

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار-عنابة

Faculté des sciences de la Terre
Département de Géologie

Année 2007

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister

IMPACT DES FORMATIONS TRIASIQUES SUR LES EAUX D'UNE PLAINE EN ZONE SEMI- ARIDE : Cas de la plaine Bekkaria-Tebessa (Extrême Est Algérien).

Option

Hydrochimie

Par

GHRIEB Lassaad

(Ingénieur d'Etat en Hydrogéologie)

DIRECTEUR DE MEMOIRE : M^r : DJABRI Larbi Professeur U.B.M. Annaba

DEVANT LE JURY

PRESIDENT : M^r : LAOUAR. Rabah M .C . U .B.M.Annaba

EXAMINATEURS | M^r : HANI. Azzedine M .C . U .B.M.Annaba

M^r :CHAFFAI. Hichem M .C . U .B.M.Annaba

INVITÉ | M^r :ROUABHIA. A/ Kader M.A.C.C. Tébessa

ملخص

هذا البحث ثم انجازه في منطقة شبه جافة وهي سهل بكارية- تبسة. تأثير التكوينات الترياسية على نوعية المياه شكلت موضوع هذه الدراسة المنطقة موضوع البحث تتميز بتكوين جيولوجي غير متجانس : على الأطراف الجنوبية تظهر تكوينات كلسية متشققة تساهم في تغذية المائدة المائية. التكوينات الترياسية تتميز منطقة جبيسة.

الدراسة الجيوفيزيائية أظهرت المستوى P1 المتوافق مع المائدة المائية السطحية المتكون من مواد ذات مسامية حبيبية متوضعة بشكل منقطع بسمك مختلف. المقاومة تتراوح بين 5 إلى 100 Ω m.

تتميز المنطقة موضوع الدراسة بمناخ شبه جاف، كمية التساقط لا تتجاوز 350 مم/سنة. ملاحظة تاريخ التساقط يوضح تأثير السنوات الجافة على تغذية المائدة المائية.

القياسات البيزوميترية على الآبار في المنطقة توضح أن اتجاه الجريان يتم من الشرق نحو الغرب أي من بكارية نحو تبسة.

دراسة نوعية مياه المنطقة تم التطرق إليه لمعرفة مدى تأثير التكوينات الترياسية المميزة لمنطقة جبيسة ، وكذلك تأثير منجم الحديد في المنطقة.

مختلف طرق الدراسة ساعدت على إظهار عوامل التأثير على نوعية المياه. فعلا إن التكوينات الجبسية عند التحلل تساعد في زيادة نسبة الملوحة.

اهتمام خاص قد أعطي في هذه الدراسة إلى المعادن الثقيلة في منطقة جبيسة.

RESUME

Ce travail a été réalisé dans la plaine Bekkaria –Tébessa; zone semi aride, dont l'objet d'étude est l'impact des formations triasiques sur la qualité des eaux.

Cette région est caractérisée par une géologie très hétérogène, sur les bordures sud affleurent des calcaires fissurés pouvant influencer la recharge de la nappe. Les formations évaporitiques caractérisent la région de Djebel Djebissa.

Les travaux de géophysique dans la région montrent que le niveau P1, qui correspond à la nappe phréatique, est constitué de matériel à porosité d'interstice se déposant à des épaisseurs variables avec quelques discontinuités. Les valeurs de résistivité varient de (5 à 100 Ω m).

Un climat semi-aride caractérise la dite zone, où la pluviométrie ne dépasse pas 350 mm/an. L'observation de l'historique des précipitations a montré au cours des dernières années une domination de périodes sèches, ce qui se répercute négativement sur la recharge de la nappe.

Les campagnes piézométriques effectuées au niveau des puits implantés dans la région mettent en évidence un écoulement dirigé d'Est en Ouest; de Bekkaria vers Tébessa.

L'étude de la qualité des eaux de la région a été abordée avec le souci de mettre en évidence l'influence des évaporites caractérisant la zone de Djebissa ainsi que l'impact de la mine de fer située dans la dite région.

Les méthodes développées, nous ont permis de mettre en évidence l'influence de ces facteurs sur la qualité des eaux.

En effet les formations gypsifères par le biais de la dissolution peuvent entraîner une augmentation de la salinité. Nous signalons qu'un intérêt particulier a été accordé à l'étude des éléments traces métalliques dans la région de Djebissa.

ABSTRACT

This work was carried out in Bekkaria –Tébessa, a semi arid zone; where the purpose of the survey is the impact of the Triassic formations on the quality of water.

The area of study is characterized by a very heterogeneous geology, on the edges south level fissured limestones being able to influence the refill of the ground water. The evaporitic formations characterize the area of Djebel Djebissa.

Geophysics in the area of study shows that the P1 level which corresponds to the ground water consists of material with porosity of interstice settling with some discontinuities and variable thicknesses. The resistivities vary from 5 to 100 $\Omega.m$

The zone of study is characterized by a semi-arid climate. Precipitations do not exceed 350 mm/year. The history of precipitations showed during last years a domination of the dry years, which is reflected negatively on the refill of the ground water.

The piezometric measurements carried out on the wells of the zone of study highlight a flow directed from Bekkaria towards Tébessa.

The study of the water quality of the area was approached with the concern of highlighting the influence of the evaporates characterizing the zone of Djebissa as well as the impact of the iron mine located in the aforementioned area.

The developed methods have enabled us to highlight the influence of these factors on the water quality.

Indeed the formations gypsifères by the means of dissolution can involve an increase in salinity. We highlight that a particular interest was granted to the study metal elements traces in the area of Djebissa.

TABLE DES MATIERES

APERÇU GEOLOGIQUE

I. 1. INTRODUCTION.....	4
I. 2. GEOMORPHOLOGIE	4
I. 2. 1. Introduction.....	4
I. 2. 2. Les monts septentrionaux.....	5
I. 2. 3. Les monts méridionaux.....	5
I. 3. STRATIGRAPHIE ET DESCRIPTION DES FACIES.....	5
I. 3. 1. Le Trias.....	5
I. 3. 2. Le Jurassique	7
I. 3. 3. Le Barrémien.....	7
I. 3. 4. L'Aptien.....	7
I. 3. 4. 1. L'Aptien marneux:.....	8
I. 3. 4. 2. L'Aptien calcaire:.....	8
I. 3. 4. 3. Le Clansayésien:.....	8
I. 3. 5. L'Albien.....	8
I. 3. 6. Le Vraconien.....	8
I. 3. 7. Le Cénomaniens.....	9
I. 3. 8. Le Turonien.....	9
I. 3. 9. Le Campanien-Santonien.....	9
I. 3. 10. Le Maestrichtien.....	9
I. 3. 11. Le Paléocène.....	10
I. 3.12. L'Eocène.....	10
I. 3.13. Le Miocène.....	10
I. 3. 14. Le Quaternaire.....	10
I. 4 : TECTONIQUE DE LA REGION :.....	13
I. 4. 1 Les Phases de l'orogénèse.....	13
I. 4. 2 : La formation du fossé d'effondrement de Tébessa.....	14
I. 5 : Lithostratigraphie, tectonique et conséquences hydrogéologiques :.....	16
I. 6. GEOLOGIE DU MASSIF DE DJEBISSA.....	16
I. 6. 1. Introduction :.....	16
I.6. 2. Stratigraphie du Djebel Djebissa :.....	18
I.6. 2. 1. Trias :.....	18
I.6. 2. 2. Crétacé :.....	19
Aptien- albien :.....	19
Cénomaniens :.....	19
Turonien :.....	19
I.6. 2.3. Quaternaire :.....	19
I. 8. La Tectonique.....	20
I. 8. 1. les déformations souples.....	20
I. 8.2. Les accidents cassants.....	20
I. 9. Minéralisation :.....	20
I. 10. CONCLUSION.....	21

GEOMETRIE DE L'AQUIFERE

II. 1. Introduction.....	22
II. 2. Essai de corrélation entre la géologie et la géophysique.....	22
II. 3. Mise en parallèle des profils géophysiques et des coupes lithologiques.....	24
II. 4. Conclusion.....	26

APERÇU CLIMATIQUE

III. 1. Introduction.....	27
III. 2. Historique :	27
III. 3. Type de climat	31
III. 3. 1. Diagramme pluviothermique :	31
III. 3. 2. Evolution des facteurs climatiques sur la période 1972 à 2006 :	32
III. 3. 2. 1 Les précipitations:.....	32
III. 3. 2. 2 Variation inter annuelle des précipitations	33
III. 3. 2. 3 Variations mensuelles des précipitations:.....	33
III. 3. 2. 4 Répartition saisonnière des précipitations :	34
III. 3. 2. 5. Les températures	35
III. 3. 2.6. La neige.....	36
III. 3. 3. Calcul du coefficient pluviométrique :	36
III. 3.4. Détermination des indices climatiques	37
III. 3.4. 1. Climagramme d'Emberger	37
III. 3. 4. 2. Indice d'aridité de De. Martonne:.....	38
III. 4. Le Bilan hydrique	40
III. 4. 1. Etude de l'évapotranspiration	40
a. Estimation de l'évapotranspiration potentielle : (ETP).....	40
b. Estimation de l'évapotranspiration réelle: (ETR).....	41
III. 4. 2. Estimation des réserves facilement utilisables:	41
III. 4. 3. Indice thermique mensuel.....	41
III. 4. 4. Indice thermique annuel.....	42
III. 4. 5. Répartition des précipitations	42
a. / Calcul du ruissellement.....	42
b. / Calcul de l'infiltration:	42
III. 4. 6. Commentaire sur le bilan hydrique.....	47
III. 5. Variation de l'écoulement interannuel moyen :	52
III. 6. Conclusion	52

APERÇU HYDROGEOLOGIQUE

IV. 1. INTRODUCTION :	53
IV. 2. La piézométrie des puits domestiques :	53
IV. 2. 1. Interprétation des cartes piézométriques :	53
a. / Carte piézométrique de la période des hautes eaux (mars 2006) :	53
b. / Carte piézométrique de la période des basses eaux (juillet 2006) :	54
IV. 2. 2. Conclusion	55
IV. 4. Détermination des paramètres hydrodynamiques de la nappe profonde :	55
IV. 3. Carte des conditions aux limites :	59
IV. 3. 1. Conditions aux limites et apports souterrains.....	59
IV. 5. Conclusion	59

QUALITE DES EAUX

V. 1. Introduction:	60
V. 1. 1. Caractéristiques des eaux des puits :	60
V. 1. 2. Echantillonnage	60
V. 2. Caractérisation hydrochimique des eaux souterraines	61
V. 2. 1. Statistiques monodimensionnelles	61
V. 2. 2. Analyse multidimensionnelle	62
V. 2. 2. 1. L'analyse en composantes principales (ACP)	62
V. 2. 2. 2. Etude des variables:	62
V. 2. 2. 3. Période des hautes eaux:	62
V. 2. 2. 3. Etude des individus	64
V. 2. 2. 4. Période des basses eaux	65
V. 2. 2. 5. Etude des individus	67
V. 2. 3. Conclusion:	68
V. 3. L'Outil Géostatistique	69
V. 3. 1. Analyse Géostatistique	69
V. 3. 1. 1. Calcul du variogramme	69
V. 3. 1. 2. Le krigeage	69
a / Krigeage ordinaire	69
V. 4. Estimation des classes de la CE	70
V. 4. 1. Estimation de la CE par krigeage ordinaire	70
V. 4. 1. 1. Variographie de la CE	70
A- Période des hautes eaux:	70
B- Période des basses eaux:	70
V. 4. 1. 2. Cartographie de la CE	71
V. 4. 1. 3. Estimation spatiale des fonctions indicatrices	73
V. 4. 2. Conclusion	75
V. 5. Facteurs régissant le chimisme des eaux:	75
V. 5. 1. Géologie:	75
V. 5. 1. 1. Les bases de la thermodynamique:	75
A/ Relation activité concentration :	75
B/ L'activité ionique	76
V. 5. 1. 2. Indice de saturation	76
V. 5. 1. 2. 1. Application aux eaux de la région étudiée :	77
V. 5. 1. 2. 2. Evolution des valeurs des SI dans les eaux de la région :	78
V. 5. 2. Le climat:	80
V. 5. 3. Le niveau statique:	80
V. 6. Impact de la mine abandonnée sur la qualité des eaux de surface :	81
V. 6. 1. Caractéristiques des eaux de surface :	81
V. 6. 1. 1. Caractéristiques des eaux au niveau du point 1 :	82
V. 6. 1. 2. Caractéristiques des eaux au niveau du point 2 :	82
V. 6. 1. 3. Caractéristiques des eaux au niveau du point 3 :	84
V. 6. 1. 4. Caractéristiques des eaux au niveau du point 4 :	85
V. 6. 1. 5. Caractéristiques des eaux au niveau du point 5 :	86
V. 6. 1. 6. Caractéristiques des eaux au niveau du point 6 :	87
V. 6. 1. 7. Caractéristiques des eaux au niveau du point 7 :	88
V. 6. 1. 8. Caractéristiques des eaux au niveau du point 8 :	89
V. 6. 2. Evolution du chimisme dans les puits de Djebissa :	90

MODELE

VI. Réseaux de neurones artificiels	94
VI.1. Présentation de la méthode neuronale	94
VI.2. Connexions entre les neurones	94
VI. 3. Application du modèle de RNA (ou ANN):	96
VI. 3. 1. Architecture du réseau	96
VI. 3. 2. Choix des critères d'exécution:	96
VI. 4. Création du modèle.....	97
VI. 5. Calibrage et vérification du modèle:	99
VI. 5. 1. Détermination des modèles d'entrées	99
VI. 5. 1. 1. Résultats et discussion :	100
VI. 6. Conclusions:	101

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE.....	103
--------------------------	-----

