deux cartes piézométriques nous a permis de calculer le battement de la nappe et on remarque que la fluctuation varie de 0.0m à 6.0m. Cette fluctuation diminue vers l'Ouest (Roknia) et le Nord (Azrouat) et devient importante vers le Sud Ouest. Aussi la fluctuation est petite et s'annule vers le centre de la plaine à cause des apports du Chott et la Merdja

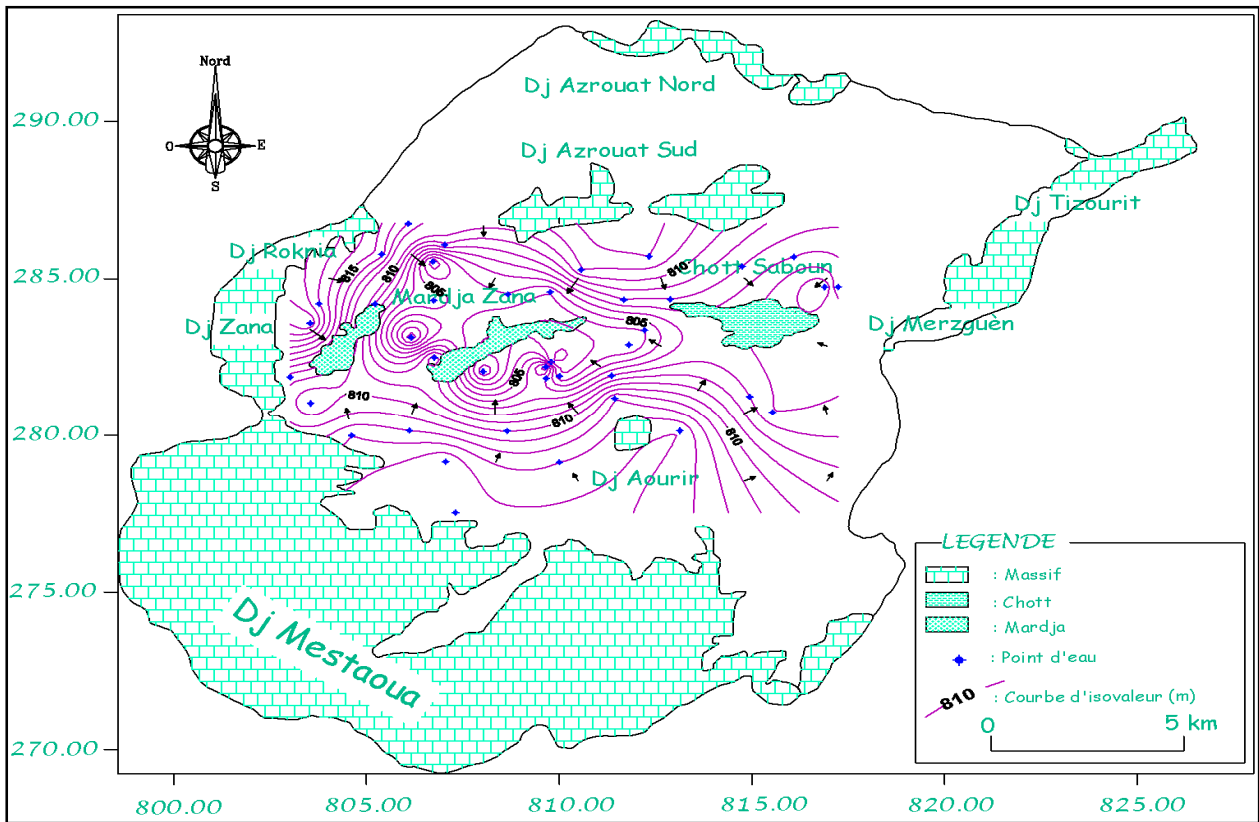


Figure VI.3 Carte piézométrique (période des basses eaux)

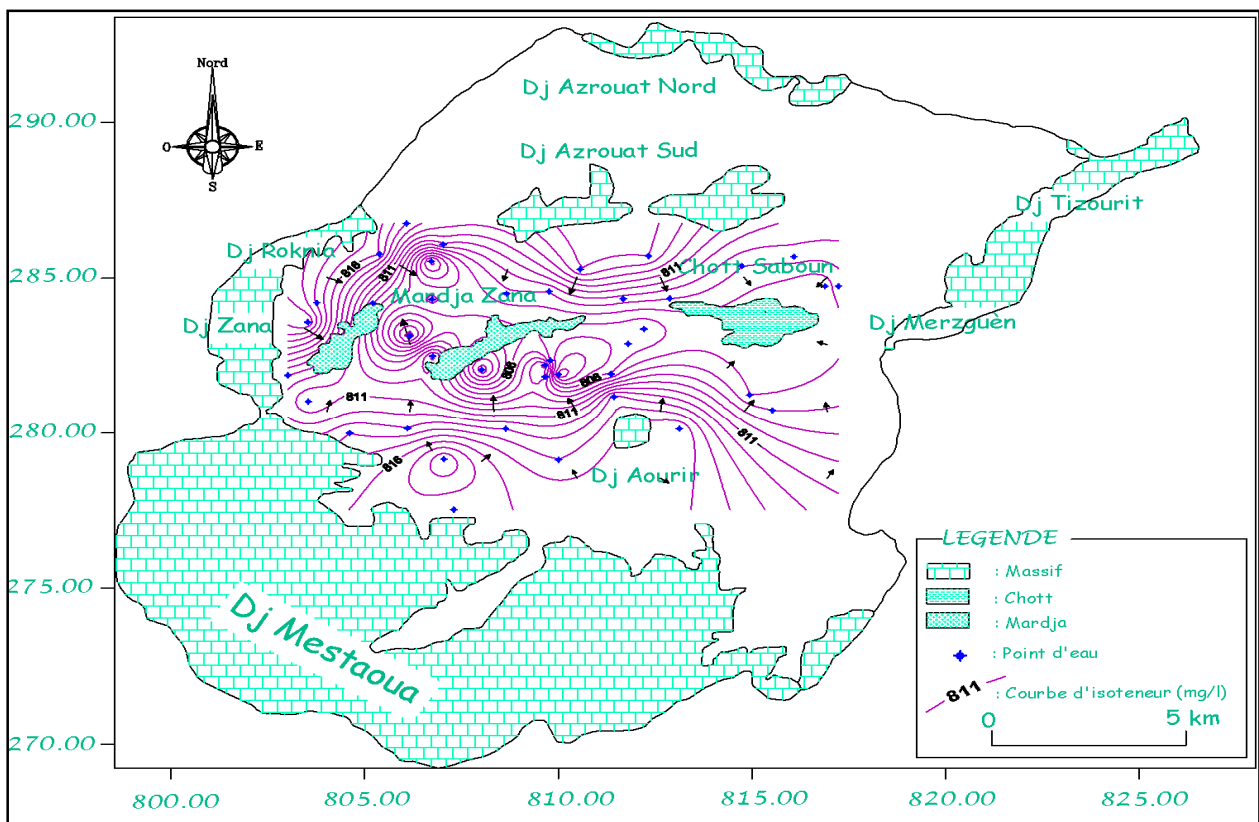


Figure VI.4 Carte piézométrique (période des hautes eaux)

VI.2.2 Aquifère karstique

Les massifs carbonatés des Djebels de Zana, Roknia, Mestaoua, Azrouat, Tizourite, Aourir, Metrassi et Mesaouda 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 50cm 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).

L'alimentation des aquifères karstiques se fait à partir des précipitations efficaces sur leur affleurement. 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 forage de forages. L'exutoire naturel est les sources qui jaillissent dans la région, figure VI.5.

Reste à noter que dans la plaine de Zana existe deux aquifères de karstiques :

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

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 Z4 et Z2 d'une profondeur 220m chacun. Le karst du Jurassique affleure sur les massifs de Djebel Zana (300m d'épaisseur) qui est le prolongement de Djebel Mestaoua (350m d'épaisseur) et sur koudiat Aourir et Djebel Merzguène. Les formations du Jurassique supérieur sont des calcaires en gros bancs et des calcaires dolomitiques.

Le karst du Crétacé inférieur est le plus intéressant. Ces formations se trouvent dans la partie Nord de la plaine (Azrouat Nord et Sud, Roknia et Metrassi) comme l'indique le forage Z3. Il se trouve aussi au centre de la plaine au voisinage du Chott Saboun comme le montre le forage Z 5

Les calcaires du Crétacé forment une partie du substratum du recouvrement d'une profondeur de 300m d'épaisseur selon l'étude géophysique, figure VI.6.

VI.2.2.1 Inventaire des points d'eau

L'inventaire des points d'eaux captant cette nappe nous permet de constater que la majorité des ouvrages sont des forages. Les campagnes sont effectuées en deux périodes et ont permis de mesurer les niveaux piézométriques et les paramètres physico-chimique in situ (conductivité, température et pH). Quarante points d'eaux ont été inventoriés, mais seul quinze points (la majorité est au centre de la plaine) sont retenus pour le suivi piézométrique et les analyses des éléments fondamentaux. Ce choix intervient du fait que la plaine est divisée en deux parties par le Chott qui joue le rôle de limite à potentiel imposé, figure Vi.2

VI.2.2.2 Géométrie de l'aquifère

L'étude géologique, géophysique et les forages réalisés dans la région ont pus déterminés l'extension de l'aquifère karstique ainsi :

❖ Le substratum est constitué par des niveaux d'argiles imperméables contenu dans le Jurassique supérieur et le Crétacé inférieur situés aux piedmonts des massifs d'âge Néocomien et Cénomaniens ;

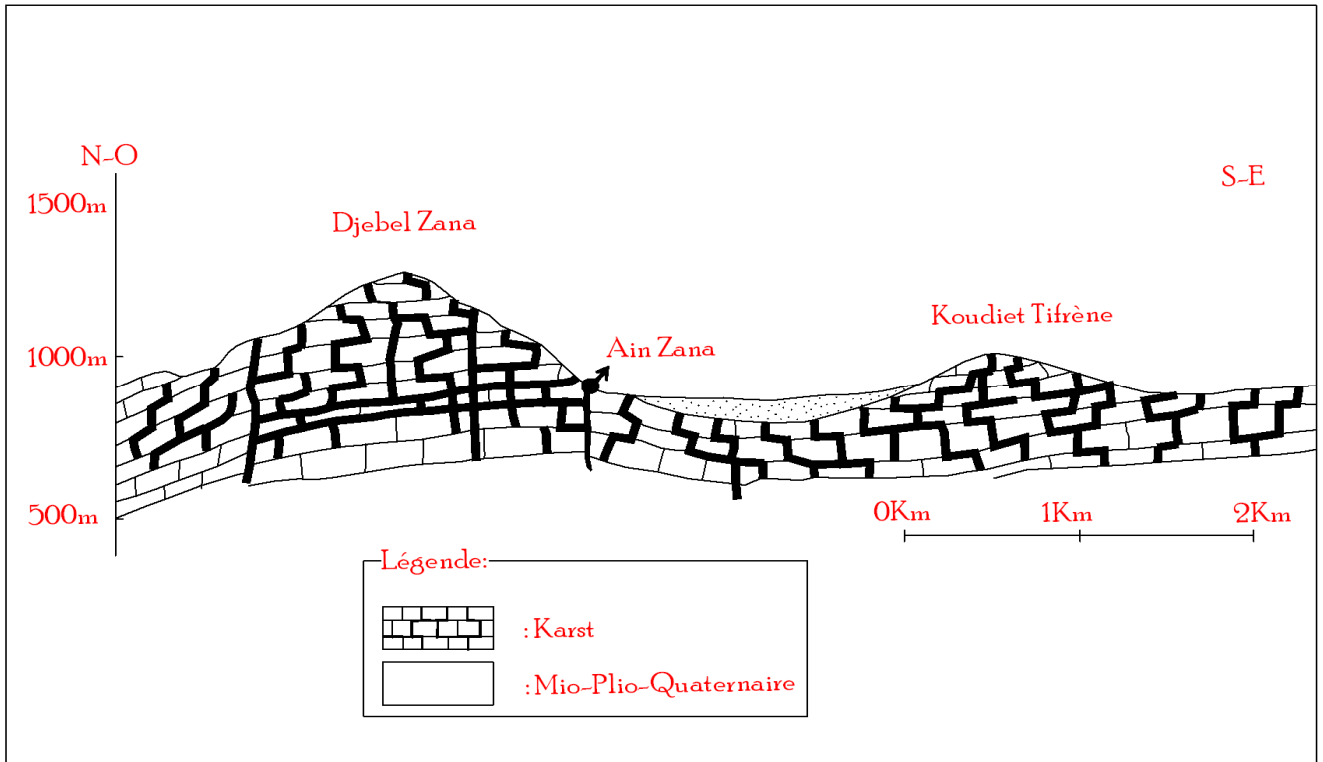


Figure VI.5 Schéma structural de la source de Zana (aquifère karstique)

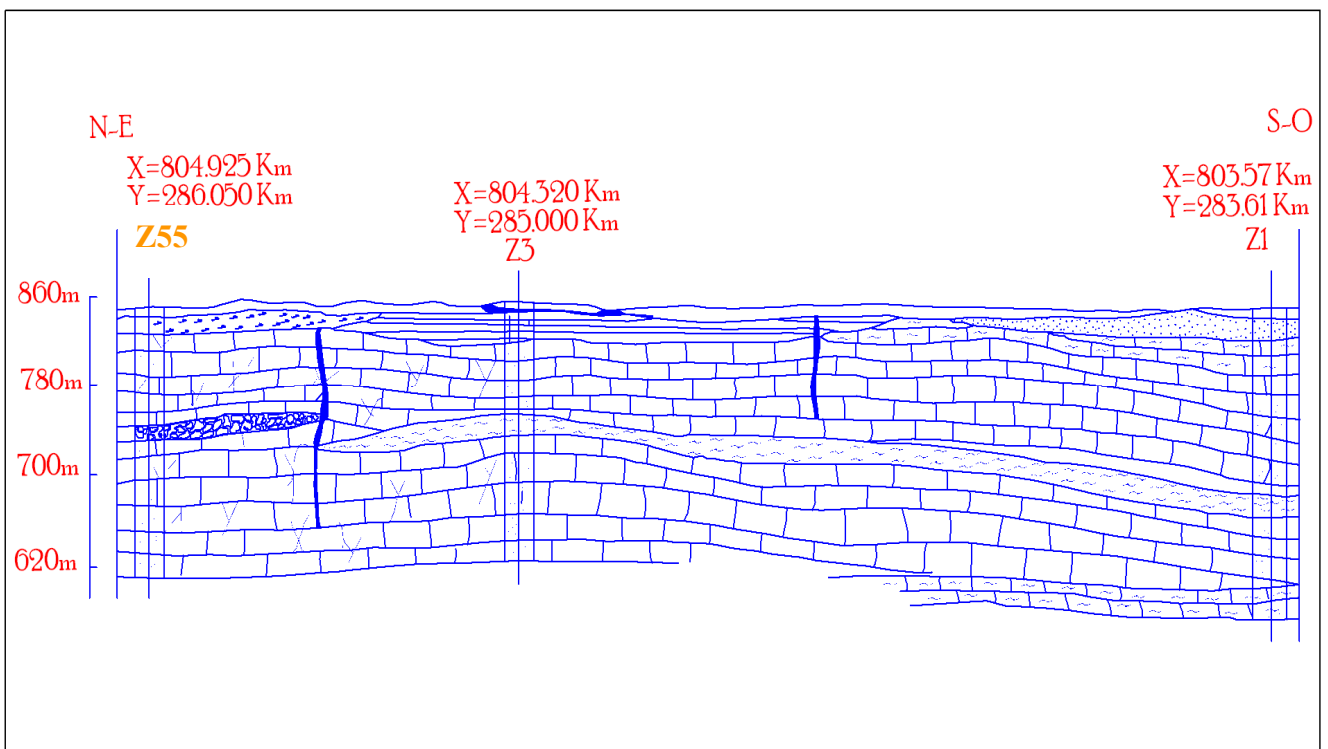


Figure VI.6 Coupe hydrogéologique dans le Crétacé inférieur

- ❖ Le toit est un recouvrement des formations carbonatées 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 (environ 200m de remplissage Mio-Plio-Quaternaire) et par contre ils s'enfouissent à 500m de profondeur dans le bassin de Gadaïne, Seriana et El Madher ;
- ❖ Les limites de cet aquifère s'étend des bordures des massifs du Crétacé et du Jurassique des Djebels de Mestaoua ; Metrassi au Sud et les Djebels Azrouat au Nord, Tizourite au Nord-est et l'ensemble Zana-Roknia à l'Ouest.

VI.3 Interactions entre les aquifères

La plaine de Zana est entourée par des formations carbonatées du Crétacé et du Jurassique. Ces massifs plongent sous le remplissage du Mio-Plio-Quaternaire et réapparaissent de l'autre côté, par exemple le Djebel Mestaoua plonge au 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 où le substratum du recouvrement est imperméable. Cette superposition et communication permet à l'eau de passer d'un horizon à un autre.

La plaine de Zana est caractérisée par des courbes iso-pièzes parallèles aux bordures des massifs, ce qui permet de dire, que les reliefs alimentent le recouvrement avec une direction d'écoulement Nord-Ouest vers l'Est (Zana et Roknia) et Sud vers le Nord-Est (Mestaoua et Metrassi).

VI.4 Caractéristiques hydrodynamique

Les données prises pour le calcul des paramètres hydrodynamique sont recueillis du mémoire de L.CHEBAH 2004 et de la DHW de Batna (essais de débit).

VI.4.1 Nappe superficielle

VI.4.1.1 Transmissivité

La Transmissivité (T) est un paramètre très important qui nous permet de mesurer la quantité d'eau qui peut être transmise horizontalement sur toute l'épaisseur d'un aquifère saturé.

La transmissivité de notre région est faible, elle varie de $3,6 \cdot 10^{-3}$ à $8 \cdot 10^{-4}$ m²/s, elle croit vers le Chott

VI.4.1.2 Perméabilité

Elle est obtenue à partir de la transmissivité et de l'épaisseur de la tranche saturée de la nappe. Pour la plaine de Zana la perméabilité (K) est comprise entre $2 \cdot 10^{-5}$ et 10^{-4} m/s avec une décroissance vers le Chott Saboun.

VI.4.1.3 Coefficient d'emmagasinement

Le coefficient d'emmagasinement est de l'ordre de 0.2 à 0.01 pour les nappes libres et de 0.001 à 0.0001 pour les nappes captives. Pour notre plaine le coefficient d'emmagasinement $S = 1.082 \cdot 10^{-3}$, donc on peut déduire que nous sommes devant une nappe semi captive et cela est due à la présence des intercalations argileuses entre les couches perméables. Cette déduction est corroborée par la géologie et la géophysique, voir coupes géoélectriques.

$$T = 0.183 \frac{Q}{c} = 0.183 \frac{0.008}{1.46} = 1.003 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

Avec un piézomètre distant de 25 m de l'axe du puits (x) et $t_0 = 300$ s

$$S = 2.25 \frac{t_0}{x^2} = 2.25 \frac{1.003 * 10^{-3} * 300}{25^2} = 1.082 * 10^{-3}$$

VI.4.1.4 Bilan de la nappe

Le bilan hydrogéologique est un moyen de contrôle de la cohérence des données (entrées et sorties). Ce bilan on peut l'écrire de la manière suivante :

$$\Delta R = Q_e - Q_s$$

Ou :

ΔR . la variation de réserve de la nappe ;

Q_e . la recharge de la nappe ou apports latéraux (entrées);

Q_s . les sorties (prélèvement de la nappe et évaporation directe)

Tableau VI.1 Bilan estimatif de la nappe superficielle

Entrées 10^6 m^3	Sorties 10^6 m^3
Infiltration 0.873	Prélèvement 1.89
Apports latéraux 1.429	Evaporation 10.59
2.302 hm^3	12.48 hm^3

De ce bilan on déduit que les sorties sont largement supérieur aux entrées criant un déséquilibre dans le bilan hydrogéologique ce qui entraine l'abaissement du niveau piézométrique, environ 6 m de l'année 2004 (L. Chebah) à nos jours (2007-2008).

VI.4.2 Nappe profonde (Karst)

VI.4.2.1 Transmissivité

La transmissivité de la plaine de Zana est faible, elle varie de 10^{-3} à $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, elle croit vers le Chott

VI.4.2.2 Perméabilité

Pour la plaine de Zana la perméabilité (K) est faible, elle est comprise entre $1.8 * 10^{-5} \text{ m/s}$ à Djebel Roknia et Mestaoua et $4.0 * 10^{-6} \text{ m/s}$ vers Merdja de Zana

VI.5 Conclusion

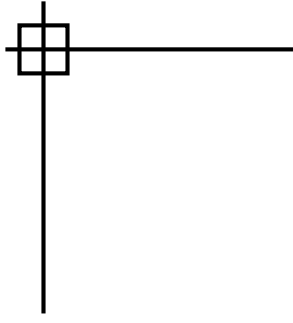
Le complexe aquifère de la région est formé par deux nappes :

❖ 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 et dolomitiques du Crétacé inférieur et du Jurassique supérieur dont l'exutoire naturel est l'ensemble de sources qui émergent en surface.

Les deux aquifères sont superposés et en communication par endroits comme on l'a vu précédemment ;

Les axes d'écoulement des eaux souterraines convergent vers les zones de drainage qui sont le Chott et la Merdja.



Septième chapitre

Hydrochimie

Introduction

C'est en circulant dans les micros fissures et les micropores des roches que les eaux dissolvent certains composants. La dissolution est facilitée par la chaleur ambiante et par la durée du contact entre l'eau et la roche.

Dans ce chapitre, nous allons étudier la qualité chimique des eaux des deux aquifères de la plaine de Zana.

VII.1 Les travaux de terrain

Pour aboutir aux résultats souhaités, nous avons effectué plusieurs visites afin d'inventorier les points d'eau existant dans la plaine. Puis nous avons retenues quarante points d'eaux suivant un maillage de 1Km * 2Km et effectué deux campagnes d'échantillonnages et quatre campagnes d'échantillonnage pour doser les nitrates, nitrite et ammonium.

Les points d'eau concernés par le présent travail sont vingt cinq puits et quinze forages. Des mesures effectuées in situ et les appareils utilisés pour ce travail sont donnés dans le tableau VII.1

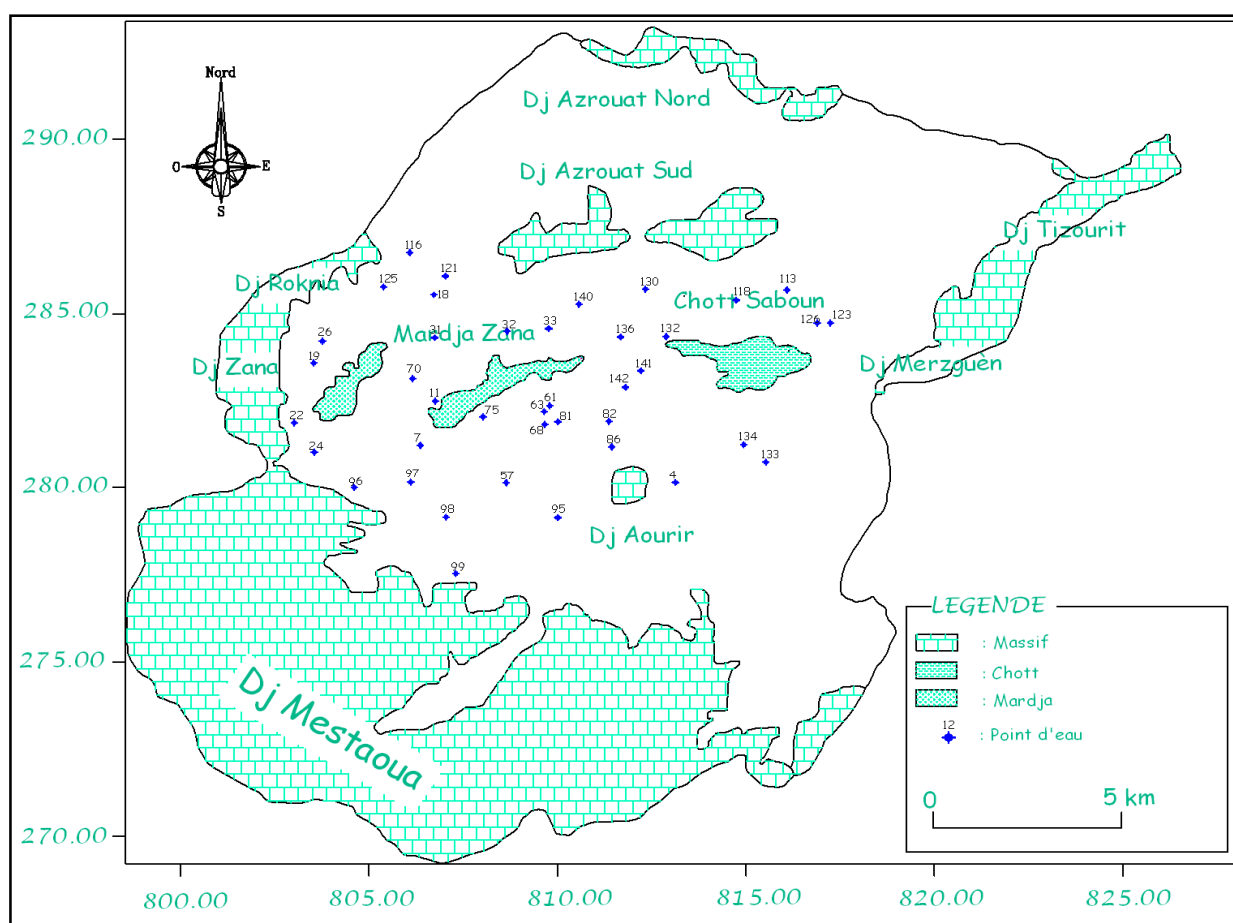


Figure VII.1*. Position des points d'eau retenus pour la piézométrie et les analyses chimiques. (Puits et forages)

Tableau VII.1 Paramètres mesurés in situ et appareillage utilisé.

Paramètres mesurés	Appareil utilisé
Température (°C)	Thermomètre digital, marque HANNA
pH	pH-mètre, marque HANNA
Conductivité (µS/cm)	Conductimètre, marque HACH CO150
Salinité (mg/l)	Conductimètre, marque HACH CO150

VII.2 Les travaux de laboratoire

Les travaux de laboratoires ont concerné les analyses chimiques aussi bien des éléments majeurs que des éléments de pollutions. Les analyses chimiques ont concerné pour les éléments majeurs :

- ❖ Les cations: Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , NH_4^+ ;
- ❖ Les anions: Cl^- , SO_4^{--} , HCO_3^- , NO_3^- , NO_2^- ;
- ❖ Résidu sec ;

Les analyses chimiques des eaux et la détermination de leur teneur sont d'une grande importance car elles permettent d'avoir une idée sur la nature des formations géologiques traversées par ces eaux et la dynamique de ces derniers. Les analyses ont été effectuées au niveau du laboratoire de l'institut des sciences de la terre de l'université de Constantine, voir annexe VIII.

VII.3 Etude analytique des paramètres physiques

VII.3.1 Température

Les températures mesurées in situ en degré Celsius, varient entre 13.9 et 23.0°C. (basses eaux). On remarque aussi qu'à l'exception de certains forages situés du côté de Djebel Azrouat (point 113, 118 et 130) dans la température avoisine et dépasse les 20°C ; le reste des points d'eau présente des températures ordinaires, figure VII.1 et VII.2

VII.3.2 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.

A. Issaâdi a regroupé les sources minérales et thermales algériennes en quatre classes :

- **Classe 1** : où la conductivité est inférieure à 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$;
- **Classe 2** : où la conductivité est comprise entre 2000 et 7000 $\mu\text{S}/\text{cm}$;
- **Classe 3** : où la conductivité est comprise entre 7500 et 15000 $\mu\text{S}/\text{cm}$;
- **Classe 4** : où la conductivité est supérieure à 15000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Les valeurs mesurées sur notre terrain ont été ramenées à une température standard de 25°C. Nous avons répertoriée huit points d'eau qui ont une conductivité inférieure à 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (point 32, 98, 97, 96, 63, 68,33 et 4)), et deux points d'eaux ayant une conductivité supérieure à 7500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (133 et 123) et le reste en classe deux.

Les valeurs de la conductivité électrique varient entre 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 8770 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (basses eaux), figure VII.3 et VII.4

VII.3.3 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 suivante

$$pH = -\log(H^+)$$

Les valeurs du pH mesurées montrent que tous les points d'eau ont des valeurs qui oscillent autour de la neutralité ; entre 7,1 et 8,30 (basses eaux), figure VII.5 et VII.6

VII.4 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

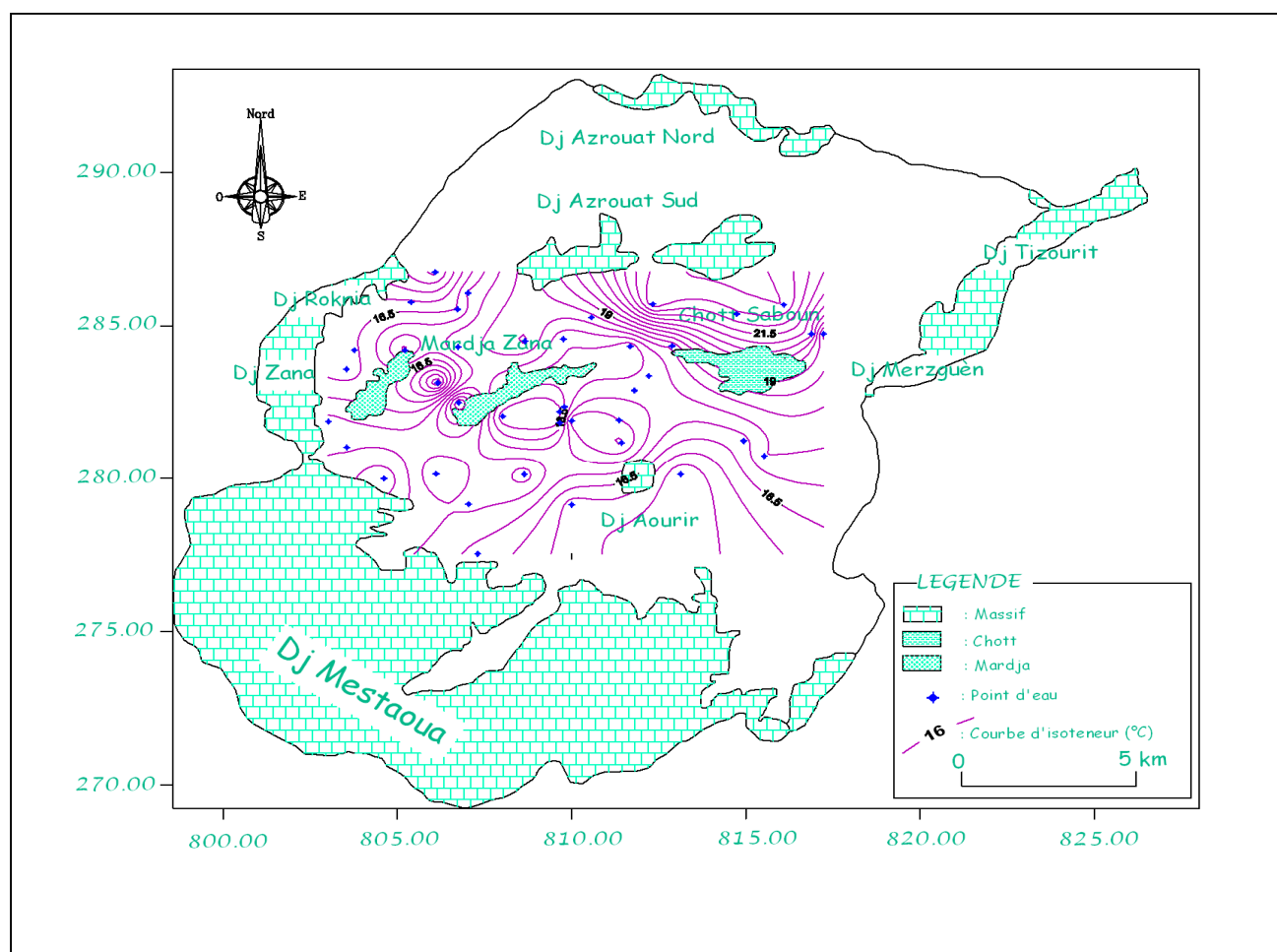
Les analyses chimiques effectuées sur les échantillons prélevés des quarante points d'eau de la zone d'étude, montrent des teneurs variables des différents éléments dosés d'un point à un autre, l'examen de l'analyse montre que : l'ion SO_4^{--} est légèrement prédominant sur les ions HCO_3^- et Cl^-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

VII.4.1 Le calcium

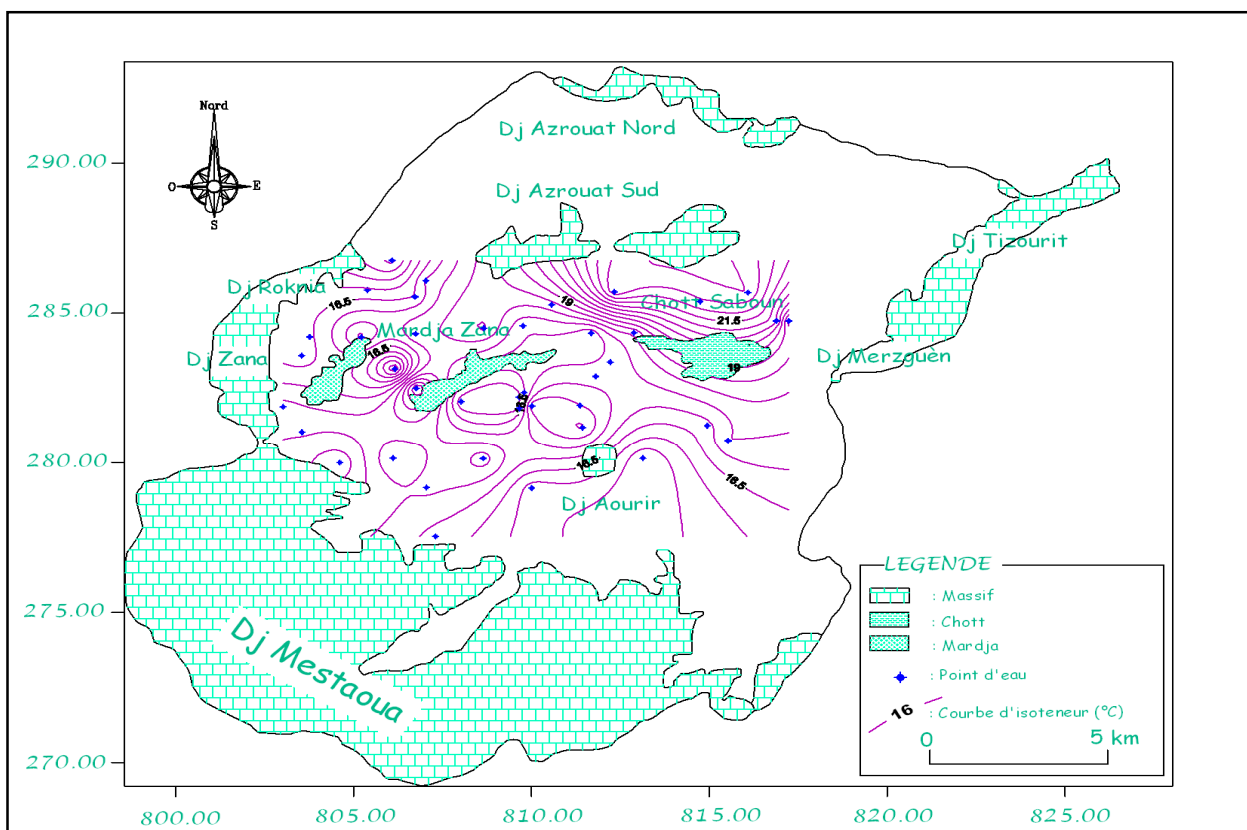
La présence des ions Ca^{2+} dans l'eau est liée principalement à deux origines naturelles : soit la dissolution des formations carbonatées ($\text{CaCO}_3 = \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$), soit à la dissolution des formations gypseuses [$\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O}) = \text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + 2(\text{H}_2\text{O})$].

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.