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXE

LISTE DES FIGURES

N°		Page
1	Situation Géographique de la région d'étude.....	3
2	Croquis géomorphologique de la région de Tébessa	4
3	Colonne stratigraphique synthétique de la région de Tébessa.....	6
4a	Cadre géologique de la région de Tébessa.....	12
4b	Coupe Schématique dans les formations géologiques de la région de Tébessa.....	12
5	Esquisse tectonique de la région de Tébessa.....	15
6	Carte géologique simplifiée de Djebel Djebissa.....	17
7	Coupe géologique montrant la position de la zone minéralisée.....	18
8	Les argiles rouges du Trias en contact avec les formations du Quaternaire.....	18
9	Les conglomérats du Quaternaire à disposition verticale (mine de fer Khanget).....	19
10	Carte d'implantation des sondages électriques.....	22
11	Profils géo électriques Coupe de U à W.....	23
12	Profils géo électriques Coupes X, YZ.....	24
13	Carte de répartition de la lithologie du niveau P1 Région de Djebel Djebissa.....	25
14	Précipitations annuelles médianes « normales» (1965-95).....	27
15	Répartition interannuelle des précipitations sur une période de 100 ans 1906-2006.....	28
16	Répartition interannuelle des précipitations (1906-1925).....	28
17	Répartition interannuelle des précipitations (1926-1945).....	29
18	Répartition interannuelle des précipitations (1946-1965).....	29
19	Répartition interannuelle des précipitations (1966-1985).....	30
20	Répartition interannuelle des précipitations (1986-2006).....	30
21	Diagramme pluviothermique de la station de Tébessa.....	31
22	Diagramme pluviothermique de l'année la plus arrosée (72/1973).....	32
23	Diagramme pluviothermique de l'année la plus sèche à la station de Tébessa 96/97).....	33
24	Variation interannuelle des précipitations à la station de Tébessa (1972/2006).....	34
25	Variation des moyennes mensuelles annuelles des précipitations (72/2006).....	34
26	Répartition saisonnière des précipitations (1972/2006).....	35
27	Répartition saisonnière des précipitations (1996/2006).....	35
28	Répartition mensuelle des températures 72/2006.....	36
29	Températures moyennes interannuelles à la station de Tébessa (72/2006).....	38
30	Climagramme d'EMBERGER.....	39
31	Abaque de l'Indice d'aridité Annuel de DE Martone 1923.....	40
32	Abaque de l'Indice d'aridité Mensuel de DE Martone 1923.....	48
33	Représentation graphique du bilan de Thornthwaite (1972/2006).....	49
34	Représentation graphique du bilan de Thornthwaite (1986/2006).....	50
35	Représentation graphique du bilan de Thornthwaite (1972 /73).....	51
36	Représentation graphique du bilan de Thornthwaite (1996 /97).....	52
37	Ecoulement interannuels moyens dans la zone d'étude (1965-1995).....	53
38	Carte d'inventaire des points d'eau.....	54
39	Carte piezométrique Mars 2006 Plaine de Tébessa.....	55

40	Carte piezométrique Juillet 2006 Plaine de Tébessa.....	56
41	Carte d'inventaire des forages Plaine de Tébessa.....	57
42	Courbe de remontée et de descente du forage X4.....	59
43	Carte Géologique et des conditions aux limites.....	61
44	Carte de la répartition des échantillons dans la zone d'étude.....	64
45	Cercle de corrélation des variables dans le plan formé par l'axe 1 et l'axe 2.....	65
46	Projection des individus sur le plan formé par les deux premiers axes hautes eaux.....	65
47	Cercle de corrélation des variables dans le plan formé par l'axe 1 et l'axe 2.....	67
48	Projection des individus sur le plan formé par les deux premiers axes basses eaux.....	68
49	Variogramme expérimental de la conductivité électrique Hautes eaux.....	70
50	Variogramme expérimental de la conductivité électrique Basses eaux.....	70
51	Carte des écarts types d'estimations de la Conductivité électrique Hautes eaux.....	71
52	Carte des écarts types d'estimations de la Conductivité électrique Basses eaux.....	72
53	Carte d'estimation de la Conductivité électrique par krigeage ordinaire Hautes eaux...	72
54	Carte d'estimation de la Conductivité électrique par krigeage ordinaire Basses eaux.....	73
55	Variogramme de la fonction indicatrice au seuil > 1000 de la CE des hautes eaux.....	74
56	Variogramme de la fonction indicatrice au seuil > 1000 de la CE des basses eaux.....	74
57	Carte de probabilité de seuil de dépassement de la CE >1000 des Hautes eaux	74
58	Carte de probabilité de seuil de dépassement de la CE >1000 des Basses eaux.....	75
59	Evolution des indices de saturation dans les eaux de la région.....	78
60	Histogramme montrant les variations du rapport Sr^{2+}/Ca^{2+}	79
61	Carte de répartition des rapports Sr^{2+}/Ca^{2+}	79
62	Répartition des points de prélèvement des eaux de surface.....	81
63	Evolution du chimisme au point 1.....	82
64	Evolution du chimisme au point 2.....	83
64a	Stock de terrils de la mine de fer.....	83
65	Evolution du chimisme au point 3.....	84
66	Evolution du chimisme au point 4.....	85
67	Evolution du chimisme au point 5.....	86
68	Evolution du chimisme au point 6.....	87
69	Evolution du chimisme au point 7.....	88
70	Evolution du chimisme au point 8.....	89
71	Répartition des points de prélèvement des eaux des puits.....	90
72	Evolution du chimisme au puits 1.....	91
73	Evolution du chimisme au puits 2.....	91
74	Evolution du chimisme au puits 3.....	92
75	Schéma d'un neurone artificiel.....	94
76	Schéma d'un neurone biologique.....	94
77	Illustration du réseau à 3 couches (MLP).....	98
78	Fonction de transfert sigmoïde.....	99
79	Corrélation entre la conductivité simulée et mesurée.....	100
80	Erreur RMS avec nombre de nœuds cachés.....	101

LISTE DES TABLEAUX

N°		Page
1	Valeurs des résistivités et lithologie correspondante Djebel Djebissa.....	25
2	Récapitulatif des données statistiques.....	30
3	Précipitations moyennes mensuelles (mm) à la station de Tébessa (72/2006).....	33
4	Récapitulation des années humide dépassant la moyenne.....	33
5	Répartition saisonnière des précipitations pour les périodes 72/2006 et 2001/2006.....	34
6	Moyenne mensuelle des précipitations 72/2006.....	35
7	Coefficient pluviométrique de la plaine de Tébessa.....	37
8	Indice d'aridité mensuel.....	39
9	Valeurs de l'ETR.....	41
10	Résultats du ruissellement Pour les différentes périodes.....	42
11	Résultats de l'infiltration pour les différentes périodes.....	42
12	Récapitulatif des résultats de ETR, R, I, pour les différentes périodes.....	43
13	Bilan hydrique global d'après la méthode de Thornthwaite (72/2006).....	44
14	Bilan hydrique d'après la méthode de Thornthwaite (Station de Tébessa de 96/2006) ...	45
15	Bilan hydrique d'après la méthode de Thornthwaite (année pluvieuse 72 /73).....	46
16	Bilan hydrique d'après la méthode de Thornthwaite (année sèche 96/97).....	47
17	Valeurs de quelques paramètres hydrodynamique des forages.....	58
18	Paramètres statistiques.....	61
19	Coefficient de corrélation entre les variables initiales.....	62
20	Valeurs propres et pourcentages des axes principaux.....	63
21	Corrélations des variables aux axes principaux.....	63
22	Coefficient de corrélation entre les variables initiales.....	65
23	Valeurs propres et pourcentages des axes principaux.....	66
24	Corrélations des variables aux axes principaux.....	66
25	Paramètres d'ajustement des variogrammes expérimentaux de la CE.....	73
26	Valeurs limites de l'activité (moles/l).....	76
27	Valeurs de l'indice de saturation.....	77
28	Analogie entre les neurones biologiques et artificiels.....	95
30	Paramètres statistiques de régression	101

INTRODUCTION :

L'année 2003 a été proclamée Année internationale de l'eau douce par l'UNESCO et par l'Assemblée générale de l'ONU. De plus, le Comité des droits économiques, sociaux et culturels de l'ONU vient de déclarer que l'accès à l'eau potable est un droit humain fondamental. Entre le Sommet de la Terre de 1992 à Rio et celui de Johannesburg en 2002, il y a eu une prise de conscience croissante du fait que l'eau est un enjeu vital pour l'avenir.

L'eau est une question émergente en ce qui concerne l'accès à l'eau potable, la qualité de cette eau, et le problème de sa privatisation et ces questions sont perçues comme des enjeux majeurs pour les droits humains, l'équité, et la démocratie.

L'eau est un élément matériel de base et une ressource naturelle très précieuse, dont les usages domestiques, agricoles, industriels, urbains et de loisirs sont devenus considérables.

L'eau douce est un enjeu économique et stratégique central, une source potentielle de conflits majeurs. L'accès à l'eau et sa maîtrise est dorénavant des enjeux incontournables pour les collectivités locales et les gouvernements, au même titre que la terre l'a été tout au cours de l'histoire.

Nous sommes maintenant devant la nécessité d'utiliser, de gérer, et de protéger l'eau de façon durable, car elle est à la base de toutes les formes de vie sur Terre. Tout comme l'air que nous respirons, l'eau de qualité et en quantité suffisante est un trésor collectif indispensable et irremplaçable, qui est en train de devenir un objet de conflits et de guerres, ainsi que de commerce et de profits mirobolants. Comme l'air, c'est un bien commun de l'humanité dont l'accès est un droit humain individuel et collectif inaliénable. Il faut donc éviter à tout prix de «pétroliser» l'or bleu en le privatisant et en le commercialisant. Au moment même où l'humanité fait face à une sérieuse pénurie d'eau potable et donc à une crise grave qui menace la survie des humains sur Terre, des gouvernements et des institutions internationales à la solde d'intérêts financiers privés préconisent la privation et la marchandisation de l'eau douce, une solution qui ne fera qu'empirer le problème.

Ces recommandations ne tiennent pas compte de l'impact des formations géologiques sur la qualité des eaux. En effet l'Algérie perd des quantités importantes (ni consommées ni utilisées) en eau dues à la salinité engendrée par l'interaction eau roche. Nous rappelons qu'une eau fortement minéralisée ne peut être consommée par l'être humain car le corps

humain a ses limites en matière de salinité des eaux, par ailleurs une irrigation à partir des eaux fortement minéralisées engendre une asphyxie des plantes.

Le but recherché par ce travail est la détermination et la localisation des facteurs provoquant la salinité des eaux, pour atteindre nos objectifs nous avons procédé de la manière suivante :

- Aspects quantitatifs et qualitatifs des eaux de la plaine de Tébessa,
- Influence de la mine de fer abandonnée de Khanguet sur la pollution des eaux de la zone de Djebel Djebissa.
- Aspects Quantitatifs, définis par les résultats obtenus à partir de la climatologie et l'hydrogéologie.
- Aspects qualitatifs, issus de la compilation des résultats relatifs à la géologie, la géophysique et la chimie des eaux.

Pour caractériser l'influence de la mine de fer abandonnée nous nous sommes intéressés uniquement aux points d'eau situés en aval de cette mine.

Les résultats obtenus par les différentes méthodes concordent et montrent une relation de cause à effet entre les différents paramètres étudiés : la salinité des eaux reste très influencée par le climat et la géologie.

Contexte géographique :

Tébessa, ville frontalière avec la Tunisie, est située à l'extrême Nord-Est algérien (fig. 1), aux portes du désert, à environ 230 km au Sud de Annaba sur la côte méditerranéenne. La région est limitée au Sud par le secteur de Biskra, à l'Ouest par celui de Constantine et à l'Est par la frontière Algéro-Tunisienne.

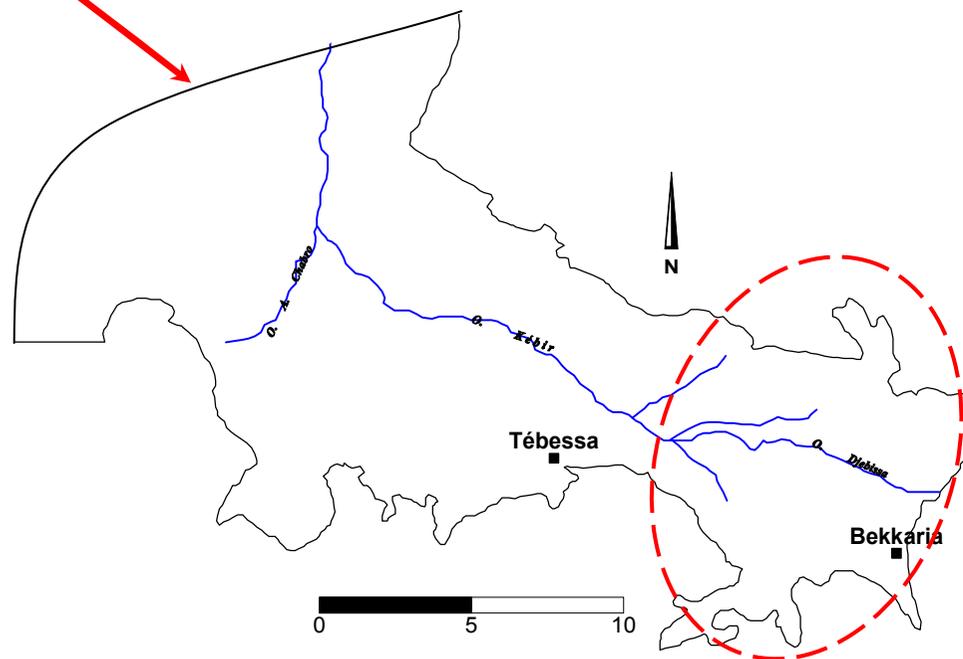
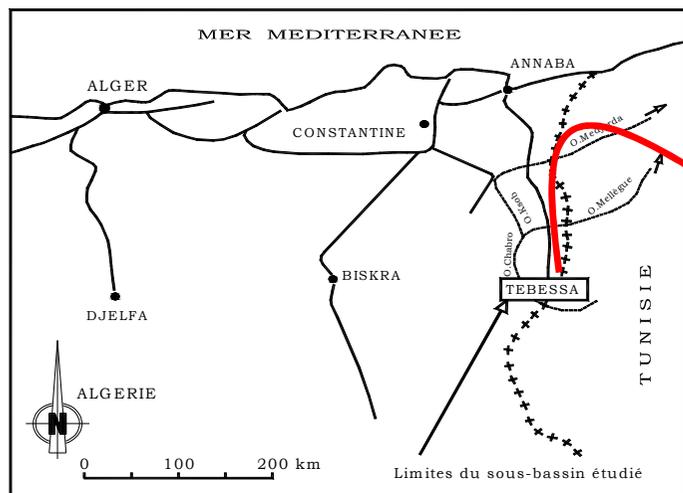


Fig.1. Situation Géographique de la région d'étude

CHAPITRE I : APERÇU GEOLOGIQUE

I. 1. INTRODUCTION

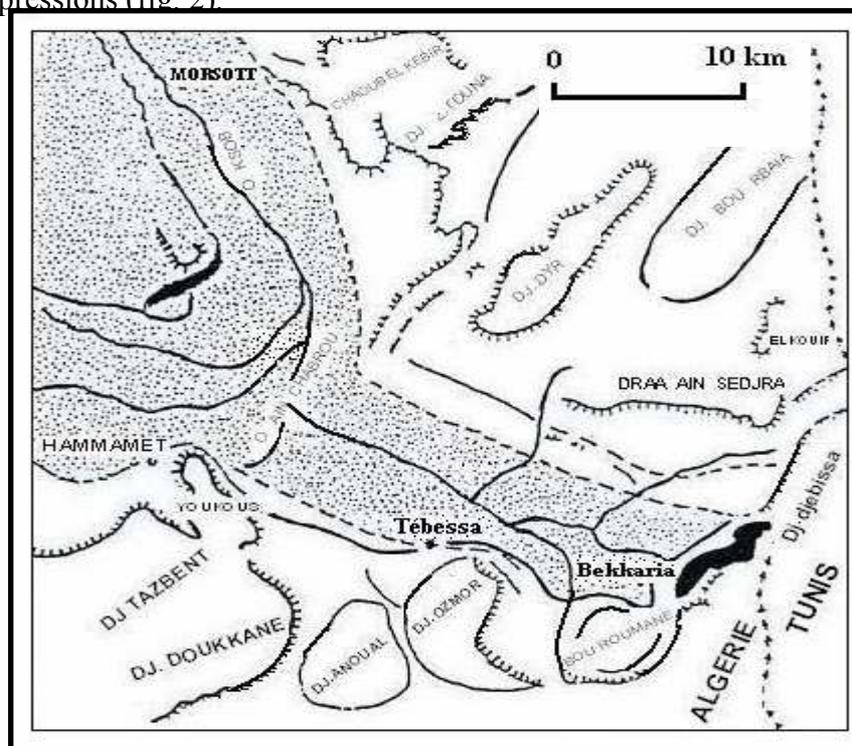
La région de Tébessa fait partie de la structure autochtone Nord-aurésienne (Aurès Nememcha) de l'atlas saharien (Durozoy, 1956 ; Blès, 1969 ; Fleury, 1970 ; Vila, 1974 ; Kowalski *et al.*, 1995, 1996, 1997). Elle est constituée essentiellement des formations suivantes:

- Une formation triasique diapirique disloquant des formations subjacentes au niveau du Djebel Djebissa
- Des formations carbonatées représentées par d'importantes couches calcaire-marneuses et de marnes d'âge Crétacé à Tertiaire. Certaines de ces formations sont observables au niveau des bordures de la plaine de Tébessa – sujet de cette étude.
- Un important dépôt alluvionnaire Mio-Plio-quaternaire qui repose en discordance avec les formations précédentes et forme ainsi le remplissage de la dépression, actuellement la plaine. Cette formation est observable surtout au piedmont des reliefs accidentés.

I. 2. GEOMORPHOLOGIE

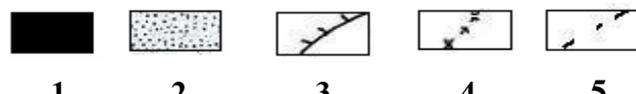
I. 2. 1. Introduction

La plaine de Tébessa correspond à un grand fossé d'effondrement qui recoupe orthogonalement des plis anticlinaux et synclinaux d'axes NE-SW. Les grands accidents disloquant ces structures, ont donné à la région sa physionomie actuelle. La plaine est entourée de part et d'autres par deux grands ensembles d'affleurements calcaires, séparés par des dépressions (fig. 2)



F. THOMAS (1974)

Fig. 2. Croquis géomorphologique de la région de Tébessa



- 1 : Trias, 2: Quaternaire, 3 : Limite d'unité géomorphologique,
4 : Frontière Algero- 5 : Accident tectonique.

I. 2. 2. Les monts septentrionaux

Le passage des hautes plaines de Mellegue aux monts de Tébessa se manifeste par le rétrécissement des plaines et par l'accentuation des unités géomorphologiques tel que le val perché de Dyr et celui de Bou Rbaia. La majorité des plis dans cette bordure septentrionale sont tranchés par des failles transversales NW-SE.

I. 2. 3. Les monts méridionaux

Au sud, le fossé d'Ain Chabro tranche les monts de Nememcha, interrompant les formes du relief qui possédaient, auparavant, une certaine symétrie. Le relief devient de plus en plus complexe à l'Est de Djebel Doukkane ; la barrière orientée E-W s'incline vers le Nord-Est où elle ferme la plaine de Tébessa. Cette barrière se présente en petits massifs tels que Djebel Anoual, Djebel Azmor, Djebel Bouroumane et celui de Djebissa.

I. 3. STRATIGRAPHIE ET DESCRIPTION DES FACIES

Une synthèse sur les travaux lithostratigraphiques dans la région de Tébessa a été donnée par Salmi-Laouar (2004). Je présente ici l'essentiel de cette description avec présentation d'un log lithologique synthétique (Fig. 3).

I. 3. 1. Le Trias

Les terrains les plus anciens connus dans "la zone de diapirs" de la région de Tébessa appartiennent au Trias. Celui-ci a été daté par analogie à Dj. Chettaba (Bertrand, 1896a). Les pointements triasiques qui affleurent dans cette région ont depuis toujours fait l'objet d'une attention particulière, en raison de leur importance pour l'exploration des champs miniers et pétroliers. En Algérie nord orientale et en Tunisie, les nombreux diapirs sont à trias évaporitique sans sel affleurant; toutefois la présence du sel est souvent confirmée en profondeur (Bouzenoune, 1993; Perthuisot, 1994).

La succession lithologique complète du Trias dans la "zone des diapirs" n'est pas connue avec précision. Cependant, ce dernier garde une composition lithologique assez constante, du moins dans toute la région de Tébessa. Son épaisseur demeure également inconnue mais elle est évaluée à plus de 1000 mètres (Rouvier *et al.*, 1985; Pohl *et al.*, 1986). Au cours de la période triasique s'est déposée une puissante série de dépôts évaporitiques et argilo-gypsifères dans des bassins lagunaires et lacustres (Chevenine *et al.*, 1989). Il s'agit de marnes bariolées à gypse, de dolomies, de calcaires dolomitiques, de grés. La présence de grains de pyrite et de cristaux de quartz bipyramidés est la caractéristique marquante du Trias. Dans la zone des "dômes" de Tunisie, de nombreux auteurs, en particulier Burollet (1973) et Perthuisot (1978), ont donné un aperçu synthétique sur les dépôts triasiques. Selon ces auteurs, le Trias débute par une série détritique (grés et pélites) observée localement, suivie d'un ensemble évaporitique puissant, au sein duquel s'intercalent des niveaux d'argiles bariolées, des grés fins psammitiques associés à des niveaux carbonatés irréguliers.

Dans la région de Tébessa, le Trias affleure sous forme d'extrusions et occupe généralement le cœur des structures anticlinales (Perthuisot et Rouvier, 1992; Aoudjehane *et al.*, 1990; 1992), avec des récifs à son apex à l'Aptien et à l'Albien (Masse et Chikhi-Aouimeur, 1982).

Ces corps triasiques présentent des dimensions variables sous forme de sections elliptiques parfois très étirées, sur une bande orientée NE-SW sur environ 80 Km. Les

		Lithologie	Epaisseur (m)	Description lithologique																																																																																																																																																																																				
CENOZOIQUE	Quaternaire		⑥ 10-30	Dépôts clastiques d'origine continentale.																																																																																																																																																																																				
	Néogène	Miocène		⑤ 10-150	Conglomérats à grains variés avec un ciment carbonaté, grès quartzeux et calcaire sableux avec intercalations d'argilites.																																																																																																																																																																																			
				200	Calcaires marneux à silex et intercalations de phosphates par endroits dans le mur.																																																																																																																																																																																			
	E	O	C	E	R	I	E	U	R	M	A	S	U	P	E	R	C	O	N	O	Z	E	F	U	R	Vracon.		② 500-600	Marnes et marnes-argileuses avec intercalations de calcaires argileux et argilites.																																																																																																																																																											
																											E	O	C	E	R	I	E	U	R	M	A	S	U	P	E	R	C	O	N	O	Z	E	F	U	R	Albien		480-600	Marnes grises et gris-foncées, noires dans la partie supérieure avec de minces intercalations de calcaires argileux.																																																																																																																																	
																																																					E	O	C	E	R	I	E	U	R	M	A	S	U	P	E	R	C	O	N	O	Z	E	F	U	R	Clans		100-200	Marnes grises, gris-jaunes partiellement avec des intercalations de calcaires.																																																																																																							
																																																																															E	O	C	E	R	I	E	U	R	M	A	S	U	P	E	R	C	O	N	O	Z	E	F	U	R	Aptien		① 300-600	1- Faciès clastique, marnes argileuses avec intercalations de marnes sableuses et grès calcaires. 2- Faciès carbonaté, calcaires organo-détritiques, bioclastes, ooclastes et intercalations.																																																																													
																																																																																																									E	O	C	E	R	I	E	U	R	M	A	S	U	P	E	R	C	O	N	O	Z	E	F	U	R	Barrém		< 250	Calcaires et dolomies, argilites et argiles dans la partie supérieure (Grès à Mesloulia).																																																			
																																																																																																																																			E	O	C	E	R	I	E	U	R	M	A	S	U	P	E	R	C	O	N	O	Z	E	F	U	R	Jurassique		?	Formations marno-gypsifères bariolées																									
																																																																																																																																																													E	O	C	E	R	I	E	U	R	M	A	S	U	P	E	R	C	O	N	O	Z	E	F	U	R	Trias		< 700

Fig. 3. Colonne stratigraphique synthétique de la région de Tébessa.

(D'après : Dubourdiu 1956, 1959; David 1956; Madre 1969; Fleury 1969; Thibieroz et Madre 1976; Chikhi 1980; Otmanine 1987; Bouzenoune 1993 ; Vila et al., 2000; Salmi-Laouar, 2004).

affleurements les plus importants sont ceux de Djebissa, Ouenza, Boukhadra, Mesloul, Boujaber, Hameimat nord, Hameimat sud et bien d'autres massifs.

Le déclenchement des phénomènes halocinétiques est lié à la distension (en blocs basculés) qui a caractérisé l'Atlas saharien oriental durant le Crétacé, après fracturation du substratum anté-salifère (Vila, 1980). La mobilisation du matériau salifère est favorisée par son fluage et l'existence de zones fragiles dans la couverture post-salifère. Elle provoque ainsi son ascension et sa migration vers le haut et une intense subsidence pour les formations post-apitiennes d'une puissance d'environ 5000 m dans les bassins inter-diapiriques. La plasticité et la densité légère de ce matériau ont favorisé, au cours de son ascension, sa déformation intense et la disparition de son aspect stratigraphique originel compliqué ultérieurement par les phases tectoniques. Il est évident donc, qu'à l'échelle de l'affleurement, le Trias forme un ensemble chaotique non structuré. Ces critères ne sont que des effets de la mobilisation triasique enregistrée dans le faciès évaporitique lui-même. Cette mobilisation se traduit aussi par l'évolution d'une structure à plusieurs zonations minéralogiques accompagnée dans la plupart des cas par des concentrations métallifères Pb-Zn- Ba-Sr (Rouvier *et al.*, 1985, Sheppard *et al.*, 1996).

Les arguments et les conséquences du diapirisme sur la couverture post-triasique retenus par les diapiristes se traduisent par des remaniements de faciès, des constructions récifales, des variations lithologiques et des épaisseurs de sédiments albo-apitiens et des contacts verticaux avec les séries de la couverture et leur renversement. Ces effets sont visibles dans de nombreux massifs.

I. 3. 2. Le Jurassique

Les dépôts jurassiques sont absents dans la région en question (Dubourdiou, 1956; Chevenine *et al.*, 1989) mais ils ont été recoupés par des sondages pétroliers en dehors des zones diapiriques (Beghoul, 1974).

I. 3. 3. Le Barrémien

Les seules formations qui se rapportent au Barrémien, affleurent au petit anticlinal de Sidi Embarka au NE de Dj. Ouenza, sur le flanc SW de l'anticlinal de Mesloul et le long de l'oued Batma et au NW de Dehar Mesloul (Dubourdiou, 1956). Ailleurs des mouvements d'effondrements (Boukhadra-Hameimat) et la poussée triasique (Ouenza, Boujaber, Dubourdiou, 1956), empêchent d'observer les sédiments antérieurs à l'Aptien.

Les formations barrémiennes sont représentées essentiellement par des marnes grises ou jaunes assez argileuses, à ammonites pyriteuses. Vers le sommet, ces marnes sont intercalées par de minces passées de calcaires noduleux gris clair à patine ocre (Dubourdiou, 1956). Ces formations ne dépassent pas les 250 mètres d'épaisseur. Elles se sont déposées sur un haut fond assez proche de la surface (Dubourdiou, 1956), et témoignent des conditions de sédimentation en mer peu profonde. Ces conditions de sédimentation se sont poursuivies jusqu'au début de l'Aptien.

I. 3. 4. L'Aptien

Sur de vastes surfaces, l'Aptien prend dans "la zone des diapirs" de la région de Tébessa une grande importance par la nature de ses dépôts et leur développement substantiel (300 à 600 m d'épaisseur) (Fig. 3). Il est formé de roches carbonatées néritiques qui se sont déposées dans des eaux chaudes peu profondes. Ces conditions ont favorisé l'essor des processus organogènes de la sédimentation qui a mené à la formation de différentes constructions. A l'Aptien, la mer était plus étendue qu'au Barrémien. Le fait le plus marquant de cette période est la formation des récifs sur des rides allongées (Dubourdiou, 1956). Durant l'Aptien supérieur, la région de Tébessa a connu le développement de nombreuses plates-formes isolées dont l'architecture est contrôlée par des remontées diapiriques (Dubourdiou,

1956). Ce complexe fait partie du domaine des hauts-fonds qui séparait, durant l'Aptien un domaine profond (sillon de Sellaoua) d'un autre très subsident (sillon atlasique oriental). Ces faciès aptiens annoncent une régression fini- aptienne.

La formation aptienne débute par un Aptien essentiellement marneux composé par une alternance de marnes, d'argile, de grès et de calcaire à Gastéropodes, Mollusques et Echinoïdes. Cet Aptien marneux est surmonté par un Aptien calcaire, formé de puissants blocs calcaires à ciment dolomitique, bioclastiques à orbitolines, rudistes et qualifiés de récifaux (Dubourdiou, 1956). Le Clansayésien est composé quant à lui par des marnes grises à jaunes avec des intercalations gréseuses et calcaires (Dubourdiou, 1956).

L'Aptien et les successions du Clansayésien apparaissent au cœur des anticlinaux de la région.

I. 3. 4. 1. L'Aptien marneux:

Il est présenté par des gros bancs massifs et épais de calcaires bréchiques à ciment dolomitique, de calcaires graveleux et bioclastiques à Orbitolines et de Mollusques. Parfois, on rencontre des intercalations de quelques niveaux de marnes feuilletées de couleur rouge violacée ou verte. On note la présence de quelques Lamelibranches, de moules internes de Gastéropodes au niveau de Djebel Bouroumane. Cette formation peut atteindre 450 m d'épaisseur.