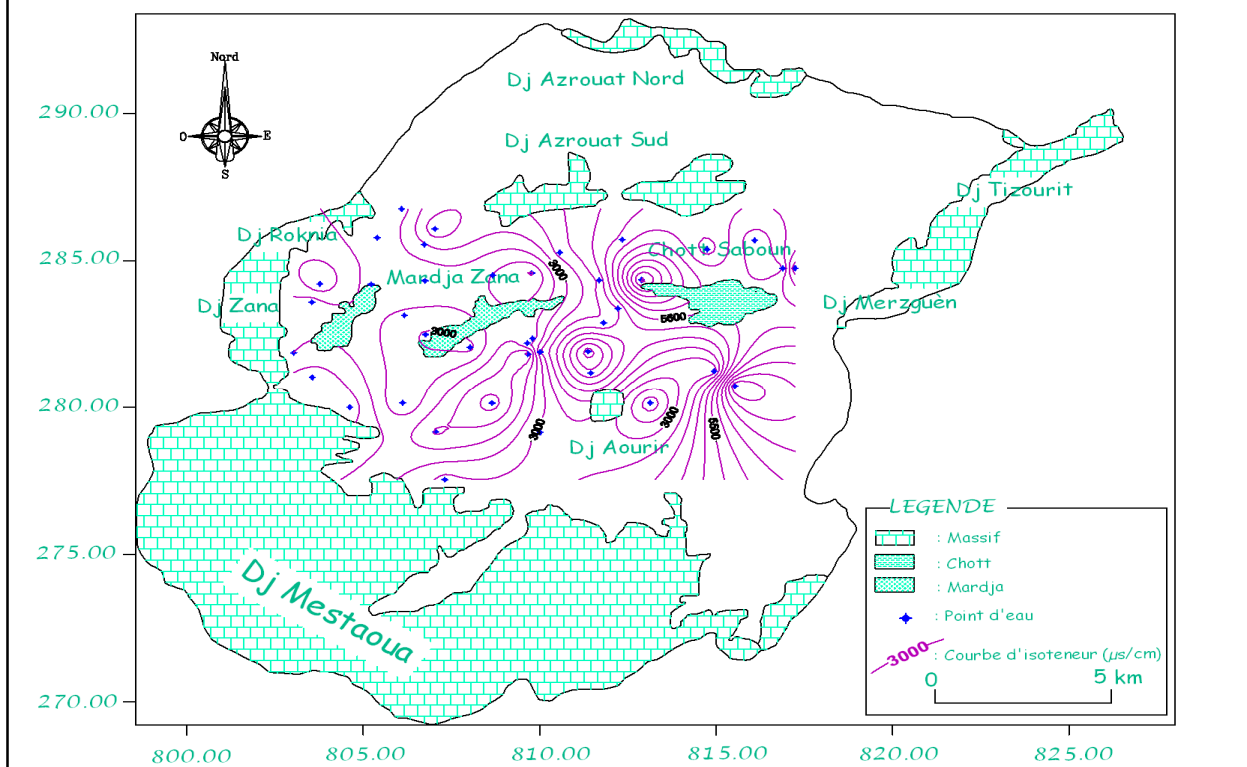
Pour notre cas les teneurs en calcium varient entre 80.16 mg/l comme valeur minimale et 488.97 mg/l comme valeur maximale, (basses eaux). Ces concentrations indiquent que ces eaux sont influencées par la dissolution des formations carbonatées et les formations gypseuses à la fois connue on le verra plus loin, figure VII.7 et VII.8



**Figure VII.1 : Carte de la température (°C)
(Compagne des basses eaux)**



**Figure VII.2 : Carte de la température (°C)
(Compagne des hautes eaux)**



**Figure VII.3 : Carte de la conductivité électrique (µs/cm)
(Compagne des basses eaux)**

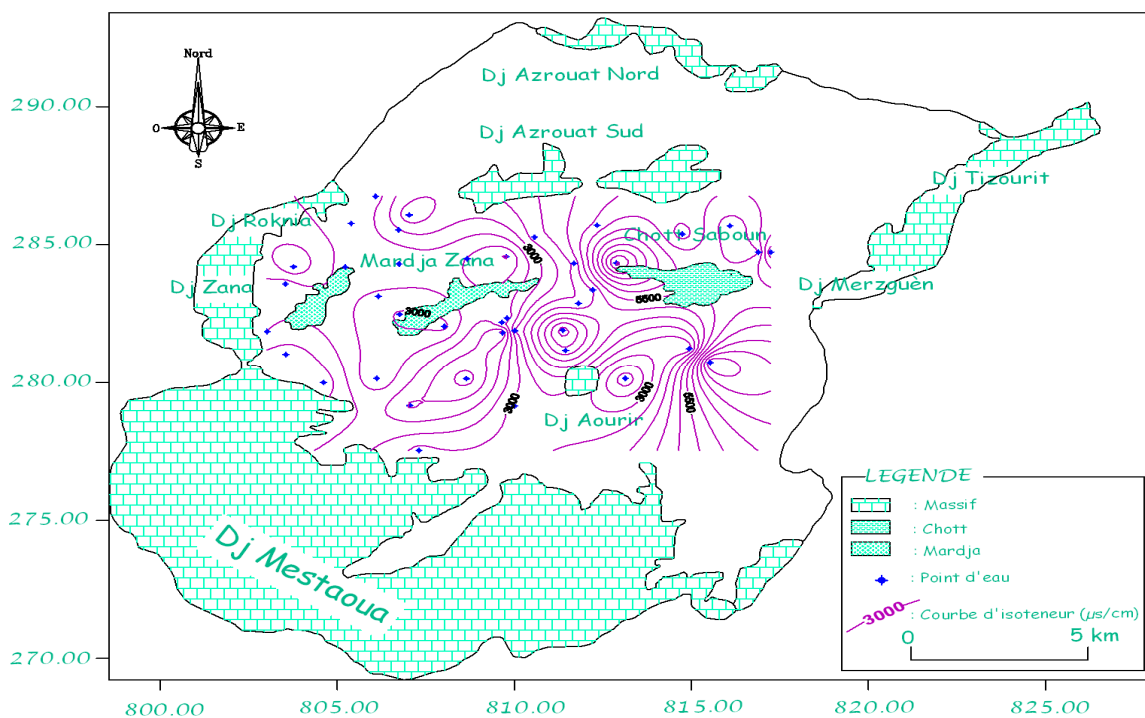


Figure VII.4 : Carte de la conductivité électrique ($\mu\text{s}/\text{cm}$)
(Compagne des hautes eaux)

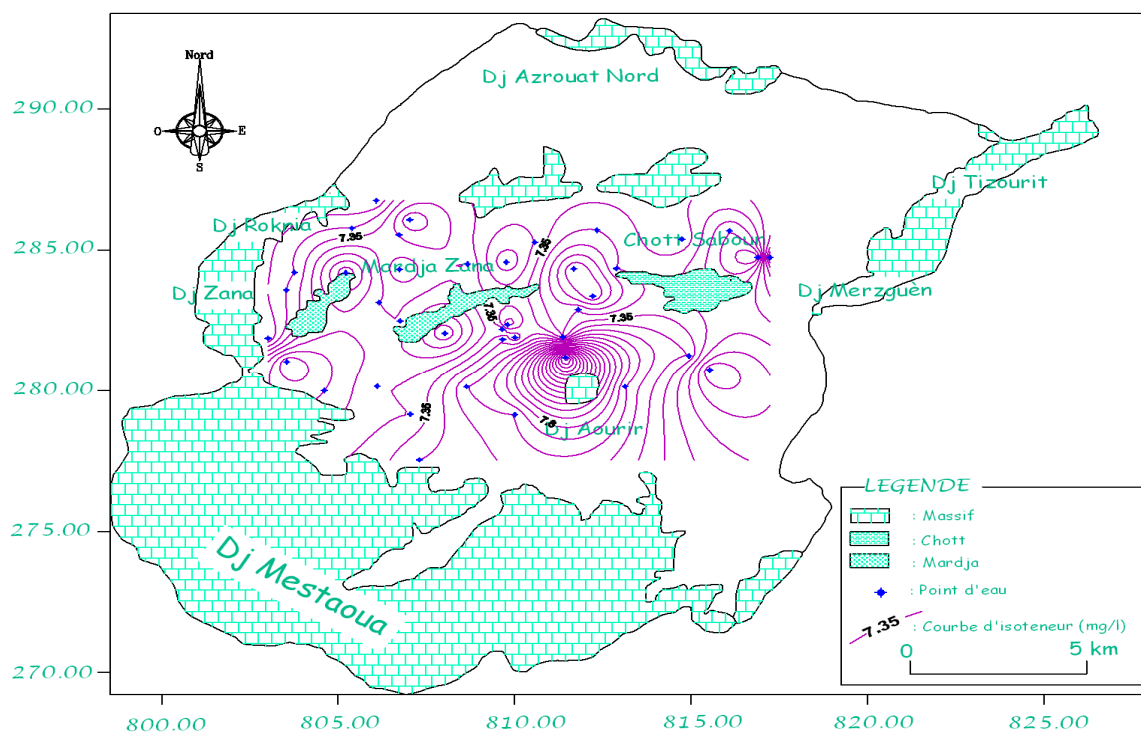
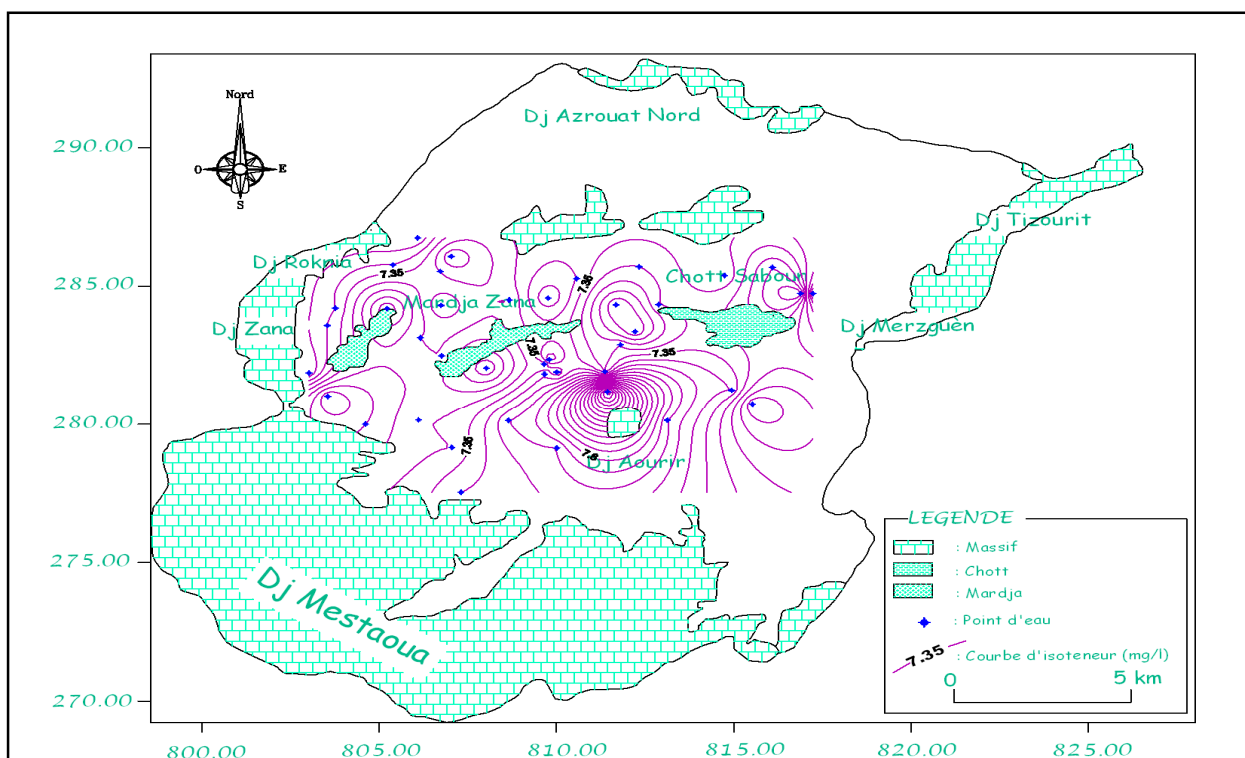
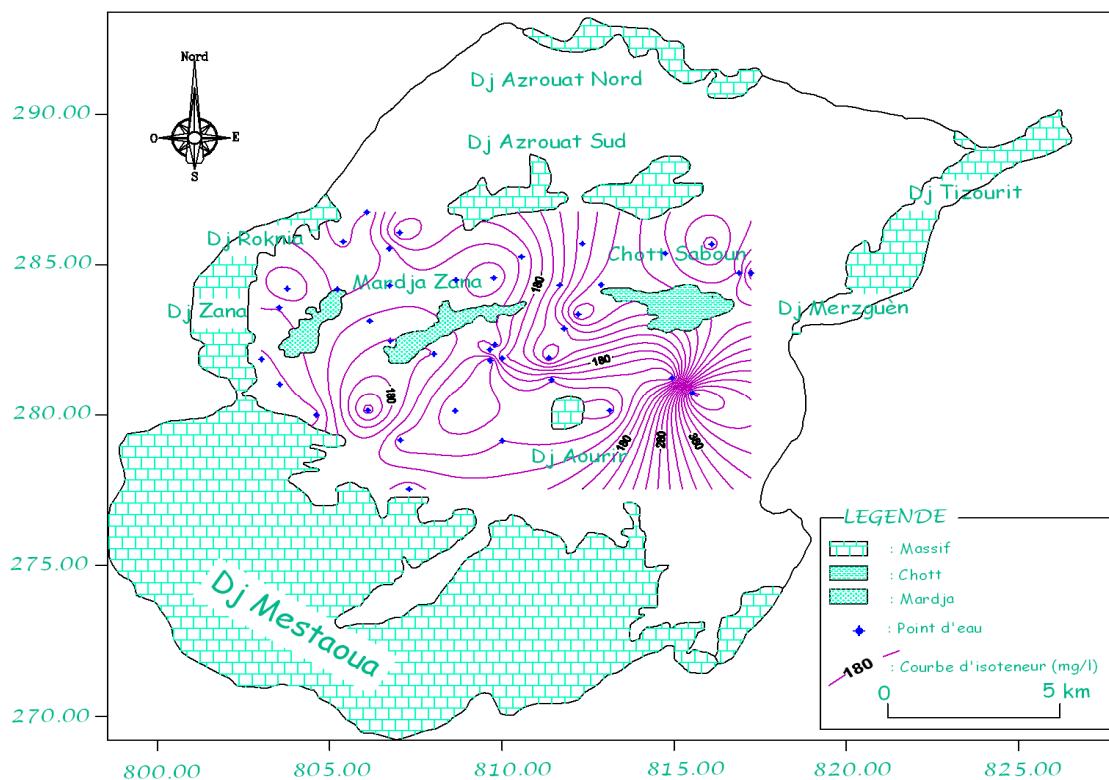


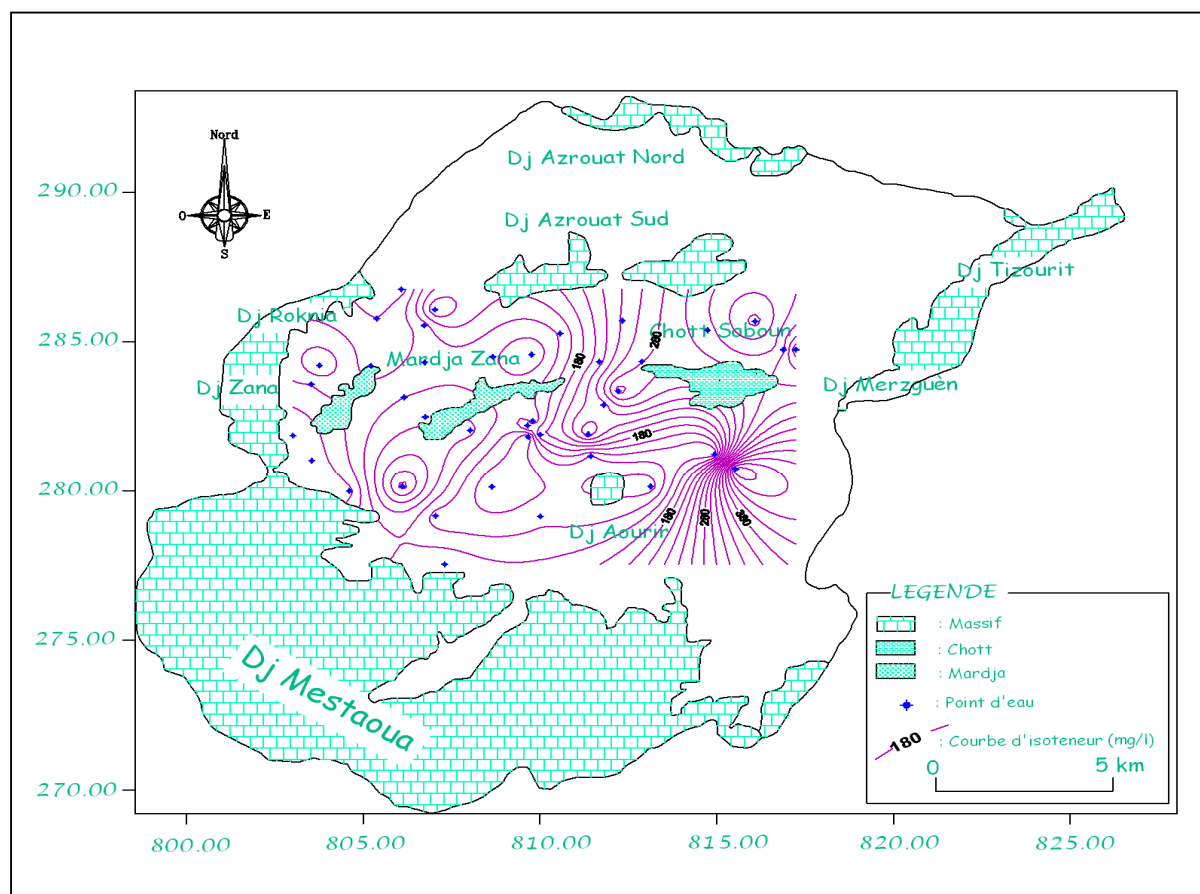
Figure VII.5: Carte de pH
(Compagne des basses eaux)



**Figure VII.6: Carte de pH
(Compagne des hautes eaux)**



**Figure VII.7: Carte de Ca⁺⁺ (mg/l)
(Compagne des basses eaux)**



**Figure VII.8: Carte de Ca⁺⁺ (mg/l)
(Compagne des hautes eaux)**

VII.4.2 Le magnésium

Ses origines sont comparables à celle du calcium, car il provient de la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en magnésium, magnésite : $\text{MgCO}_3 = \text{Mg}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$, et dolomite : $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + 2(\text{CO}_3^{2-})$.

Quant 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.

Pour notre cas les teneurs en magnésium varient entre 27.44 mg/l comme valeur minimale et 383.76 mg/l comme valeur maximale, (basses eaux).

On pense ici que les apports en magnésium proviennent de la dissolution des formations évaporitiques, figure VII.9 et VII.10

VII.4.3 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 $\text{Na}_2\text{SO}_4(10(\text{H}_2\text{O}))$).

La présence du sodium est liée à la dissolution rapide des formations évaporitiques riches en halite. L'existence des Sebkhass 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.

Sur notre terrain les teneurs en sodium varient entre 35.19 mg/l comme valeur minimale et 340.63 mg/l comme valeur maximale, (basses eaux). Ces concentrations témoignent d'un apport salifère à partir des formations évaporitiques liées aux Sebkhass et à la Merdja, figure VII.11 et VII.12

VII.4.4 Le potassium

Le potassium provient de l'altération des formations silicatées (gneiss, schiste), des argiles potassiques.

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.

Sur notre terrain les teneurs en potassium varient entre 1,62 mg/l comme valeur minimale et 18,40 mg/l comme valeur maximale, (basses eaux) figure VII.13 et VII.14

VII.4.5 Les chlorures

L'origine de cet élément est comme pour le cas du sodium, 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 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. La teneur du chlore dans les eaux continentales peut être maximum sur les zones côtières et moindres en s'éloignant de la mer. Généralement les eaux riches en chlore sont riches en sodium, parfois le calcium remplace le sodium.

Les teneurs en chlorures des points d'eau analysés varient entre 35.5 mg/l comme valeur minimale et 340.80 mg/l comme valeur maximale, (basses eaux). Ces teneurs présentent des valeurs importantes par rapport à celle du sodium, à cause des caractéristiques spéciales de cet élément qui ne rentre pas dans les phénomènes de précipitation chimique, ne s'adsorbe pas par les formations géologiques et qui est très mobile.

Ces concentrations indiquent l'existence d'apports salifères à partir des formations évaporitiques liées à la Sebkha et la Merdja, figure VII.15 et VII.16.

VII.4.6 Les sulfates

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 (Vieville, 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 de nos analyses varient entre 207,40 mg/l comme valeur minimale et 1311,50 mg/l comme valeur maximale, (basses eaux). Donc la présence des sulfates est beaucoup plus liée aux formations gypseuses, figure VII.17 et VII.18.

VII.4.7 Les bicarbonates

Les bicarbonates résultent de la dissolution des roches calcaires ou d'émanation du magma profond, l'apport atmosphérique de cet élément est négligeable.

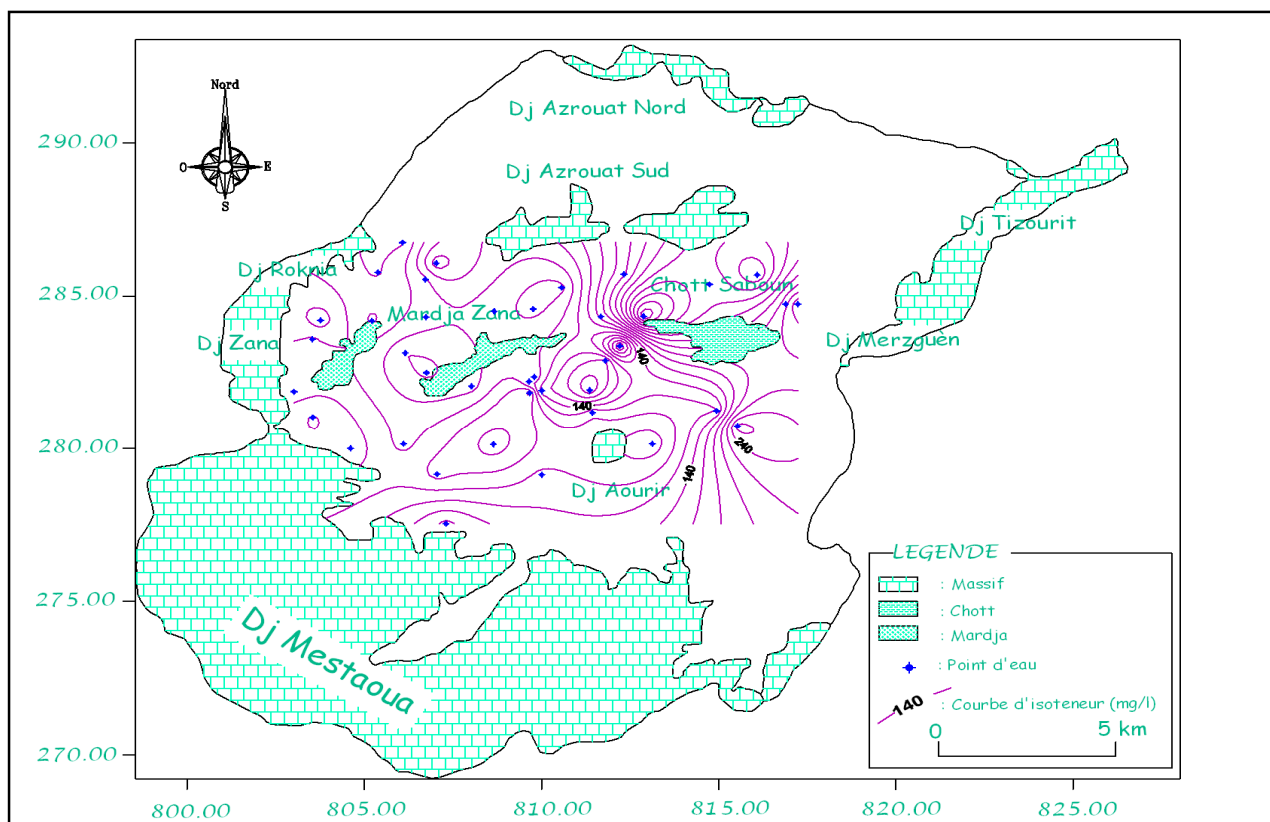
Les teneurs en bicarbonates de nos analyses varient entre 207.40 mg/l comme valeur minimale et 1311.50 mg/l comme valeur maximale, (basses eaux) figure VII.19 et VII.20.

VII.4.8 Les nitrates

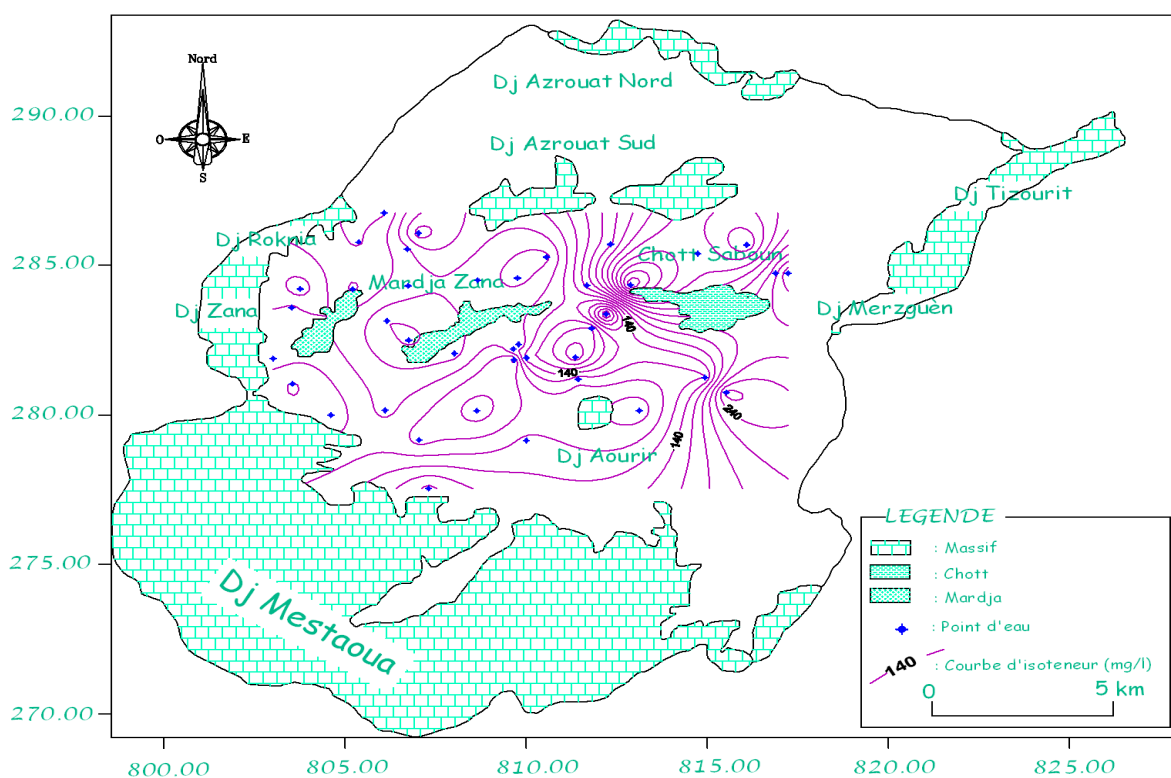
Les nitrates, représentent la forme la plus oxygénée de l'azote, c'est une forme très soluble. L'apport atmosphérique en nitrates est faible, la teneur naturelle des eaux souterraines en cet élément est également faible; elle dépend des types de sols, de la végétation qui les recouvrent ainsi que du taux d'oxygénation dans la zone noyée. On peut dire aussi que l'origine des nitrates dans les eaux souterraines est essentiellement externe (apports anthropiques). Les nitrates sont utilisés comme indice de pollution. Les teneurs en nitrates de nos analyses varient entre 0,50 mg/l comme valeur minimale et 41,50 mg/l comme valeur maximale, (basses eaux) et atteint la valeur maximale de 71,0 mg/l pendant la période des hautes eaux.

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

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.



**Figure VII.9 Carte de Mg^{2+} (mg/l)
(Compagne des basses eaux)**



**Figure VII.10: Carte de Mg^{2+} (mg/l)
(Compagne des hautes eaux)**

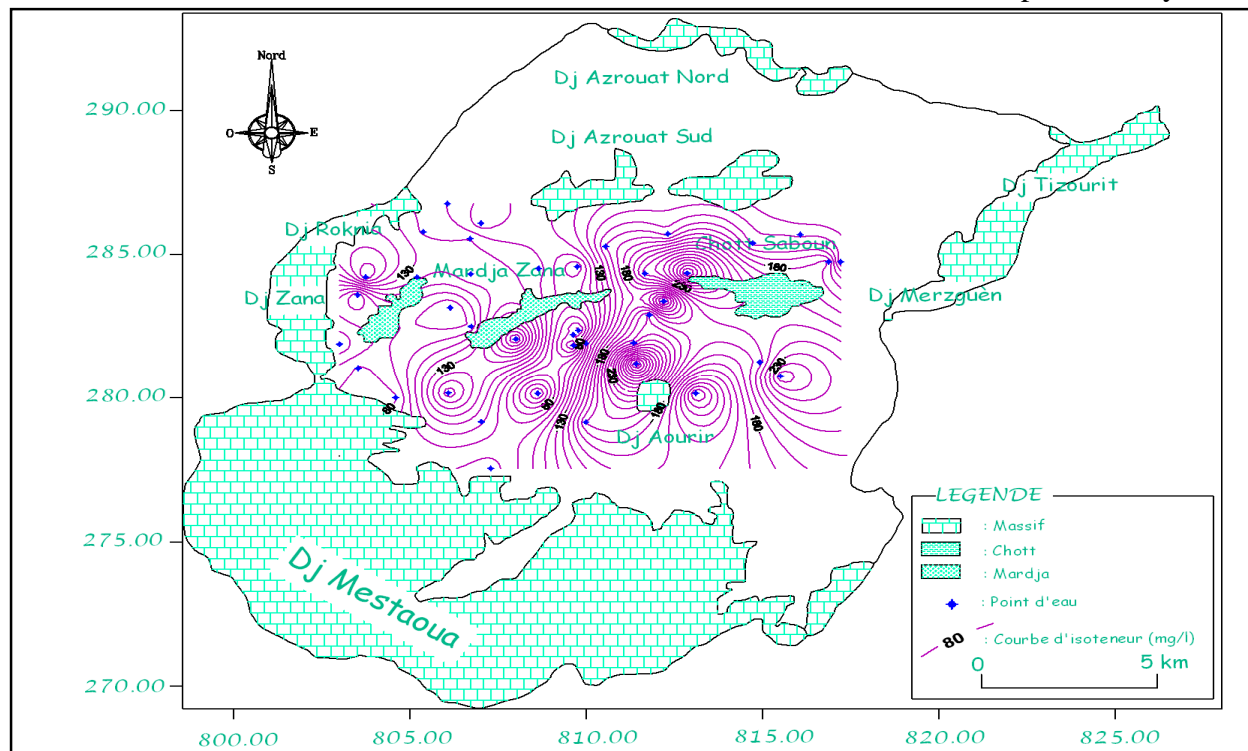


Figure VII.11: Carte de Na^+ (mg/l)
(Compagne des basses eaux)

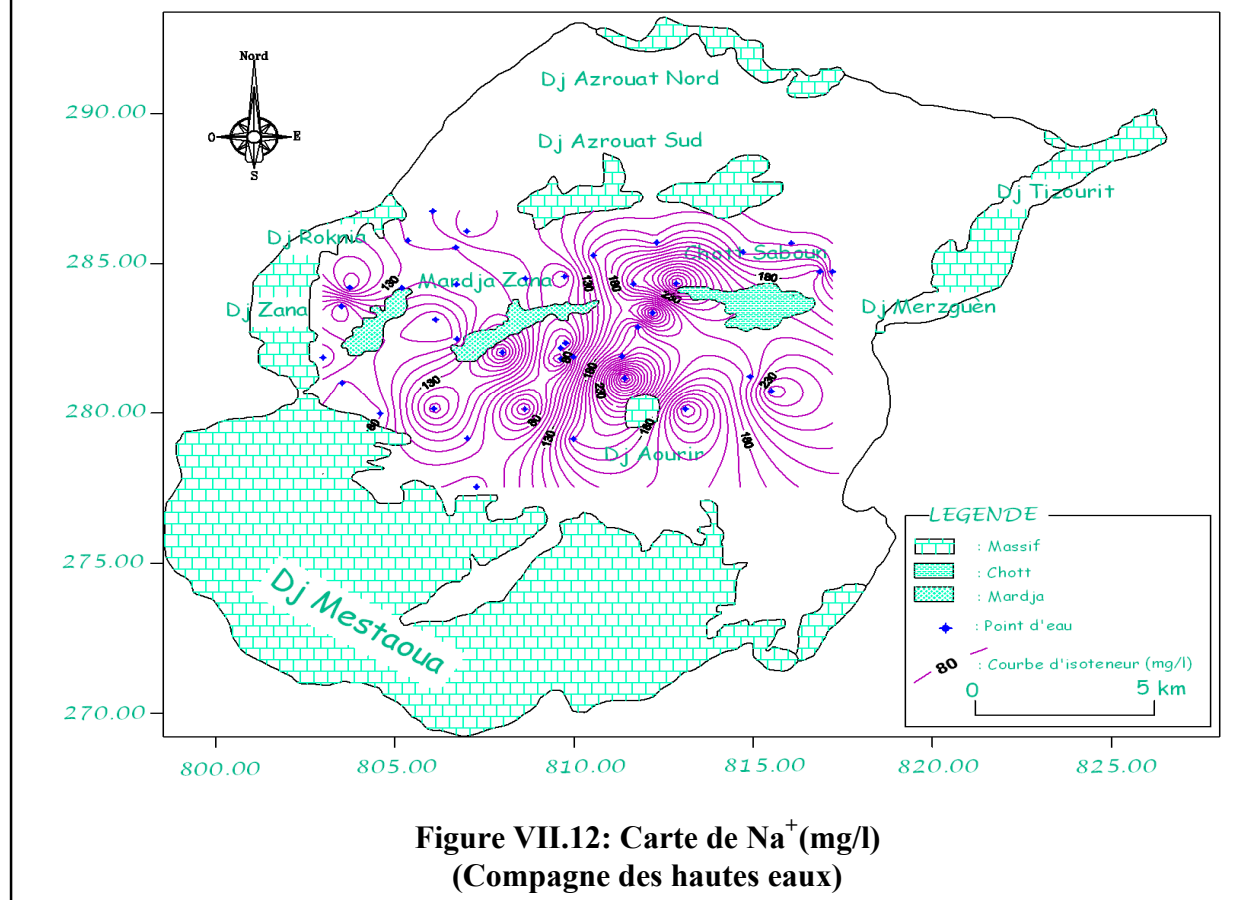


Figure VII.12: Carte de Na^+ (mg/l)
(Compagne des hautes eaux)

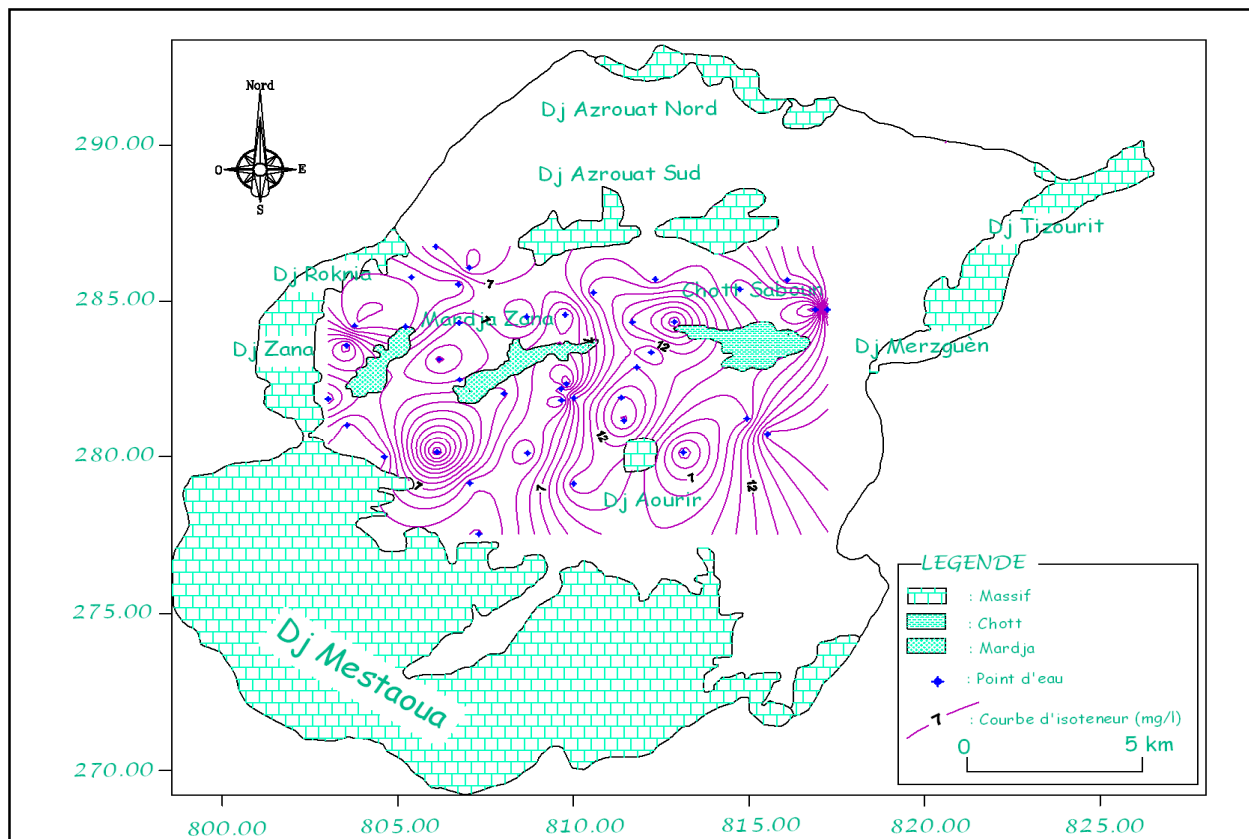


Figure VII.13: Carte de K^+ (mg/l)
(Compagne des basses eaux)