I. 3. 4. 2. L'Aptien calcaire:

Il surmonte l'Aptien marneux et renferme le plus souvent des miliolles, des rudistes et des lamelibranches (Chikhi-Aouimeur, 1980) et une abondance de quartz automorphe. L'épaisseur de cette formation varie entre 100 et 170 mètres. Ces calcaires sont considérés comme un métallotecte lithologique puisqu'ils encaissent l'essentiel de la minéralisation ferrifère et/ou polymétallique (Dubourdiou, 1956; Bouzenoune, 1993) ;

I. 3. 4. 3. Le Clansayésien:

Il affleure dans divers anticlinaux de la région étudiée, il s'agit des marnes grises, jaunes à Ammonites avec des calcaires gréseux (Dubourdiou ; 1956).

La formation aptienne présente une épaisseur totale de l'ordre de 700m en moyenne.

I. 3. 5. L'Albien

Généralement, la formation albienne débute par un faciès carbonaté qualifié de « récifal » dans sa partie inférieure et marneux et marno-calcaire dans sa partie moyenne à supérieure. Dans la région de Tebessa, il est marqué par une faune benthique dans des zones peu profondes. A l'Albien supérieur, la couverture albo-aptienne est percée par le Trias, entraînant le redressement des couches et la complexité des structures (plis évasés, plis en champignon, etc.) généralement scellées par le Vraconien (Bouzenoune, 1993; Othmanine, 1987; Nedjari-Belhocène et Nedjari, 1984).

Une série monotone de marnes à argiles d'un gris foncé avec passage de calcaires à marnes noires. Sa puissance varie de 20 à 150 mètres.

I. 3. 6. Le Vraconien

Il est composé généralement par des marnes à intercalation de calcaires argileux et argilites de 500 à 600 mètres d'épaisseur (Dubourdiou, 1956). Il est généralement transgressif dans quelques régions sur le Trias (Thibiéroz et Madre, 1976) et sur l'Aptien

(Othmanine, 1987). Avec sa sédimentation marno-argileuse, le Vraconien forme un écran immédiat et un contrôle principal à la minéralisation polymétallique.

I. 3. 7. Le Cénomanien

Dans la Région de Tébessa, une série monotone de marnes argileuses verdâtres s'installe au Cénomanien inférieur. Au Cénomanien moyen, ces marnes admettent diverses intercalations calcaires peu développées avec une faune plus au moins abondante et de veinules de calcite fibreuse. Au Cénomanien supérieur, la sédimentation devient carbonatée. L'épaisseur totale de la formation cénomanienne est estimée entre 750 et 1100 mètres.

La sédimentation cénomanienne s'est déposée dans des conditions abyssales (profondes). Cette époque est caractérisée par des décrochements traduisant un raccourcissement NE-SW (Othmanine, 1987). A l'approche du Turonien, la sédimentation change rapidement en même temps que disparaissent les fossiles. Les marnes argileuses sont remplacées par des couches chargées en carbonate de chaux (Duboudieu, 1956). La limite supérieure du Cénomanien est difficilement distinguable (Dubourdieu, 1956).

I. 3. 8. Le Turonien

Il se fait remarquer par son changement rapide de sédimentation vers des calcaires compacts donnant lieu à des reliefs accusés. Le Turonien constitue les flancs des grands anticlinaux et synclinaux et ses formations affleurent également en dehors des zones diapiriques.

L'analyse lithologique faite par Salmi-Laouar (2004) montre que la partie inférieure du Turonien dans le massif d'Essouabaa, épaisse de 200 mètres environ, est formée d'une série d'alternance stratocroissante de marnes, de calcaire marneux et de calcaires. Les marnes sont parfois argileuses de couleur grisâtre, d'ordre métrique à plurimétrique. L'épaisseur des bancs de calcaires marneux et des calcaires fins micritiques sont aussi d'ordre métrique à plurimétrique. L'étude de la microfaune a livré des sections du genre *Weithenella* et du genre *Hedbergella*. Sachant que ces genres sont très abondants à la limite Cénomanien-Turonien ainsi que dans le Turonien inférieur, l'âge turonien inférieur pour ces niveaux est admis et confirmé.

A partir du Turonien inférieur, les conditions abyssales qui régnaient, commencent à changer vers des conditions de mer chaude moins profonde. Au Turonien supérieur, une mer relativement profonde s'installe avec une accumulation d'une assise marneuse. Ce régime continue jusqu'au Campanien.

I. 3. 9. Le Campanien-Santonien

Ils ne sont pas subdivisés à cause du manque d'éléments de datation. Ils sont représentés par des marnes argileuses gris verdâtre et jaune gris à plaquettes de calcite fibreuse et intercalation de marnes à lumachelles. Leur puissance varie de 200 à 600 mètres.

I. 3. 10. Le Maestrichtien

Il est marqué par des calcaires blancs bien lités, d'environ 60 mètres d'épaisseur, recouverts par une très forte accumulation de marnes argileuses grises à noires (150m). Ces dernières admettent à leur base quelques intercalations de calcaires (Dubourdieu, 1956).

Le régime sédimentaire au Campanien supérieur et au Maestrichtien, indique toujours la continuité des mêmes conditions de dépôts dans un milieu peu profond et de mer chaude (Chevenine *et al*, 1989) avec une prédominance de calcaires crayeux rarement récifaux.

I. 3. 11. Le Paléocène

Sa base présente des marnes analogues à celles du Maestrichtien supérieur qui s'intercalent à des couches phosphatées vers les niveaux supérieurs.

I. 3.12. L'Eocène

Des calcaires à silex et d'autres à Nummulites caractérisent l'Eocène inférieur et moyen, près des périmètres de la région de Tébessa. Leur puissance est de 200 mètres

I. 3.13. Le Miocène

Les dépôts du Miocène inférieur et moyen reposent transgressivement sur les formations anciennes (Albien-Sénonien et même sur le Trias). Il s'agit d'une puissante accumulation de marnes et de grès dont l'épaisseur peut atteindre dans le bassin de Oulad Soukiès (NW de l'Ouenza) 1000 m (Dubourdieu, 1956; Kowalski et Hamimed, 2000). A leur base, les formations miocènes comportent des conglomérats contenant des éléments de calcaires variés, de silex gris, des galets ferrugineux et des éléments empruntés au Trias, témoignant d'une activité diapirique (Bouzenoune, 1993). Le remaniement de silex, réputé d'âge Yprésien à la base du Miocène témoigne de l'existence d'une mer éocène où se dépose une sédimentation marine durant l'Eocène et le Miocène inférieur à moyen. La sédimentation à la fin du Miocène indique le début d'une phase de régression.

La puissance moyenne du Miocène dans la région d'étude est de 150 m (Dubourdieu, 1956).

I. 3. 14. Le Quaternaire

Les dépôts quaternaires sont d'origine continentale et sont distribués dans les parties basses des reliefs et couvrent des surfaces importantes (plaines et vallées actuelles). Ils sont formés de croûtes calcaires, limons éboulis, cailloutis et poudingues. La puissance du Quaternaire varie entre 10 et 30 m (Dubourdieu, 1956). Les formations lithologiques qui peuvent être distinguées sont les formations actuelles, les formations anciennes et le Plio-Quaternaire (Fig. 4):

Formations actuelles et récentes:

- **Eboulis actuels.** Ils existent au pied de tous les grands reliefs calcaires, mais ils se confondent, la plupart du temps, avec les éboulis anciens.
- **Travertins :** Ils se déposent par les sources de Tébessa et de Tenoukla.
- **Alluvions actuelles.** Elles n'existent que rarement car, en règle très générale, les oueds recoupent les formations sur lesquelles ils coulent. Sur les bordures de la plaine, elles affectent l'allure de dépôts torrentiels.
- **Limons récents :** ils sont développés surtout dans la grande vallée de l'Oued kébir. Dans la Merdja de Tébessa, des dépôts de gypse alluvionnaire font l'objet d'exploitations locales.
- **Croûtes calcaires :** Ce sont des dépôts superficiels dû à l'évaporation d'eau chargée de calcaire développé surtout sur les alluvions caillouteuses anciennes.

Formations anciennes :

- **Alluvions anciennes :** Elles constituent les basses terrasses des oueds et se raccordent généralement à des formations anciennes occupant latéralement de plus grandes surfaces ainsi que de niveaux localement discernables (cours amont de l'Oued Oglat el Rbaïb).
- **Alluvions anciennes de piedmont :** Ce sont des formations de bordure de la plaine de Tébessa, argileuses ou caillouteuses. Dans le premier cas, elles sont constituées à partir des marnes sénoniennes à l'W et au NE de Tébessa, dano-montiennes au NW, cénomaniennes au SE et dans le seconde cas, à partir des calcaires maestrichtiens à l'W et au NE, éocènes au N, turoniennes à l'E, enfin d'éléments très divers aux flancs du Dj. Djebissa. Ce sont, la plupart du temps, des cônes de déjection.

- **Matériel d'épandage ancien en terrasse** : Il est composé de cailloutis et d'argiles, peu épais en générale (sauf à l'W de Tébessa dans la région du Chabet el Hallouf), sur les marnes crétacées.
- **Matériel d'épandage ancien : éboulis et cônes de déjection.**
 - a. éboulis et cônes de déjection anciens, ravinés par les oueds actuels ;
 - b. grand éboulis, amas de blocs, souvent énormes, de calcaires maestrichtiens paraissant soliflués, disloqués et en cours de destruction par l'érosion ;
 - c. localement : anciens cônes de déjection rougeâtres, formés d'esquilles calcaires bien cimentées, empruntées exclusivement aux reliefs maestrichtiens au pied desquels ils se trouvent (Dj. Mestiri, Chabet el Hmara, Ksar Tebinet). Un pendage vers l'amont est parfois bien visible. Il peut s'agir, soit du rejeu récent d'accidents de la bordure du fossé d'effondrement, soit de mouvements de solifluxion sur les marnes. Une période très humide a dû présider à leur formation.
- **Cailloutis anciens du Dj. Djebissa** : Ils sont souvent perchés sur les argiles à gypse du Trias ou sur les marnes cénomaniennes dans la région du Dj. Djebissa.

-
Plio-Quaternaire (villafranchien) : Il est composé de :

- a. Argile rouge (O. Oglat Rbaïb ; O. Kébir ; K^t el Kramassa ; O. Serdiess) ;
- b. Conglomérats (contreforts E du Dj. Djebissa).

Au K^t Sefra et dans l'O. Naguess (prés Tébessa), l'argile et les conglomérats, alternant, n'ont pas été distingués. Quelquefois horizontaux, ces sédiments présentent, la plupart du temps, un pendage qui, s'il tient parfois à leur origine (dépôts de pente anciens à l'E du Dj. Djebissa), peut être aussi d'origine tectonique (O. Naguess, près de Tébessa). A cette série se rapporte la plus grande partie des terrains de comblement du fossé d'effondrement. Un sondage exécuté pour la recherche d'eau dans la basse plaine de Tébessa les a traversés sur 171 m. Ils renferment, en général, une faune d'Hélicidés. L'origine des sédiments détritiques est toujours immédiatement proche.

Fig. 4 a. Cadre géologique de la région de Tébessa montrant les formations quaternaires

(d'après G. DUROZOY - 1956)

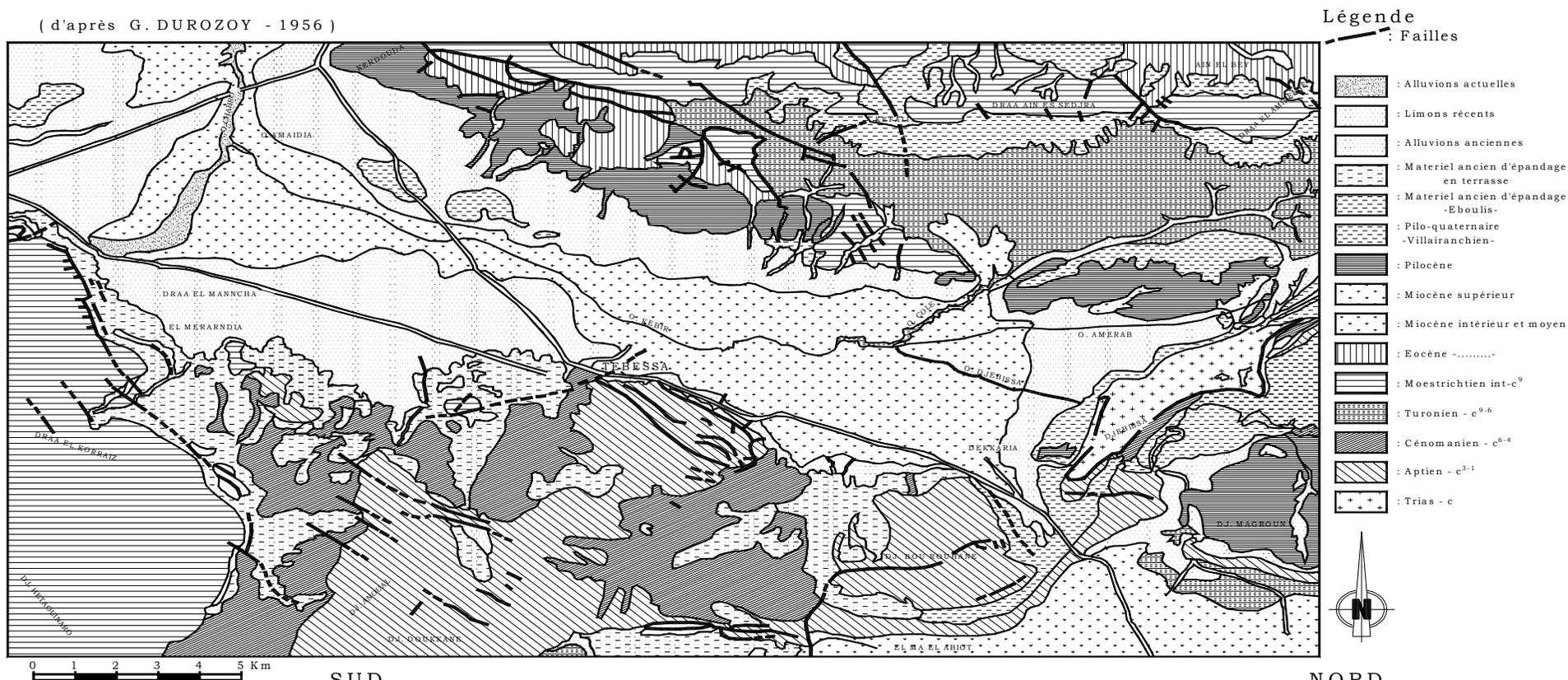
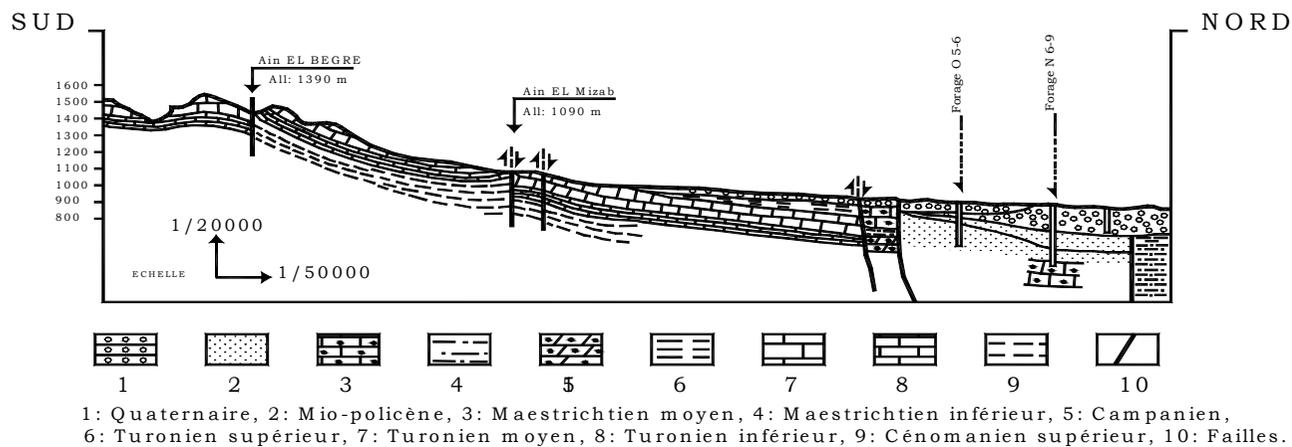


Fig. 4 b. Coupe schématique dans les formations géologiques de la



I. 4 : TECTONIQUE DE LA REGION :

I. 4. 1 Les Phases de l'orogénèse

Les différentes études sur la tectonique de la région ont permis de mettre en évidence la chronologie de la sédimentation, du plissement, du diapirisme et de la fracturation ainsi que, localement, les stades successifs d'effondrement du fossé de Morsott-Tébessa (Fig. 5).

Cette région a subi les cinq phases de l'orogénèse alpine (Kowalski et al., 2002):

- La phase compressive fini-lutétienne :

Elle est caractérisée par une contrainte maximale d'orientation N 320-330°E. Elle se manifeste par des plis d'orientation atlasique N 50°-60°E bien visibles sur les cartes géologiques d'El-Aouinet (Dozet et al., 1985), de Meskiana (Kuscer et al., 1985) et de Morsott (Blés, Fleury., 1970), mais moins nettes sur la carte géologique de Tébessa (Durozoy, 1956) à cause de la superposition des phases ultérieures. Elle se manifeste clairement au SW de Tébessa (carte géologique d'Ain Télijdjène, Vila., 1995).

- La phase distensive du Miocène Inférieur :

Elle est responsable de la formation et développement du bassin d'El Ma Labiod au cours du Langhien-Serravallien et Tortonien, ainsi que celui des Oulad Soukies et du graben de Foussana et Kasserine en Tunisie. La distension miocène a facilité le diapirisme dans le fossé des Oulad Soukies, à Djebel Ouenza, à Djebel Boukhadra et dans la zone entre Djebel Belkif et Hameimat.

- La phase compressive du Miocène Supérieur :

Elle ne se manifeste que dans la zone de Sebkhia Sellaoua et plus au Nord. Dans la zone d'étude, ces manifestations sont amorties, en accord avec Vila., 1980. Les dernières manifestations de la compression miocène vers le sud, ont été observées dans les monts de la Haute Mejerda.

- La phase compressive du Pliocène Inférieur :

Elle a une contrainte maximale N 0°-20° E responsable de la formation des plis orientés N90°-110°S (l'anticlinal de Bled Tebaga, le synclinal de Draa Es Snouber, l'anticlinal de Bir Salem et les replissements de l'anticlinal fini-Lutétien de Bou Roumane. avec la formation de l'anticlinal de Bou Roumane-Tella-Djebel Anoual) sur la carte de Tébessa. On observe aussi la formation du synclinal de Draa Snouber sur la carte de Meskiana.

L'effondrement du fossé de Morsott provoquée par la composante senestre de la contrainte N 0°-20°E au cours du stade distensif, était accompagné par le percement du diapir de Belkl'if-Hameima (diapirisme mio-pliocène), qui s'effondrait partiellement dans le fossé. La composante dextre facilitait la réactivation du diapirisme du Djebel Djebissa, qui se manifestait comme un diapirisme sous-marin à l'Aptien-Albien, provoquant la réduction drastique du profil Aptien-albien de ce Djebel (Vila, 1994).

- La phase compressive du Pliocène Supérieur :

Elle est responsable de la formation des structures plissées plus Jeunes que le fossé de Morsott qui lui sont parallèles. A cette phase appartient l'anticlinal de Djebel Belkfif, le synclinal Faid Al *Obbiz* (Morel 1957) et l'anticlinal d'Oued Annba-Djebel Stah. Ces plis, orientés N 160-170 E sont formés par la contrainte maximale N 80 E et détectés par Blés (1969) à El Kouif. **La** composante dextre de cette contrainte est responsable de l'effondrement du fossé de Tébessa lié avec l'effondrement et basculement d'une partie des structures plicatives du Pliocène inférieur (comme une partie de l'anticlinal du Bled Tebaga, et du synclinal draa Snouber).

La composante senestre de cette contrainte a réactivé la montée du diapir de Djebel Belkif avec sa couverture turonienne et de la zone de Sidi Bouhalala. Ce soulèvement diapirique a déformé le fossé du Morsott et parallèlement se produisait la réactivation du diapir du Djebel Djebissa, qui monte jusqu'à maintenant.

La zone de jonction des fossés de Morsott (orienté NNW-SSE) et de Tébessa (orienté WNW-ESE) constitue une sorte de décrochement. La prolongation septentrionale du fossé de Tébessa déborde cette zone de jonction en modifiant partiellement le synclinal de Draa Snouber (Pliocène inférieur) à l'Ouest du Djebel Belkif. Par contre les plis de Villafranchien inférieur, parallèles au fossé du Morsott sont conservés. La composante senestre de la contrainte maximale du Plio- Villafranchien est responsable de la formation du fossé de Hammamet (fig. 5). Le substratum de ce fossé basculé, est constitué d'un système de horsts et grabens orientés SW - NE.

I. 4. 2 : La formation du fossé d'effondrement de Tébessa.

L'effondrement dans toute la région étudiée n'est observable qu'après la phase atlasique fini-lutétienne qui se manifeste dans l'Atlas Saharien par des plis dirigés SW-NE.

Le fossé de Morsott dirigé NNW-SSE s'est formé après le stade compressif de la phase Pliocène inférieur. La jonction entre le fossé de Morsott et le fossé de Foussana a été établie au cours du Villafranchien inférieur par la formation du fossé de Tébessa. Les sédiments du Pliocène supérieur (Villafranchien inférieur) appartenant au premier stade d'effondrement du fossé de Tébessa ont été en grande partie érodés en liaison avec le deuxième stade d'effondrement affectant presque toute la surface du fossé au Villafranchien supérieur (Pléistocène inférieur). Dans le fossé de Foussana les sédiments du Miocène sont couverts par la formation de Segui (Villafranchien inférieur) qui est contemporaine des sédiments du premier stade d'effondrement du fossé de Tébessa.

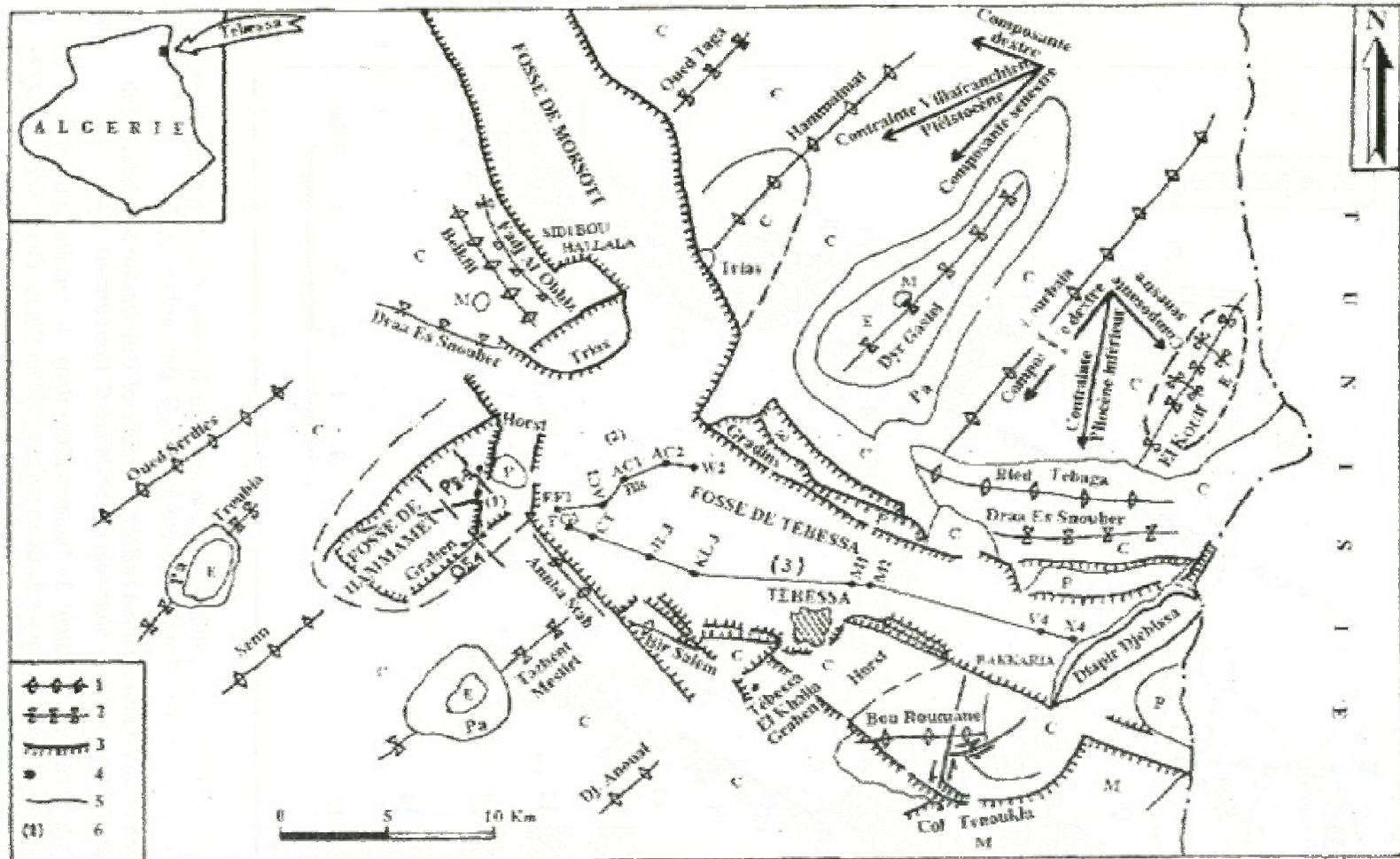
Les puissantes séries de cailloutis témoignent dans le fossé de Tébessa de l'importance du deuxième stade d'effondrement du Pléistocène inférieur.

Une subsidence beaucoup plus modérée après le deuxième stade d'effondrement a favorisé, au Pléistocène moyen, la sédimentation d'argiles au cours du troisième stade d'effondrement.

Au Pléistocène supérieur a eu lieu un quatrième stade d'effondrement très important dans la zone axiale du fossé de Tébessa. Selon A. Zerdazi (1990), cet effondrement a provoqué la formation d'un graben d'une largeur d'environ 2 Km. L'ampleur de l'effondrement a provoqué l'érosion partielle des sédiments de Q2 et le dépôt des galets de la série Q3 dans les zones érodées.

La subsidence était ralentie rapidement au cours de l'Holocène, mais elle se poursuit encore actuellement. Trois séismes d'intensité 4-5 sur l'échelle de Richter ont eu lieu au cours de l'année 1995, semblant bien être en relation avec le stade de distension de la phase plio-quadernaire.

La zone axiale du graben de Tébessa, qui est actuellement le siège des dépôts alluvionnaires, poursuit son affaissement parallèlement aux soulèvements des marges du fossé lui-même.



W.M.Kovalski et al

Fig. 5. Esquisse tectonique des environs de Tébessa avec l'emplacement des coupes, des profils, des forages et des directions des contraintes maximales

C- Crétacé (Cretaceous), E- Eocène (Eocene), M- Miocène (Miocene), P- Pliocène (Pliocene), Pa- Paléocène (Palaeocene), Q- Quaternaire (Quaternary), T- Trias (Trias), OS1, RS7, YS 4-5, P8-9, EF1 etc... - symboles des forages (bore-holes symbols), 1- anticlinal (Anticline); 2- synclinal (Syncline); 3- limite du fossé (Ditch border); 4- symboles des forages (bore-holes symbols); 5- faille (faults); 6- numéro des coupes géologiques (Geological section number).

Ce mouvement tectonique a provoqué l'érosion partielle des sédiments du Pléistocène moyen et le dépôt, dans des zones érodées, des galets du Pléistocène supérieur. La subsidence s'est ralentie rapidement au cours du quatrième stade, mais elle se poursuit jusqu'à nos jours car trois séismes ont eu lieu lors de l'année 1995 ; ce qui semble être en relation avec la phase responsable de la mise en place du fossé.

Le centre du fossé constitue, actuellement, le siège de dépôts alluvionnaires sur les sédiments du quatrième stade.

I. 5 : Lithostratigraphie, tectonique et conséquences hydrogéologiques :

La complexité tectonique de la zone étudiée nous a poussé à dégager les différentes structures résultantes de ces mouvements car ces structures peuvent constituer éventuellement les conditions aux limites des aquifères. Les cycles d'érosion et de sédimentation influent sur l'extension des systèmes aquifères.

En faisant le point sur toutes les formations géologiques, nous pouvons retenir quelques niveaux qui sont d'une perméabilité en grand, ce sont les calcaires du Maestrichtien, du Turonien, et de l'Eocène. La présence de failles au niveau de ces formations leur confère l'aptitude de jouer le rôle d'important magasin d'eau. En effet ces fractures peuvent constituer au sein de ces assises des réseaux prêts à emmagasiner ou faire circuler d'importantes quantités d'eau. Nous rappelons que ces formations bordent la plaine de Tébessa aussi bien au nord qu'au sud.