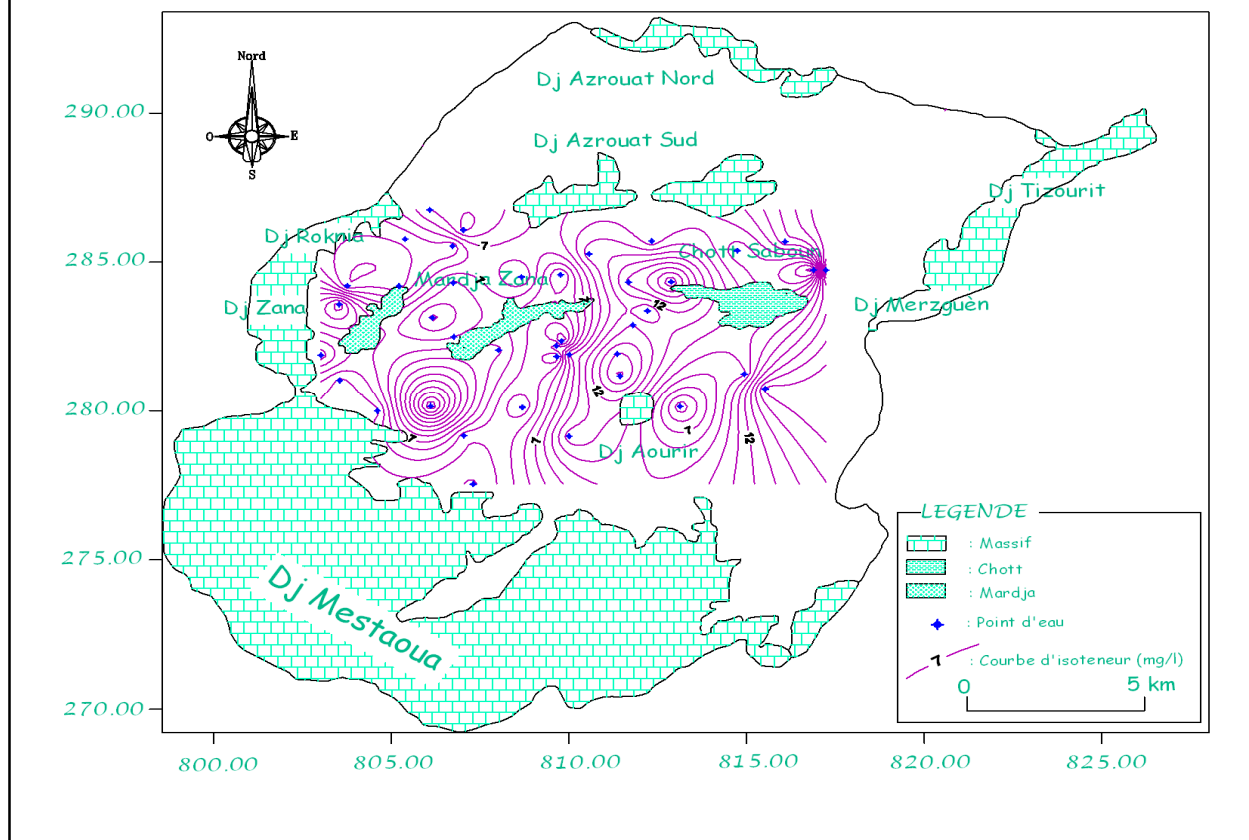
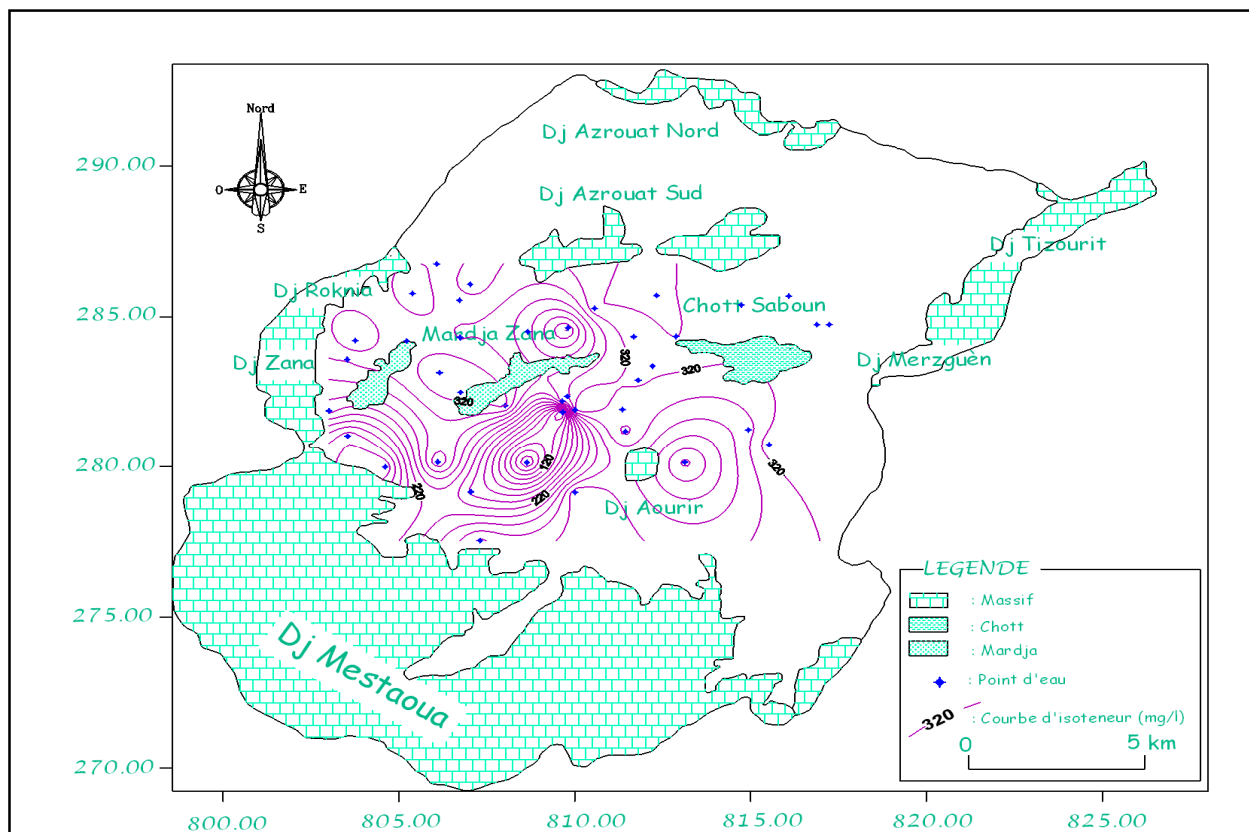
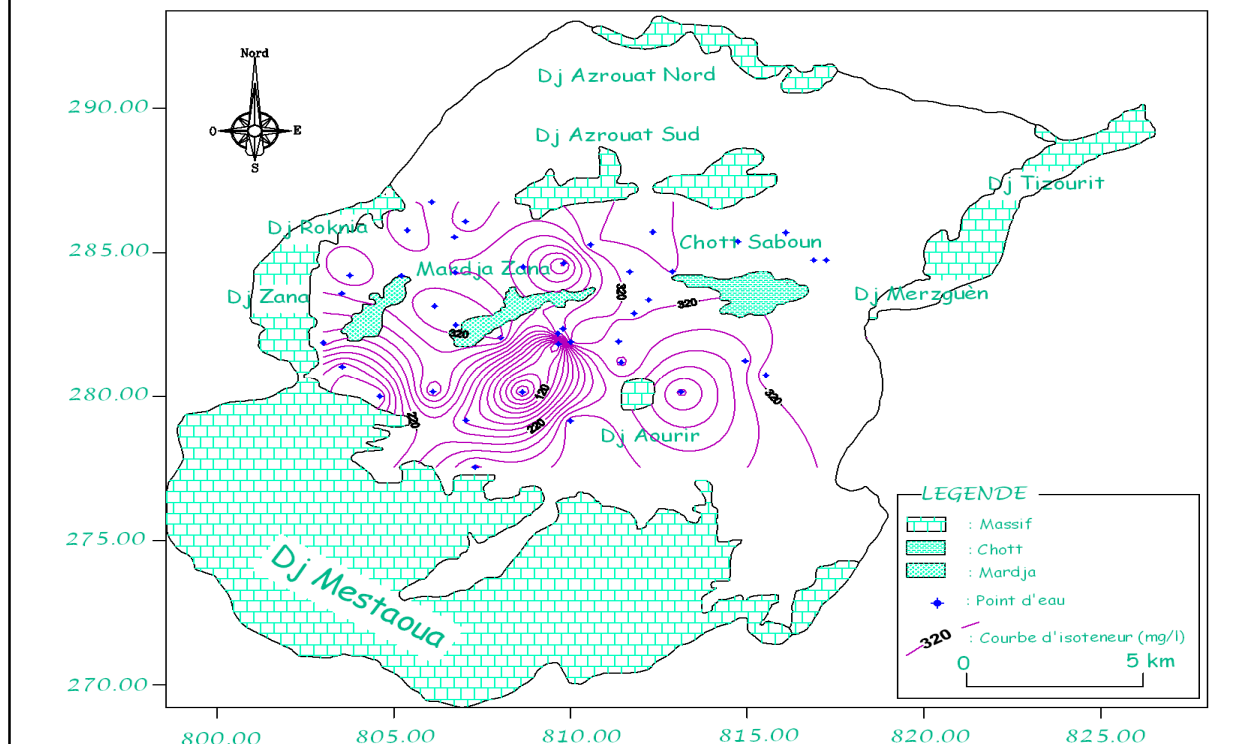


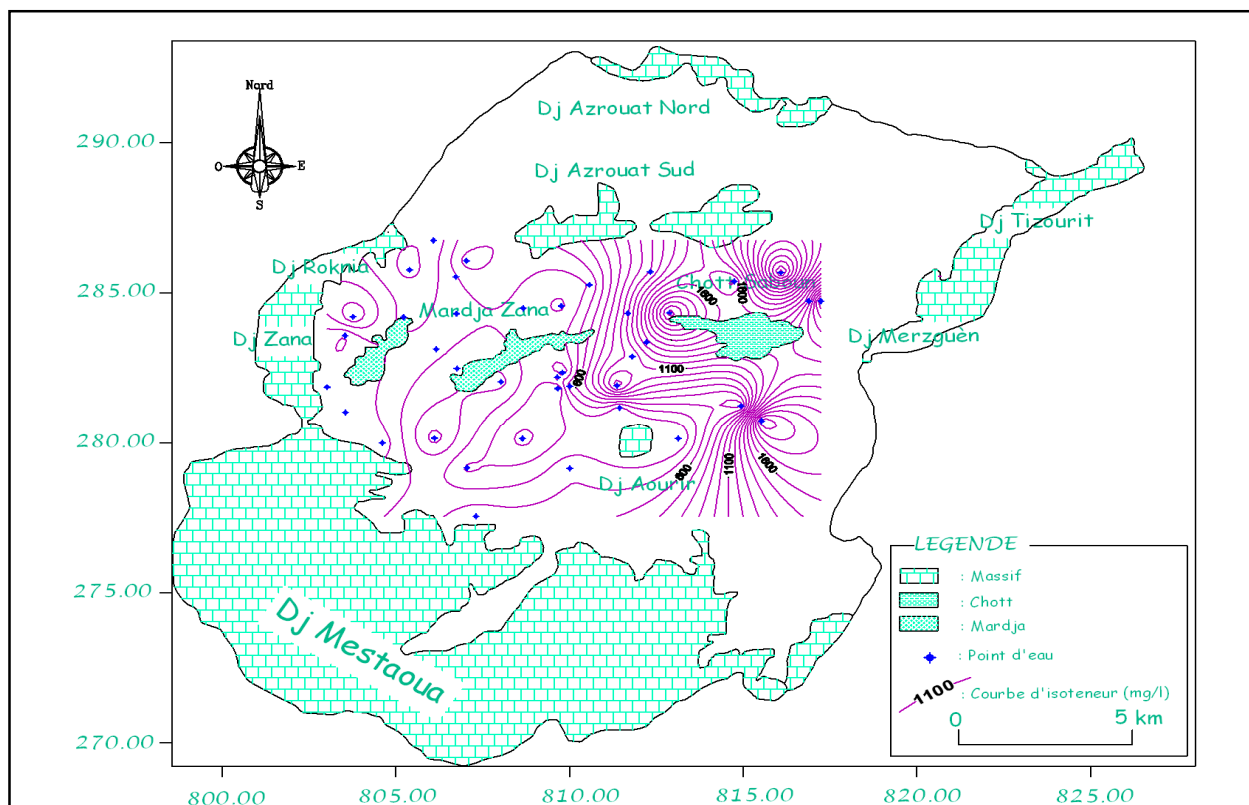
Figure VII.14: Carte de K^+ (mg/l)
(Compagne des hautes eaux)



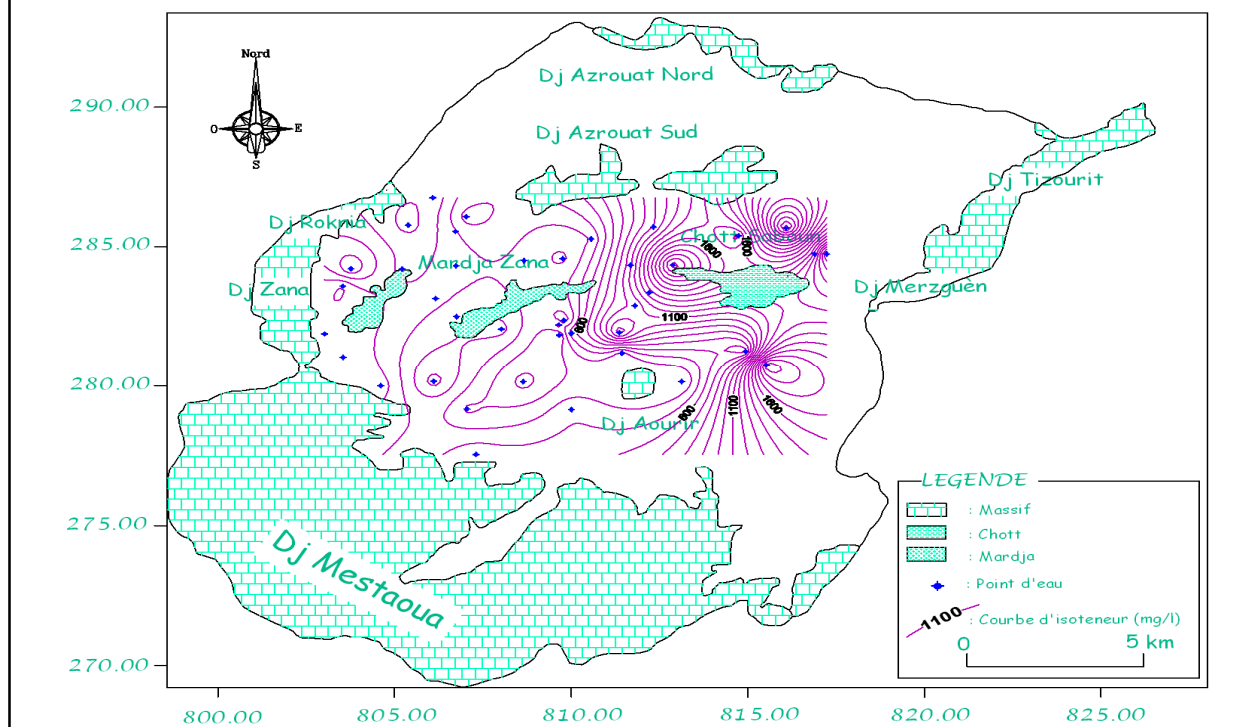
**Figure VII.15 : Carte de Cl⁻ (mg/l)
(Compagne des basses eaux)**



**Figure VII.16: Carte de Cl⁻ (mg/l)
(Compagne des hautes eaux)**



**Figure VII.17: Carte de SO_4^{2-} (mg/l)
(Compagne des basses eaux)**



**Figure VII.18: Carte de SO_4^{2-} (mg/l)
(Compagne des hautes eaux)**

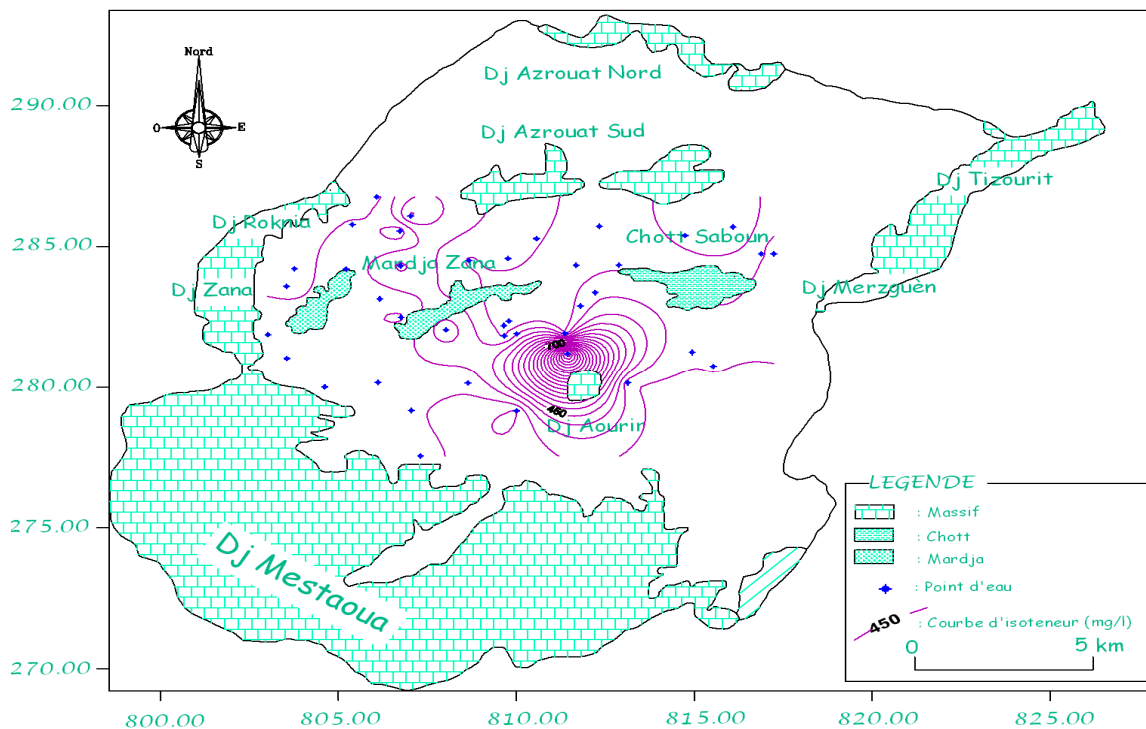


Figure VII.19: Carte de HCO_3^- (mg/l)
(Compagne des basses eaux)

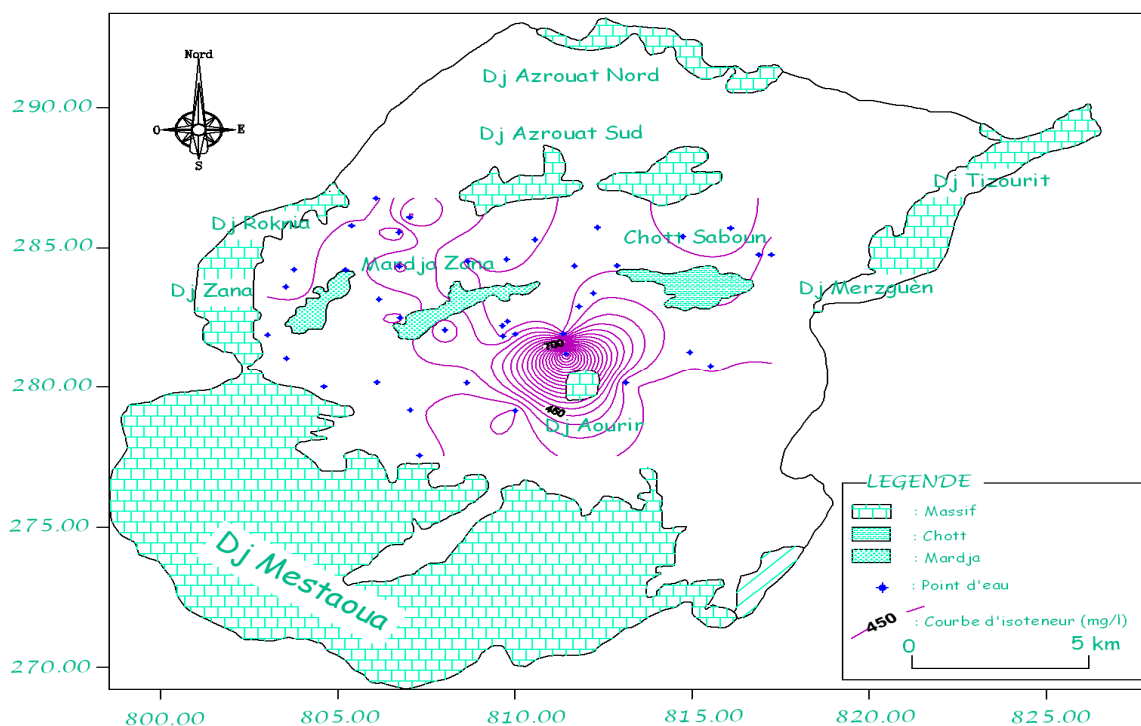


Figure VII.20: Carte de HCO_3^- (mg/l)
(Compagne des hautes eaux)

VII.5.1 Rapports caractéristiques

VII.5.1.1 Rapport $r \text{ Mg}^{2+}/r \text{ Ca}^{2+}$

Le rapport $r \text{ Mg}^{2+}/r \text{ Ca}^{2+}$ est supérieur à 1 pour l'ensemble des points pour les deux périodes ce qui traduit la dissolution rapide des dolomies par rapport aux calcaires, figure VII.21 et VII.22.

VII.5.1.2 Rapport $r \text{ SO}_4^{2-}/r \text{ Cl}^-$

L'examen des cartes de ce rapport, montre que les valeurs du rapport sont supérieures à 1 pour l'ensemble des points pendant les deux campagnes ce qui traduit que les eaux sont plus sulfatées que chlorurées, à cause du lessivage des terrains riches en sulfates, en général des lentilles de gypse, figure VII.23 et VII.24.

VII.5.1.3 Rapport $r \text{ HCO}_3^-/r \text{ SO}_4^{2-}$

Les valeurs de ce rapport sont supérieures à 1 pour l'ensemble des points de mesure pour les deux campagnes, ce qui exprime une prédominance des bicarbonates. Pour la partie Sud de la plaine le rapport est inférieur à 1 ce qui traduit des teneurs élevées en sulfates par rapport aux bicarbonates et cela est lié essentiellement au lessivage des formations gypseuses et salifères et au engrais à base de sulfates utilisés pour l'agriculture, figure VII.25 Et VII.26.

VII.5.1.4 Rapport $r (\text{Na}^+ + \text{K}^+)/r (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$

Le rapport des alcalins sur alcalino-terreux montre que les valeurs sont toujours inférieures à 1 pour les deux périodes² à l'exception de quelques points, ceci est due à la prédominance des alcalino-terreux et essentiellement le pôle calcique, figure VII.27 et VII.28.

VII.6 Faciès chimiques des eaux

VII.6.1 Représentation graphique

L'interprétation des résultats des analyses a pour but de déterminer les Faciès chimiques et d'effectuer une comparaison spatio-temporelle. Parmi les méthodes graphiques les plus utilisées, celle de SCHOELLER et BERKALOFF (1935-1938) et celle de PIPER (1944), tableau VII.2.

Ce tableau nous a permis de constater que le faciès prédominant est :

- ❖ Deux Faciès dominants lors de la période des basses eaux, figure VII.29.
 - Faciès sulfaté magnésienne avec 53%,
 - Faciès chloruré magnésien avec 25.

- ❖ De même pour la période des hautes eaux : deux faciès dominants, figure VII.30
 - Faciès sulfaté magnésienne avec 53%,
 - Faciès chloruré magnésien avec 23.

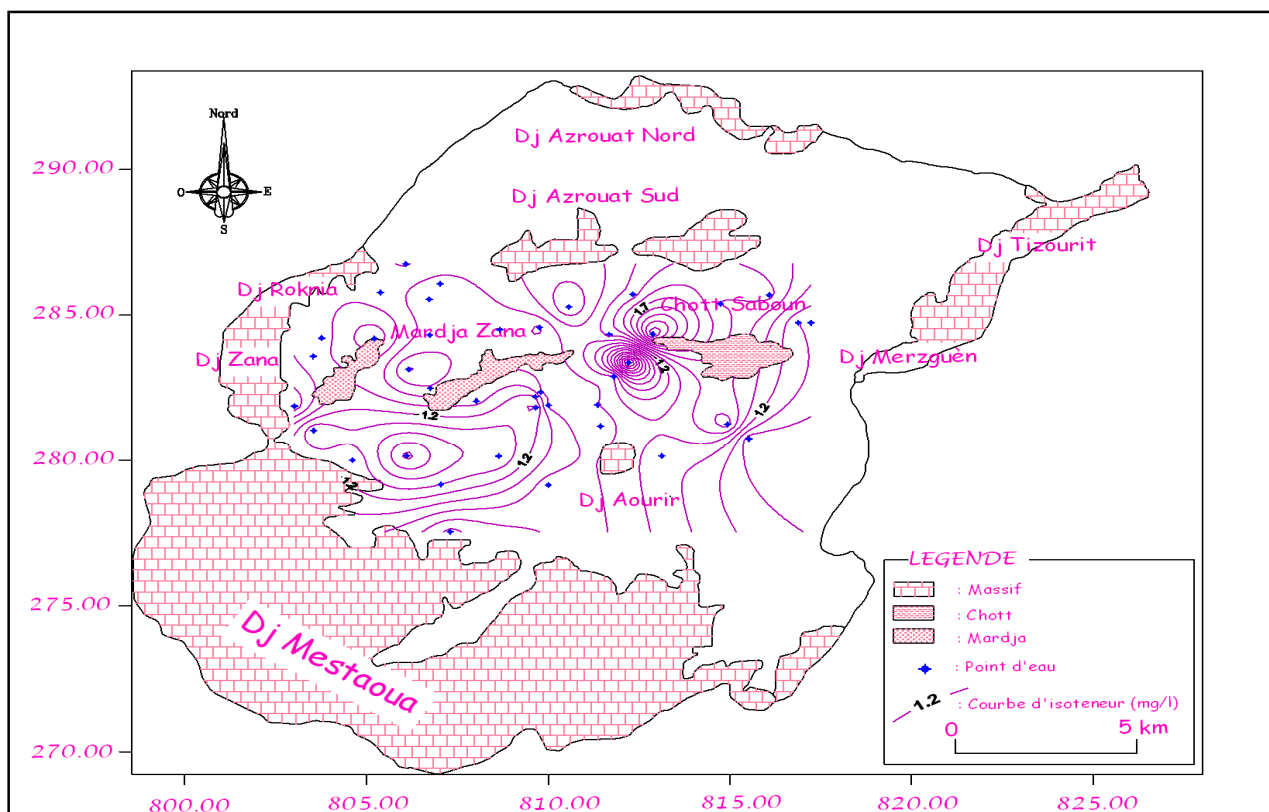


Figure VII.21: Carte de rapport rMg^{2+}/rCa^{2+}
(Compagne des basses eaux)

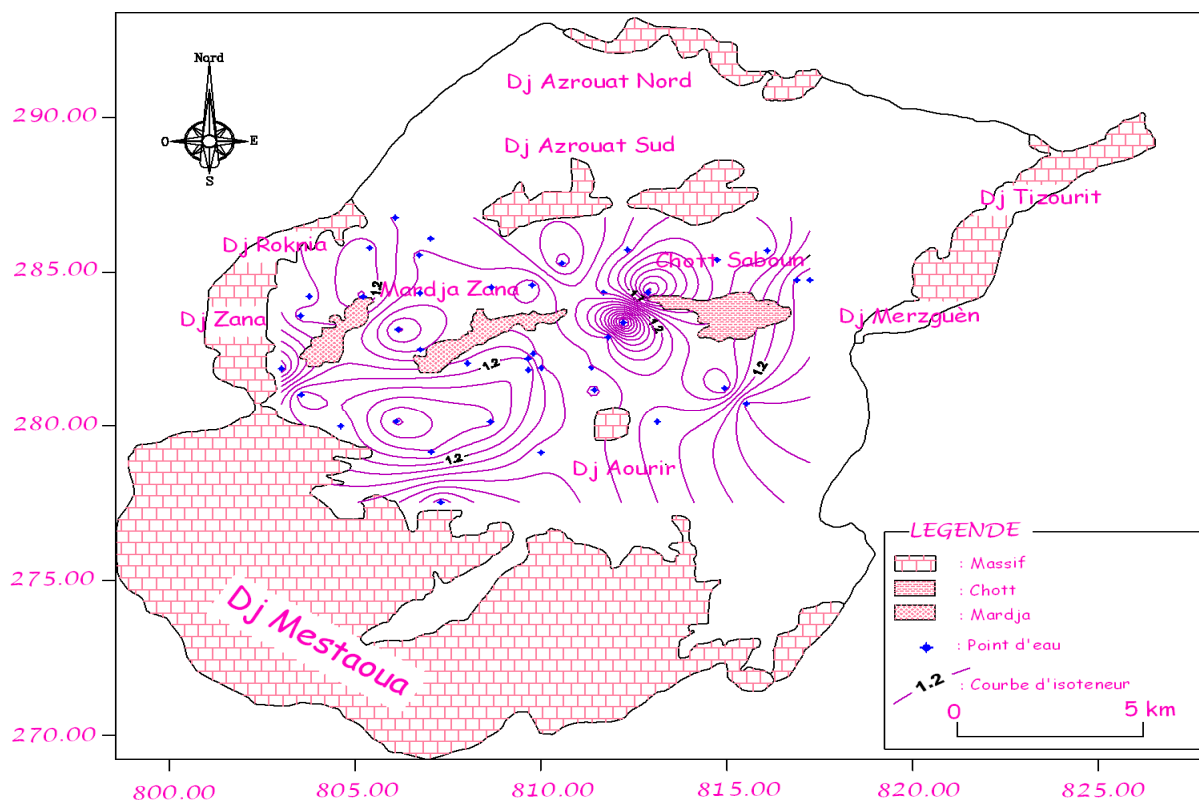


Figure VII.22: Carte de rapport rMg^{2+}/rCa^{2+}
(Compagne des hautes eaux)

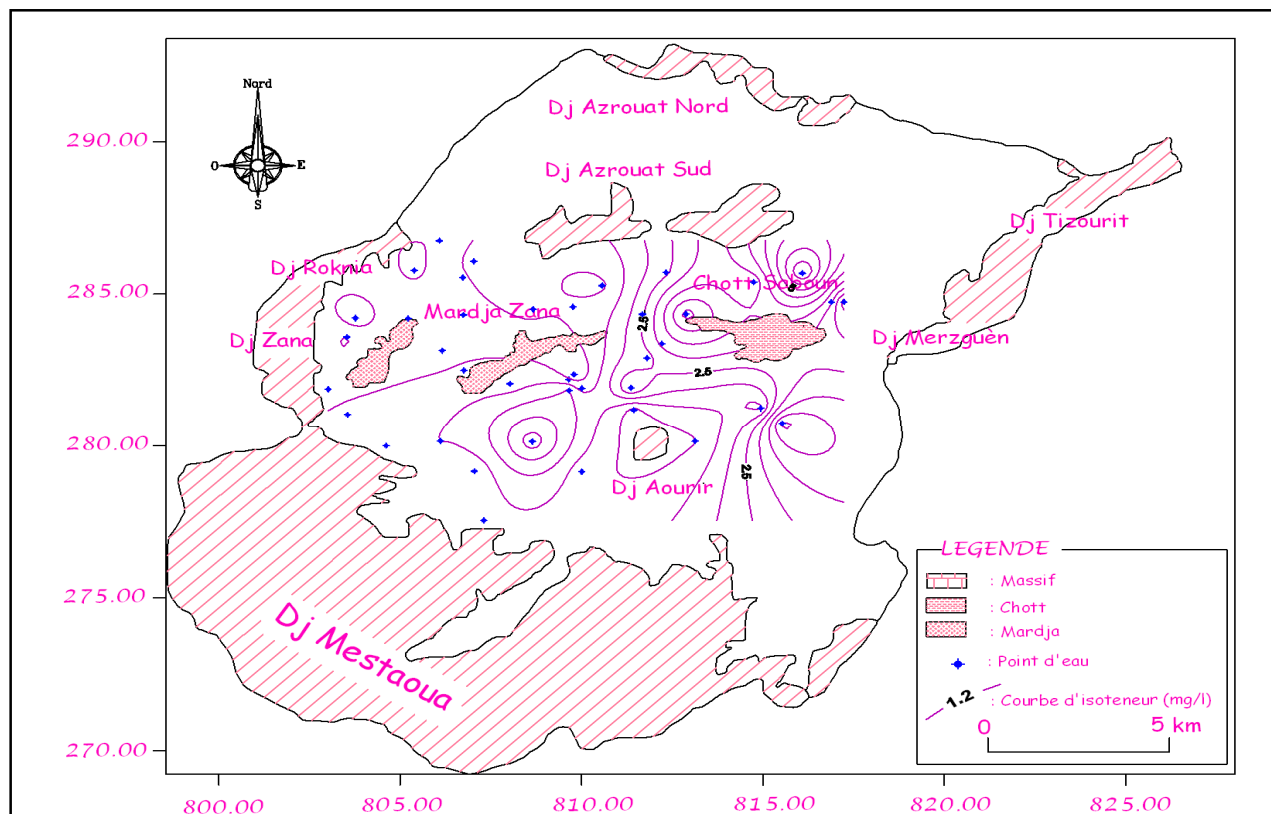


Figure VII.23: Carte du rapport $r \text{SO}_4^{2-}/r \text{Cl}^-$
(Compagne des basses eaux)

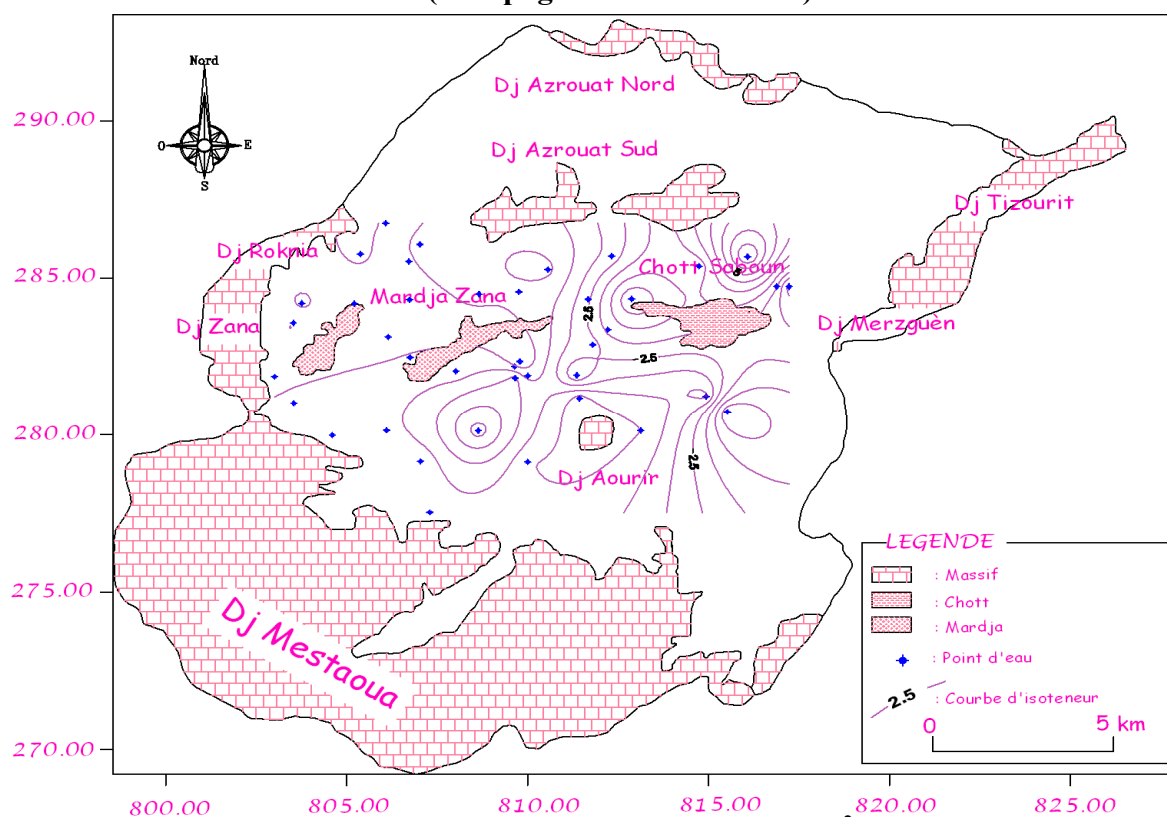


Figure VII.24: Carte du rapport $r \text{SO}_4^{2-}/r \text{Cl}^-$
(Compagne des hautes eaux)

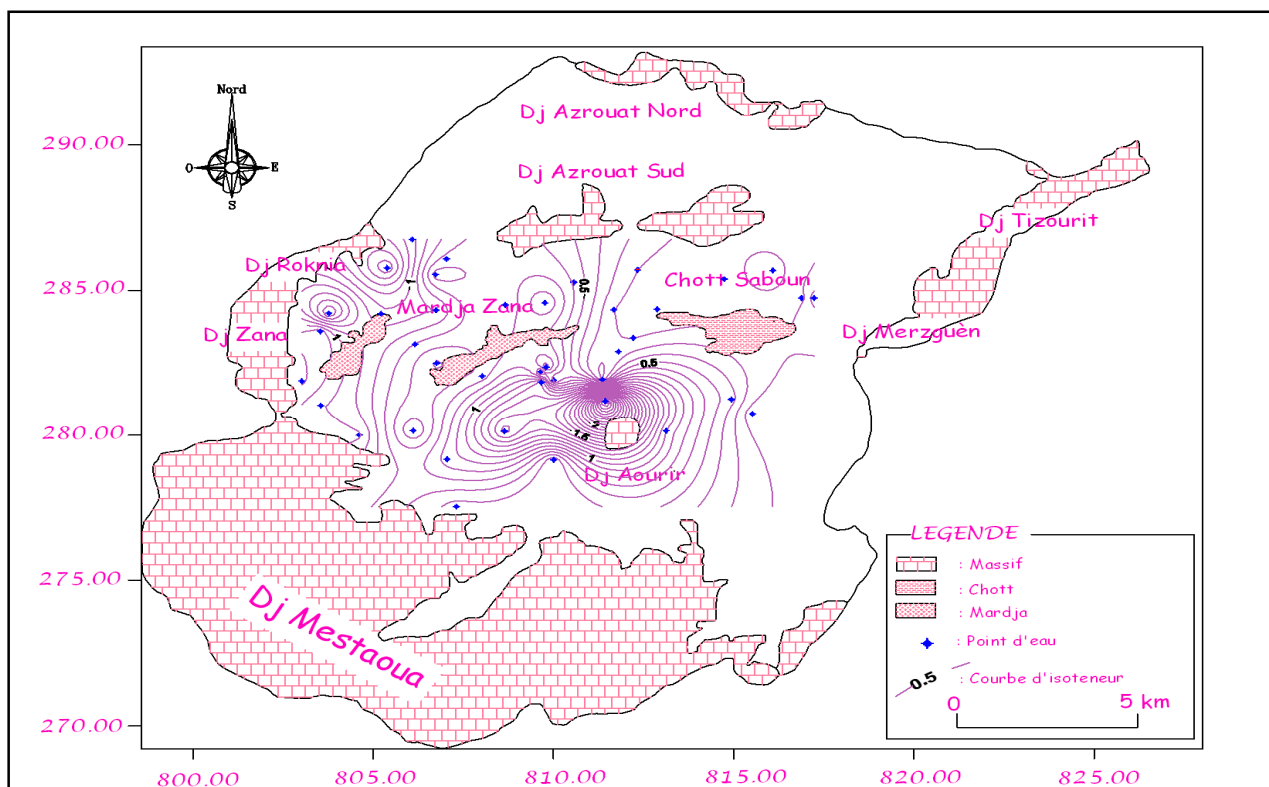


Figure VII.25: Carte du rapport $r \text{HCO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$
(Compagne des basses eaux)