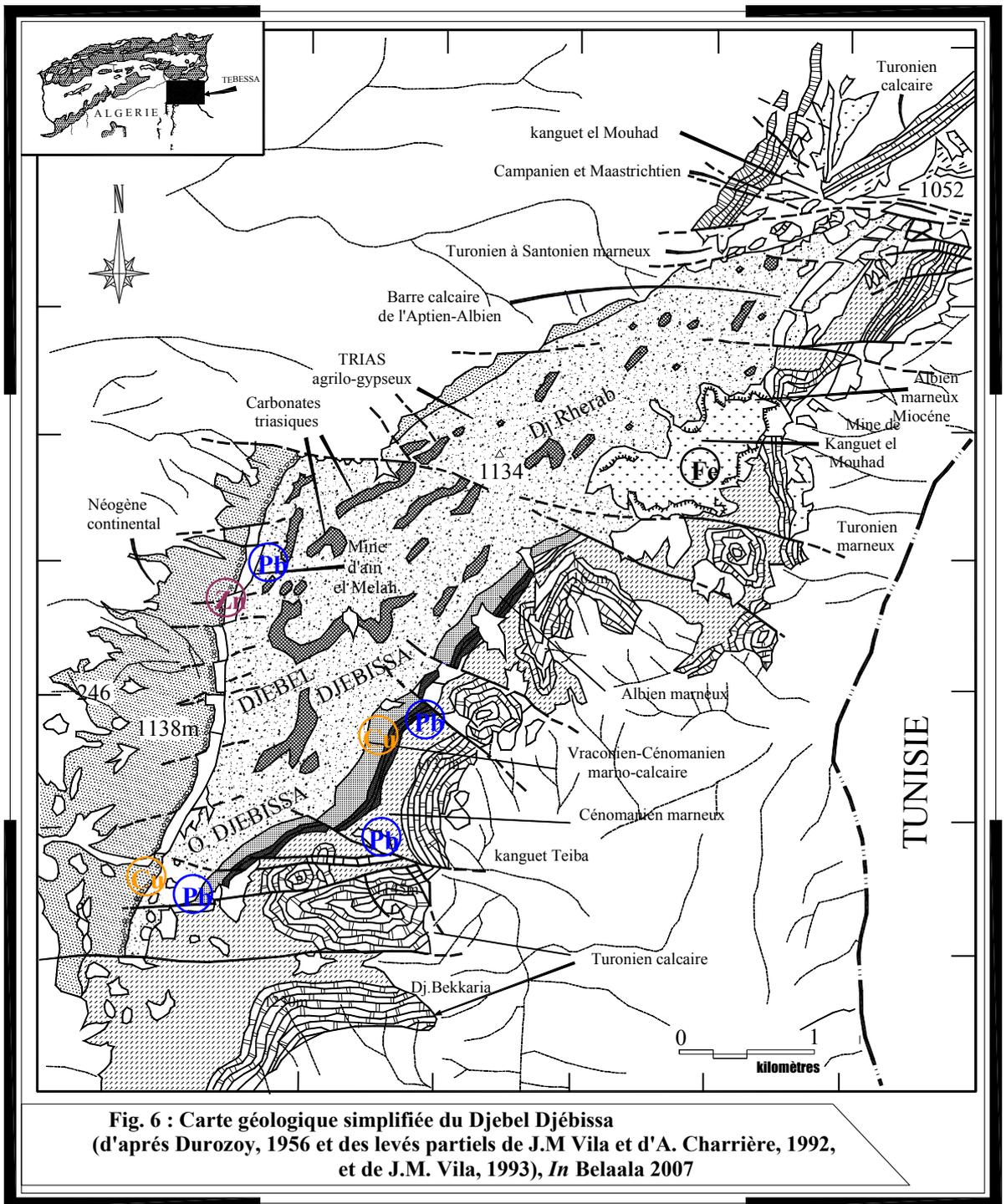
A l'intérieur de la plaine, les formations alluvionnaires, constituées à partir des sédiments de la série plio-quadernaire, sont d'une perméabilité en petit. Ces formations bénéficient d'un granoclassement de la bordure vers l'axe de la plaine (en bordure se sont des gros cailloutis, voire des galets calcaires et au centre des limons récents à faible perméabilité).

Une partie de cette étude se rapporte au Djebel Djebissa caractérisé par une minéralisation polymétallique pouvant entraîner une modification de la composition chimique des eaux par dissolution des minéraux tel que le fer, le plomb, zinc... résultant de l'exploitation de la mine, par ailleurs les formations évaporitiques peuvent influencer la qualité des eaux, c'est pourquoi nous avons jugé utile de traiter la géologie du Djebel Djebissa à part.

I. 6. GEOLOGIE DU MASSIF DE DJEBISSA

I. 6. 1. Introduction :

Le massif de Djebel Djebissa (Fig. 6) présente un relief accidenté et parfois difficilement accessible. L'ensemble de ce massif forme une structure anticlinale orientée NE-SW, s'allongeant sur plus de 15 Km et de 2 à 6 Km de large. Le cœur de la structure est occupé par des terrains d'âge triasique de 500 à 1500m d'affleurement en largeur. L'essentiel des formations triasiques forme une dépression composée de masses argilo gypsifères où apparaissent quelques îlots de dolomies triasiques et quelques blocs de roches carbonatées arrachées d'âge Aptien-Albien (Fig. 7). Sur les flancs affleurent les formations du Cénomaniens et du Turonien recouvertes par endroits de dépôts quadernaires.



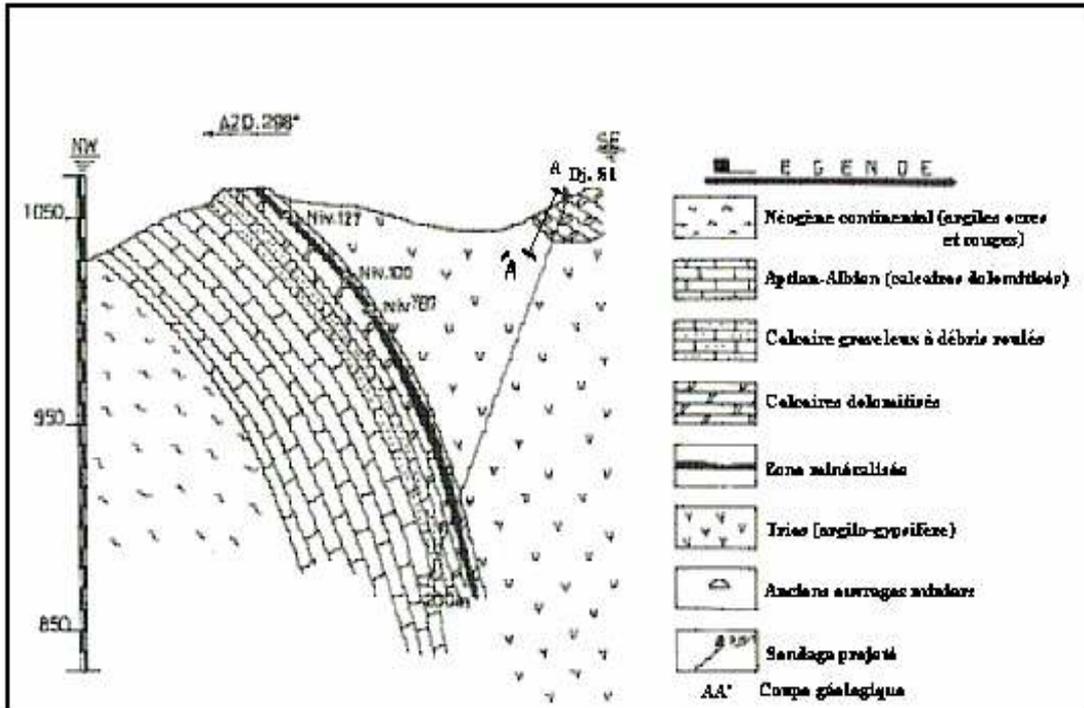


Fig. 7. Coupe géologique montrant la position de la zone minéralisée par rapport au sondage Dj-S1 et la coupe AA'.
D'après ORGM

I.6. 2. Stratigraphie du Djebel Djebissa :

I.6. 2. 1. Trias :

Ce sont les plus vieilles roches reconnues dans la région. Sur le secteur, les roches du trias sont de faciès évaporitique, de grande dimensions, constituées d'argiles rouge et bariolées avec du gypse au sein desquelles on trouve des blocs de calcaires dolomitique et dolomies rougeâtres. Le trias occupe le cœur de l'anticlinal (Fig. 8).



Fig. 8. Les argiles rouges du Trias en contact avec les formations du Quaternaire verticalisées.

I.6. 2. 2. Crétacé :

Aptien- albien :

Sur le flanc Ouest, la datation de Vila et Charrière (1993) incluent la présence du Crétacé inférieur. A l'étage Aptien sont attribués les faciès biodétritiques et oolitiques. Sa base est représentée par un conglomérat à débris de rudistes, orbitolines, et d'insolubles Triasiques. Le sommet est constitué de calcaires noduleux biodétritiques à débris de coquilles divers (rudistes, orbitolines,...), calcaires micritiques bioclastiques gréseux, dolomies gréseuses, calcaires organogènes dolomités et silicifiés, et domiciles.

Aux sédiments de l'Albien sont attribués des calcaires bioclastiques à gros débris de polypiers et de molobesiées.

Cénomanién :

Il est représenté dans la partie Est de l'anticlinal de Djebel Djebissa par des intercalations de marnes gris verdâtre et de calcaires organogènes dolomités, dolomies, la faune est très abondante. (Rapport O.R.G.M., 1997-2000).

Turonien :

Il est représenté par des calcaires gris clair, compacts en bancs minces et des marno calcaires en plaquettes, avec une prédominance de calcaires dolomitiques très durs à son sommet. (Rapport O.R.G.M., 1997-2000).

Les autres étages sont inexistant suite à une lacune stratigraphique.

Le Pliocène

Formé de couches parfois verticalisées d'argiles ocre et de conglomérats grossiers rougeâtres. Il affleure sur les deux flancs de l'anticlinal.

I.6. 2.3. Quaternaire :

Il est constitué par des cailloux anciens, le plus souvent perchés sur les argiles à gypse ou sur les marnes Cénomaniennes, des alluvions ainsi que des conglomérats à disposition horizontale (fig. 9), présentant la plupart du temps un pendage, et s'il tien parfois à leur origine (dépôts de pente), peut être aussi d'origine tectonique.



Fig. 9. Les conglomérats du Quaternaire à disposition verticale (mine de fer Khanget).

I. 8. La Tectonique

La structure anticlinale du massif de Djebissa est affectée par des accidents cassants et sa stratification normale et simple permet la subdivision lithostratigraphique des roches formant l'anticlinal.

Le contact entre les roches gypsifères du Trias et les terrains sus-jacents est de nature tectonique (Thibiéroz et Madre, 1976).

Le flanc Nord Ouest est fortement réduit et les couches sont redressées ou verticales sous l'effet des poussées halocinétiques.

Les différents types d'accidents sont:

I. 8. 1. les déformations souples

La principale déformation souple est le plissement de la région, ce qui explique la structure anticlinale du Dj. Djébissa. Cet anticlinal se raccorde au Nord au synclinal d'Oglet El Rbaib. Son axe passe par les crêtes de Dj. Bouroumane avec une direction N40°.

Le noyau de l'anticlinal, la partie la plus érodée, est formé par des dépôts gypsifères du Trias rangés dans les formations du Crétacé inférieur. Les parties SW et NE sont constituées par des dépôts carbonatés et argilo-carbonatés du Crétacé.

I. 8.2. Les accidents cassants

Ils sont peu développés dans cette zone, ceci peut être expliqué partiellement par le large développement de terrains mio-quaternaire qui empêche l'étude directe des terrains anciens. On note tout de même la présence de deux systèmes de failles de direction NE-SW (contrôlant le percement des roches triasiques) et Est-Ouest sur les versants Nord et Sud de Dj. Djébissa. Le fait le plus marquant reste l'existence du fossé d'effondrement de Tébessa qui influe sur l'aspect tectonique de cette structure (cf. Fig. 6).

Le système d'accident de moindre importance est mis en évidence sur le flanc Nord du pli. Ce sont en général des failles normales à rejet vertical de quelques dizaines de mètres et qui s'allongent en plan sur 200 à 800 m avec un pendage subvertical.

Certains auteurs considèrent le rôle des effondrements par rapport au contrôle de la localisation de la minéralisation comme très important. Durozoy (1956) pense que la surrection du Horst de Dj. Bouroumane avait probablement commencé lors des premiers plissements et joué tardivement car les grandes failles E-W qui le disloquent recoupent les accidents à la bordure du fossé de Tébessa.

I. 9. Minéralisation :

Dans les limites de la structure sont connus quelques indices de minerais polymétalliques et ferrifères (mine de Fer de Khanguet). (cf. fig. 6)

Les minéralisations polymétalliques sont de type stratoïde. Ce sont des minéralisations situées au contact des formations Albo-Aptiennes au voisinage du Trias diapirique, et dans les marno calcaires du Cénomanién supérieur et Turonien inférieur. Ces deux sous-types sont localisés respectivement sur le flanc NW et SE de Dj. Djebissa.

L'indice de Pb-Cu situé près du contact Cénomanién Turonien sur le Flanc SE dans les roches carbonatées (calcaires), renferme une minéralisation à galène en disséminations, en amas articulaires, et en nids. En plus de la galène, on rencontre les produits de l'épigenèse : cérusite, limonite et minéraux de cuivre hypogènes représentés par le cuivre gris et la digénite hypergènes représentés par la malachite, azurite et covelline.

Au flanc NW, les accumulations de minerai sous forme de nids et veines de calamine avec des cristaux de galène se trouvent dans les calcaires, dolomies, au contact tectonique des

roches du trias et Crétacé. La longueur de ce contact est importante, mais les corps minéralisés connus ont été délimités seulement dans un intervalle de 600 m par les travaux de prospection et exploitation antérieurs.

La zone minéralisée à une direction sensiblement Nord-Sud et plonge à l'Est avec une inclinaison de 80°. Son épaisseur moyenne est de 1.7 m. Cette minéralisation paraît concentrée dans les calcaires qui présentent de nombreuses fractures dont la direction générale est celle de la stratification. Dans ce remplissage se trouvent disséminés très irrégulièrement des rognons de galène de dimensions importantes (jusqu' à 10 cm), on la trouve aussi bien dans la marne ou argile ocre que dans la barytine.

I. 10. CONCLUSION

D'après les résultats des travaux antérieurs réalisés sur le massif de Djebel Djébissa ainsi que sur les informations acquises en terme de ce chapitre, on peut conclure qu'il s'agit en grande partie de formations argilo-grèsocalcaire à gypse très abondant, d'âge triasique, en contact tectonique avec des formations carbonatées essentiellement dolomitiques de l'Aptien Albien non différencié. L'abondance de ce matériel évaporitique témoigne d'une grande activité diapirique et une ascension intense. Le résultat de cette activité est l'arrachement de quelques lambeaux de roches carbonatées d'âge Aptien-Albien, généralement minéralisés localisés au flanc Ouest du secteur étudié.