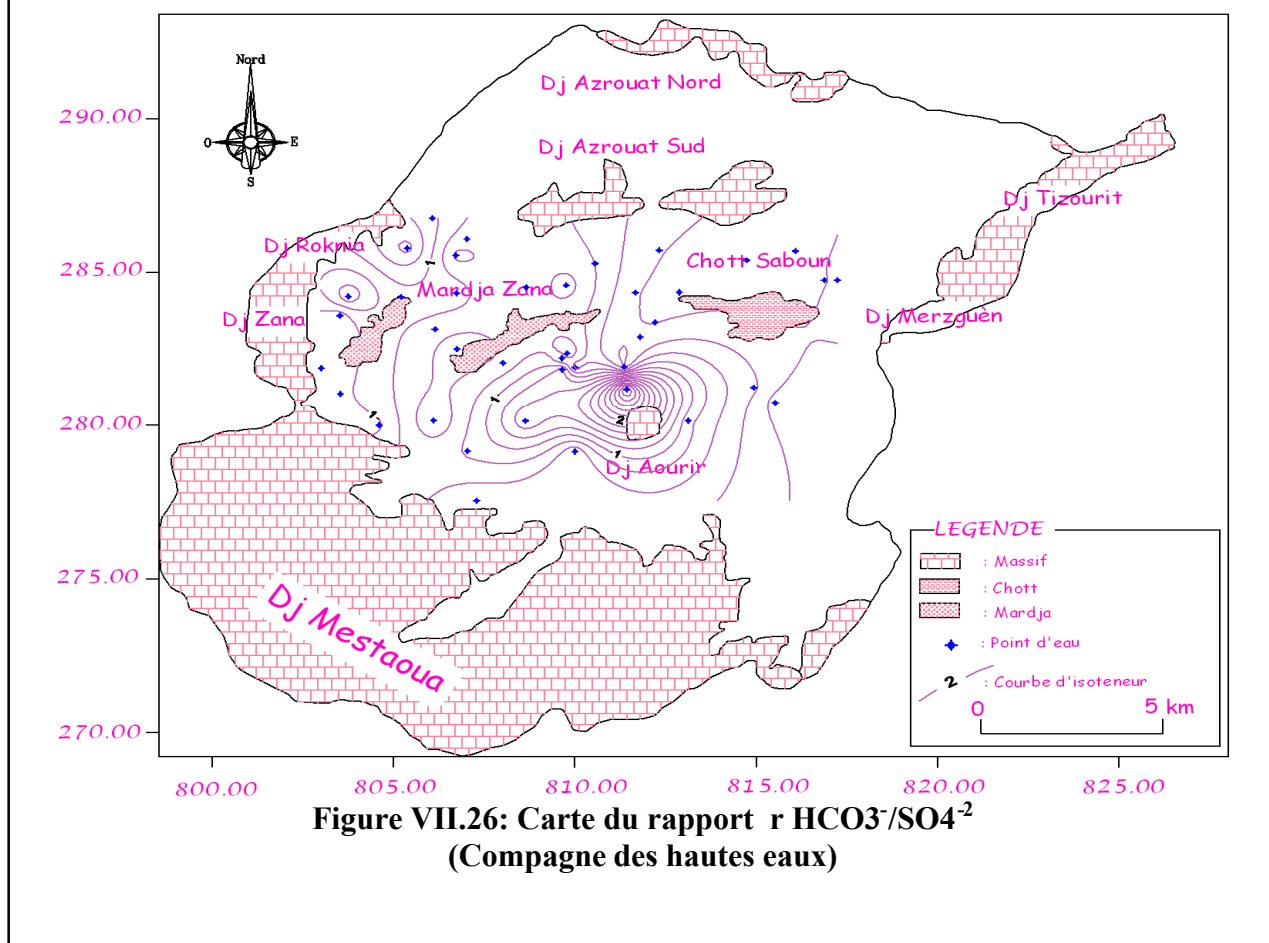


Figure VII.26: Carte du rapport $r \text{HCO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$
(Compagne des hautes eaux)

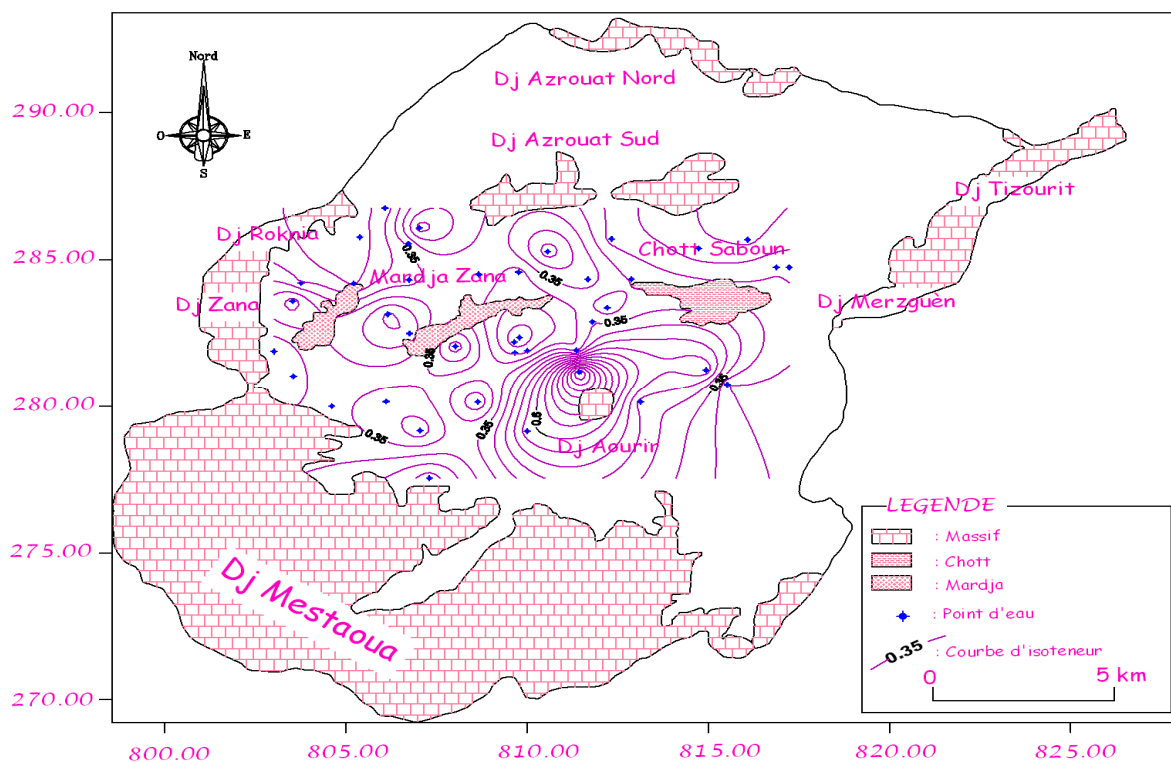


Figure VII.27: Carte du rapport $r = \frac{Na^+ + K^+}{Ca^{+2} + Mg^{+2}}$ (Compagne des basses eaux)

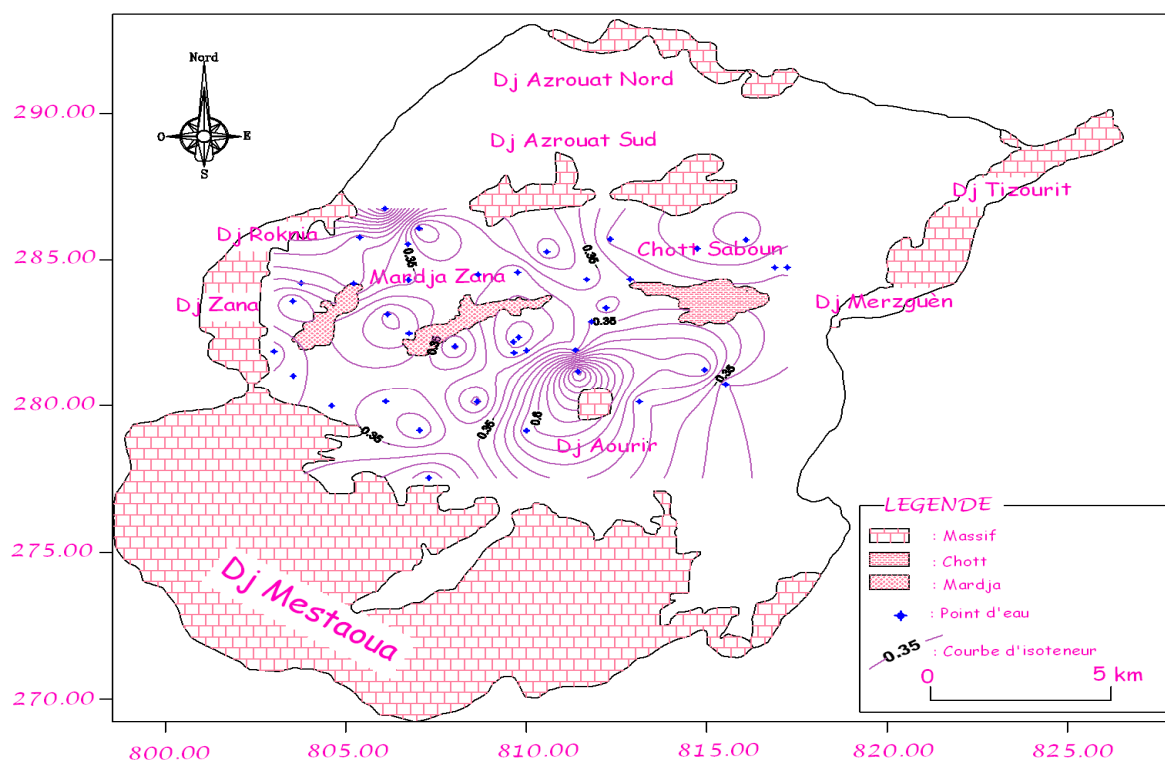


Figure VII.28: Carte du rapport $r = \frac{Na^+ + K^+}{Ca^{+2} + Mg^{+2}}$ (Compagne des hautes eaux)

Tableau VII.2 faciès chimiques des eaux selon le diagramme de Schoeller_Berkaloff

<i>Compagne chimique</i>	<i>Faciès chimique</i>	<i>Nombre de points</i>	<i>pourcentage</i>
Basses eaux	Sulfaté_magnésienne	21	53%
	Chloruré_magnésienne	10	25%
	Bicarbonaté_magnésienne	3	8%
	Sulfaté_calcique	3	8%
	Bicarbonaté_sodique	1	3%
Hautes eaux	Sulfaté_magnésienne	21	53%
	Chloruré_magnésienne	9	23%
	Bicarbonaté_magnésienne	4	10%
	Sulfaté_calcique	3	8%
	Bicarbonaté_calcique	1	3%
	Chloruré_calcique	1	3%
	Chloruré_sodique	1	3%

Répartition des faciès chimiques des eaux selon la classification de la méthode de Schoeller_Berkaloff (B,EAUX)

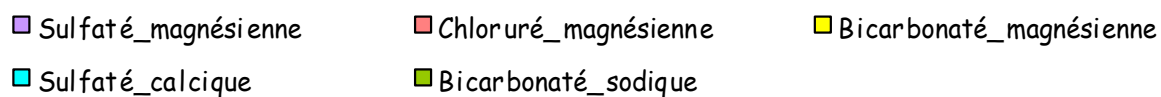
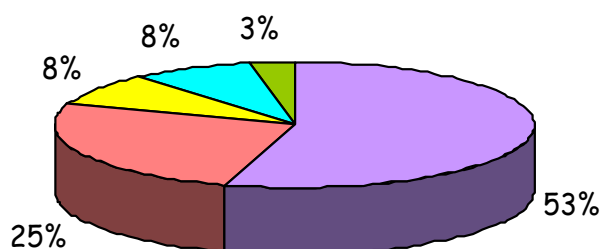


Figure VII.29: Répartition des faciès (compagne des basses eaux)

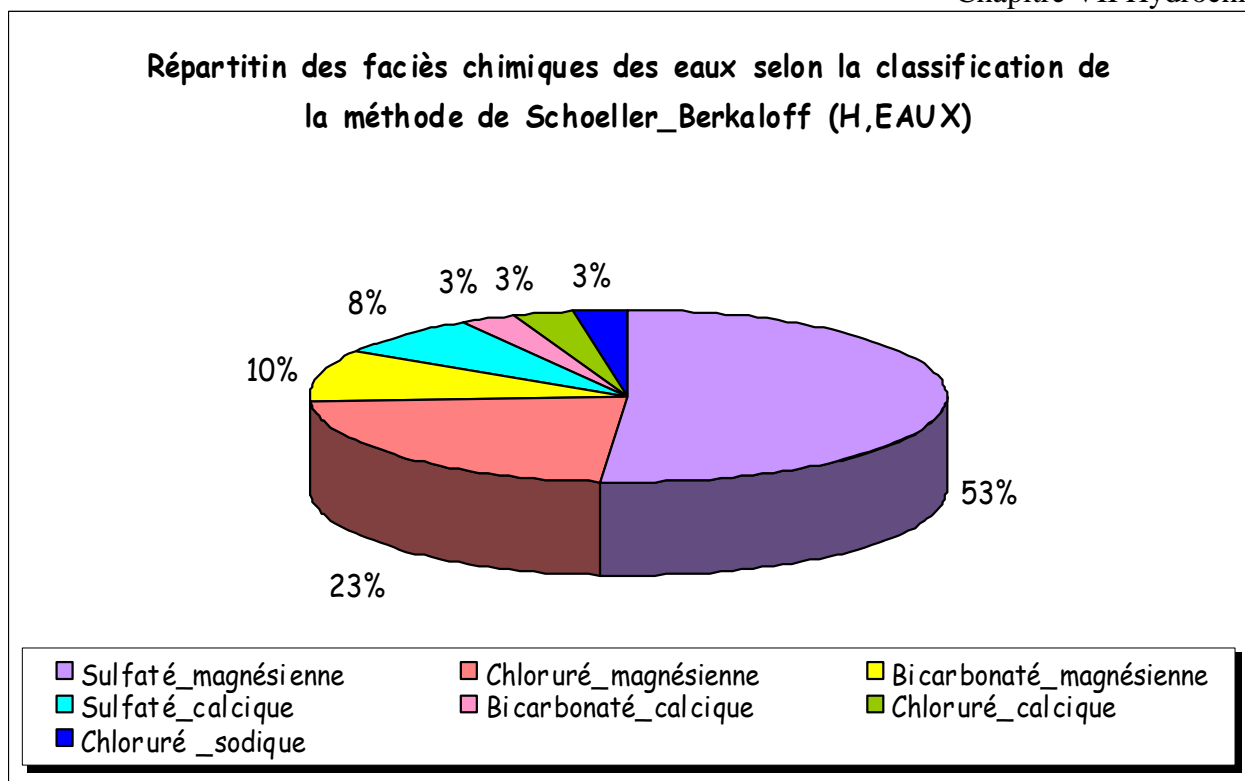


Figure VII.30: Répartition des faciès (compagne des Hautes eaux)

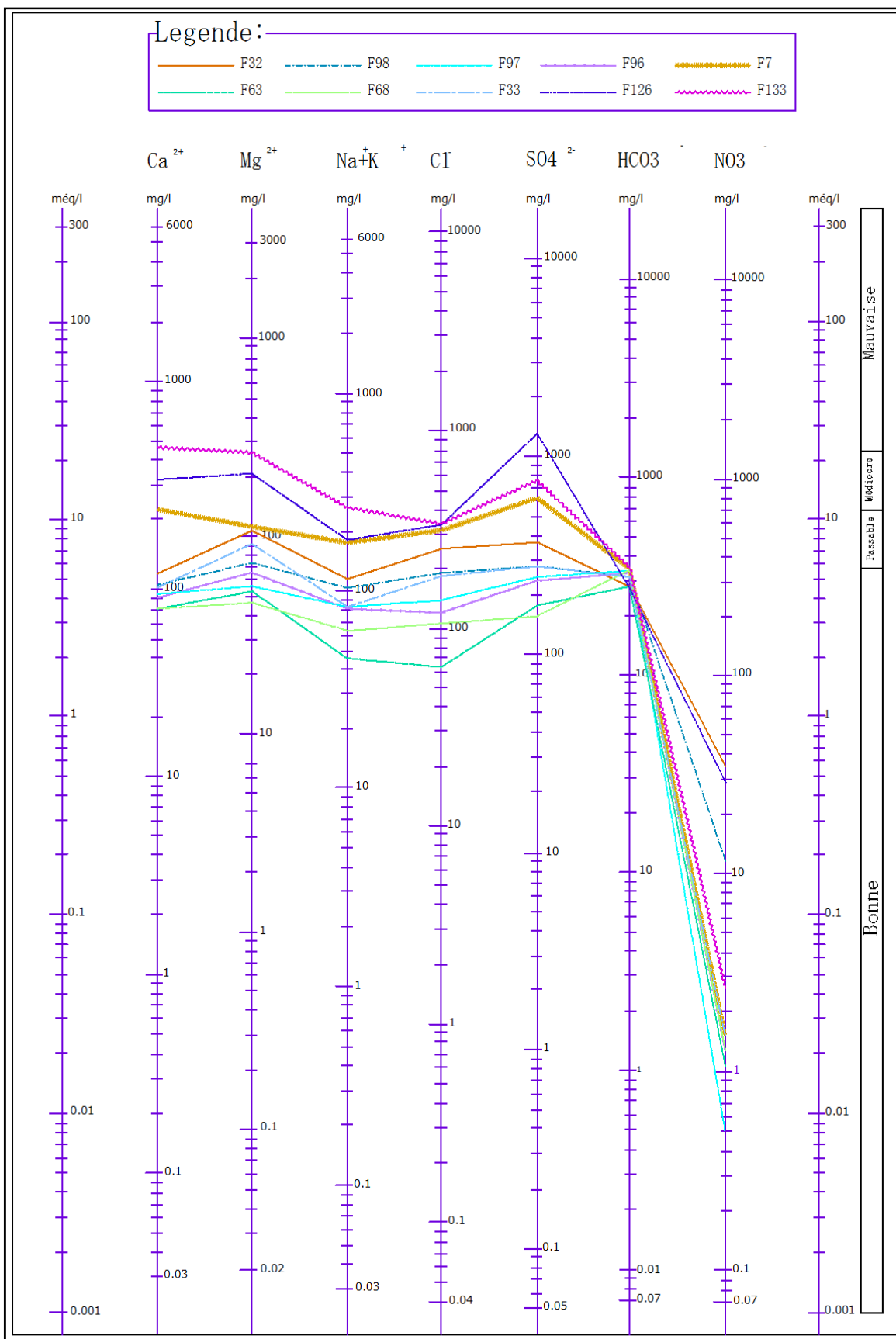


Figure VII.31: Diagramme de Schöeller pour dix points (Compagne des basses eaux)

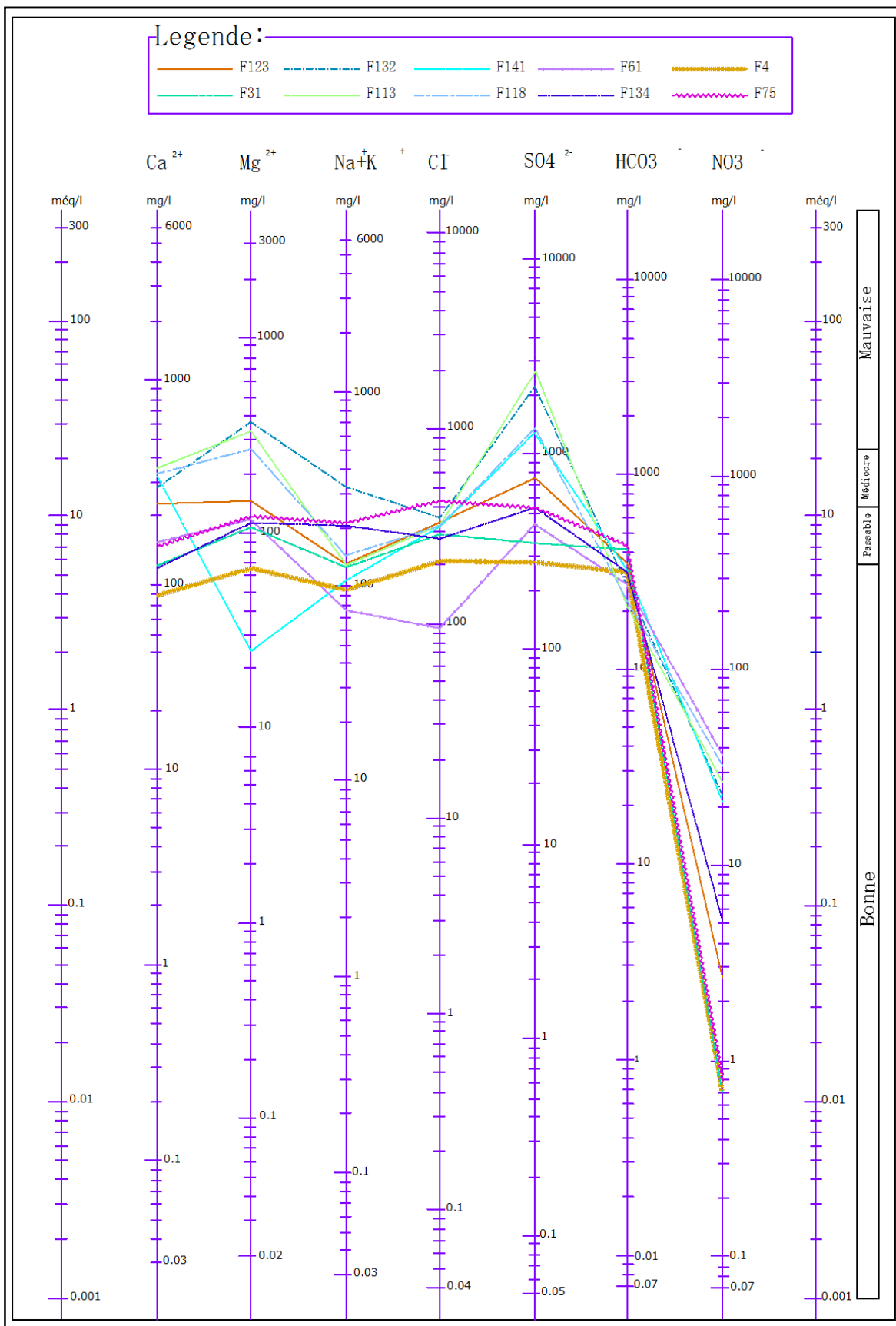


Figure VII.32: Diagramme de Schöeller pour dix points (Compagne des basses eaux)

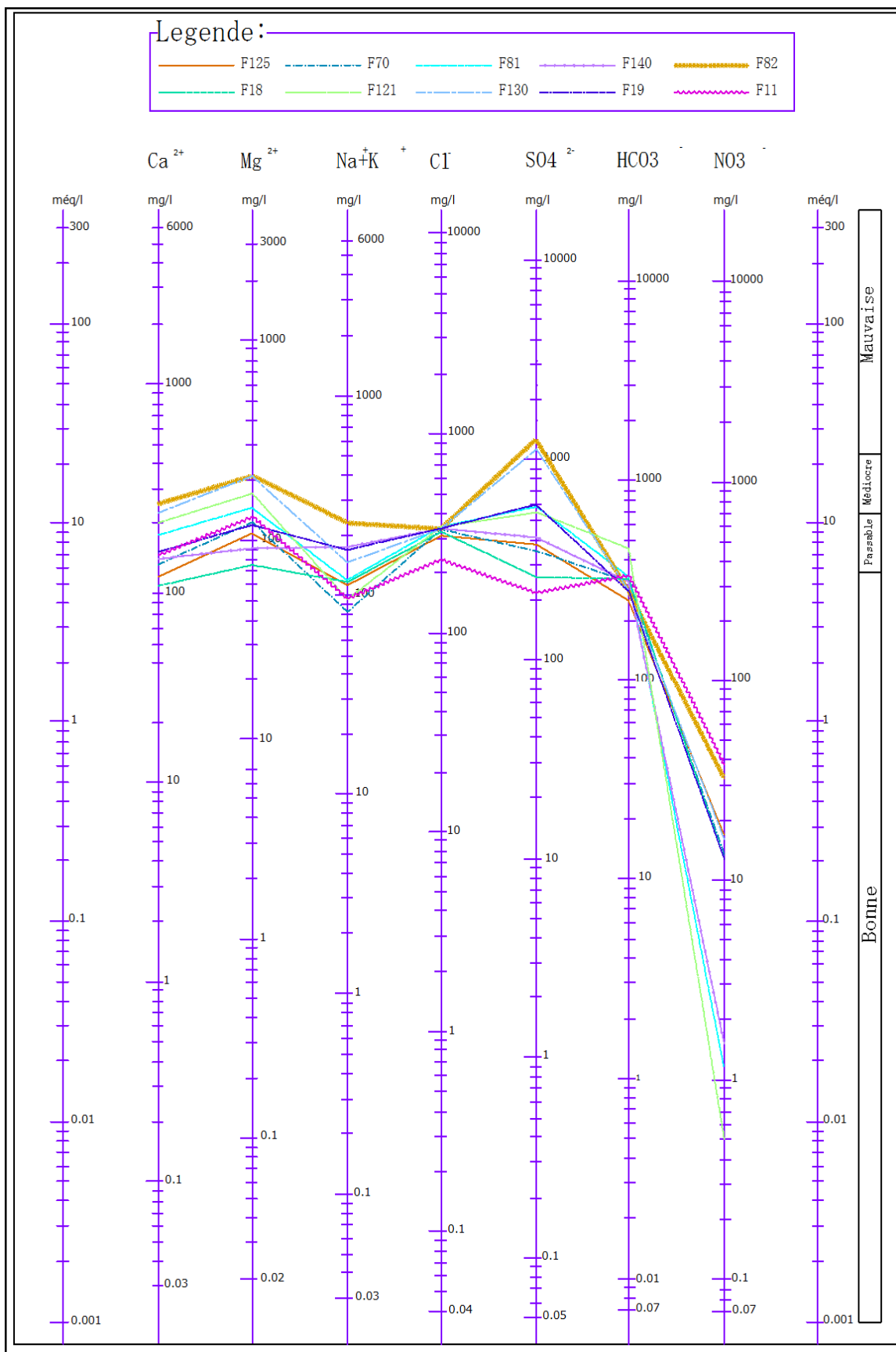


Figure VII.33: Diagramme de Schöeller pour dix points (Compagne des basses eaux)

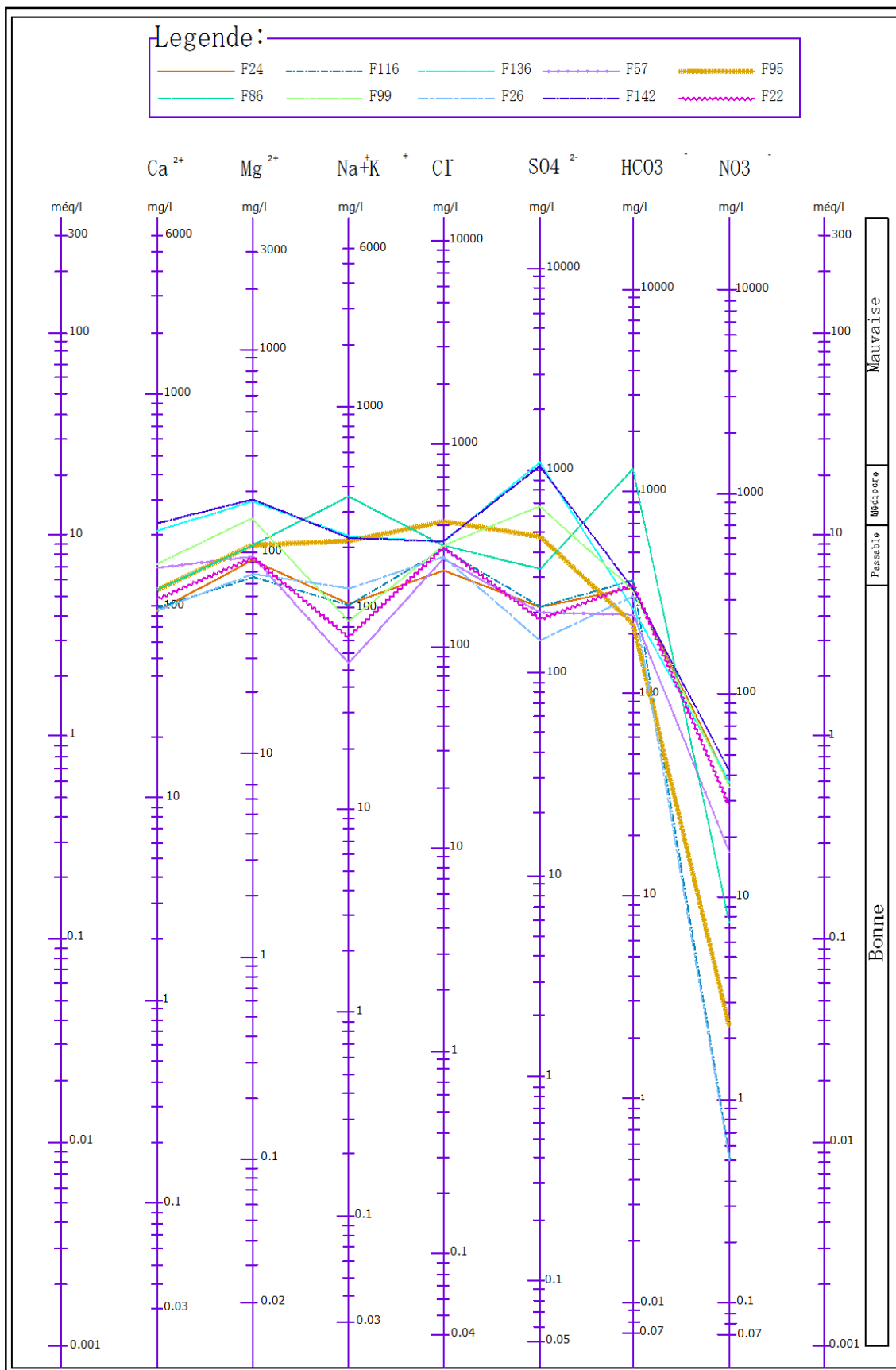


Figure VII.34: Diagramme de Schöeller pour dix points (Compagne des basses eaux)

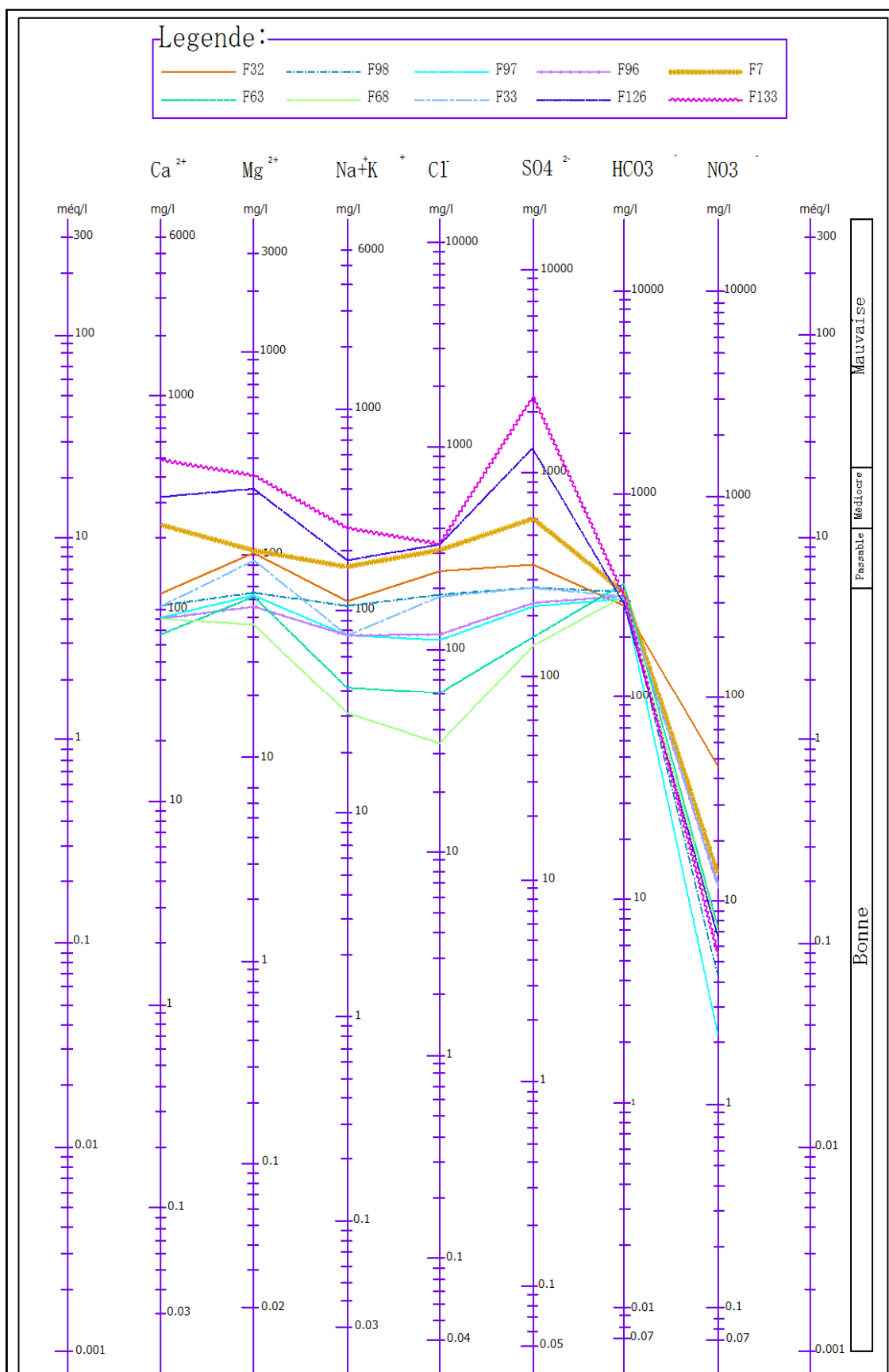


Figure VII.35 : Diagramme de Schöeller pour dix points (Compagne des hautes eaux)

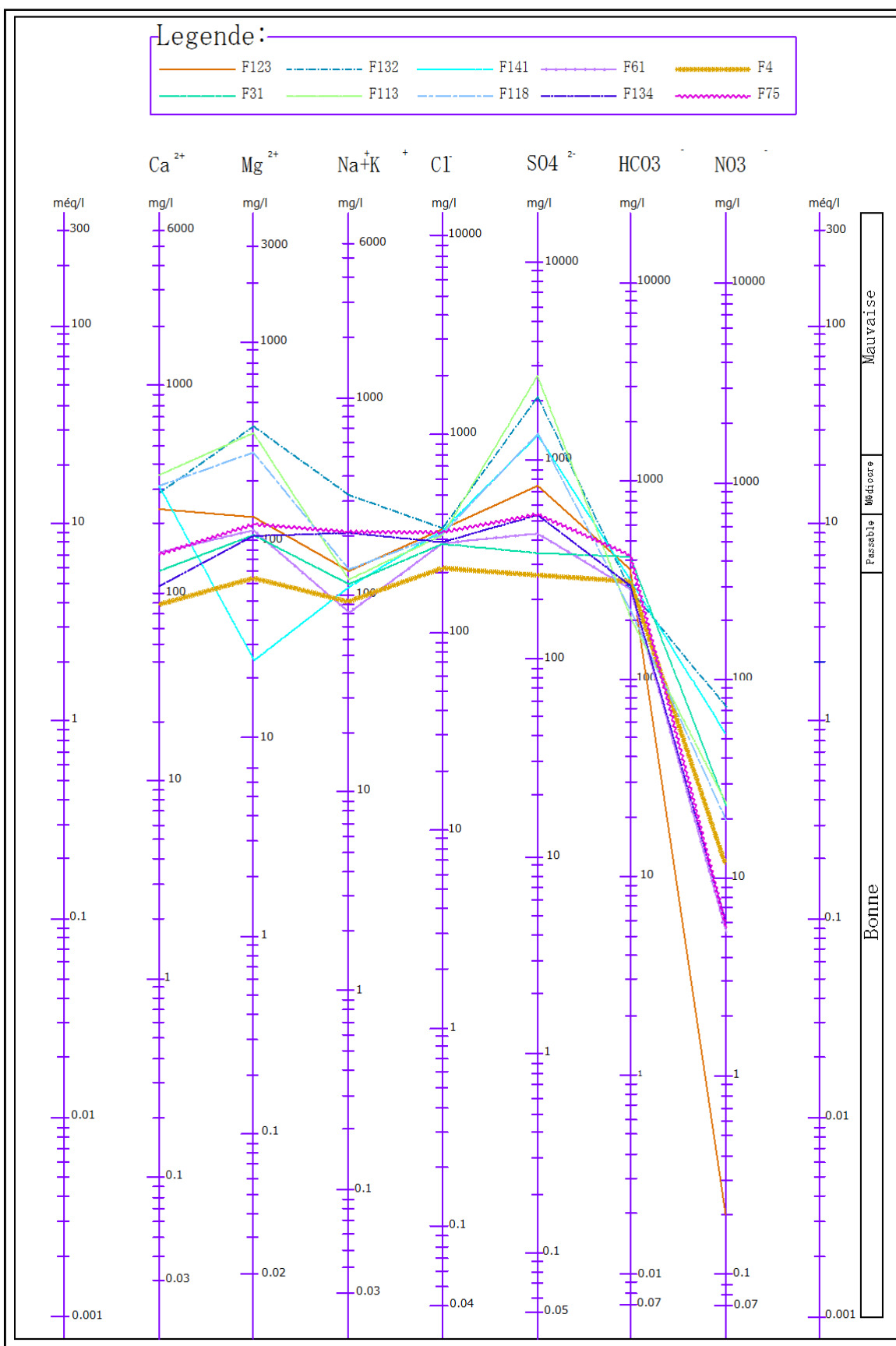


Figure VII.36 : Diagramme de Schöeller pour dix points (Compagne des hautes eaux)