CHAPITRE II : GEOMETRIE DE L'AQUIFERE

II. 1. Introduction.

L'étude géophysique réalisée par la CGG en 1970 dans la région de Tébessa a montré la succession de trois niveaux plus ou moins aquifères. Ces niveaux et particulièrement le niveau superficiel qui peut être exposé à la pollution engendrée par l'environnement immédiat (mine de fer abandonnée et formations gypsifères). Dans cette partie nous nous intéresserons aux informations fournies par les sondages implantés dans la partie étudiée.

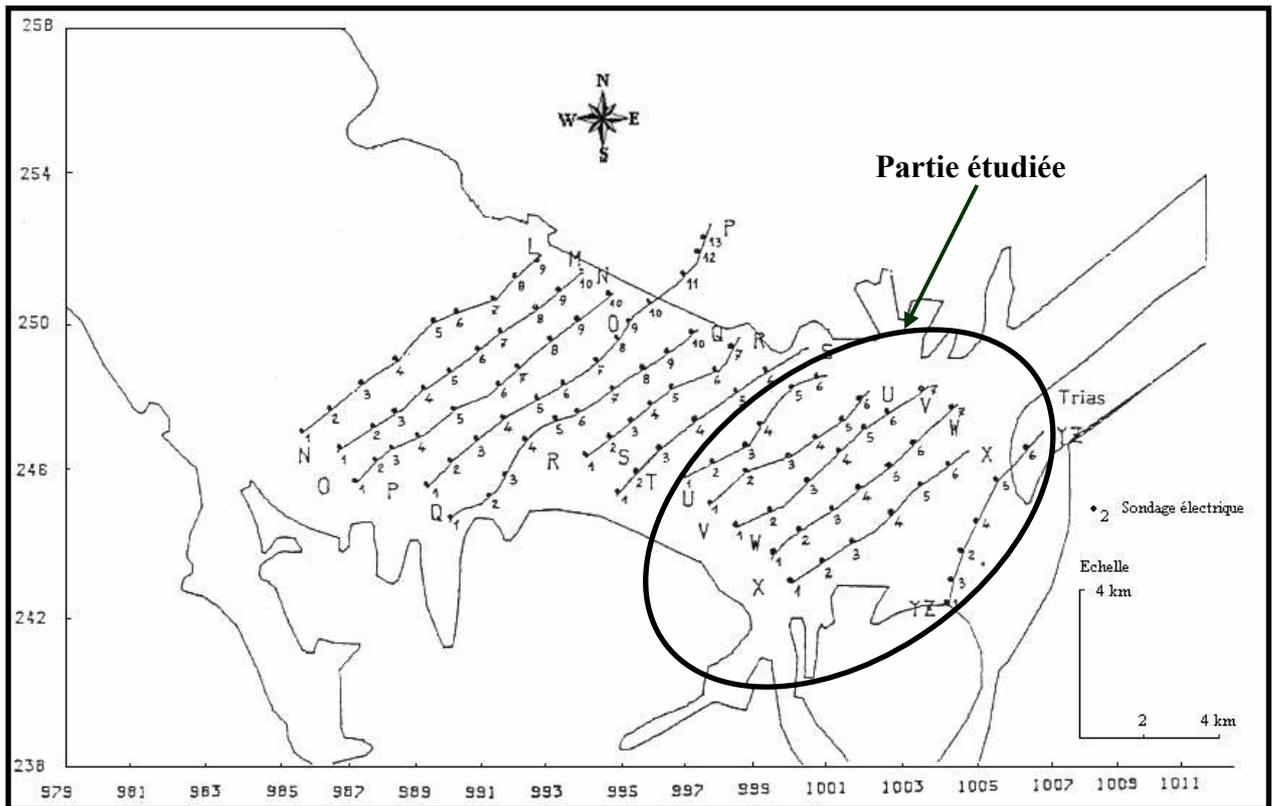


Fig. 10. Carte d'implantation des sondages électriques

Les profils U, V, W, X et YZ (fig. 10) sont réalisés dans la zone d'étude, les résultats obtenus par la prospection géophysique vont permettre l'établissement d'une corrélation entre les données géologiques et géophysiques.

II. 2. Essai de corrélation entre la géologie et la géophysique.

On note une alternance des couches résistantes et des couches conductrices selon trois horizons P₁, P₂, et P₃ qui se suivent et se superposent d'une manière irrégulière.

L'horizon p1 : a ce niveau les résistivités varient entre 5 et 50 Ω m, montrant une présence de gravier, cailloutis calcaires, sables (Profil X) et quelques petits niveaux argileux (Profil U). Cet horizon n'apparaît pas sur tous les profils, montrant une discontinuité de l'aquifère. (fig. 11, 12).

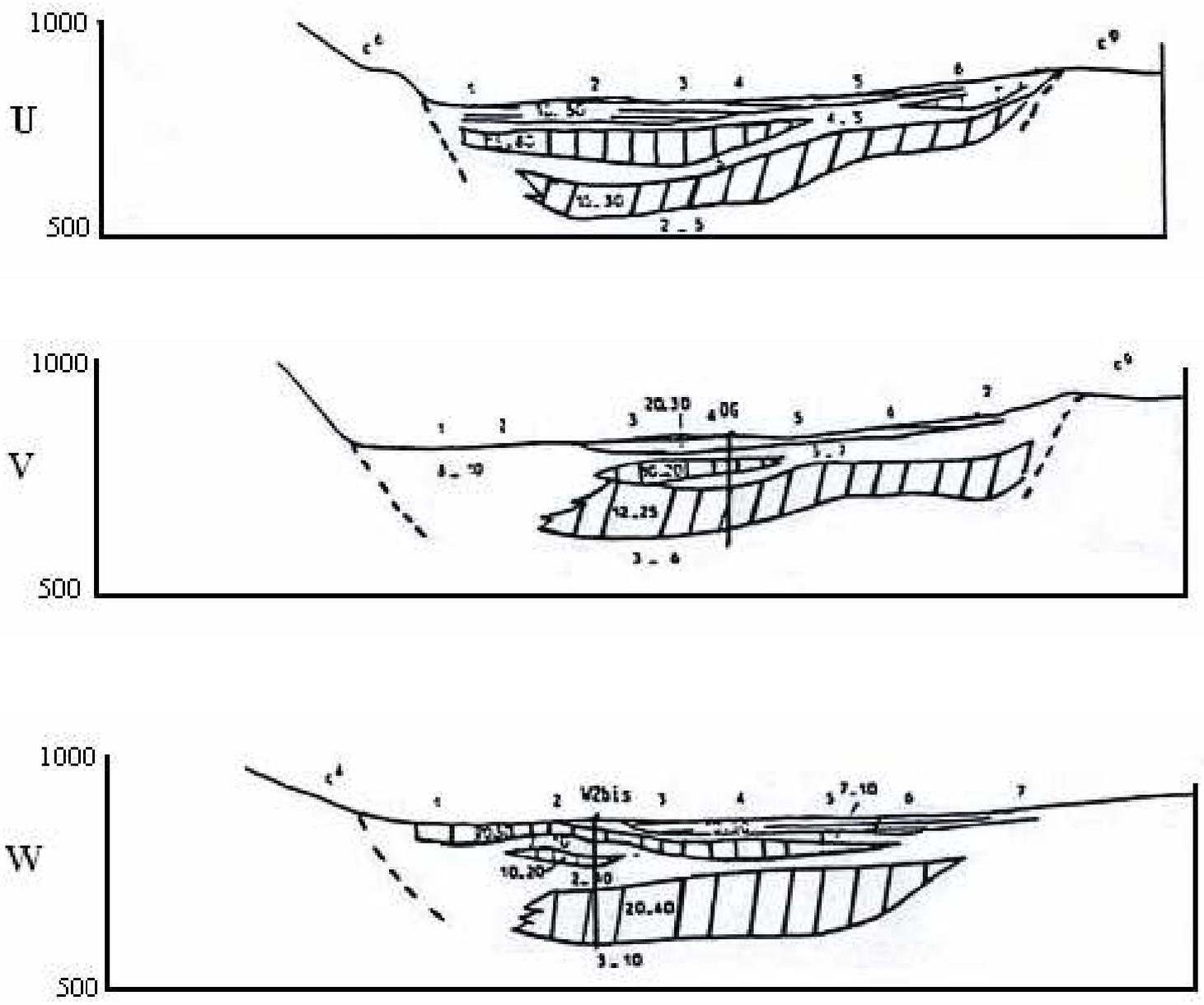


Fig. 11. Profils géo électriques
Coupe de U à W

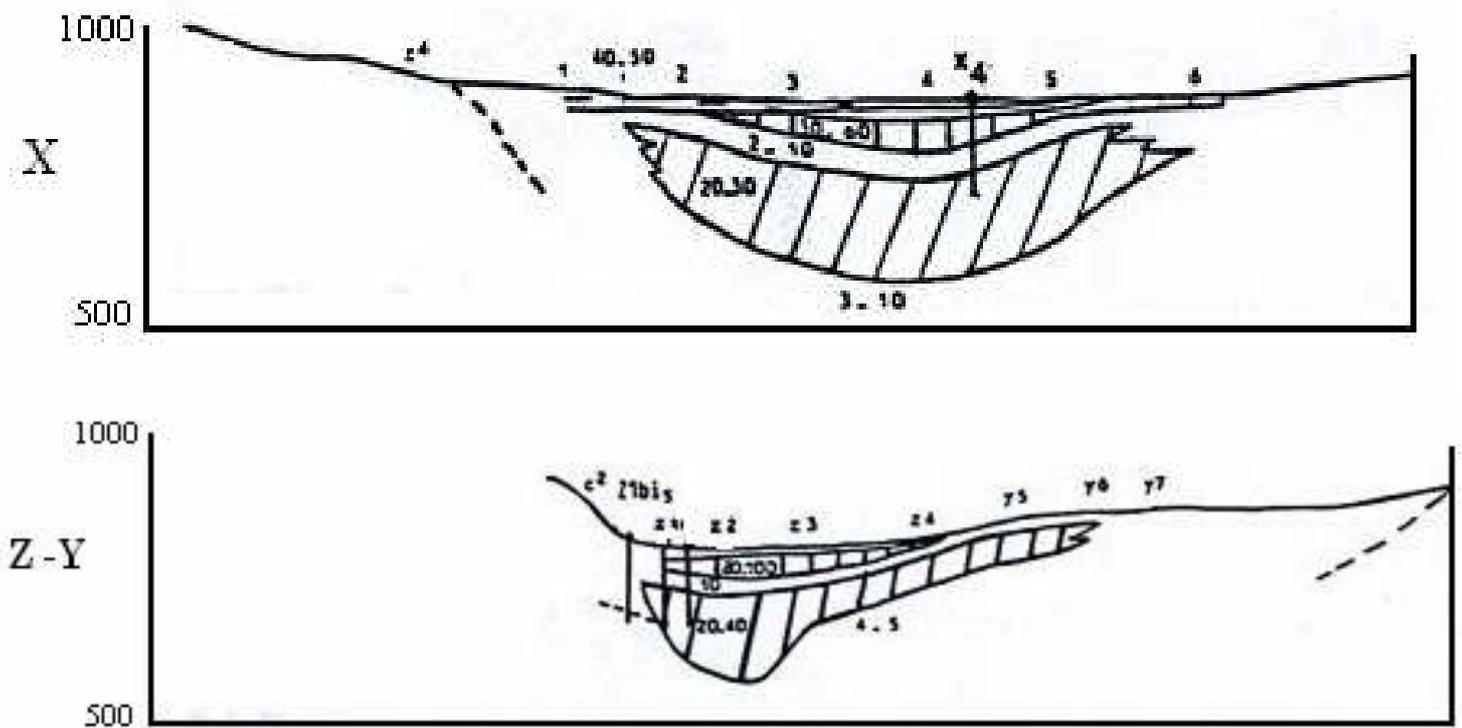


Fig. 12. Profils géo électriques
Coupes X, YZ



In Djabri 1987

II. 3. Mise en parallèle des profils géophysiques et des coupes lithologiques.

Pour réaliser ce travail nous avons utilisés les valeurs de résistivités mesurées dans la zone de Djebel Djebissa. Les valeurs de résistivités ayant permit la caractérisation des formations géologiques sont issues des valeurs limites données par l'étude géophysique et sont comme suit :

- De 01 à 05 Ωm : formations très conductrices : argiles ou marnes ou présence d'eau minéralisée.
- De 05 à 10 Ωm : argiles ou marnes non salées conductrices
- De 10 à 20 Ωm : argiles avec cailloutis
- De 20 Ωm et plus : formations relativement résistantes (Ces formations caractérisent l'horizon P1).

Appliquée à la zone de Djebel Djebissa, on a déterminé la lithologie suivante (tableau .1)

Tableau 1. Valeurs des résistivités et lithologie correspondante dans le secteur de Djebel Djebissa.

Point	Sondages Electriques	Résistivité du 1 ^{er} horizon aquifère ($\Omega.m$)	Lithologie probable
1	U ₁	10-50	Argiles +Graviers
2	U ₂	10-50	Argiles +Graviers
3	U ₃	10-50	Argiles +Graviers
4	U ₄	10-50	Argiles +Graviers
5	U ₅	10-50	Argiles +Graviers
6	V ₃	20-30	Conglomérats de calcaires et de sables
7	V ₄	20-30	Conglomérats de calcaires et de sables
8	W ₃	10-50	Argiles +Graviers
9	W ₄	10-50	Argiles +Graviers
10	W ₅	10-50	Argiles +Graviers
11	W ₆	10-50	Argiles +Graviers
12	W ₇	10-50	Argiles +Graviers
13	X ₁	40-50	Cailloutis calcaires
14	X ₂	40-50	Cailloutis calcaires
15	X ₃	40-50	Cailloutis calcaires
16	X ₄	40-50	Cailloutis calcaires
17	X ₅	40-50	Cailloutis calcaires

Cette succession nous a permis de tracer la carte de répartition de la lithologie du niveau P1 dans le secteur de Djebel Djebissa

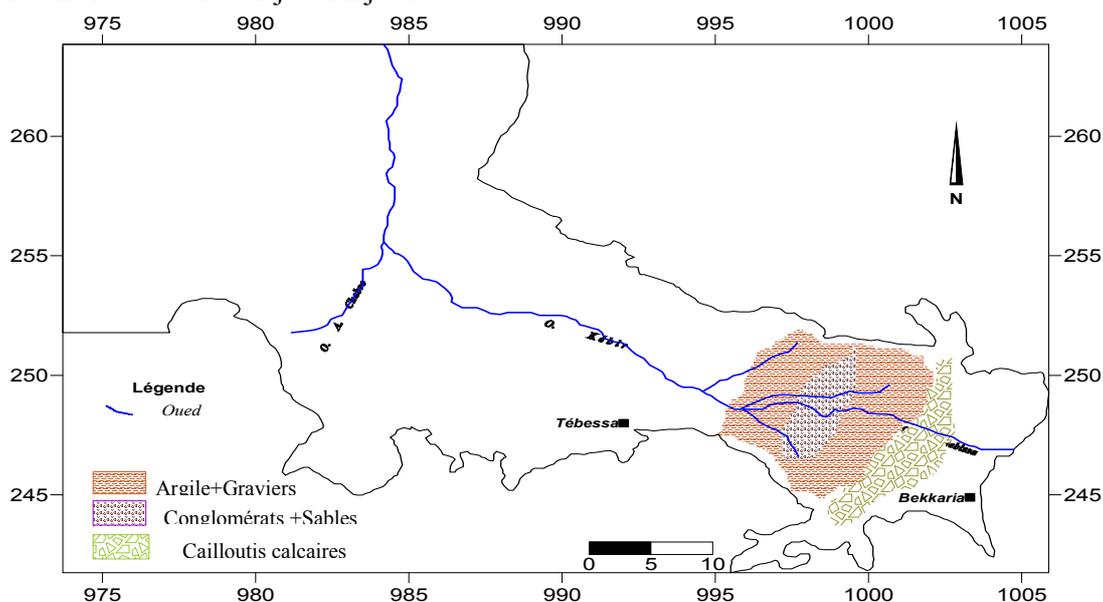


Fig. 13. Carte de répartition de la lithologie du niveau P1 Région de Djebel Djebissa

II. 4. Conclusion

D'après cette étude géophysique nous constatons l'existence de différentes formations aquifères : dans la zone d'étude affleurent les formations alluvionnaires (graviers, galets, sables, qui s'intercalent avec des argiles) d'âge quaternaire qui constituent le matériel de remplissage du bassin. Ces formations sont d'une porosité d'interstice ; leurs résistivités varient de 20 à 100 Ωm .