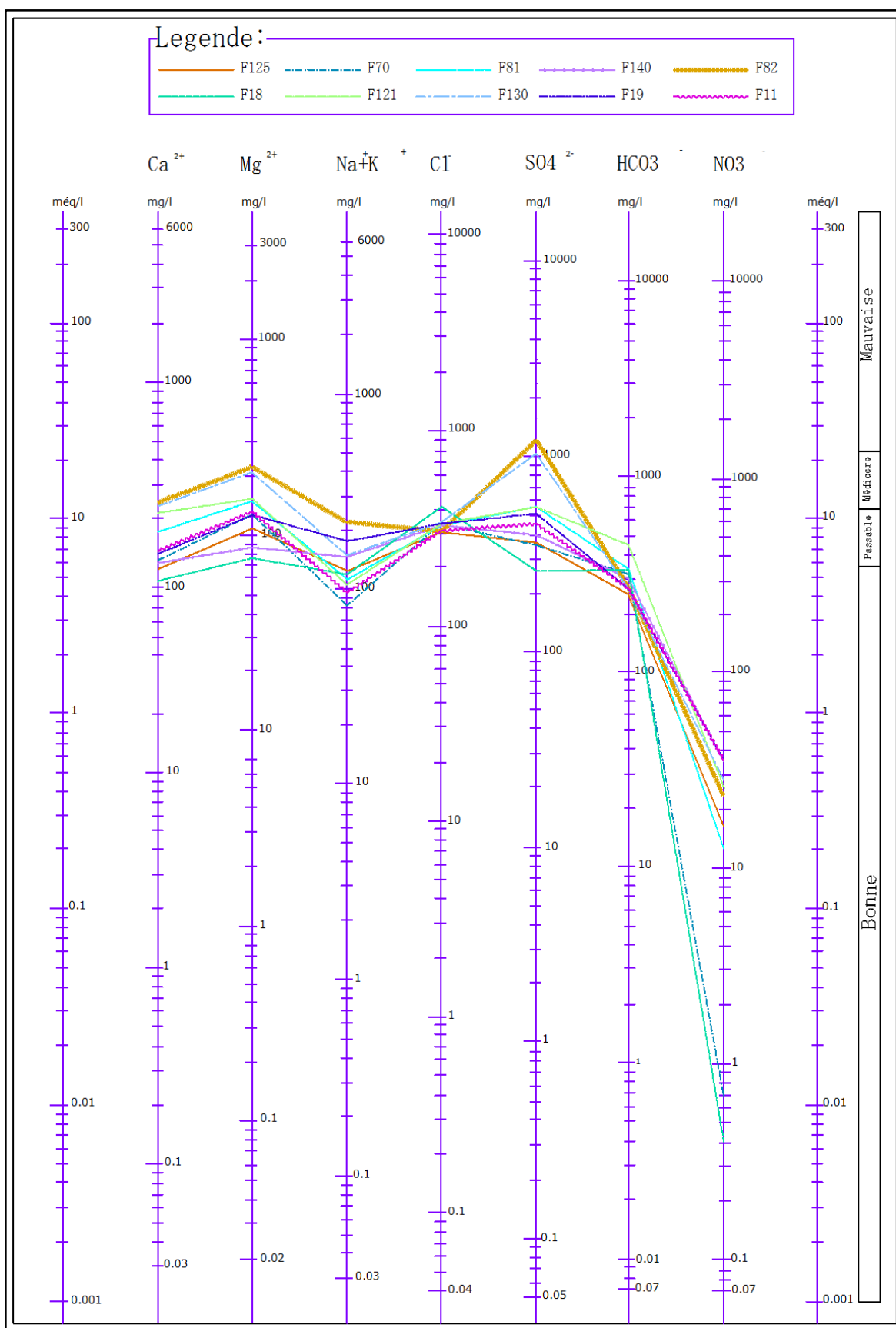


Figure VII.37 : Diagramme de Schöeller pour dix points (Compagne des hautes eaux)

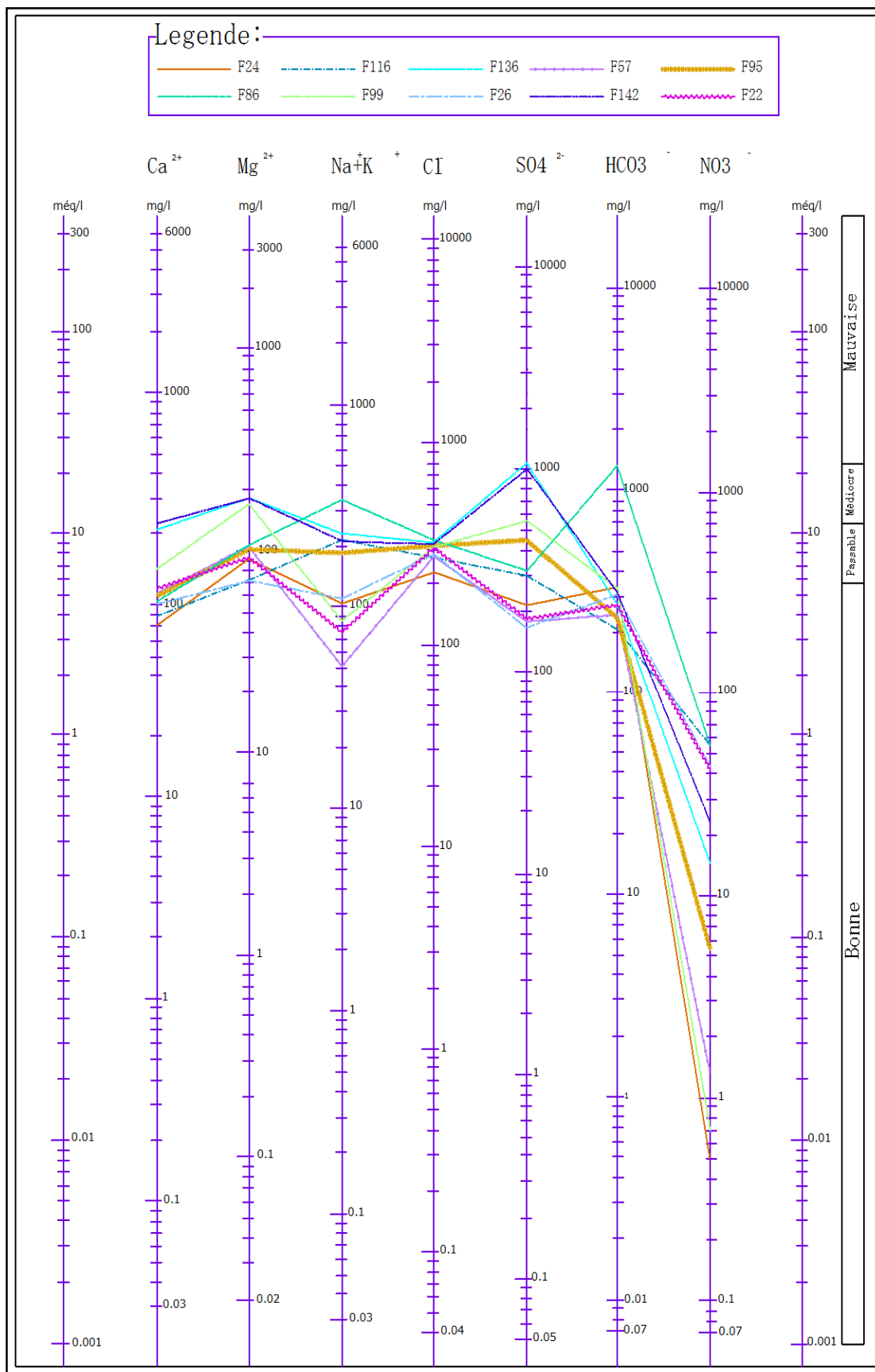
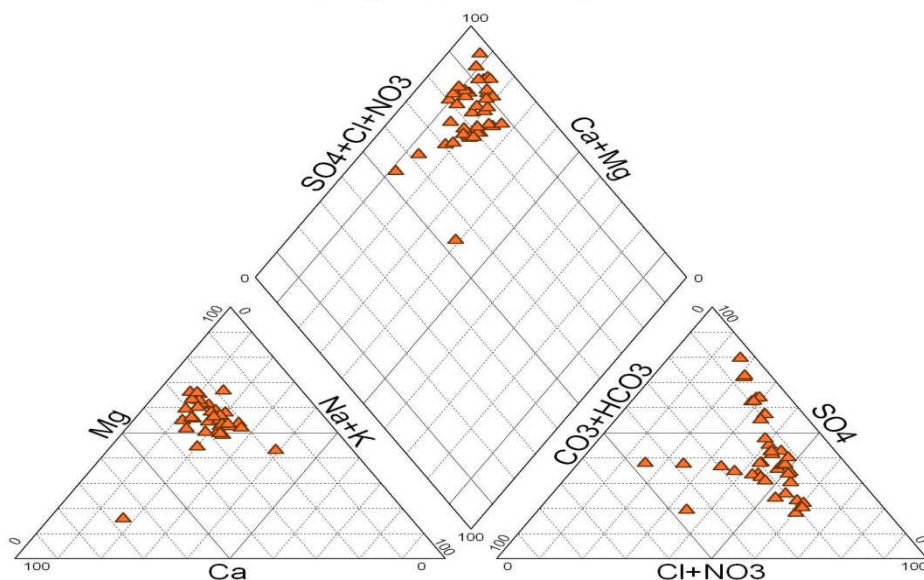


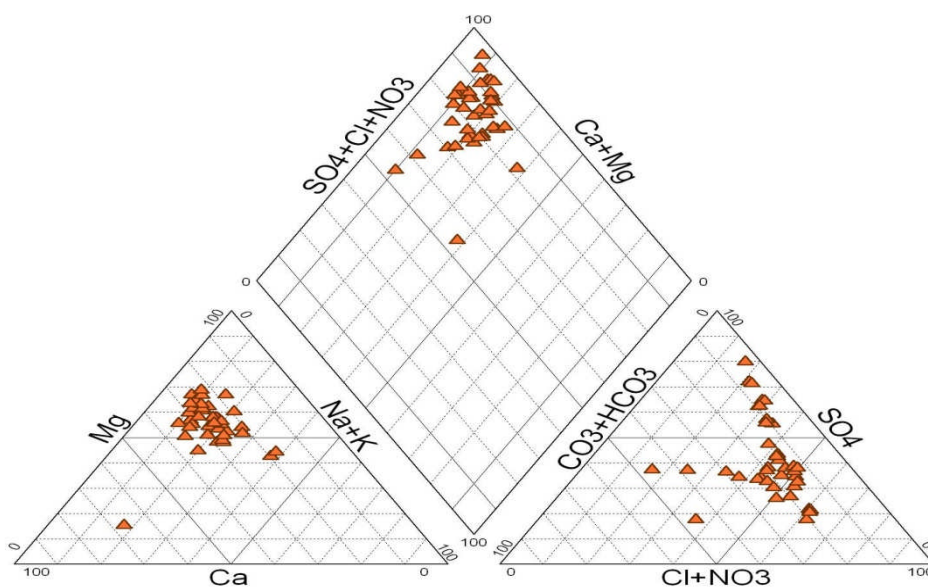
Figure VII.38 : Diagramme de Schöeller pour dix points (Compagne des hautes eaux)

La représentation des données sur le diagramme triangulaire de PIPER montre que :

- ❖ Pendant la période des basses eaux, le faciès hydrochimique dominant est le chloruré et sulfaté magnésien, figure VII.39.
- ❖ Pendant la période des hautes eaux, on a presque le même faciès hydrochimique qui est le chloruré et sulfaté magnésien, figure VII.40.



**Figure VII.39 : Diagramme de Piper
(Compagne des basses eaux)**



**Figure VII.40 : Diagramme de Piper
(Compagne des hautes eaux)**

VII.7. Indices d'échange de base

Lors de l'écoulement dans la nappe, l'eau rentre en contact avec certaines formations qui ont les propriétés d'échanger leurs ions contre ceux continus dans l'eau.

Selon SCHOELLER (1934) l'indice d'échange de base est le rapport entre les ions échangés et les ions de même nature primitivement existant. Si l'on admet qu'initialement

L'eau contient autant de $r\text{Cl}^-$ que de $r(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$, alors deux possibilités d'échange de base peuvent se produire:

❖ La première est l'échange des alcalins avec les alcalino-terreux, selon le modèle suivant:

$$I.E.B_1 = r\text{Cl}^- - r(\text{Na}^+ + \text{K}^+) / r\text{Cl}^-$$

❖ La deuxième est. l'échange des alcalino-terreux de l'eau avec les alcalins, selon le modèle suivant:

$$I.E.B_2 = r\text{Cl}^- - r(\text{Na}^+ + \text{K}^+) / r(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-)$$

VII.7.1. Interprétation des résultats

Le calcul de cet indice pour l'aquifère de la plaine de Zana, a donné des valeurs de l'I.E.B négatives pour les points d'eau 97,63,68,133,132,134,82,136,86 et 142 pour la période des basses eaux, pour les points d'eau 97,63,68,133,132,134,82,136,86, et 142 pou la période des hautes eaux Or cet indice est positif pour l'ensemble des échantillons qui restent, voir annexes VIII et XIV

❖ Quand l'I.E.B < 0, la formation aquifère encaissante libère le sodium et le potassium et garde le calcium.

❖ Quand l'I.E.B > 0, la formation aquifère encaissante libère le calcium et garde le sodium et le potassium.

VII.8 Qualité des eaux:

Les eaux souterraines ne sont pas chimiquement pures, elles contiennent toujours une certaine quantité de sels dessous qui confèrent une certaine saveur, odeur et couleur nécessaire et acceptable jusqu'à un seuil de potabilité fixé par des normes établis par les responsables de la santé publique. Pour notre cas, on utilise les normes de l'O.M.S.

VII.8.1 Teneurs maximales admissible pour l'A.E.P

VII.8.1.1 Calcium et Magnésium

Ils n'existent pas de limites pour la teneur en calcium, mais une eau dure présente de nombreux inconvénients. Pour l'usage domestique. On note alors, une augmentation de la consommation du savon et de la durée de cuisson. A cause de son effet laxatif, le magnésium provoque un trouble digestif chez l'enfant pour des teneurs supérieur à 1 g/l.

L'O.M.S donne des limites pour le Ca^{2+} de 100 à 400 mg/l et pour le Mg^{2+} la teneur admissible est 150 mg/l.

VII.8.1.2 Sodium et potassium

L'effet de potassium est mineur sur le corps humain. A partir de 34 mg/l on remarque que l'eau commence à avoir un léger goût. Le sodium n'est laxatif qu'à de très forte concentration 1 g/l. l'O.M.S recommande une valeur de 200mg/l.

VII.8.1.3 Carbonates et bicarbonates

La concentration des bicarbonates et des carbonates dans l'eau est essentiellement fonction des conditions d'équilibre, la présence d'anhydrite carbonique dans l'eau, donne une saveur agréable et ne présente aucun inconvénient pour la santé humaine.

VII.8.1.4 Les chlorures

Les chlorures sont dangereux pour les personnes atteintes de maladies cardio-vasculaires, mais en général des teneurs de 700mg/l de NaCl ne présentent aucun inconvénient pour l'homme. L'O.M.S recommande une valeur de 250mg/l pour une eau destinée à la consommation humaine.

VII.8.1.5 Les nitrates

L'O.M.S fixe une valeur limite de 50mg/l pour l'eau potable si la concentration dépasse ce seuil, elle provoque une irritation des muqueuses et les quantités supérieures à 2g/l entraîne des nausées, un vomissement et provoquent des sels sanguins lents.

D'après les normes de potabilité de l'organisation mondiale de la santé ; on distingue que les eaux souterraines de la nappe superficielle de la plaine de Zana soit dans la majorité (70%) sont potables.

VII.8.2 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).

VII.8.2.1 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 $\mu\text{s}/\text{cm}$ est inférieure à 700, il n'y aucune restriction pour l'irrigation;
- ❖ Si la conductivité variée entre 700 et 3000 $\mu\text{s}/\text{cm}$, la restriction pour l'irrigation est légère à moyenne;
- ❖ Si elle est supérieure à 3000 $\mu\text{s}/\text{cm}$, la restriction pour l'irrigation est forte.

L'examen du tableau VII.3 montre que la majorité des points d'eau de la plaine de Zana représentent une restriction légère à modérée pendant les deux saisons avec 48 à 53%, et une restriction forte comprenant 47 à 52% 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 VII.4

Tableau VII.3 Directives pour l'interprétation de la qualité d'une eau d'irrigation (salinité)

Restriction pour l'irrigation	Conductivité électrique ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	Pourcentage des échantillons	
		B.EAUX	H.EAUX
Aucune	< 700	0	0
Légère à modéré	700-3000	48	53
Forte	>3000	52	47

Tableau VII.4 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
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.

VII.8.2.2 Eaux peu salées:

Les eaux peu salées dont la conductivité électrique est inférieure à 200 µs/cm ont une forte tendance à mobiliser rapidement le calcium du sol ce qui entraîne la dispersion des particules fines 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.

VII.8.2.3 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 devient 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 Ratio) (S.A.R). Pour une même conductivité, le risque 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) :

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

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 absorbant le calcium ou le magnésium, voir annexes IX et X.

Le tableau VII.5, récapitule les résultats obtenus après interprétation des diagrammes de Richards, figure VII.41 et VII.42.

Tableau VII.5: Degré d'aptitude à l'irrigation selon SAR.

Classes		% des échantillons	
		Basses Eaux	Hautes Eaux
Admissible	C3S1	37.5	40.0
Médiocre	C4S1	60.0	57.5
Mauvaise	C4S2	2.5	2.5

On remarque une amélioration due à un échange de base de la première période à la dernière. On peut dire que la plus grande partie des eaux de la plaine sont acceptables (admissible et médiocre) et peuvent être exploitées pour l'irrigation.

VII.8.2.4 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, voir annexes XI et XII

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

Cette classification définit cinq classes d'eau, 1: excellente, 2: bonne, 3: admissible, 4: médiocre, 5: mauvaise.

On ce qui nous concerne les diagrammes de Wilcox (Figures VII.44 et VII.43) donne quatre classes:

Tableau VII.6 Classification des eaux d'irrigation selon Wilcox

Classes	% des échantillons	
	Basses Eaux	Hautes Eaux
Excellente	2.5	2.5
Bonne	15.0	22.5
Médiocre	27.5	27.5
Mauvaise	55.0	47.5

Selon le tableau ci-haut 27.5% des points d'eau pendant les deux périodes sont médiocres et 47.5 à 55% des points d'eau sont de mauvaise qualité ; Tandis que 15 à 22.5% de ces points sont de bonne qualité et seulement 2.5 % sont excellente

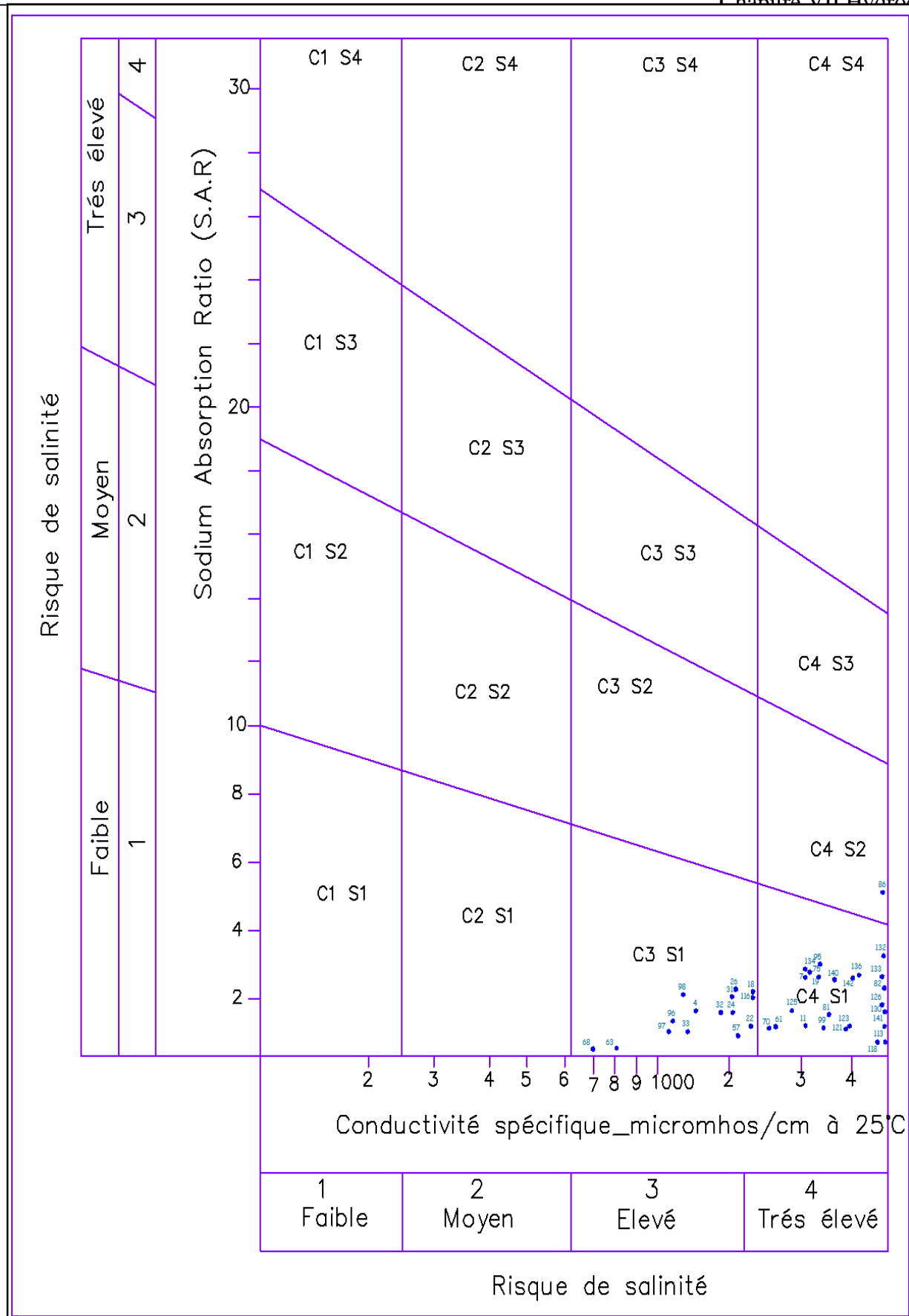


Figure VII.41 : Diagramme du S.A.R (Compagne des basses eaux)

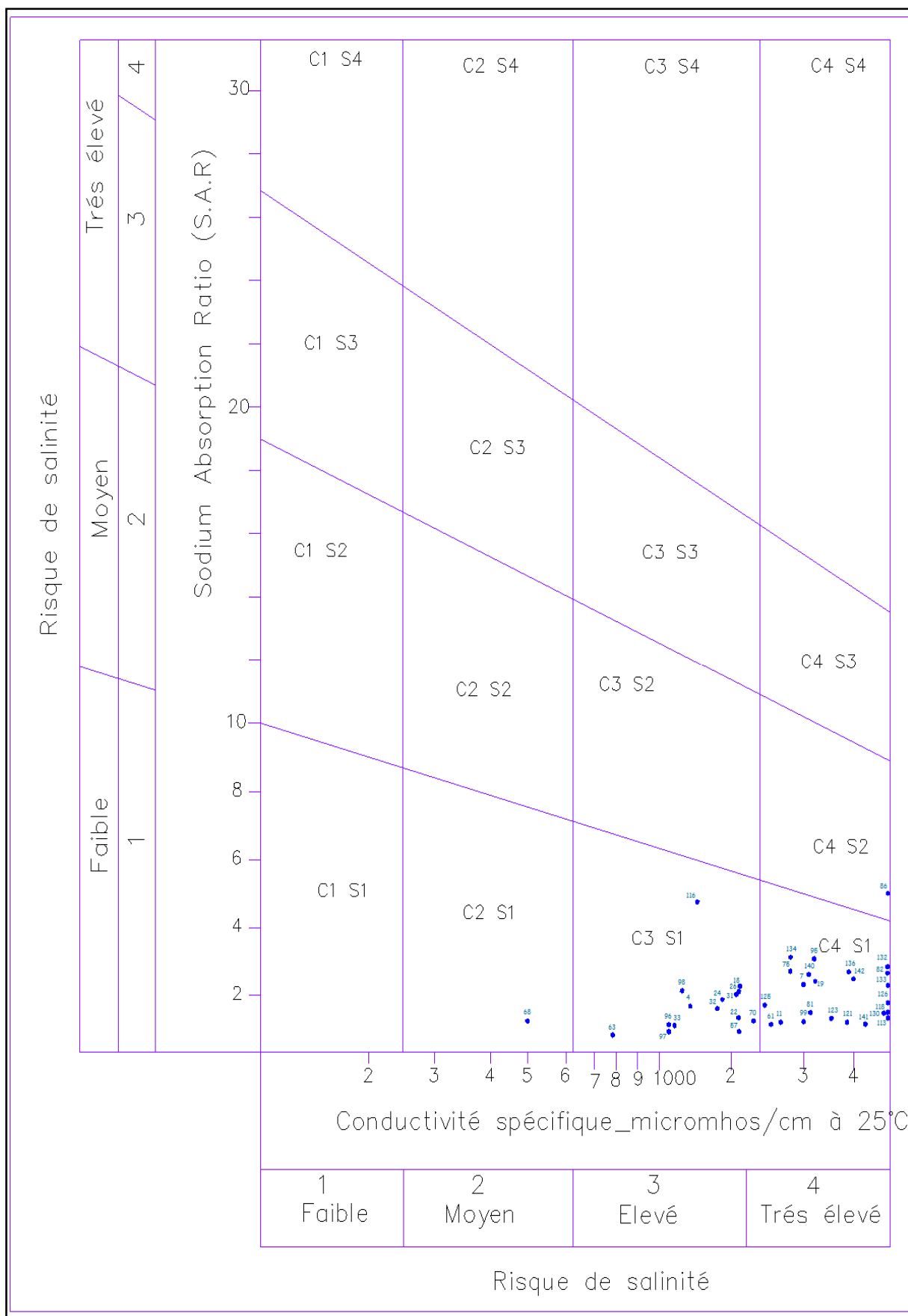
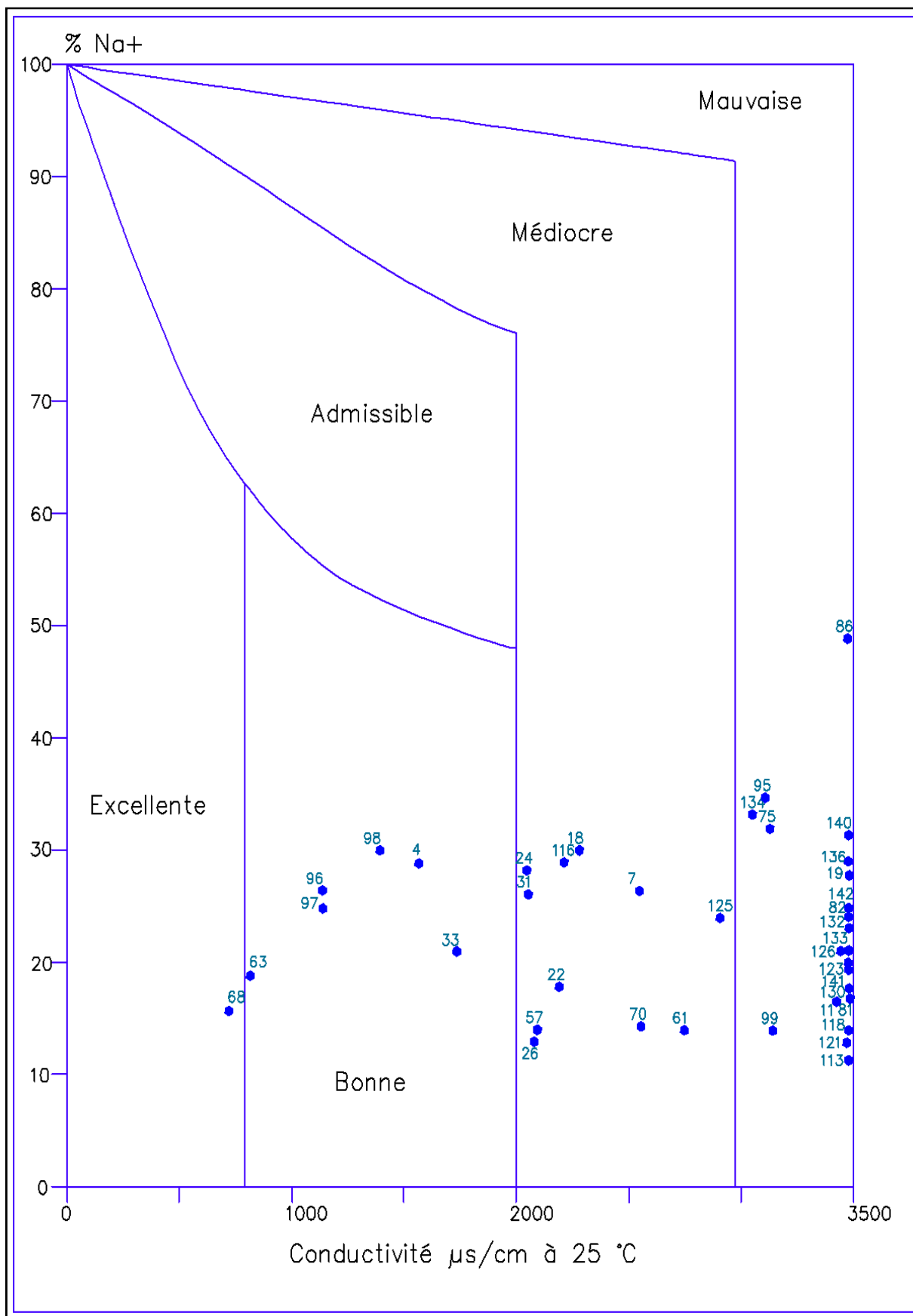
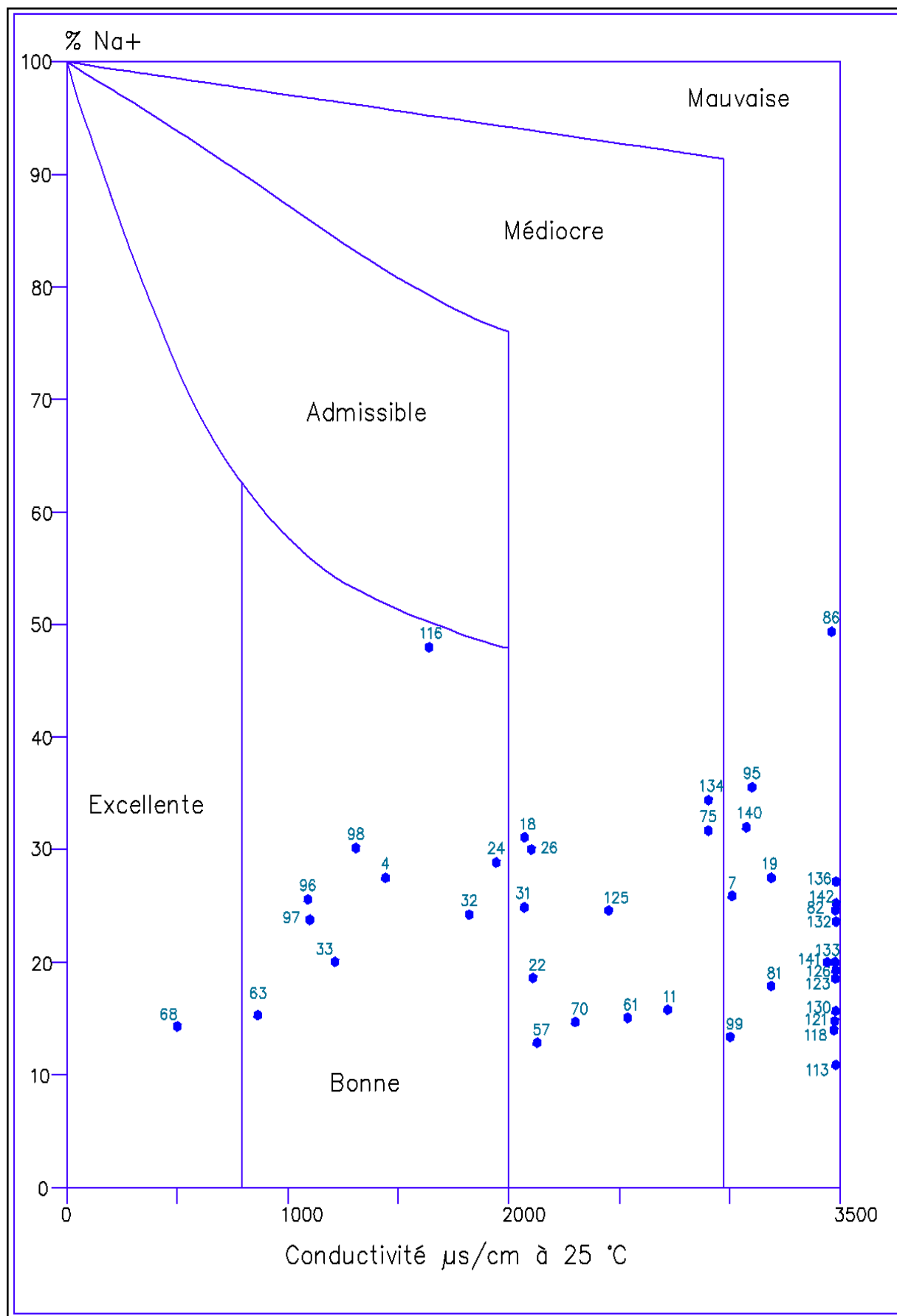


Figure VII.42 : Diagramme du S.A.R (Compagne des hautes eaux)



**Figure VII.43 : Diagramme Wilcox
(Compagne des basses eaux)**



**Figure VII.44 Diagramme Wilcox
(Compagne des hautes eaux)**

VII.9 Analyse en composantes principales

VII.9.1 Introduction

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 (T en °C, pH sans unité, teneurs en méq/l, ...) 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.

VII.9.2 Projection des variables

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 (58.41%), 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 liés les uns aux autres. Ceci s'est répercuté sur la matrice de corrélation où on a eu une corrélation significative entre Ca, Mg, Na, K, SO₄, NO₃, Cl et conductivité. Il faut signaler que quarante (40) individus ont été introduits avec neuf (09) variables. Le coefficient de corrélation critique tiré du tableau de Mangin (annexe II) est égal à 0,568 au seuil de 5% soit $r^2 = 0,32$. 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 HCO₃ qui proviennent des formations carbonatées (tableau VII.8).

L'analyse du plan factoriel 1-2 (figure VII.45) 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 1 est fortement déterminé, négativement, par la conductivité, SO₄, Ca, Mg et d'une façon moindre par Na, K et Cl. Donc ce facteur est déterminé négativement par le gypse

et le sel gemme donc par les évaporites. Le facteur 2 est déterminé, positivement, par HCO₃, donc c'est le facteur des formations carbonatées.

Sur le plan factoriel 1-3 (figure VII.46), le facteur 3 est déterminé négativement 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 VII.7 Matrice de corrélation des variables.

	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	HCO ₃	NO ₃	Conductivité
Ca	1.00								
Mg	0.76	1.00							
Na	0.58	0.64	1.00						
K	0.55	0.47	0.75	1.00					
Cl	0.52	0.51	0.53	0.48	1.00				
SO ₄	0.91	0.85	0.63	0.55	0.42	1.00			
HCO ₃	-0.15	-0.23	-0.10	-0.14	0.03	0.31	1.00		
NO ₃	0.34	0.33	0.30	0.23	0.41	0.36	-0.24	1.00	
conductivité	0.89	0.86	0.77	0.63	0.61	0.89	-0.17	0.43	1.00

Tableau VII.8 Corrélation facteurs-variables.

Désignation	Fact. 1	Fact. 2	Fact. 3
Ca	<u>-0.89</u>	0.00	0.16
Mg	<u>-0.87</u>	-0.08	0.16
Na	<u>-0.82</u>	0.22	0.05
K	<u>-0.73</u>	0.21	0.07
Cl	<u>-0.67</u>	0.33	-0.43
SO ₄	<u>-0.91</u>	-0.17	0.24
HCO ₃	0.25	<u>0.88</u>	-0.06
NO ₃	-0.49	-0.29	<u>-0.76</u>
Conductivité	<u>-0.97</u>	0.04	0.06

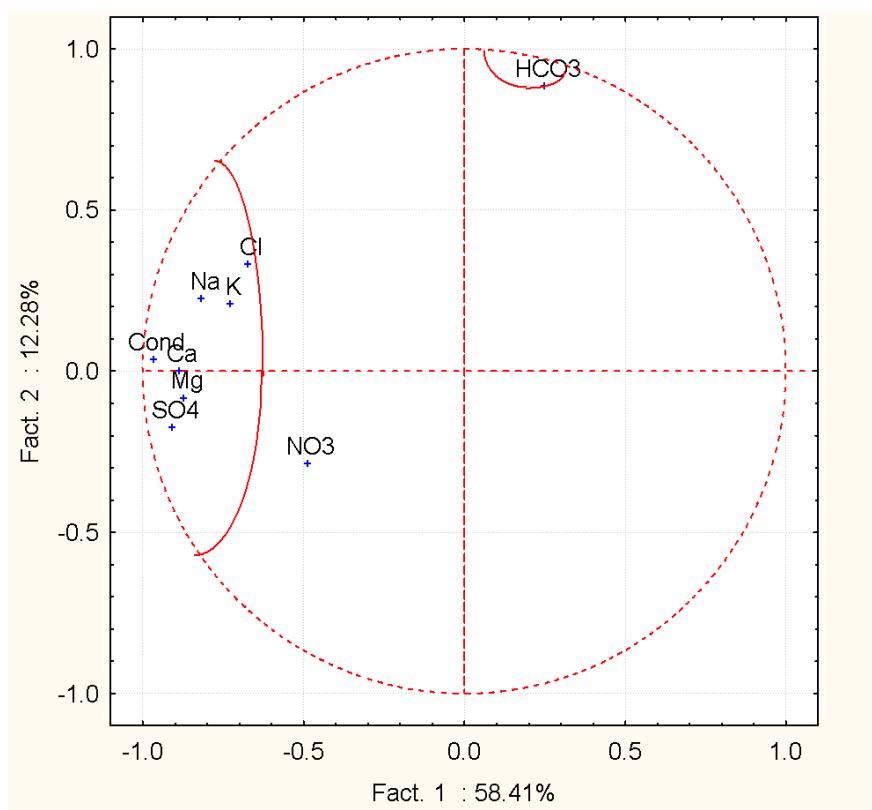


Figure VII.45 – Cercle des corrélations, plan F1-F2.

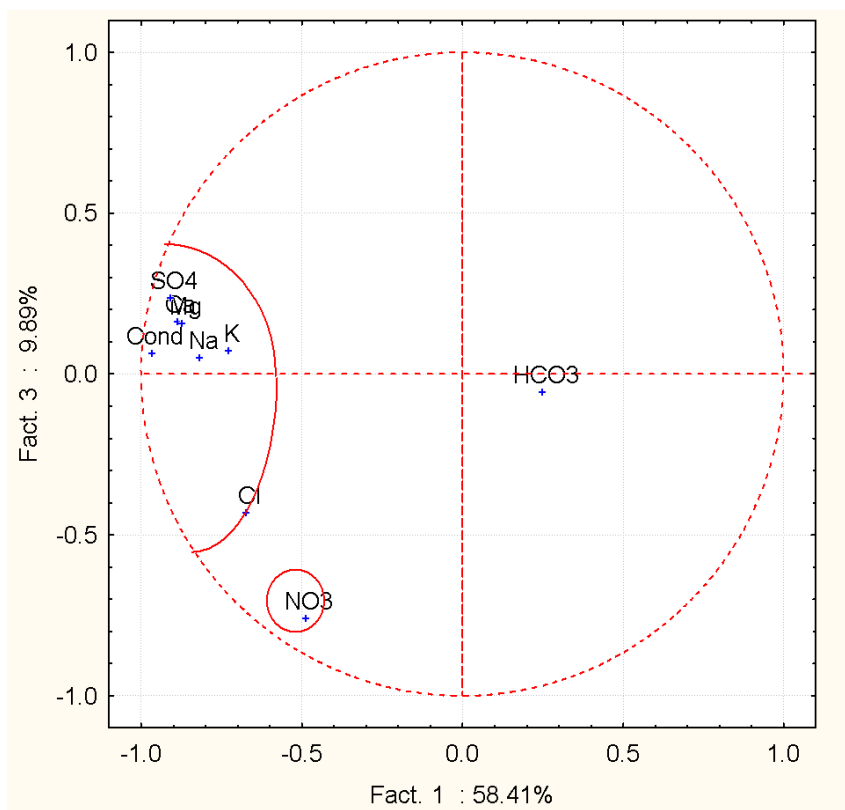


Figure VII.46 – Cercle des corrélations, plan F1-F3.

VII.9.3 Etude de l'origine des éléments chimiques

VII.9.3.1 Couple (Na^+/Cl^-)

Dans les eaux naturelles, le sodium et les chlorures sont souvent liés à la dissolution de l'halite (NaCl). 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^+ et Cl^- (figure VII.47A) montre que la majorité se trouvent au dessous de la droite de pente égale à 1, traduisant une origine autre que l'halite et que seulement quelques points ont une origine de l'halite.

La projection des différents points sur le diagramme $\text{Ca}^{2+}/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}) - \text{Na}^+/\text{Cl}^-$ (figure VII.47B) montre que les eaux de 31 points sur 40 présente l'état naturel, quand aux eaux des neufs points restants elles subissent un échange de base.

VII.9.3.2 Les éléments ($\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-$)

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 évaporitiques.

La représentation graphique du calcium en fonction des bicarbonates (figure VII.48B), montre une origine évaporitique et carbonatée.

La représentation graphique des teneurs en Ca^{2+} en fonction de $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ (figure VII.48A), montre une origine carbonatée du calcium.

VII.9.3.3 Le rapport Conductivité électrique – $\text{HCO}_3^- / (\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})$

On remarque que les points ayant une conductivité inférieure à 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ converge vers le pôle carbonaté (dominance des ions HCO_3^-) et les points ayant une conductivité supérieur converge vers le pôle évaporitique (dominance des ions Cl^- et SO_4^{2-}) (figure VII.49).

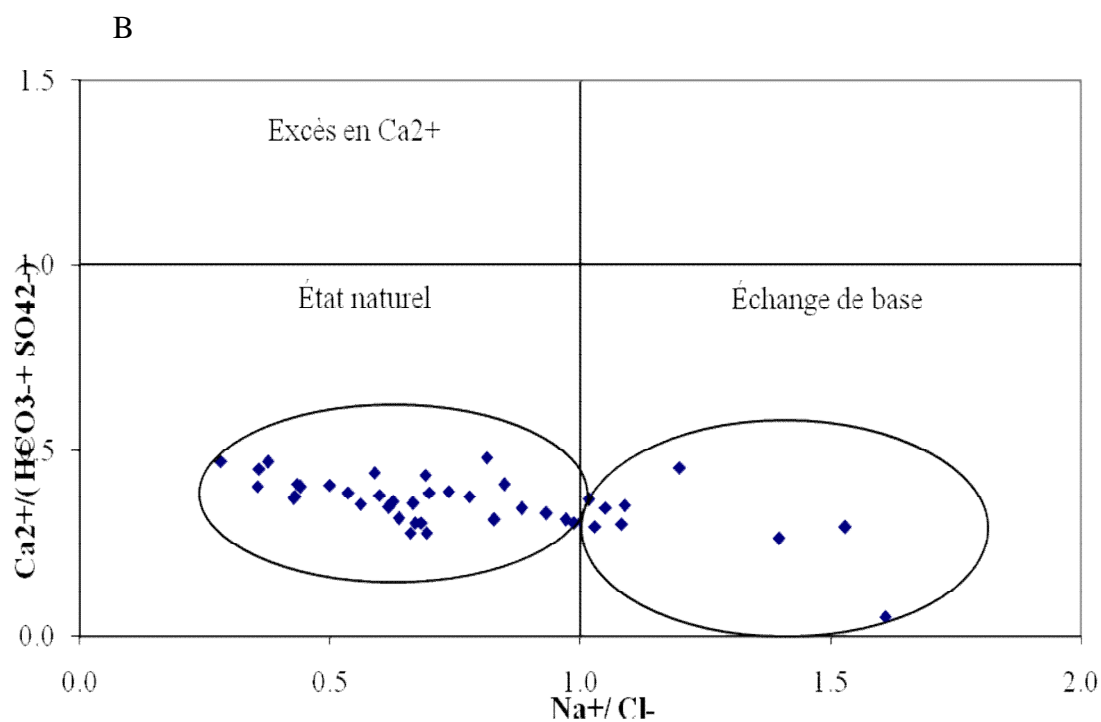
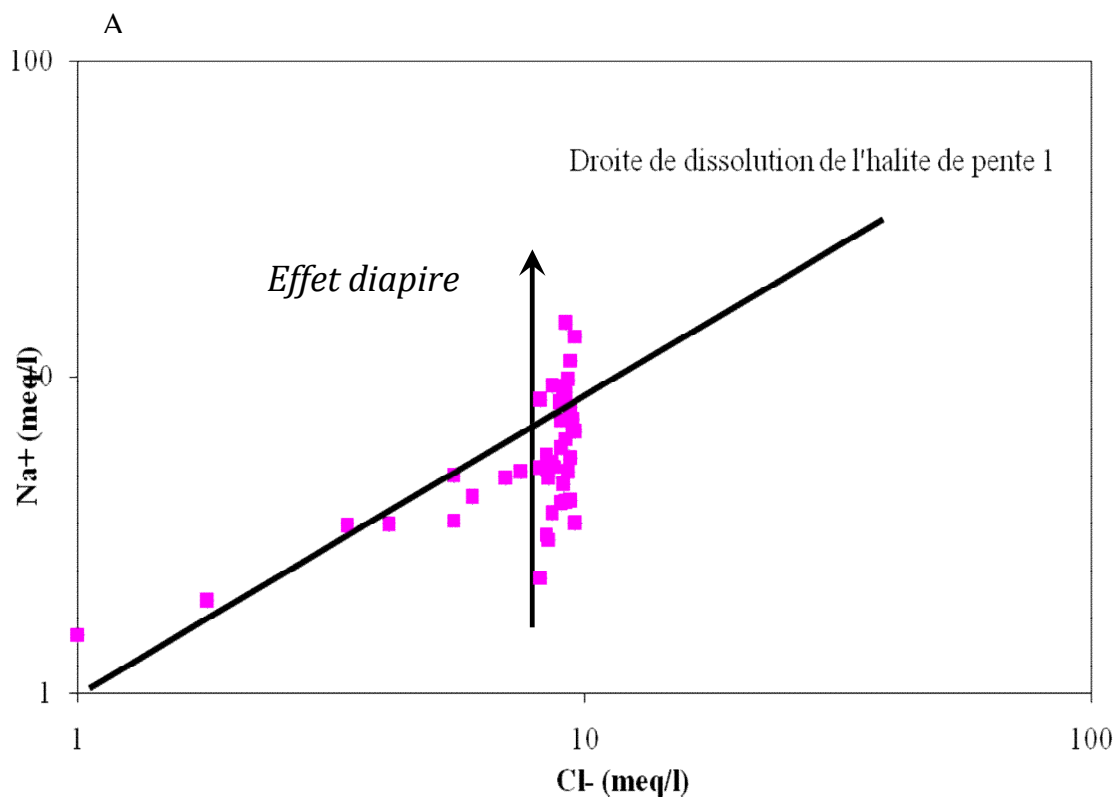


Figure VII.47 – Echange de base.

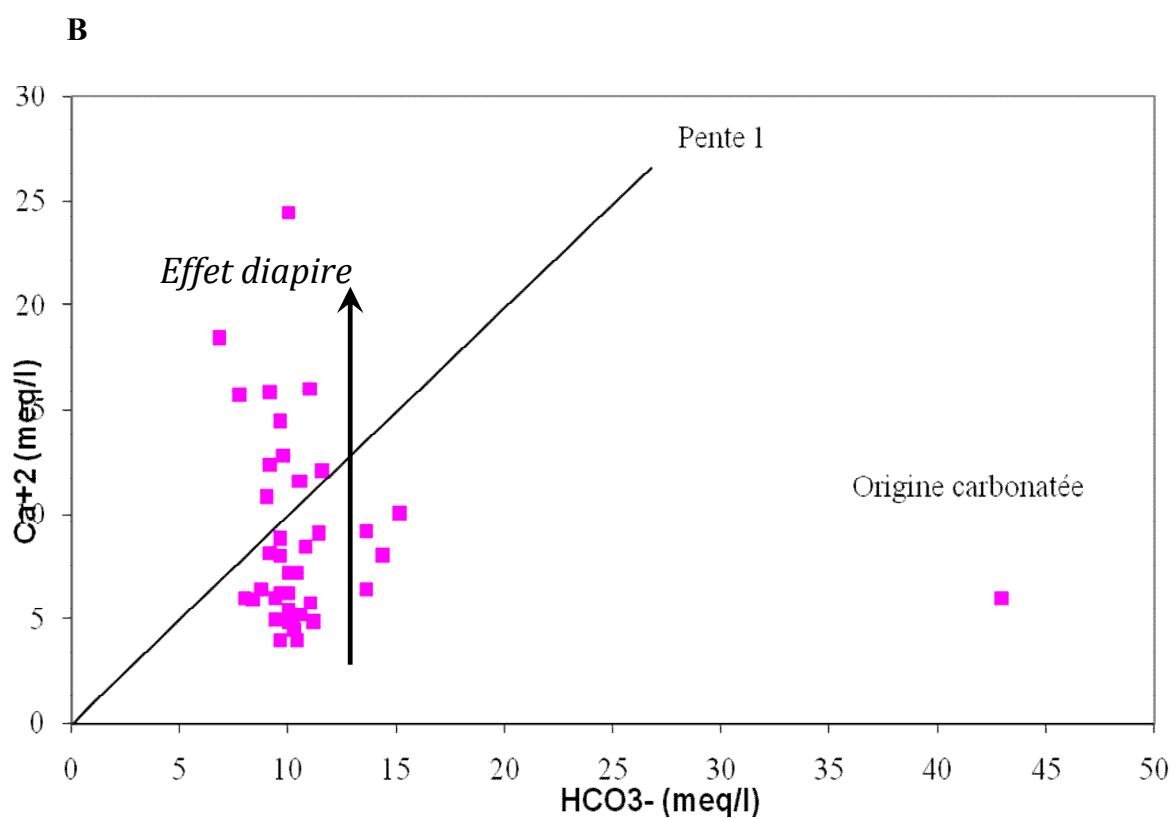
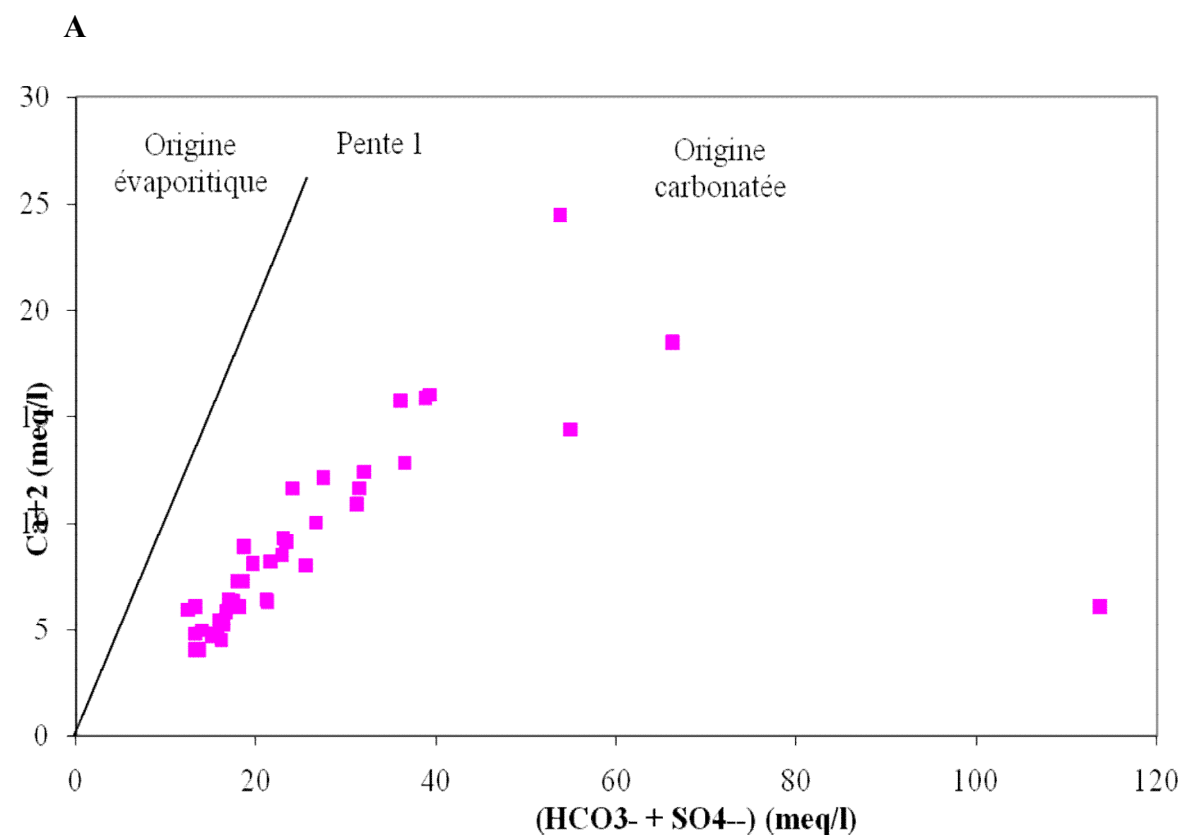


Figure VII.48 – Origine du calcium.

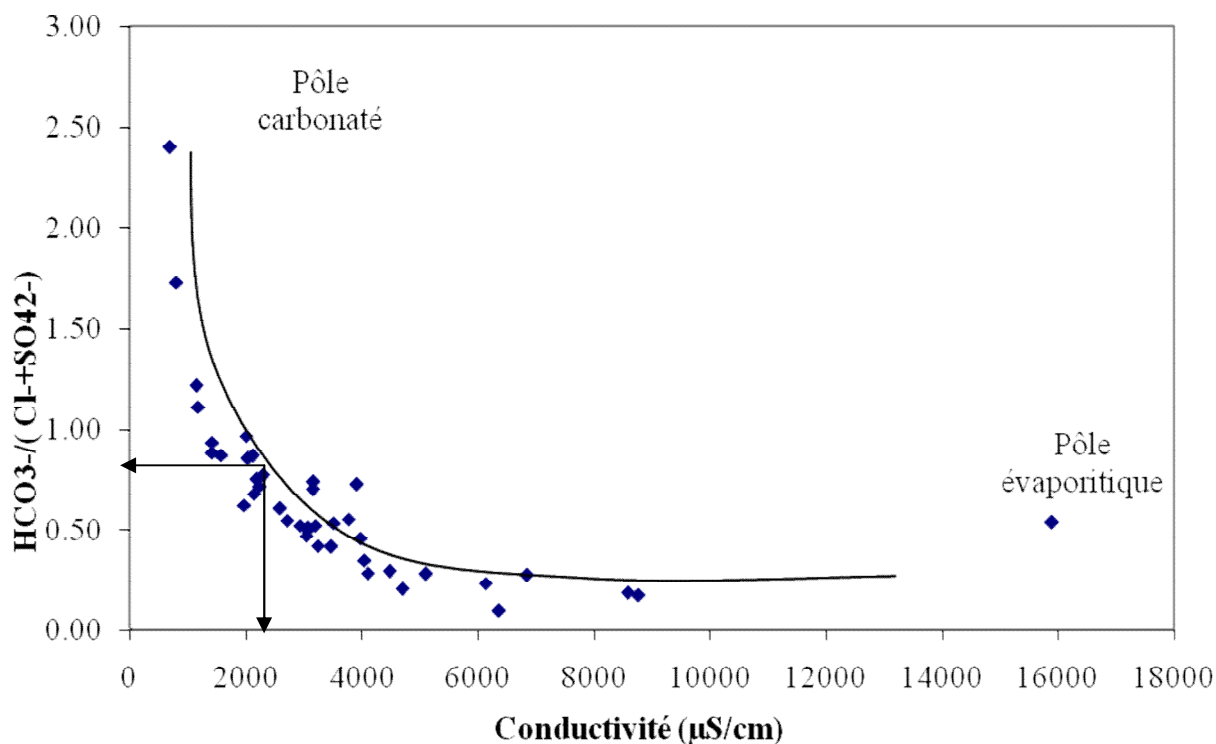
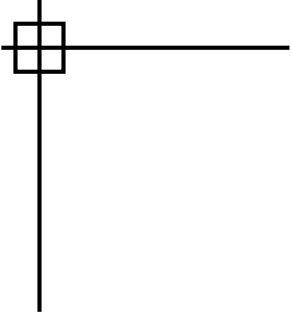


Figure VII.49 – Origine de la salinité.

VII.10 Conclusion

Les conclusions suivantes pourront être tirées à partir de l'étude hydrochimique des eaux de la plaine de Zana:

- ❖ Les eaux de cette zone possèdent une forte salinité;
- ❖ On a une dominance de l'anion SO_4^{2-} sur HCO_3^- et Cl^- et du cation Mg^+ et Ca^+ sur Na^+ et K^+ ;
- ❖ Le faciès observé est du type sulfaté magnésien et chloruré magnésien;
- ❖ Les eaux de la plaine sont plus sulfatées que chlorurées à cause du lessivage des terrains riches en sulfates et au engrais à base de sulfates utilisés pour l'agriculture ;
- ❖ L'élément Ca^{2+} proviennent à la fois des formations carbonatés et évaporitiques;
- ❖ La majorité des points d'eau de la plaine de Zana sont acceptables et peuvent être exploitées pour l'irrigation pendant les deux saisons ;
- ❖ La majorité des points d'eaux analysés présente une qualité d'eau bonne à moyenne pour la consommation humaine.



Huitième chapitre

Pollution

Introduction

Au cours des dernières années, les techniques agricoles ont évolué très rapidement entraînant la mécanisation poussée avec un usage abusif des produits chimiques (Pesticides et engrais) dans l'exploitation des terres agricoles. Les activités se sont de plus en plus spécialisées, culture céréalière, élevage, arboriculture, etc. La concentration élevée par unité de surface crée une pression sur l'environnement et mérite une attention spéciale. En ce qui concerne la qualité de l'eau, la concentration d'éléments chimiques utilisés (pesticide, engrais et fumier) par unité de surface touche directement sa qualité.

VIII.1 Origine des éléments azotés

VIII.1.1 Origine atmosphérique

La dégradation des eaux souterraines liée à la présence du nitrate est connue. En l'absence de toute fertilisation azotée, on trouve néanmoins toujours des nitrates dans les sols. Ceux-ci proviennent de la fixation de l'azote atmosphérique par certaines espèces végétales, les légumineuses. Figure VIII.4, qui sont capables, grâce à des bactéries qui vivent en symbiose avec elles, de capter l'azote et de le transformer en matière organique azotée dans leurs racines. Quand la plante a fini son cycle saisonnier, cette matière organique azotée est peu à peu décomposée par les bactéries nitrifiantes du sol, et transformée en nitrates. Ces nitrates sont à leur tour utilisés par les autres espèces végétales pour leur propre croissance, car on rappelle que pour se développer, les végétaux ont besoin de trouver dans le sol trois éléments majeurs : nitrates, phosphates, et potassium, qui sont d'ailleurs les principaux fertilisants apportés par l'agriculture industrielle. On estime qu'un sol normal contient environ 1000 kg d'azote (N) par hectare, sous forme de matière organique plus ou moins fraîche ou en cours de décomposition, et on estime la concentration naturelle en nitrates des eaux souterraines en l'absence de fertilisation à 5 à 15 mg/l en NO_3 .

VIII.1.2 Origine anthropique

Tout changement de l'occupation du sol peut venir perturber ce cycle naturel. On sait par exemple que le labourage d'une prairie, le défrichage d'une forêt, l'assèchement d'une zone marécageuse engendrent inévitablement une augmentation du flux de nitrates vers les nappes, car le stock de matière organique se décompose et s'oxyde plus vite, libérant ainsi des nitrates. Même sans apport d'engrais, de tels changements d'occupation du sol peuvent entraîner une augmentation pendant quelques dizaines d'années des teneurs en nitrates dans les nappes sous-jacentes, jusqu'à ce que le système retrouve un nouvel équilibre.

Une dernière source naturelle de nitrates dans les eaux est due à l'urine des animaux. Celle-ci

contient de l'ammoniac et de l'urée (contenant de l'azote), qui peuvent être rapidement oxydés en nitrates dans les sols. Dans les pays arides, les animaux viennent s'abreuver autour des rares points d'eau, et en général urinent en buvant. Les alentours des points d'eau sont alors en général riches en nitrates.

VIII.1.2.1 Les sources anthropiques des nitrates dans le sol.

Le changement d'occupation des sols peut être une source d'origine anthropique des nitrates dans les sols, mais la source majeure est l'apport d'engrais azotés. Cet apport peut se faire soit directement sous forme de nitrates, soit sous forme d'ammoniac, ou d'urée, lesquels se transformeront dans le sol en nitrates, comme cela se fait pour l'ammoniac de l'urine ou la matière organique naturelle azotée. Dans le cas d'épandage de lisiers d'élevage, c'est la forme ammoniacuée qui domine. Certains engrais cumulent les deux formes, par exemple le nitrate d'ammonium, qui dans les sols libérera immédiatement les nitrates, puis plus lentement produira un flux de nitrates issu de l'oxydation de l'ammoniac.

La majorité de cet azote est consommé par les plantes. Cependant, comme pour les nitrates d'origine naturelle, une fraction des nitrates présents dans les sols est lessivée par l'eau de pluie et peut rejoindre soit directement les cours d'eau, s'ils existent soit s'infiltrer vers les nappes. L'agriculteur, fera des apports peu après les semis, sous forme directement assimilable (nitrates). Si une pluie survient juste après l'épandage, les nitrates peuvent être lessivés et emportés, et il faudra refaire un apport. Si l'agriculteur utilise un engrais moins directement assimilable (ammoniac, urée), il faudra que la décomposition de cet apport (fonction de l'humidité du sol, de la température, etc) se fasse au rythme de la demande de la végétation, ce qui est plus hasardeux, à moins d'en mettre en excès. L'idéal pour la protection des eaux serait qu'à la fin de la saison culturale, la végétation ait consommé tous les nitrates apportés, afin que la saison pluvieuse qui suit ne puisse lessiver que peu de nitrates. Il faudrait donc viser très juste, et ne mettre que ce dont les cultures ont réellement besoin. C'est faisable, il faut bien mesurer le stock d'azote déjà présent dans le sol en début de culture, et n'apporter que parcimonieusement l'engrais, en plusieurs fois.

VIII.2 La migration des nitrates

VIII.2.1 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'infiltré dans les sols. Cette infiltration va se faire en hiver parce que la pluie qui tombe au printemps et en été ne s'infiltré 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, de l'ordre de 1 à 2 m/an. 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. 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.

VIII.2.2 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.

VIII.3 Elimination naturelle des nitrates

Les nitrates une fois arrivés en profondeur, ils subsistent dans la nappe, pendant tout le temps où ils y migrent. Il y a cependant trois cas importants où une élimination naturelle des nitrates peut se produire :

VIII.3.1 la pyrite

Le premier est le cas où la roche dont est constituée la nappe contient un minéral assez rare, la pyrite. C'est un sulfure de fer, qui se trouve sous forme de très petits minéraux non visibles à l'œil nu. Ce sulfure réagit avec l'oxygène contenu dans l'eau et s'oxyde en sulfate de fer, qui est soluble. En l'absence d'oxygène, la pyrite est oxydée par les nitrates, pour former aussi des sulfates de fer, et de l'azote gazeux, qui s'échappe vers l'atmosphère. Cette réaction est réalisée par des bactéries dénitrifiantes du milieu. Cette disparition des nitrates peut être totale, elle se traduit cependant par une augmentation des sulfates dans l'eau, lesquels ont cependant une norme de potabilité plus forte, de 250 mg/l en SO_4 , si bien que l'augmentation en sulfates liée à la réduction des nitrates ne rend en général pas les eaux non potables. On trouve de la pyrite, dans les roches cristallines, les granites ou les schistes métamorphiques, en profondeur, car la pyrite proche de la surface a été consommée par l'oxygène de l'air ou dissout dans l'eau. Certaines eaux circulent assez profond, sont exemptes de nitrates, alors que l'origine de l'eau est superficielle et fortement chargée en nitrates. Mais ce phénomène de dénitrification naturelle n'est en général pas suffisant pour épurer les eaux, et très rares

sont les forages où les nitrates sont absents. Cette réduction des nitrates consomme la pyrite, donc cet effet positif n'aura qu'un temps, mais en vérité ce temps est long, plusieurs dizaines ou centaines d'années selon les cas.

VIII.3.2 Toit imperméable

La dénitrification naturelle se produit sans la présence de pyrite, dès que la nappe se trouve isolée de l'atmosphère. Il faut en général que la nappe plonge vers la profondeur, et qu'elle soit surmontée par une couche d'argile formant un écran. L'air du sol ne peut plus communiquer avec l'eau de la nappe, et on constate alors que les bactéries présentes dans l'eau de la nappe et qui ont besoin d'oxygène pour vivre vont le chercher dans l'ion nitrate, dès que l'oxygène dissout a été consommé. Les nitrates disparaissent alors comme par enchantement, l'azote produit diffuse et retourne à l'atmosphère. On explique ainsi, l'absence de nitrates dans certains forages dans la nappe très chargée en nitrates. Il faut simplement que la nappe soit surmontée d'une couche d'argile isolante, ce qui ne se produit que rarement.

VIII.3.3 végétation

Le troisième cas à citer est celui des nappes alluviales proches de certains cours d'eau. On constate que la teneur en nitrates diminue dans la nappe quand on se dirige de la bordure de la plaine alluviale, au contact des massifs, jusqu'à la rivière. On constate même que la concentration de l'eau dans la rivière peut être environ la moitié de celle de la nappe, quand bien même l'eau de la rivière provient en totalité de la dite nappe comme en étiage estival. A ceci, il y a deux explications. La première est que la végétation alluviale qui borde la rivière puise son eau dans la nappe, et y consomme une partie des nitrates dont elle a besoin. La seconde explication, plus significative, est que, dans les alluvions, on constate très souvent que les parties graveleuses en profondeur, là où l'eau circule, sont surmontées par des dépôts fins limoneux. Ce dépôt de limons fins joue alors le rôle de la couche d'argile écran, et permet une certaine dénitrification naturelle dans les graviers sous-jacents.

VIII.4 La nuisance des nitrates dans l'eau souterraine

La nuisance des nitrates pour la consommation des eaux des nappes pour la boisson mise à part, les nitrates dans les nappes ont d'autres effets pervers. D'abord, ils finissent par arriver dans les exutoires naturels des nappes. Ils y engendrent l'eutrophisation. De plus, ils modifient les conditions d'oxydoréduction du milieu, et donc la teneur en certains autres éléments en solution. Il se pourrait aussi que l'écologie de ces milieux souterrains soit affectée (bactéries, micro-invertébrés souterrains vivant dans les nappes). Si on remonte dans les sols, on sait cependant que l'excès de nitrates peut y

engendrer une modification de la végétation naturelle, certaines plantes ne supportant pas les fortes concentrations en nitrates.

VIII.5 Traitements

La méthode proposée est limitée au voisinage immédiat d'un captage pour l'eau potable. On fore autour de ce captage un grand nombre de trous (une dizaine, par exemple) à une distance de l'ordre de 10 m, et on injecte dans l'eau de la nappe un composé organique tel que du méthanol, ou un sucre, qui va fournir aux bactéries dénitrifiantes le substrat qui alimente leur métabolisme. Si la nappe est profonde ou protégée de la surface par un écran argileux, alors les bactéries n'auront pas assez d'oxygène pour respirer, et se mettront à consommer les nitrates. Quelques expériences positives ont été effectuées en France par le BRGM, mais n'ont pas été généralisées.

VIII.6 Pollution de la plaine de Zana

Pour notre région la pollution azotique et due aux rejets d'origine domestique existants, mais elle possède encore des potentialités d'auto et biodégradations importantes; elle est encore loin d'être classée parmi les zones d'excédant structurale c'est à dire qu'elle a encore la capacité d'absorptions.

En se référant aux résultats d'analyses chimiques sur vingt cinq puits et quinze forages, la pollution des eaux est insignifiante et ne dépasse pas dans l'ensemble la teneur limites recommandée par l'O.M.S qui est de 50 mg/l de NO_3 et 44 mg/l recommandée par la France voir figure N° VIII.1-4, VIII.2-4 et VIII.3-4.

Dans la plaine de Zana on a enregistré une valeur maximale au point d'eau N° 132 avec une teneur de 71,0 mg/l, quand à la valeur minimale elle de l'ordre de 0,2 mg/l au point d'eau N° 123, voir tableau VIII.1. Quand à l'ammonium, qui est un indicateur de pollution, ne dépasse guère 0.5 mg/l admissible par l'union européenne. Or il est généralement admis qu'une eau non polluée montre des résultats plus élevée en NO_3^- et NH_4^+ , on est également encore loin de la limite maximale fixée par la directive de la CEE et l'organisation mondiale de la santé.

Mais la question qu'on se pose à ce niveau est celle relative à la représentativité des échantillons analysés. La tendance qui s'inscrit à l'horizon peut cependant être différente en raison de l'intensification de l'exploitation agricole, de la densité croissante de la population et des unités d'élevage. Un programme de recherche visant l'étude spatiale et temporelle du phénomène devra donc élaboré pour les prochaines saisons.

Pour l'impact actuel de la fertilisation sur le chimisme des eaux, il est encore difficile d'avancer des jugements tranchants, vu la nature des données disponibles. La norme de

50mg/l de nitrate n'est pas dépassée dans l'ensemble des points de la région, mais il existe un certain nombre de points ayant des teneurs qui sont proches de cette norme. Une teneur même de 71,0 mg/l a été enregistrée.

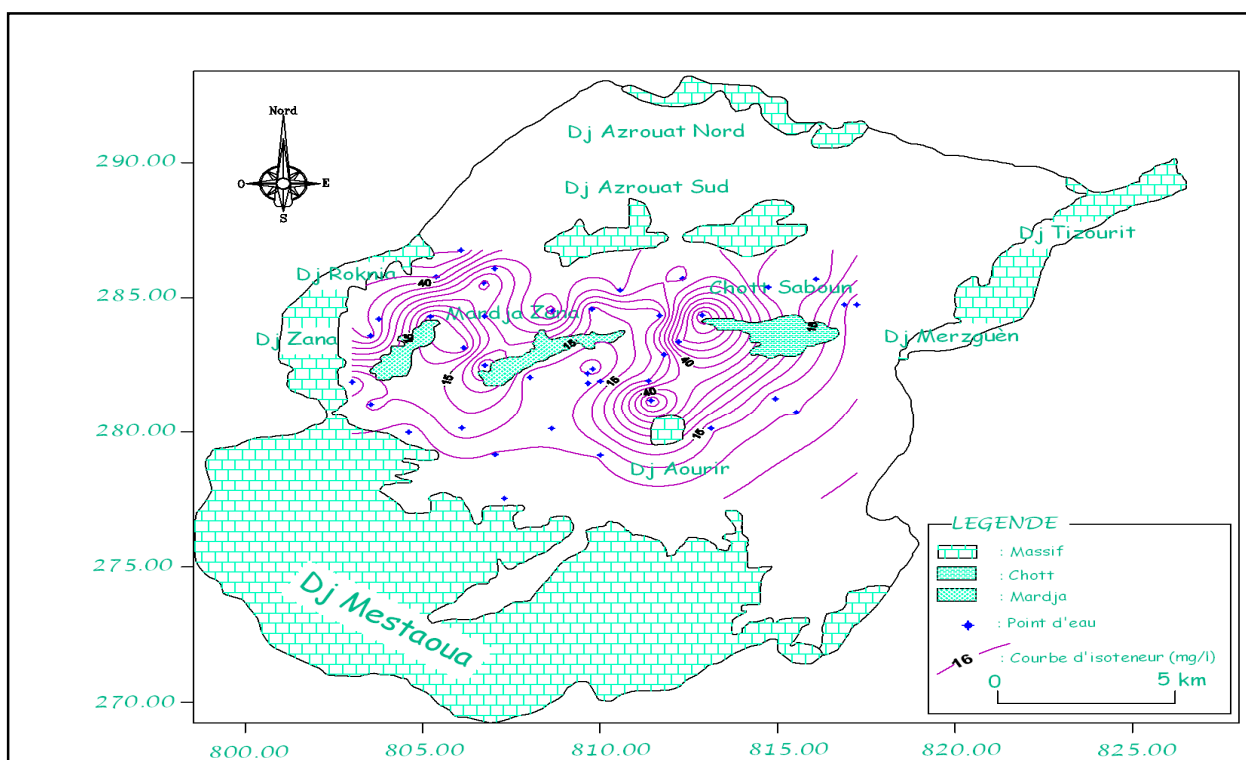


Figure VIII.1.1: Carte de NO_3^- (mg/l)
(Compagne n°01)

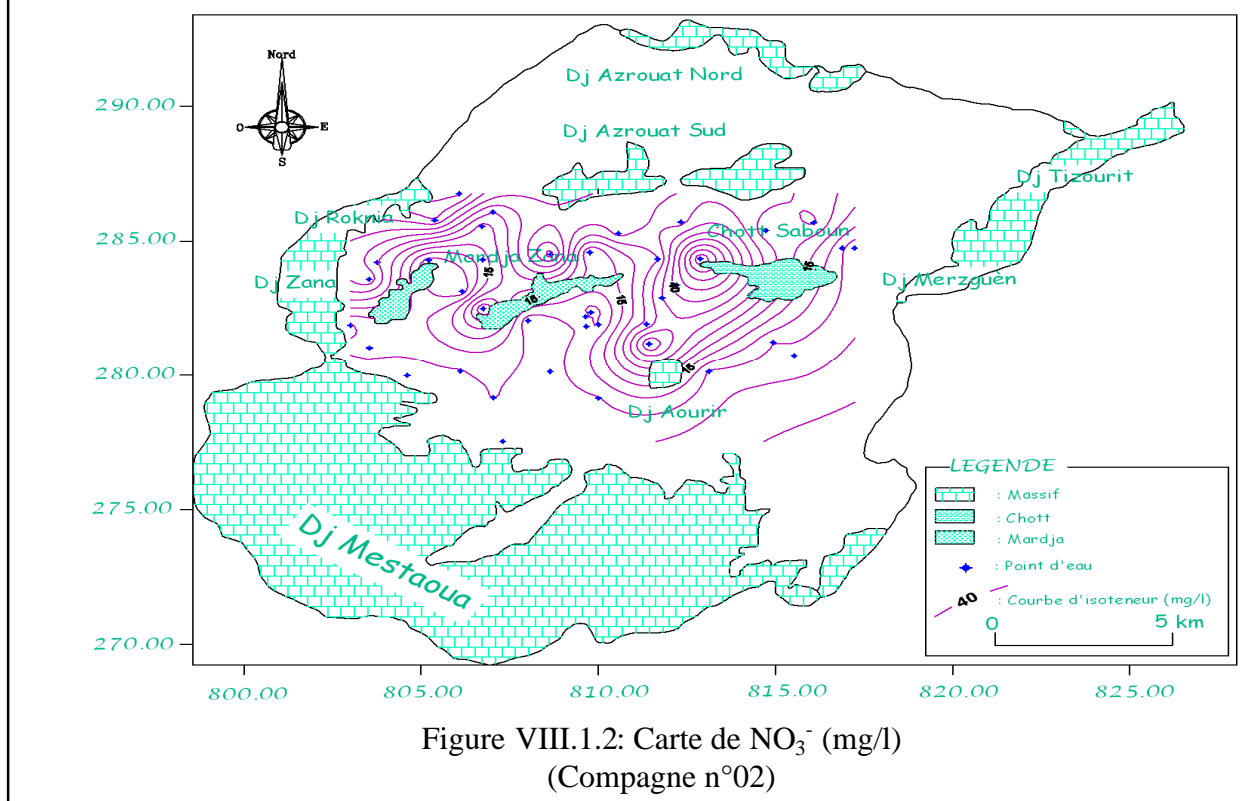


Figure VIII.1.2: Carte de NO_3^- (mg/l)
(Compagne n°02)

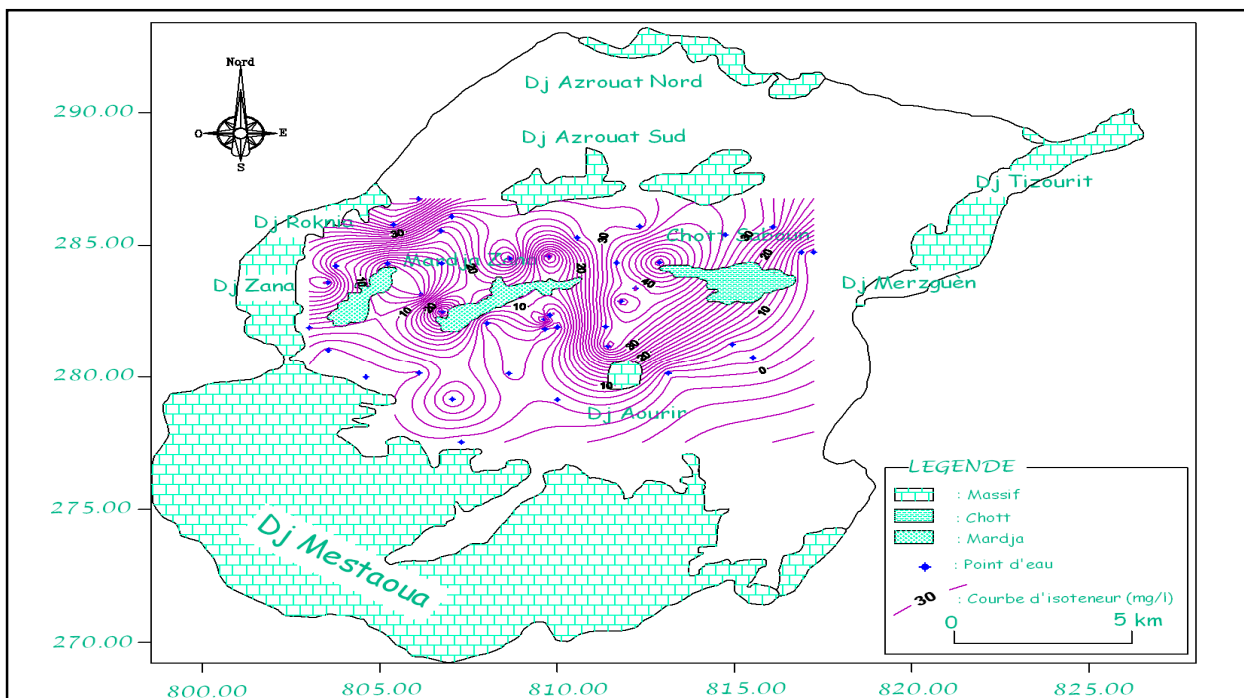


Figure VIII.1.3: Carte de NO_3^- (mg/l)
(Compagne n°03)

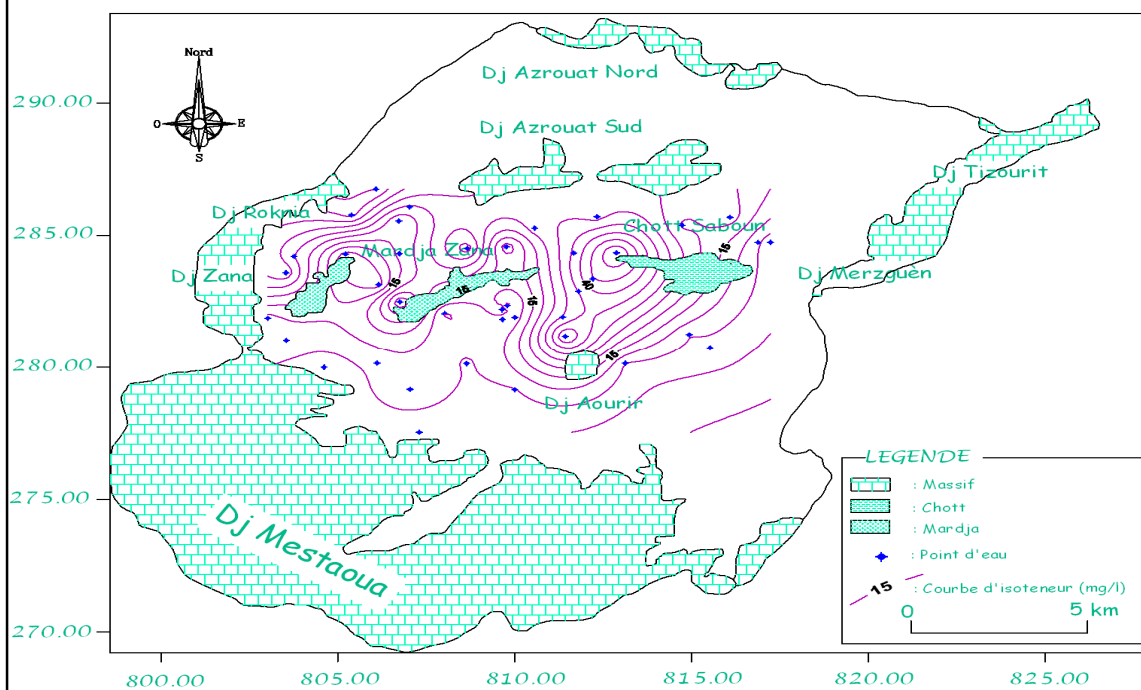


Figure VIII.1.4: Carte de NO_3^- (mg/l)
(Compagne n°04)

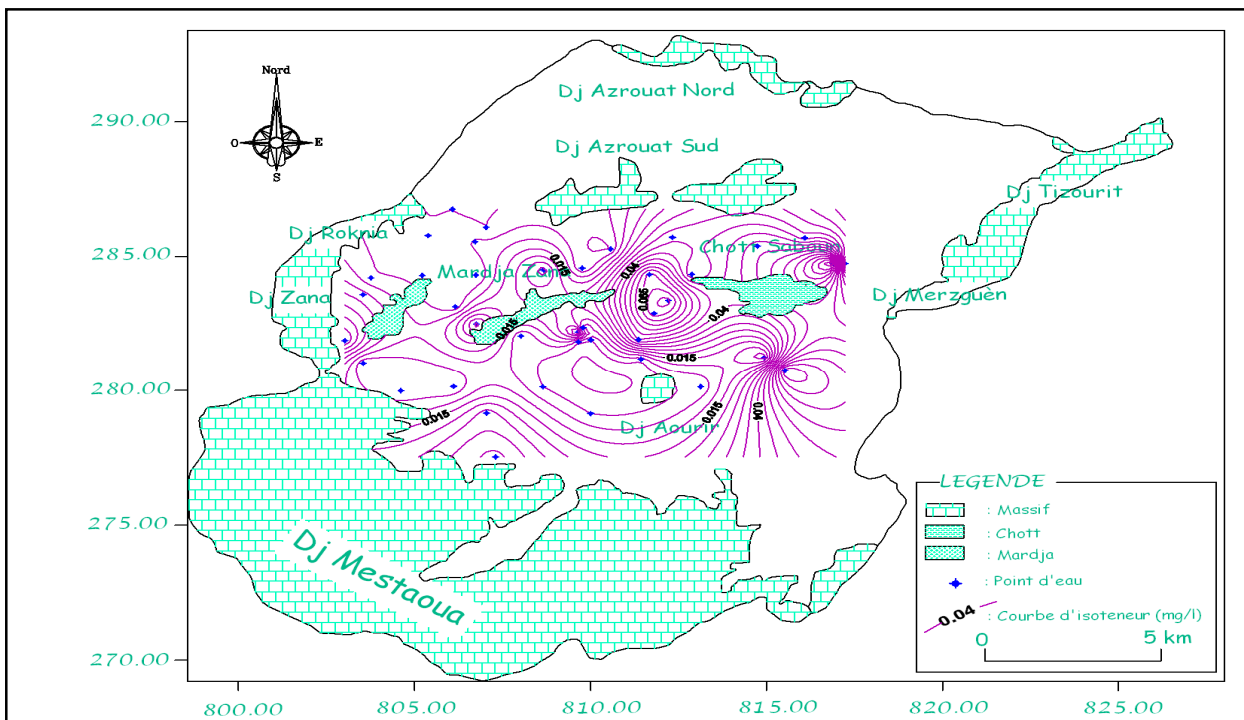


Figure VIII.2.1 : Carte de NH_4^+ (mg/l)
(Compagne n°01)

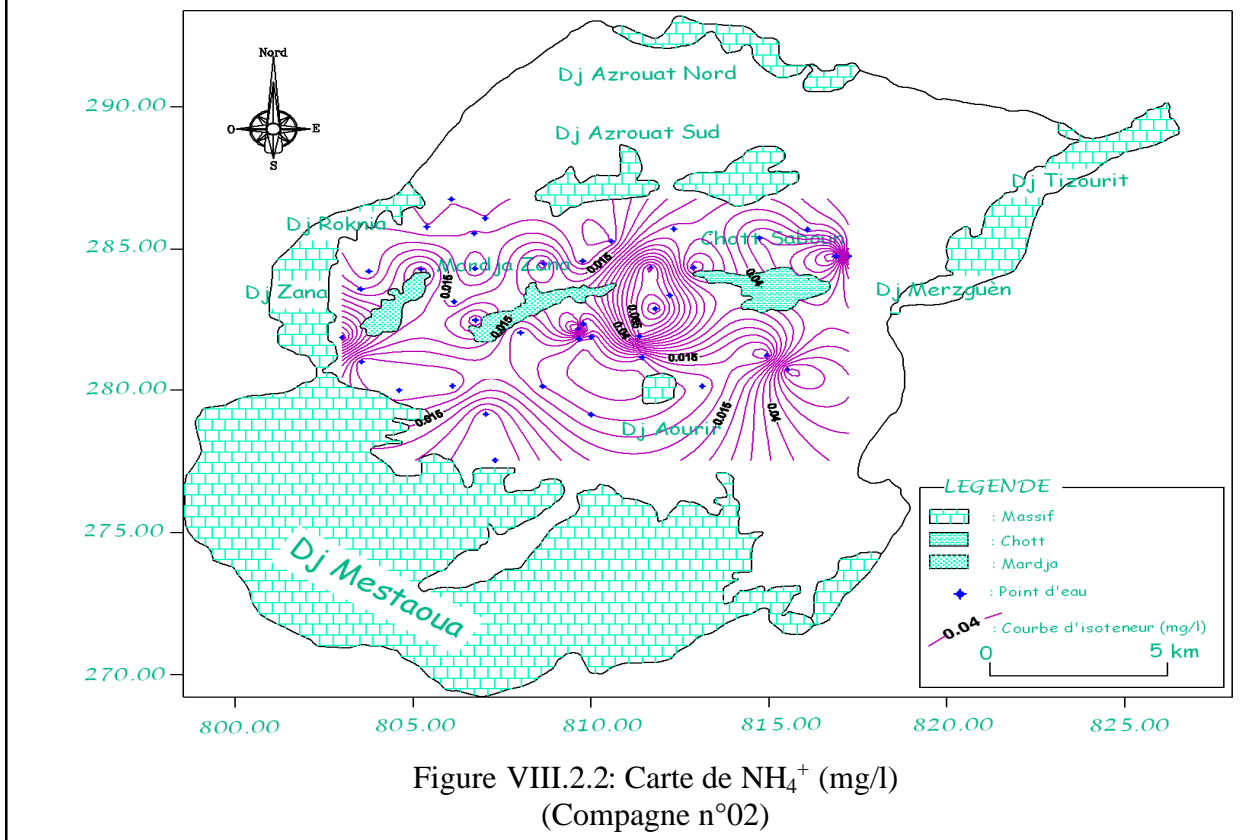


Figure VIII.2.2: Carte de NH_4^+ (mg/l)
(Compagne n°02)

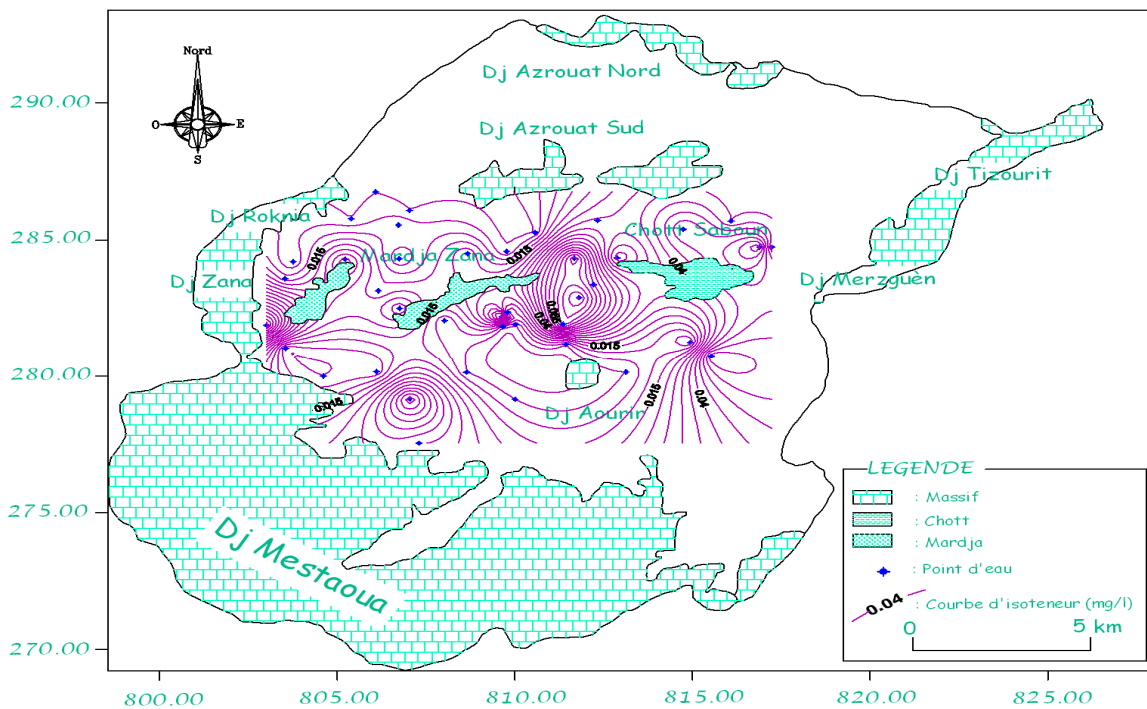


Figure VIII.2.3: Carte de NH_4^+ (mg/l)
(Compagne n°03)

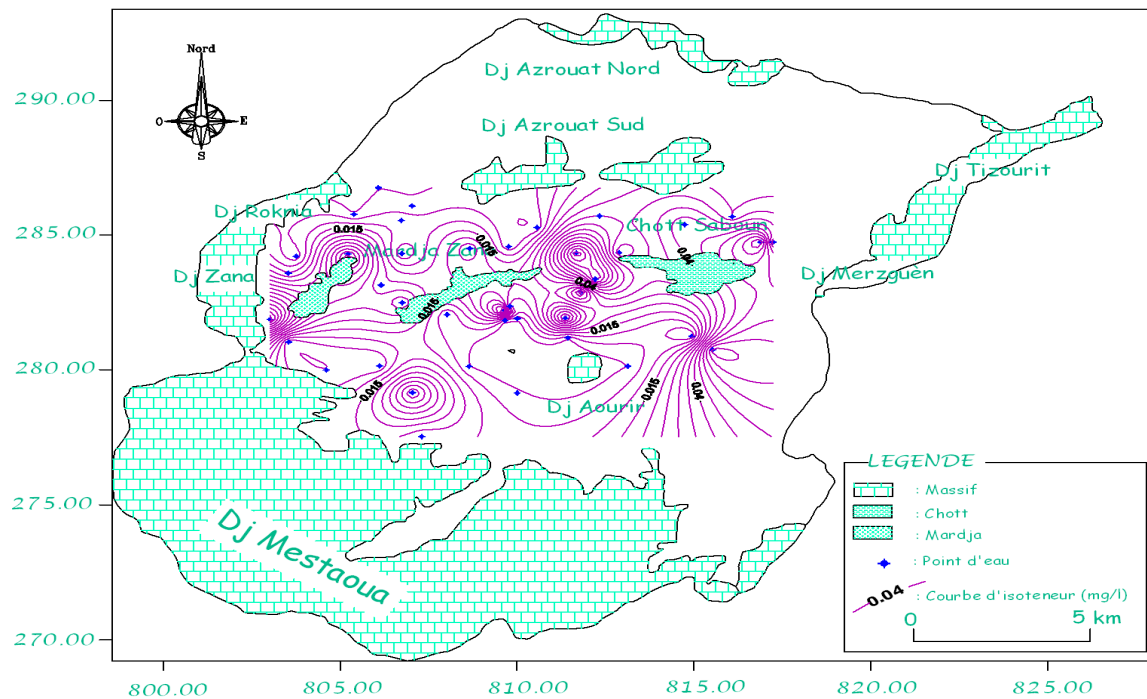


Figure VIII.2.4: Carte de NH_4^+ (mg/l)
(Compagne n°04)

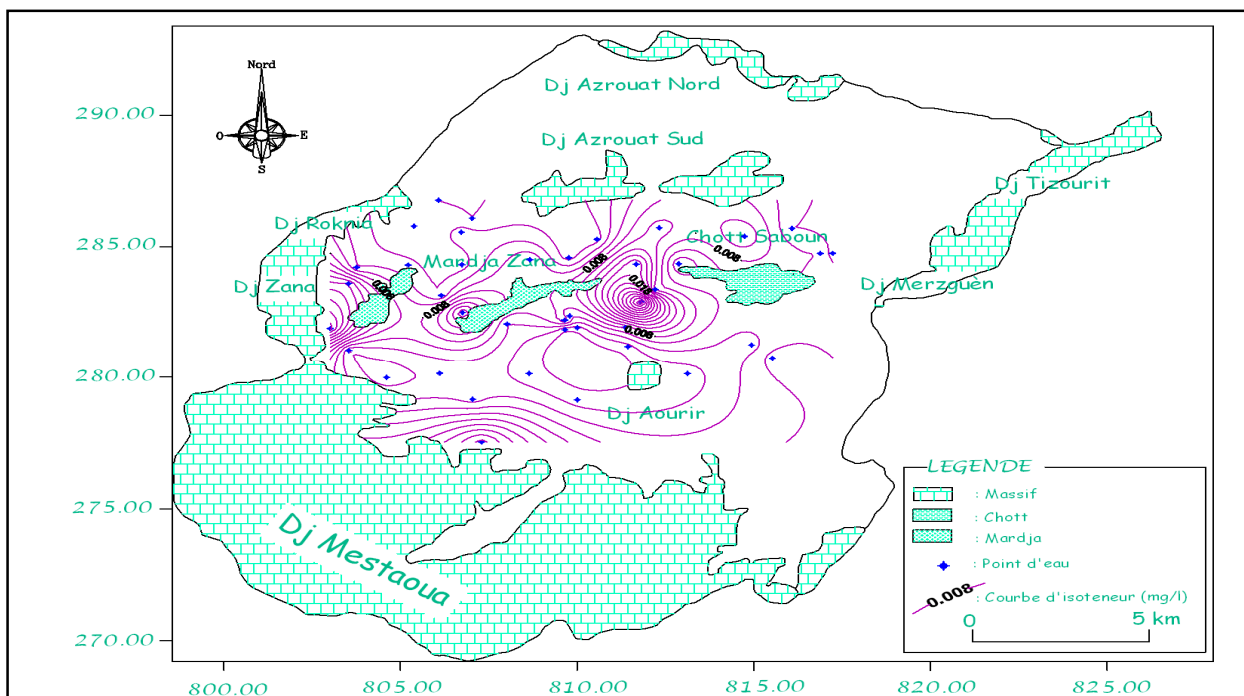


Figure VIII.3.1: Carte de NO_2^- (mg/l)
(Compagne n°01)

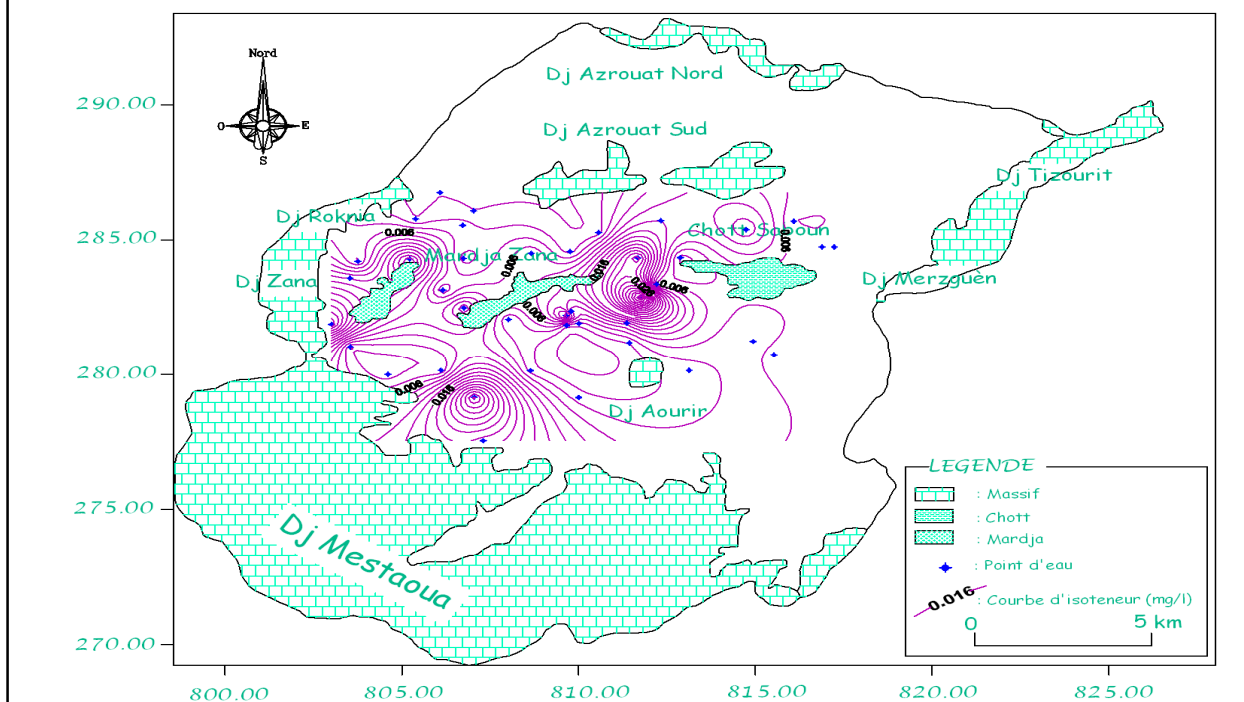


Figure VIII.3.2: Carte de NO_2^- (mg/l)
(Compagne n°02)

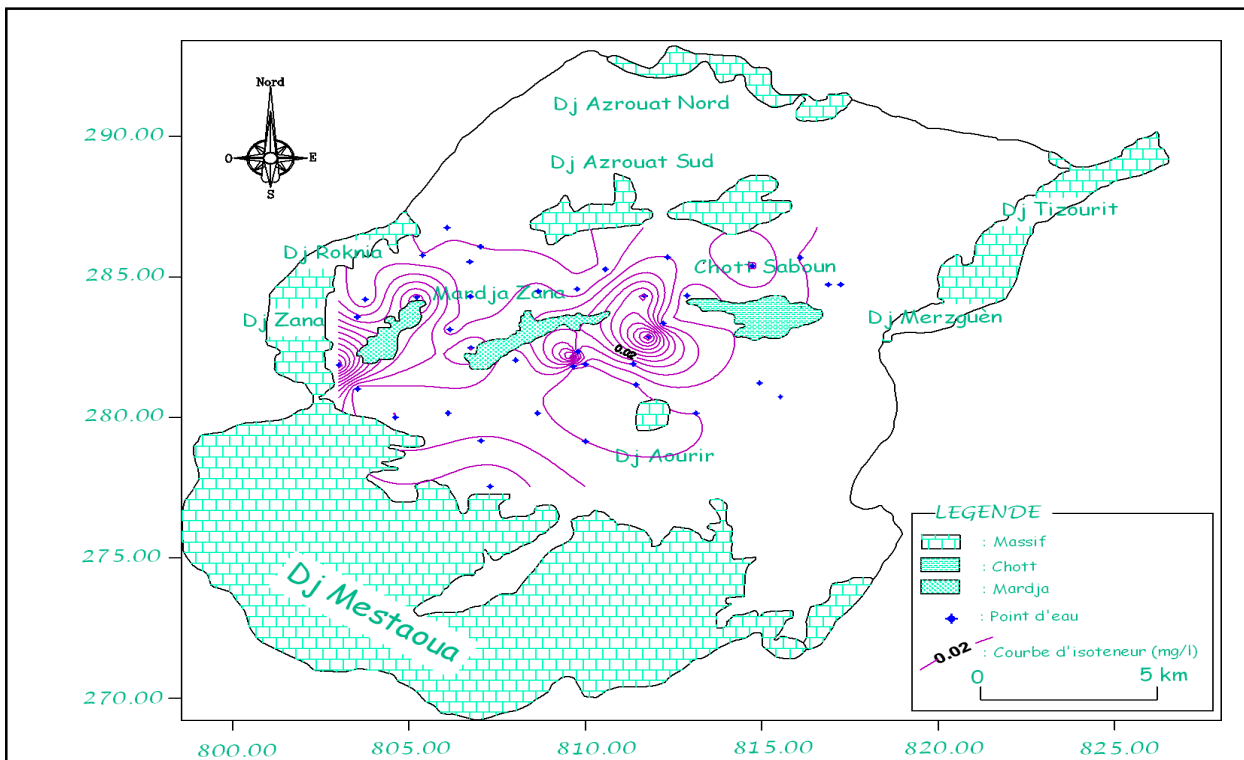


Figure VIII.3.3: Carte de NO_2^- (mg/l)
(Compagne n°03)

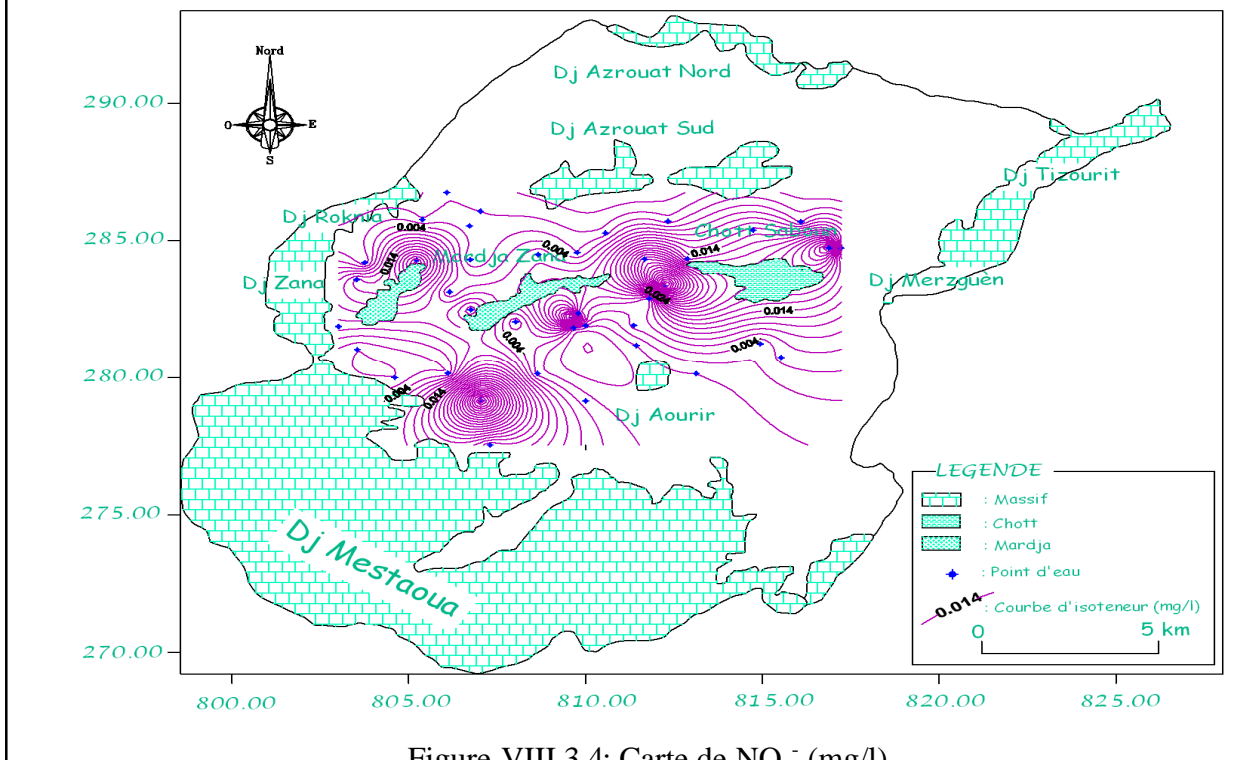


Figure VIII.3.4: Carte de NO_2^- (mg/l)
(Compagne n°04)

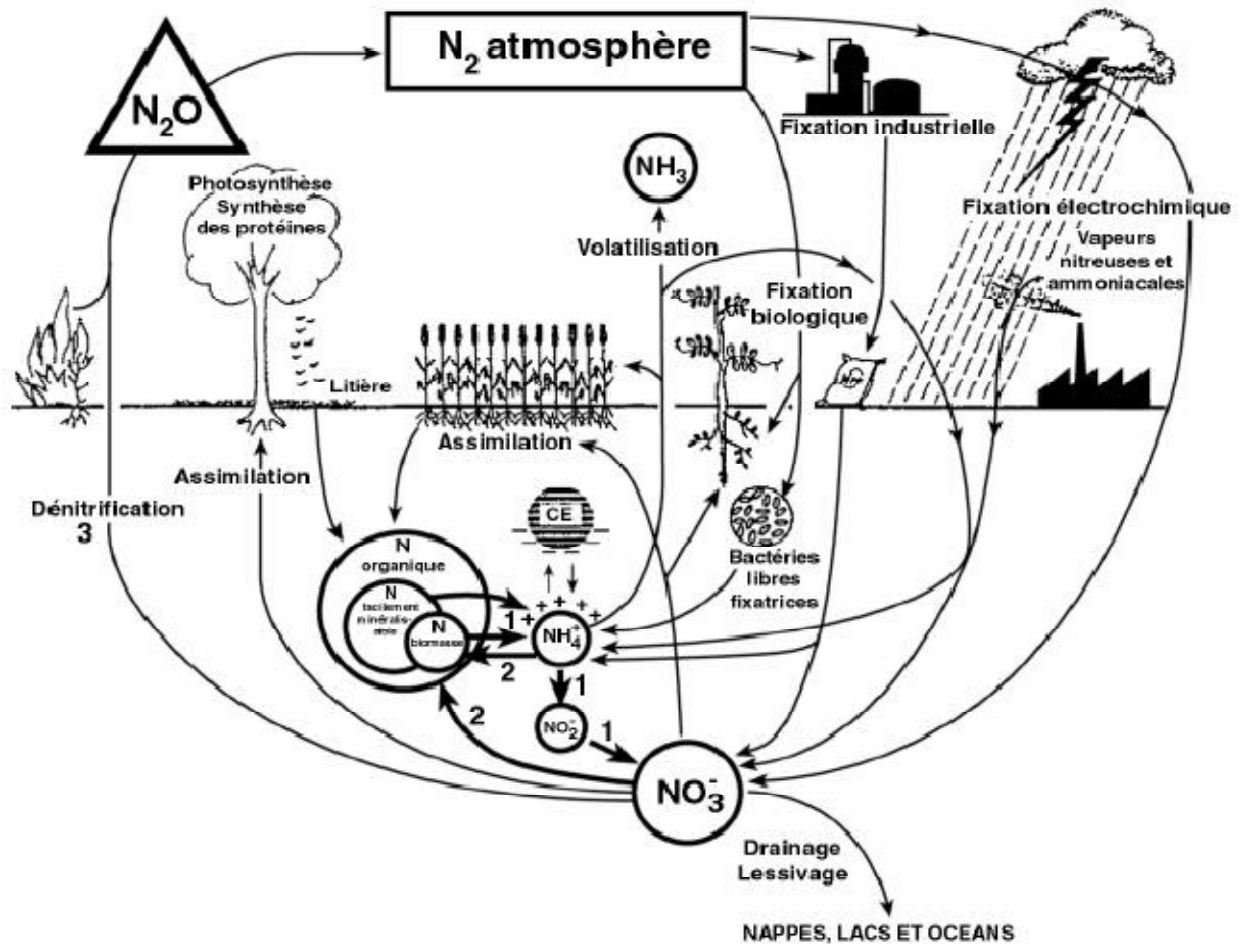


Figure VIII.4 Schéma du cycle de l'azote, (Mariotti 1996). 1. Minéralisation. 2. Réorganisation. 3. Dénitrification. CE : Colloïdes électronégatifs.

Elément chimique	NO ₃ ⁻ (mg/l)				NO ₂ ⁻ (mg/l)				NH ₄ ⁺ (mg/l)			
	Compagne_1	Compagne_2	Compagne_3	Compagne_4	Compagne_1	Compagne_2	Compagne_3	Compagne_4	Compagne_1	Compagne_2	Compagne_3	Compagne_4
Valeur minimale (mg/l)	0.20000	0.30000	0.30000	0.60000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Valeur maximale (mg/l)	71.00000	65.30000	52.00000	56.00000	0.04500	0.06000	0.06000	0.05600	0.09300	0.08500	0.09100	0.08000
Moyenne arithmétique	20.30250	17.68462	16.70513	17.91795	0.00788	0.00885	0.00885	0.00921	0.02128	0.02302	0.02587	0.02245
Ecart type	18.96567	17.59793	16.65675	15.92970	0.01097	0.01525	0.01525	0.01475	0.02769	0.02804	0.03122	0.02770
Coefficient de variation	0.93	1.00	1.00	0.89	1.39	1.72	1.72	1.60	1.30	1.22	1.21	1.23

Tableau VIII.1 Teneur en NO₃⁻, NO₂⁻ et NH₄⁺ des points d'eaux analysés

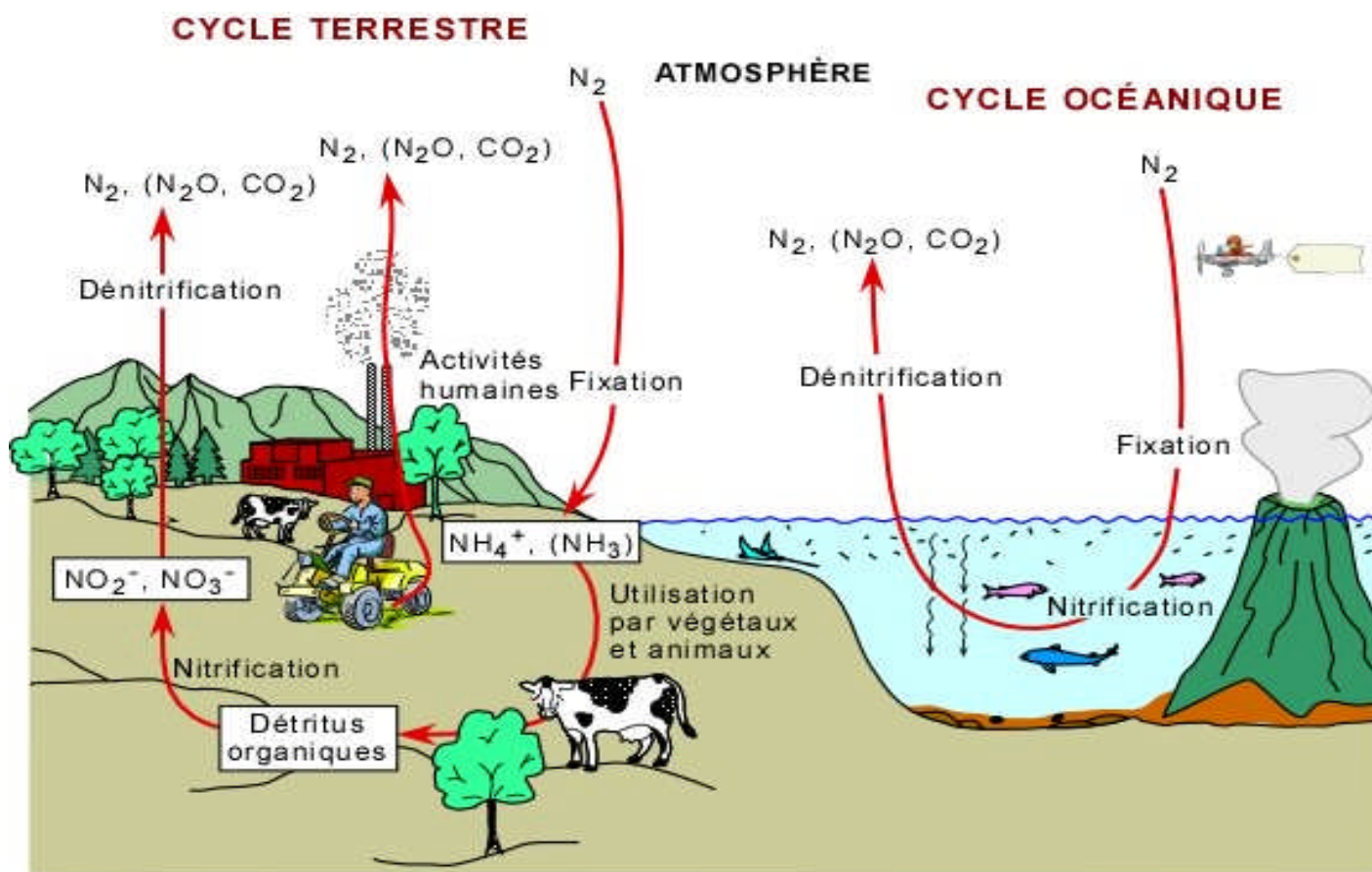


Figure VIII.5 Schéma du cycle de l'azote

Compte tenu du manque de bases de données et/ou de publications se rapportant à la fertilisation d'une manière générale et à l'utilisation des engrais par la culture en particulier, il n'a pas été possible d'accéder à certaines informations. L'utilisation des engrais par l'agriculture n'est pas connue exactement, sauf pour les agriculteurs chargés du programme d'intensification des céréales et pour les agriculteurs cultivant la pomme de terre. Le tableau VIII.2 présente les doses d'azote et de phosphore recommandées en fonction de la pluviosité de la zone.

Pour les céréales selon les données collectées auprès des services d'agriculture, les engrais les plus utilisés sont l'ammonitrate (33,5 pour cent) puis le TSP; les engrais NPK, PK et DAP sont d'usage aléatoire. Pour des raisons de disponibilité sur le marché et d'autres raisons (dont le prix, le transport, etc.), 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 propriétés des sols, notamment leur possibilité de stockage et leur pouvoir fixateur. Et pour la pomme de terre L'Institut technique des cultures maraîchères et industrielles (ITCMI) a mis en place très récemment un réseau d'information sur la fertilisation de la culture de la pomme de terre voir tableau VIII.3 et ce, au niveau

d'un certain nombre d'agriculteurs dans cinq régions: Sétif, Mila, El Oued, Batna et Tébessa. Ce début de travail, bien qu'intéressant, reste relativement incomplet.

Les agriculteurs de Sétif et de Tébessa semblent utiliser beaucoup plus d'engrais que leurs homologues d'El Oued (zone saharienne, sol sableux). Les agriculteurs des régions de Mila et de Batna occupent une position intermédiaire.

Tableau VIII.2 Doses d'azote et de phosphore en fonction de la pluviosité

Pluviosité	< 400 mm		400-600 mm		> 600 mm	
	N	P2O5	N	P2O5	N	P2O5
	kg/ha					
Jachère travaillée	34	46	67	92		
Fourrages	34	46	67	92	100	92
Légumes secs			67	92	100	92
Pomme de terre irriguée			34	46	67	92
Blé	34	46	67	46	100	92

Source: INVA-ITGC, 1997.

Tableau VIII.3 Fertilisation NPK de la pomme de terre dans cinq régions, 2004

Région:	Sétif	Mila	El Oued	Batna	Tébessa
Nombre d'agriculteurs	10	10	13	11	14
Moyenne en kg de 15-15-15 par ha	1200	960	220	720	1120

Source: ITCMI, 2004.

Pour l'arboriculture, certains agriculteurs pratiquent une fertilisation plus ou moins adéquate, en fonction de leurs moyens et du degré d'intensification de la culture. Le Fonds national pour la régulation du développement agricole (FNRDA) a permis un réel essor du développement de l'arboriculture fruitière.

Autre source de pollution est le fumier qui est très recherché compte tenu du besoin important mais aussi des techniques d'élevage précaire, qui ne permettent pas souvent une production importante de fumier. Dans la région de Zana, 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, voir 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.

VIII.7 Conclusion

Les sols naturels sont habituellement pauvres en azote et en phosphore de sorte que ces éléments doivent être ajoutés sous forme d'engrais minéraux, de fumier ou de lisier provenant de l'élevage de bétail. L'azote est essentiel et il est lié à la croissance des plantes et des quantités adéquates de cet élément doivent être fournies selon le type de culture et la période d'épandage. Les engrais minéraux contiennent l'azote sous la forme ammoniacale (NH_4^+) ou la forme nitrates (NO_3^-) alors que les fumiers et les lisiers renferment de l'azote lié à la matière organique et sous forme ammoniacale qui s'oxyde rapidement dans les sols pour former des nitrites (NO_2^-) ou des nitrates (NO_3^-). C'est sous cette dernière forme, très mobile, que l'azote se retrouve éventuellement en concentrations plus ou moins élevées dans les eaux souterraines et les eaux de surface, notamment lorsqu'une surfertilisation des sols entraîne une concentration excédentaire. Les nitrates sont universellement connus comme un des contaminants les plus répandus dans les eaux souterraines.

En se référant aux résultats d'analyses chimiques, la pollution des eaux souterraines de la plaine de Zana est insignifiante et ne dépasse pas dans l'ensemble la teneur limites, mais il faut signaler qu'on a enregistré une valeur maximale de 71,0 mg/l.

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.

Conclusion Générale

Nous avons essayé, par ce travail, d'apporter une contribution à l'étudier les aquifères de la plaine de Zana, et d'évaluer les risques de la pollution liée au flux azoté.

La plaine de Zana fait partie du bassin versant des hauts plateaux constantinois et plus précisément du sous bassin versant Merdja Zana, qui s'étend sur une superficie de 369 Km² environ.

L'étude de la géologie en association avec les données de la géophysique met en évidence l'existence de deux formations. La première formation, de surface d'âge Mio-Plio-Quaternaire formée par des niveaux de sable, de gravier, de calcaire lacustre et des intercalations argileuses. La deuxième formation, elle est carbonatée et formée essentiellement par des calcaires du Crétacé inférieur et du Jurassique supérieur de l'ensemble sud sétifien et du parautochtone aurésien. Le recouvrement de surface atteint dans certain endroits les 150m d'épaisseur notamment au milieu de la plaine et une faible épaisseur au voisinage des massifs. Quant aux formations carbonatées elles ont 350m d'épaisseur.

La géomorphologie, montre que notre bassin est allongé, il a une altitude moyenne de 935m et il est caractérisé par un relief modéré et de pente douce. Le réseau hydrographique est peu développé et de type endoréique avec un écoulement temporaire.

L'étude climatologique a montré que la région d'étude a un climat semi aride avec un bilan hydrologique déficitaire.

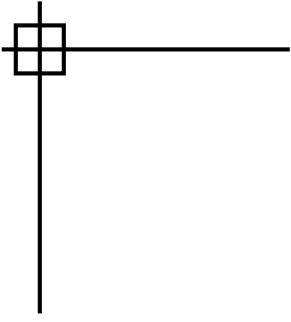
L'aperçu hydrogéologique de la plaine montre que les formations du Crétacé inférieur et du Jurassique supérieur peuvent offrir des possibilités aquifères très intéressantes de même que la formation superficielle, elle présente des potentialités aquifères non négligeables. La piézométrie montre une convergence vers les dépressions de Merdja de Zana et le Chott Saboun, qui représentent des exutoires naturels de la nappe.

L'étude hydrochimique a permis d'attribuer l'origine évaporitique aux éléments Na, Mg, K, Cl, SO₄, quant à l'élément HCO₃⁻, il est issu des formations carbonatées.

Les deux campagnes d'analyses effectuées montrent que les eaux issues de l'aquifère superficiel et de l'aquifère karstique ont le même faciès hydrochimique qui est de type chloruré et sulfaté magnésien, ce qui témoigne de l'existence d'une interaction probable entre les deux aquifères.

La pollution azotique n'est pas visible malgré que la région est à vocation agricole.

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 recherchés par un autre travail plus précis et les résultats utiles communiqués aux collectivités locales et aux agriculteurs.



Références bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ATHAMENA.M (2006) : Etude des ressources thermales de l'ensemble allochtone sud sétifien. Mémoire de Magistère, Départ d'Hydraulique, Univ. de Batna, 131 P.
- BENCER S. (2004) : Etat actuel des ressources hydriques de la région de Ain Djasser et estimation de la qualité chimique des eaux souterraines (W de Batna). Mémoire de Magistère, Départ. d'Hydraulique Univ. de Batna, 119 P.
- Boudoukha A. (1988) : Etude hydrogéologique et modélisation du système aquifère fermé d'El Eulma-Aïn Lahdjar (région Est de Sétif - Algérie). Thèse de Doctorat. Labo. Géologie structurale et appliquée. Univ. Franche Comté. Besançon. France. 167 pages.
- Boudoukha A. (1998) : Hydrogéologie des hautes plaines sétifiennes et qualité chimique des eaux souterraines. Thèse de Doctorat. Institut de chimie. Univ. Annaba, 230 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. (1997) : Etude hydrogéologique de la plaine de Ain Djasser (Bourhzel). Mémoire de Magistère, Institut sciences de la terre, Univ. de Constantine, 198 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.
- 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, 160 P.
- 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.
- DERCOURT J. et PAQUET J. (1978): Géologie objet et méthodes. *Edit. Dunod. Paris.* 329 pages
- DUBREUIL P. (1974) : Initiation à l'analyse de l'hydrologie. *Edit. Masson. Paris.* 210 pages.
- 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 chaîne Alpine en Algérie, Public. Office national de la géologie, Alger 259 P.
- 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

La Compagnie Générale de Géophysique (1969). Prospection géophysique des Chotts Gadaine et Saboun et de la plaine d'El Madher, 39 P

La Compagnie Générale de Géophysique (1972) : Prospection géophysique dans la plaine d'Ain Djasser (ex Bourzhel), 22 P

LAFFITE R. (1939) : Etude géologique de l'Aurés (Algérie). Thèse 3^e cycle, faculté des sciences d'Alger, 451 P.

REMENERAS G. (1986) : Hydrologie de l'ingénieur. *Edit. Eyrolles. Paris*. 183 pages.

MEYER DE STADELHOFE C. : Application de la géophysique aux recherches d'eau. Exposé à l'université de Lausanne. 183 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.

RODIER J. (1984) : L'analyse de l'eau. *Edit, Dunod. Paris* 1365 p.

SAVORNIN J. (1920) : Etude géologique de la région du Hodna et du plateau sétifien. *Thèse de Doctorat. Sc. Nat. Univ. Lyon. France*. 502 pages.

SCHOELLER H. (1959) : Hydrologie des régions arides progrès récents. *UNESCO*. 126 pages.

SCHOELLER H. (1962) : Les eaux souterraines hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. *Edit. Masson. Paris*. 642 pages.

SONATRACH : Géologie de l'Algérie, Division exploration, centre de recherche et développement
Service géologique de l'Algérie (1966) : Travaux des collaborateurs (1965), bulletin N° 33, 96 P.

VILA J.M. (1980) : La chaîne Alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro-Tunisiens. Thèse de Doctorat es Science naturelle, Univ. Pierre et Marie Curie Paris VI. 665 P.

Cartes

SONATRACH (1977) : Carte géologique N° 903 de la région de Sétif à l'échelle 1/200 000, ministère de l'industrie et de l'énergie, service de la carte géologique de l'Algérie 1977;

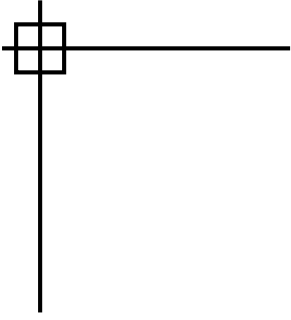
SONATRACH (1977) : Carte géologique N° 145 de la région de Bourzhel à l'échelle 1/50 000, ministère de l'industrie et de l'énergie, service de la carte géologique de l'Algérie 1977;

Institut National Cartographie : Carte topographique N° 145 de la région de Bourzhel (Ain Djasser) à l'échelle 1/50 000, ministère de la défense nationale;

Institut National Cartographie : Carte topographique N° 146 de la région de Ain Yagout) à l'échelle 1/50 000, ministère de la défense nationale;

Institut National Cartographie : Carte topographique N° 172 de la région de Corneille (Merouana) à l'échelle 1/50 000, ministère de la défense nationale;

Institut National Cartographie : Carte topographique N° 173 de la région d'El Madher à l'échelle 1/50 000, ministère de la défense nationale.



Annexes

ANNEXE -I-

Les paramètres conditionnels des coefficients a et b, pour le calcul de l'ETP
selon la formule de Blaney-Criddle, modifiée par la F.A.O.

Insolation effective (%)	Vitesse du vent (m/s)	Humidité relative (%)					
		Faible (<20)		Moyenne (20 à 52)		Elevée (>52)	
		a	b	a	b	a	b
Elevée (>80)	Faible (0 à 2)	1,59	-2,02	1,45	-2,18	1,16	-1,96
	Moyenne (2 à 5)	1,77	-1,84	1,59	-2,11	1,25	-1,88
	Elevée (5 à 8)	2,00	-1,86	1,73	-2,04	1,36	-2,00
Moyenne (60 à 80)	Faible (0 à 2)	1,45	-2,00	1,30	-2,07	1,05	-1,84
	Moyenne (2 à 5)	1,66	-1,98	1,45	-2,00	1,14	-1,84
	Elevée (5 à 8)	2,05	-2,23	1,57	-1,98	1,21	-1,80
Faible (<60)	Faible (0 à 2)	1,25	-1,79	1,13	-1,71	0,89	-1,70
	Moyenne (2 à 5)	1,45	-1,91	1,23	-1,75	0,96	-1,66
	Elevée (5 à 8)	1,61	-1,88	1,36	-1,82	1,02	-1,59

ANNEXE -II-

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

ANNEXE -IV-
Log du forage de Zana N° 02
 Direction de l'hydraulique de la wilaya de Batna

SONDAGE ZANA N° 2 (forage d'exploitation)

N° **6 M F M** | **J7**

Carte : N° 145 BOUGHZAL

Date des travaux : 19 9 1972

Long. : X = 804.650

Echelle de la coupe : 1 / 1000 ϕ

Latit. : Y = 279.950

Profondeurs et cotes	Tubages et Cimentation	Plans d'eau	Échant.	Coupe	DESCRIPTION GÉOLOGIQUE	Étage
0	$\phi 18 \frac{5}{8}$ "				terre jaune, limons, marnes	Pliogène
10		NS = -18,4				
19	$\phi 12 \frac{1}{4}$ "				19 50% argile rouge et 50% calcaire marneux rosé, légèrement vacuolaire piqueté de noir	Jurassique supérieur
20					35 passées de calcaire blanc dur microcristallin sublithographique à cassure esquilleuse identique aux calcaires secondaires (blocs remaniés)	
30					45-50-20% argile rouge 50% calcaire blanc 30% de calcaire marneux	
40					70% de calcaire blanc et 30% de marne noire	
50			G			
60			Z			
70						
80					calcaire blanc	
90						
100						
110						
120						
130						
137	trou nu				50% argile rouge + 50% micro-brèche calcaire vacuolaire	
140	$\phi 11$ "				140 monogénique à éléments arrondis cimentés par le calcite avec du fer peu être dolomitique	
150			D			
158					50% argile+ avec d'avantage d'oxide de fer = HG	
160						
170						
180			C			
190					calcaire blanc	
200						
210						
220						

mis à jour par PERRIN SEREGUINE le 15.1.1974 C.P.R. Constantine DHW Batna

ANNEXE -V-
Log du forage de Zana N° 03
 Direction de l'hydraulique de la wilaya de Batna

SONDAGE ZANA N°3 (forage d'exploitation)

Carte : N° 145 BOUGHZAL

N° 612 F11 | J8

Date des travaux : 3_7_1972

Long. : X 804.320

Echelle de la coupe : 1/1000^e

Latit. : Y 285.000 Z

Profondeurs et cotes	Tubages et Cimentation	Plans d'eau	Échant.	Coupe	DESCRIPTION GÉOLOGIQUE	Étage
0	∅ 18 5/8"					
10	∅ 12 1/4"	NS =			argile grise et calcaire polygéné- nique (90% - 10%)	plio quaternaire
20	12	- 6,5 m				
30	18					
40	28				calcaire plus abondant devient sublithographique monogénique	crétacé inférieur
50	50				même calcaire et passées de calcaire type lacustre	
60	69					
70	75				passées de marne jaune et rouge	
80						
90						
100	101		G			
110	107		Z			
120	119				calcaire beige clair sublitho- graphique a debit parfois feuilleté	
130	136		T			
140	142		T			
150	154		U			
160	160		C			
170						
180	180				même calcaire alternant avec marne (50%- 50%)	
190	184					
200	190					
	194					
	200					
NOTA		I tube plein				
		I crepine				

mis à jour par PERRIN SEREGUINE le 10_1_1974 C.P.R Constantine D.H.W. Batna

ANNEXE -VI-
Log du forage de Zana N° 04
Direction de l'hydraulique de la wilaya de Batna

SONDAGE ZANA N°4 (forage d'exploitation)

N° J 1

Carte : N° 145 BOUGHZAL

Date des travaux : 26_7_1972

Long. : X 805.580

Echelle de la coupe : 1/1000^e

Latit. : Y 284.660

Z 122 env

Profondeurs et cotes	Tubages et Cimentation	Plans d'eau	Échant.	Coupe	DESCRIPTION GÉOLOGIQUE	Étage
0	Ø 18 5/8"					
10		NS = - 1,35m			limons jaune	plio- -quaternaire
20	Ø 12 1/4"					
30	Tube plein				argile blanche	
50	50				calcaire blanc et argile jaunâtre (50 a 60%, 40 a 50%).	Jurassique superieur
60	crepine					
65	65 etc.				alternance de calcaire gris-blanc et argile rouge (30% ÷ 70%).	
70			G			
80			Z			
90						
98					calcaire blanc	
100	102					
110	116				alternance de calcaire gris-blanc et argile rouge	
120	120					
130	129		D			
140	130					
140	137		U			
150	142				alternance calcaire jaune et argile. calcaire friable et argile rouge	
150	146					
160	156				calcaire friable et argile rouge (50% - 50%).	
170	168				calcaire gris-blanc et argile rouge	
180	174					
180					80% argile rouge	
190	190				calcaire blanc dur et argile rouge (50 a 75%, 50 a 25%).	
200	203					
210	209				calcaire gris et argile jaune (30% - 70%).	
220	215					
220	220					

mis à jour par PERRIN - SEREGUINE le 18.1.1974 C.P.R. Constantine, D.H.W. Batna

ANNEXE -VII-

Log du forage de Zana N° 05

Direction de l'hydraulique de la wilaya de Batna

SONDAGE ZANA N°5 (forage d'exploitation)

N°

614 F11

J9

Carte: N° 145 BOUGHZAL

Date des travaux: 15-8-1972

Long.: X 808.060

Z 120 m

Echelle de la coupe: 1/1000^e

Latit.: Y 284.040

Profondeurs et cotes	Tubages et Cimentation	Plans d'eau	Échant.	Coupe	DESCRIPTION GÉOLOGIQUE	Étage
0	∅ 18 5/8"					
10	∅ 12 1/4" tube plein	NS = -3,5m			argile blanche et calcaire (marneux en sublithographique) (70 à 90% , 10 à 30%)	Plio quaternaire
20						
24	24m					
30	crepine					
40						
50	etc.					
60					le calcaire devient plus abondants	
70			G		(30 à 40%)	
80						
90			Z			
100						
110			T			
120						
130			D		calcaire dominant (60 à 70%)	crétacé inferieur
140						
150			C		argile et calcaire (marneux en sublithographique) (60 à 80% - 20 à 40%)	
160						
170						
180						
190						
200						
210						
220						

mis à jour par PERRIN - SERGOUINE le 28-1-74 C.P.R. Constantine D.H.W. Batna

ANNEXE –VIII

Résultats d'analyses des paramètres physico-chimiques

Eléments chimiques	Valeur minimale (mg/l)		Valeur maximale (mg/l)		Moyenne arithmétique		Ecat type		Coefficient de variation	
	Basses eaux	Hautes eaux	Basses eaux	Hautes eaux	Basses eaux	Hautes eaux	Basses eaux	Hautes eaux	Basses eaux	Hautes eaux
T°	13.90	8.20	23.00	20.90	17.64	14.30	2.03	3.39	0.11	0.24
pH	7.10	7.10	8.30	8.40	7.35	7.28	0.21	0.23	0.03	0.03
Ca++	80.16	79.50	488.97	480.00	176.81	173.57	91.74	90.86	0.52	0.52
Mg++	27.44	25.96	383.76	380.25	136.96	134.12	78.29	78.20	0.57	0.58
Na+	35.19	30.25	340.63	325.48	137.81	138.53	68.51	68.82	0.50	0.50
K+	1.62	1.98	18.40	17.10	8.37	8.06	4.59	4.26	0.55	0.53
Cl-	35.50	35.00	340.80	340.00	284.52	282.41	75.93	76.24	0.27	0.27
SO4--	207.40	155.00	1311.50	2856.00	335.17	661.03	165.41	606.82	0.49	0.92
HCO3-	207.40	205.10	1311.50	1300.00	335.17	331.00	165.41	164.52	0.49	0.50
NO3-	0.50	0.20	41.50	71.00	16.24	20.30	14.84	18.97	0.91	0.93
Résidu sec	360.00	356.00	13950.00	13856.00	3027.75	2983.98	2387.32	2376.71	0.79	0.80
Conductivité	700.00	500.00	8770.00	8230.00	3401.75	3144.30	1945.99	1814.05	0.57	0.58

ANNEXE -IX-
Résultats des valeurs du S.A.R
Basses eaux

N° POINT	Na+	Ca+	Mg++	Conductivite (μ s/cm)	S,A,R
	még/l	még/l	még/l		
32	5,00	6,25	8,96	1980,00	1,81
98	4,86	5,45	5,99	1420,00	2,03
97	3,36	4,65	5,52	1150,00	1,49
96	3,40	4,81	4,80	1180,00	1,55
7	7,32	11,62	8,86	3050,00	2,29
63	1,95	4,01	4,39	810,00	0,95
68	1,53	4,01	3,99	700,00	0,77
33	3,51	5,21	7,91	1420,00	1,37
126	7,98	15,84	17,37	6140,00	1,96
133	11,27	24,45	22,44	8590,00	2,33
123	5,53	12,07	13,33	3980,00	1,55
132	13,41	14,43	31,98	8770,00	2,78
141	4,55	16,03	2,29	4480,00	1,50
61	3,16	8,82	10,39	2710,00	1,02
4	4,16	4,49	5,52	1580,00	1,86
31	5,63	6,41	9,19	2040,00	2,01
113	5,94	18,44	28,35	6370,00	1,23
118	6,36	15,71	23,49	4700,00	1,44
134	8,45	6,25	9,75	3070,00	2,99
75	8,93	8,02	10,71	3160,00	2,92
125	5,22	6,41	9,59	2940,00	1,85
70	3,42	7,21	11,67	2590,00	1,11
81	5,00	9,06	13,03	3520,00	1,50
140	7,00	7,21	7,83	3770,00	2,55
82	9,36	12,83	17,98	6850,00	2,38
18	5,32	5,77	6,34	2300,00	2,16
121	4,05	10,02	14,38	3920,00	1,16
130	6,71	12,42	17,98	5110,00	1,72
19	7,40	8,18	11,03	3480,00	2,39
11	4,00	8,05	11,96	3080,00	1,26
24	4,78	4,81	7,60	2010,00	1,92
116	4,78	4,97	6,40	2240,00	2,00
136	9,78	10,82	15,58	4110,00	2,69
57	2,32	5,93	8,31	2140,00	0,87
95	8,30	6,01	8,79	3240,00	3,05
86	14,81	6,01	8,79	5900,00	5,44
99	3,68	8,50	13,91	3200,00	1,10
26	5,14	4,81	6,56	2120,00	2,16
142	9,26	11,62	15,58	4050,00	2,51
22	3,05	6,01	7,99	2200,00	1,15

ANNEXE -X-
Résultats des valeurs du S.A.R
Hautes eaux

N° POINT	Na+	Ca+	Mg++	Conductivite (µs/cm)	S,A,R
	még/l	még/l	még/l		
32	4,87	6,15	8,75	1802,00	1,78
98	4,79	5,43	5,46	1350,00	2,06
97	3,27	4,60	5,43	1100,00	1,46
96	3,27	4,51	4,68	1100,00	1,53
7	7,23	11,51	8,86	3000,00	2,27
63	1,75	3,98	4,39	790,00	0,85
68	1,32	4,01	3,92	500,00	0,66
33	3,26	5,10	8,00	1200,00	1,28
126	7,65	15,53	16,68	5980,00	1,91
133	10,91	24,00	20,91	7950,00	2,30
123	5,46	12,01	12,13	3560,00	1,57
132	13,49	14,00	31,69	8230,00	2,82
141	4,57	15,53	2,16	4120,00	1,54
61	3,27	8,52	10,27	2560,00	1,07
4	3,94	4,46	5,50	1450,00	1,77
31	5,57	6,40	9,17	2020,00	2,00
113	5,87	18,40	29,17	6020,00	1,20
118	6,36	15,60	23,37	4200,00	1,44
134	8,45	6,03	9,64	2890,00	3,02
75	8,75	8,37	10,66	2890,00	2,84
125	5,22	6,45	9,22	2450,00	1,86
70	3,39	7,02	12,15	2300,00	1,10
81	4,97	9,01	12,56	3200,00	1,51
140	6,96	7,15	7,46	3100,00	2,58
82	9,57	12,80	17,93	5960,00	2,44
18	5,23	5,50	5,91	2100,00	2,19
121	4,19	10,08	13,41	3900,00	1,22
130	6,70	12,16	17,56	4850,00	1,74
19	7,35	8,01	10,91	3200,00	2,39
11	3,91	7,75	11,68	2780,00	1,26
24	4,78	4,01	7,57	1980,00	1,99
116	9,70	4,46	5,85	1590,00	4,27
136	9,70	10,52	15,04	3950,00	2,71
57	2,18	6,00	8,35	2100,00	0,81
95	8,09	5,77	8,44	3200,00	3,03
86	14,15	5,81	8,85	5200,00	5,23
99	3,57	8,05	14,93	3000,00	1,05
26	4,79	5,00	5,85	2100,00	2,06
142	9,14	11,51	15,06	4000,00	2,51
22	3,27	6,01	7,52	2100,00	1,26

ANNEXE –XI-
Teneurs en Na⁺ pour classification WILCOX
Basses eaux

N° POINT	Na+	Ca+	Mg ⁺⁺	K+	Conductivite (μ s/cm)	%Na+
	még/l	még/l	még/l	még/l		
32	5,00	6,25	8,96	0,24	1980,00	24
98	4,86	5,45	5,99	0,11	1420,00	30
97	3,36	4,65	5,52	0,09	1150,00	25
96	3,40	4,81	4,80	0,09	1180,00	26
7	7,32	11,62	8,86	0,41	3050,00	26
63	1,95	4,01	4,39	0,07	810,00	19
68	1,53	4,01	3,99	0,07	700,00	16
33	3,51	5,21	7,91	0,09	1420,00	21
126	7,98	15,84	17,37	0,11	6140,00	19
133	11,27	24,45	22,44	0,42	8590,00	19
123	5,53	12,07	13,33	0,47	3980,00	18
132	13,41	14,43	31,98	0,44	8770,00	22
141	4,55	16,03	2,29	0,25	4480,00	20
61	3,16	8,82	10,39	0,16	2710,00	14
4	4,16	4,49	5,52	0,11	1580,00	29
31	5,63	6,41	9,19	0,15	2040,00	26
113	5,94	18,44	28,35	0,30	6370,00	11
118	6,36	15,71	23,49	0,19	4700,00	14
134	8,45	6,25	9,75	0,22	3070,00	34
75	8,93	8,02	10,71	0,19	3160,00	32
125	5,22	6,41	9,59	0,25	2940,00	24
70	3,42	7,21	11,67	0,09	2590,00	15
81	5,00	9,06	13,03	0,23	3520,00	18
140	7,00	7,21	7,83	0,28	3770,00	31
82	9,36	12,83	17,98	0,36	6850,00	23
18	5,32	5,77	6,34	0,27	2300,00	30
121	4,05	10,02	14,38	0,12	3920,00	14
130	6,71	12,42	17,98	0,21	5110,00	18
19	7,40	8,18	11,03	0,28	3480,00	28
11	4,00	8,05	11,96	0,15	3080,00	17
24	4,78	4,81	7,60	0,22	2010,00	27
116	4,78	4,97	6,40	0,15	2240,00	29
136	9,78	10,82	15,58	0,34	4110,00	27
57	2,32	5,93	8,31	0,04	2140,00	14
95	8,30	6,01	8,79	0,30	3240,00	35
86	14,81	6,01	8,79	0,39	15900,00	49
99	3,68	8,50	13,91	0,07	3200,00	14
26	5,14	4,81	6,56	0,25	2120,00	31
142	9,26	11,62	15,58	0,31	4050,00	25
22	3,05	6,01	7,99	0,06	2200,00	18

ANNEXE –XII-
Teneurs en Na⁺ pour classification WILCOX
Hautes eaux

N° POINT	Na+	Ca+	Mg++	K+	Conductivite (µs/cm)	%Na+
	még/l	még/l	még/l	még/l		
32	4,87	6,15	8,75	0,24	1802,00	24
98	4,79	5,43	5,46	0,11	1350,00	30
97	3,27	4,60	5,43	0,08	1100,00	24
96	3,27	4,51	4,68	0,08	1100,00	26
7	7,23	11,51	8,86	0,39	3000,00	26
63	1,75	3,98	4,39	0,05	790,00	17
68	1,32	4,01	3,92	0,05	500,00	14
33	3,26	5,10	8,00	0,08	1200,00	20
126	7,65	15,53	16,68	0,11	5980,00	19
133	10,91	24,00	20,91	0,39	7950,00	19
123	5,46	12,01	12,13	0,44	3560,00	18
132	13,49	14,00	31,69	0,39	8230,00	23
141	4,57	15,53	2,16	0,22	4120,00	20
61	3,27	8,52	10,27	0,15	2560,00	15
4	3,94	4,46	5,50	0,11	1450,00	28
31	5,57	6,40	9,17	0,15	2020,00	26
113	5,87	18,40	29,17	0,29	6020,00	11
118	6,36	15,60	23,37	0,19	4200,00	14
134	8,45	6,03	9,64	0,22	2890,00	35
75	8,75	8,37	10,66	0,18	2890,00	31
125	5,22	6,45	9,22	0,22	2450,00	25
70	3,39	7,02	12,15	0,09	2300,00	15
81	4,97	9,01	12,56	0,21	3200,00	19
140	6,96	7,15	7,46	0,24	3100,00	32
82	9,57	12,80	17,93	0,36	5960,00	24
18	5,23	5,50	5,91	0,29	2100,00	31
121	4,19	10,08	13,41	0,15	3900,00	15
130	6,70	12,16	17,56	0,21	4850,00	18
19	7,35	8,01	10,91	0,29	3200,00	28
11	3,91	7,75	11,68	0,19	2780,00	17
24	4,78	4,01	7,57	0,22	1980,00	29
116	9,70	4,46	5,85	0,16	1590,00	48
136	9,70	10,52	15,04	0,31	3950,00	27
57	2,18	6,00	8,35	0,06	2100,00	13
95	8,09	5,77	8,44	0,27	3200,00	36
86	14,15	5,81	8,85	0,35	16000,00	49
99	3,57	8,05	14,93	0,08	3000,00	13
26	4,79	5,00	5,85	0,27	2100,00	30
142	9,14	11,51	15,06	0,31	4000,00	25
22	3,27	6,01	7,52	0,05	2100,00	19

ANNEXE –XIII-
Indices d'échange de base
Basses eaux

N° POINT	HCO3 ⁻	SO4 ²⁻	CL ⁻	NO3 ⁻	Na+	K+	Na++K+	HCO3+SO4+NO3	Cl-(Na+K)	I,E,B1	I,E,B2
	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l				
32	4,80	7,92	7,50	0,57	5,00	0,24	5,24	13,29	2,26	0,30	0,17
98	5,00	5,83	5,50	0,20	4,86	0,11	4,97	11,03	0,53	0,10	0,05
97	5,12	5,00	3,40	0,01	3,36	0,09	3,45	10,13	-0,05	-0,02	-0,01
96	5,13	5,10	4,10	0,02	3,40	0,09	3,49	10,26	0,61	0,15	0,06
7	5,30	13,54	9,00	0,03	7,32	0,41	7,73	18,87	1,27	0,14	0,07
63	4,80	3,75	1,80	0,02	1,95	0,07	2,02	8,57	-0,22	-0,12	-0,03
68	5,20	3,33	1,00	0,02	1,53	0,07	1,60	8,56	-0,60	-0,60	-0,07
33	5,30	5,83	5,50	0,03	3,51	0,09	3,60	11,16	1,90	0,34	0,17
126	4,60	29,58	9,40	0,08	7,98	0,11	8,09	34,26	1,31	0,14	0,04
133	5,00	43,75	9,40	0,05	11,27	0,42	11,69	48,80	-2,29	-0,24	-0,05
123	5,80	15,83	9,39	0,05	5,53	0,47	6,00	21,68	3,39	0,36	0,16
132	4,80	45,42	9,60	0,84	13,41	0,44	13,85	51,06	-4,25	-0,44	-0,08
141	5,52	28,33	9,10	0,57	4,55	0,25	4,80	34,42	4,30	0,47	0,12
61	4,80	9,17	8,40	0,27	3,16	0,16	3,32	14,23	5,08	0,60	0,36
4	5,16	5,83	6,00	0,01	4,16	0,11	4,27	11,00	1,73	0,29	0,16
31	6,80	7,50	8,40	0,16	5,63	0,15	5,77	14,46	2,63	0,31	0,18
113	3,40	59,58	9,00	0,46	5,94	0,30	6,24	63,44	2,76	0,31	0,04
118	3,90	28,33	9,20	0,54	6,36	0,19	6,55	32,77	2,65	0,29	0,08
134	5,00	11,25	8,20	0,08	8,45	0,22	8,67	16,33	-0,47	-0,06	-0,03
75	7,20	11,25	9,20	0,01	8,93	0,19	9,12	18,46	0,08	0,01	0,00
125	4,40	8,13	8,70	0,29	5,22	0,25	5,47	12,82	3,23	0,37	0,25
70	5,20	7,50	9,60	0,02	3,42	0,09	3,51	12,72	6,09	0,63	0,48
81	5,70	12,08	9,30	0,02	5,00	0,23	5,23	17,80	4,07	0,44	0,23
140	5,00	8,54	9,50	0,44	7,00	0,28	7,28	13,98	2,22	0,23	0,16
82	4,90	26,67	8,60	0,52	9,36	0,36	9,72	32,08	-1,12	-0,13	-0,04
18	5,50	5,63	8,60	0,00	5,32	0,27	5,59	11,13	3,01	0,35	0,27
121	7,60	11,46	9,40	0,38	4,05	0,12	4,17	19,44	5,23	0,56	0,27
130	4,60	22,92	9,60	0,46	6,71	0,21	6,92	27,98	2,68	0,28	0,10
19	4,60	12,50	9,50	0,23	7,40	0,28	7,68	17,33	1,82	0,19	0,10
11	4,80	10,00	9,20	0,56	4,00	0,15	4,15	15,36	5,05	0,55	0,33
24	5,60	4,58	7,00	0,13	4,78	0,22	5,00	10,32	2,00	0,29	0,19
116	4,70	4,58	8,50	0,81	4,78	0,15	4,93	10,09	3,57	0,42	0,35
136	4,50	22,29	9,30	0,59	9,78	0,34	10,12	27,38	-0,82	-0,09	-0,03
57	4,20	4,17	8,20	0,04	2,32	0,04	2,36	8,40	5,84	0,71	0,69
95	4,00	10,21	8,90	0,04	8,30	0,30	8,60	14,25	0,30	0,03	0,02
86	21,50	7,08	9,20	0,60	14,81	0,39	15,20	29,19	-6,00	-0,65	-0,21
99	5,40	12,08	8,60	0,01	3,68	0,07	3,75	17,49	4,85	0,56	0,28
26	5,00	3,33	8,20	0,67	5,14	0,25	5,39	9,00	2,81	0,34	0,31
142	5,27	21,04	9,10	0,67	9,26	0,31	9,57	26,98	-0,47	-0,05	-0,02
22	4,69	3,96	8,50	0,47	3,05	0,06	3,11	9,11	5,39	0,63	0,59

**ANNEXE –XIV-
Indices d'échange de base
Hautes eaux**

N° POINT	HCO ₃ ⁻ méq/l	SO ₄ ²⁻ méq/l	CL ⁻ méq/l	NO ₃ ⁻ méq/l	Na ⁺ méq/l	K ⁺ méq/l	Na++K ⁺ méq/l	HCO ₃ +SO ₄ +NO ₃	Cl-(Na+K)	I,E,B1	I,E,B2
32	4,80	7,92	7,50	0,57	5,00	0,24	5,24	13,29	2,26	0,30	0,17
98	5,00	5,83	5,50	0,20	4,86	0,11	4,97	11,03	0,53	0,10	0,05
97	5,12	5,00	3,40	0,01	3,36	0,09	3,45	10,13	-0,05	-0,02	-0,01
96	5,13	5,10	4,10	0,02	3,40	0,09	3,49	10,26	0,61	0,15	0,06
7	5,30	13,54	9,00	0,03	7,32	0,41	7,73	18,87	1,27	0,14	0,07
63	4,80	3,75	1,80	0,02	1,95	0,07	2,02	8,57	-0,22	-0,12	-0,03
68	5,20	3,33	1,00	0,02	1,53	0,07	1,60	8,56	-0,60	-0,60	-0,07
33	5,30	5,83	5,50	0,03	3,51	0,09	3,60	11,16	1,90	0,34	0,17
126	4,60	29,58	9,40	0,08	7,98	0,11	8,09	34,26	1,31	0,14	0,04
133	5,00	43,75	9,40	0,05	11,27	0,42	11,69	48,80	-2,29	-0,24	-0,05
123	5,80	15,83	9,39	0,05	5,53	0,47	6,00	21,68	3,39	0,36	0,16
132	4,80	45,42	9,60	0,84	13,41	0,44	13,85	51,06	-4,25	-0,44	-0,08
141	5,52	28,33	9,10	0,57	4,55	0,25	4,80	34,42	4,30	0,47	0,12
61	4,80	9,17	8,40	0,27	3,16	0,16	3,32	14,23	5,08	0,60	0,36
4	5,16	5,83	6,00	0,01	4,16	0,11	4,27	11,00	1,73	0,29	0,16
31	6,80	7,50	8,40	0,16	5,63	0,15	5,77	14,46	2,63	0,31	0,18
113	3,40	59,58	9,00	0,46	5,94	0,30	6,24	63,44	2,76	0,31	0,04
118	3,90	28,33	9,20	0,54	6,36	0,19	6,55	32,77	2,65	0,29	0,08
134	5,00	11,25	8,20	0,08	8,45	0,22	8,67	16,33	-0,47	-0,06	-0,03
75	7,20	11,25	9,20	0,01	8,93	0,19	9,12	18,46	0,08	0,01	0,00
125	4,40	8,13	8,70	0,29	5,22	0,25	5,47	12,82	3,23	0,37	0,25
70	5,20	7,50	9,60	0,02	3,42	0,09	3,51	12,72	6,09	0,63	0,48
81	5,70	12,08	9,30	0,02	5,00	0,23	5,23	17,80	4,07	0,44	0,23
140	5,00	8,54	9,50	0,44	7,00	0,28	7,28	13,98	2,22	0,23	0,16
82	4,90	26,67	8,60	0,52	9,36	0,36	9,72	32,08	-1,12	-0,13	-0,04
18	5,50	5,63	8,60	0,00	5,32	0,27	5,59	11,13	3,01	0,35	0,27
121	7,60	11,46	9,40	0,38	4,05	0,12	4,17	19,44	5,23	0,56	0,27
130	4,60	22,92	9,60	0,46	6,71	0,21	6,92	27,98	2,68	0,28	0,10
19	4,60	12,50	9,50	0,23	7,40	0,28	7,68	17,33	1,82	0,19	0,10
11	4,80	10,00	9,20	0,56	4,00	0,15	4,15	15,36	5,05	0,55	0,33
24	5,60	4,58	7,00	0,13	4,78	0,22	5,00	10,32	2,00	0,29	0,19
116	4,70	4,58	8,50	0,81	4,78	0,15	4,93	10,09	3,57	0,42	0,35
136	4,50	22,29	9,30	0,59	9,78	0,34	10,12	27,38	-0,82	-0,09	-0,03
57	4,20	4,17	8,20	0,04	2,32	0,04	2,36	8,40	5,84	0,71	0,69
95	4,00	10,21	8,90	0,04	8,30	0,30	8,60	14,25	0,30	0,03	0,02
86	21,50	7,08	9,20	0,60	14,81	0,39	15,20	29,19	-6,00	-0,65	-0,21
99	5,40	12,08	8,60	0,01	3,68	0,07	3,75	17,49	4,85	0,56	0,28
26	5,00	3,33	8,20	0,67	5,14	0,25	5,39	9,00	2,81	0,34	0,31
142	5,27	21,04	9,10	0,67	9,26	0,31	9,57	26,98	-0,47	-0,05	-0,02
22	4,69	3,96	8,50	0,47	3,05	0,06	3,11	9,11	5,39	0,63	0,59