Quant au premier niveau supposé être aquifère et qui correspond à la nappe phréatique on signale qu'il est constitué de matériel à porosité d'interstice se déposant avec quelques discontinuités et des épaisseurs variables. Les résistivités varient de 5 à 100 Ωm .

On remarque que la résistivité diminue des bordures vers le centre de la plaine. En tenant compte de la nature du matériel de remplissage et sa relation avec la répartition de la résistivité, on peut juger que la zone étudiée est caractérisée par une hétérogénéité du matériel aquifère.

CHAPITRE III : APERÇU CLIMATIQUE

Les caractéristiques climatiques influencent les variations des réserves des eaux souterraines, de ce fait il est impératif de connaître leurs évolutions dans le temps et dans l'espace. Aujourd'hui de nombreuses questions se posent concernant l'avenir de la planète terre vis-à-vis des changements des caractéristiques climatiques. Le continent Africain reste le plus exposé aux soubresauts du climat.

III. 1. Introduction

La région d'étude jadis verdoyante se remarque actuellement par des épisodes de sécheresse très prononcée allant jusqu'au durer huit mois (08) dans l'année. Cette situation, nous a contraint à considérer ces variations et leurs impacts sur la ressource en eau.

Pour répondre aux questions posées nous étudierons les variations des paramètres climatiques au niveau de la station de Tébessa.

III. 2. Historique :

La station référence fonctionne depuis plus d'un siècle (100 ans), les enregistrements de précipitations ont été réalisés sur deux sites différents, le premier, le plus ancien est géré par l'ANRH, le second datant de 1972 et est situé près de l'aéroport. Les mesures de températures sont réalisées au niveau du deuxième site uniquement. La carte de répartition des précipitations établie par l'ANRH (fig. 14), montre que les précipitations sont de l'ordre de 300 mm/an, ce qui constitue un faible apport.

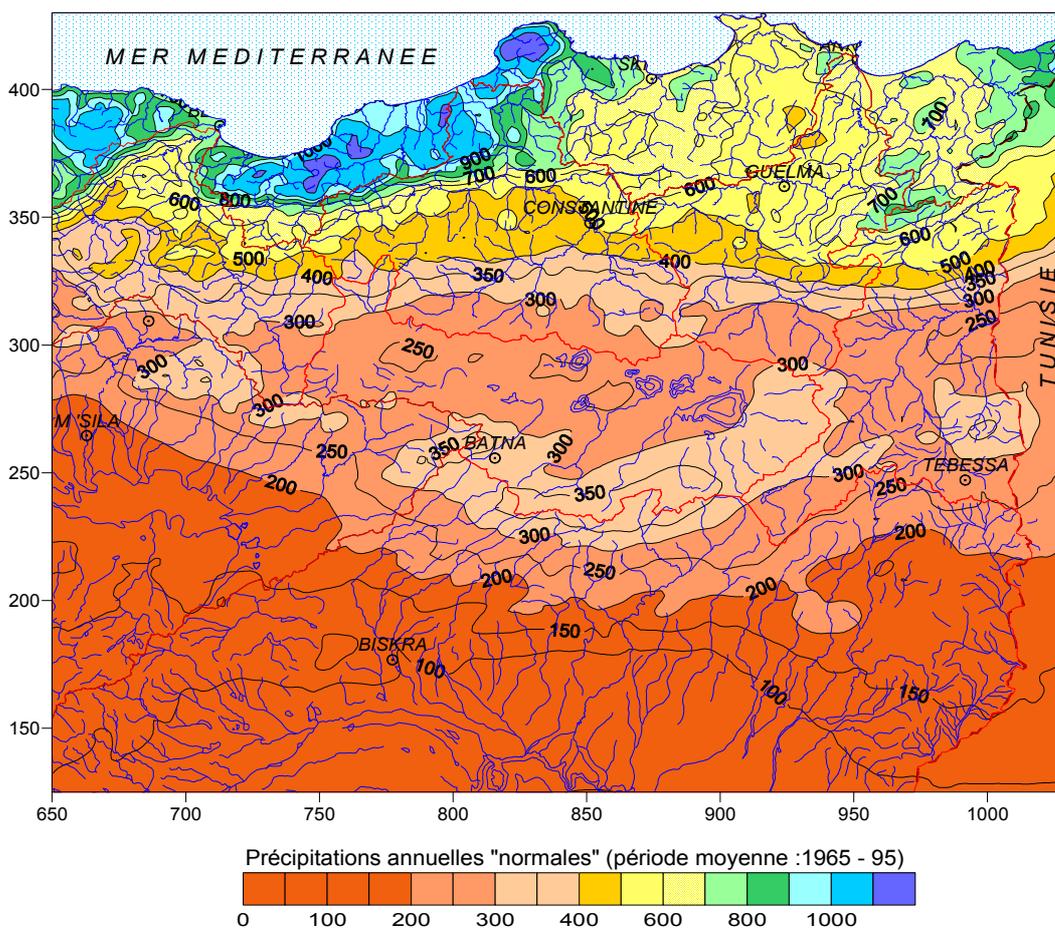


Fig. 14. Précipitations annuelles médianes « normales » (1965-95) (d'après étude ANRH-GTZ ,2003)
In Azzedine MEBARKI (*) et Jean-Pierre LABORDE (**)

Les précipitations enregistrées sur 100 années, nous ont permis d'étudier l'évolution des précipitations.
La valeur moyenne calculée nous a permis de déterminer l'évolution annuelle des précipitations, la fig. 15. donne un aperçu sur la répartition des précipitations vis-à-vis de cette moyenne.

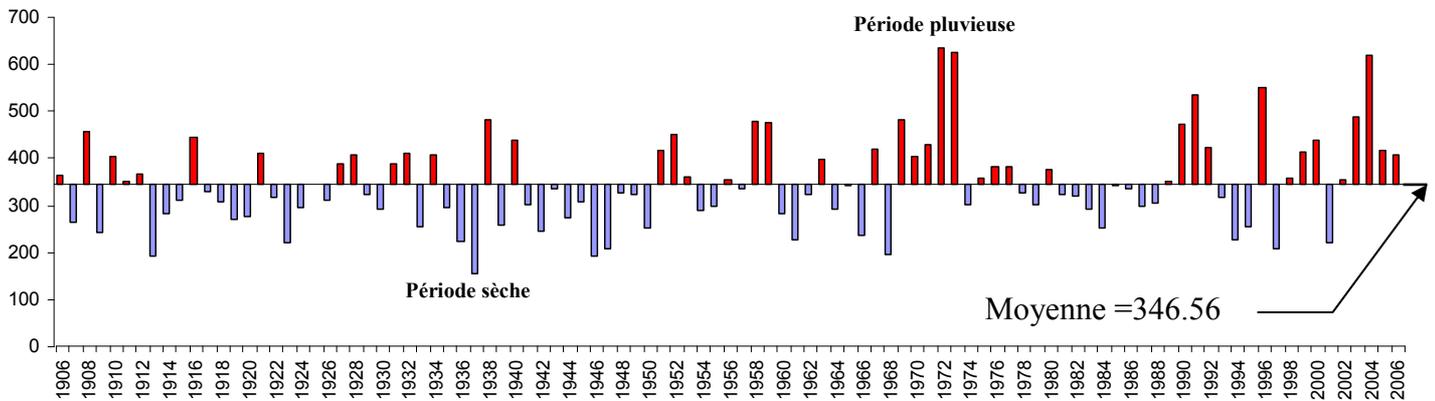


Fig. 15. Répartition interannuelle des précipitations sur une période de 100 ans 1906-2006

On remarque une succession des épisodes, cependant au début du siècle les épisodes secs sont plus importants, en effet les périodes sèches peuvent durer jusqu'à 10 ans, par contre les périodes pluvieuses ne dépassent pas 5 à 6 années.

Pour mieux visualiser cette évolution, nous nous sommes intéressés à la variation des précipitations sur une période de vingt années, de ce fait nous avons cinq périodes d'observations.

***Période allant de 1906-1925:**

On remarque bien que l'allure générale de ce graphe (fig. 16), montre que seulement neuf ans sur vingt dépassent la moyenne qui est de l'ordre de 323,25 mm.

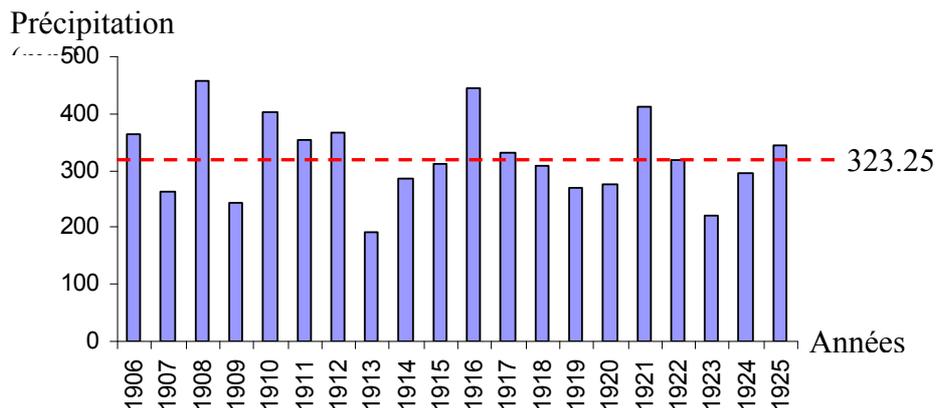


Fig. 16. Répartition interannuelle des précipitations (1906-1925)

***Période allant de 1926-1945:**

Pour cette période on remarque que la moyenne qui est de l'ordre de 325,37mm dépasse légèrement celle des vingt premières années (graphe précédent) où on a seulement sept ans dépassant cette moyenne (fig. 17).

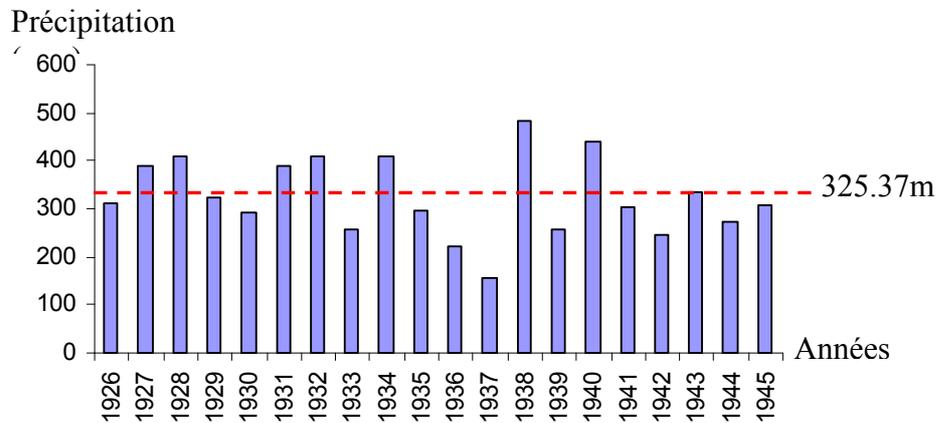


Fig. 17. Répartition interannuelle des précipitations (1926-1945)

***Période allant de 1946-1965 :**

La moyenne de pluviosité pour cette période est de 331,56mm où on remarque une augmentation de cette moyenne par rapport aux deux périodes précédentes (fig. 18). Nous tenons à signaler que seulement neuf ans sur vingt pour cette période dépassent cette moyenne.

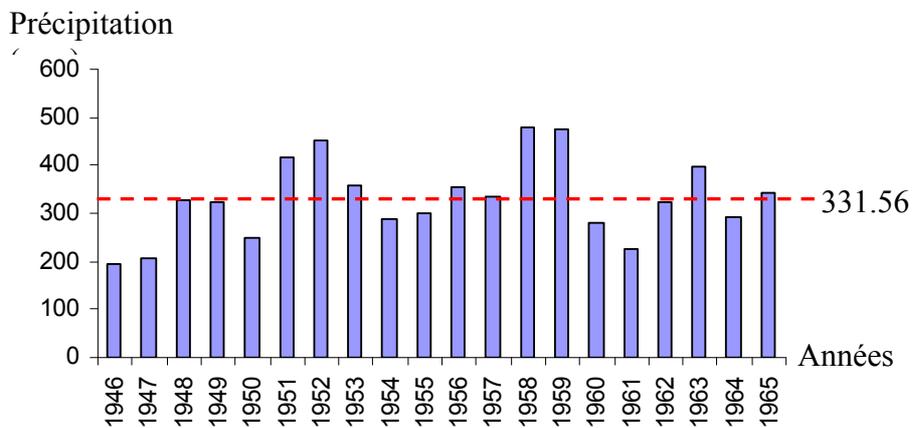


Fig. 18. Répartition interannuelle des précipitations (1946-1965)

***Période allant de 1966-1985 :**

On remarque bien que pour cette période la moyenne atteint 369,91mm où on voit une augmentation des moyennes par rapport aux périodes précédentes (fig. 19)

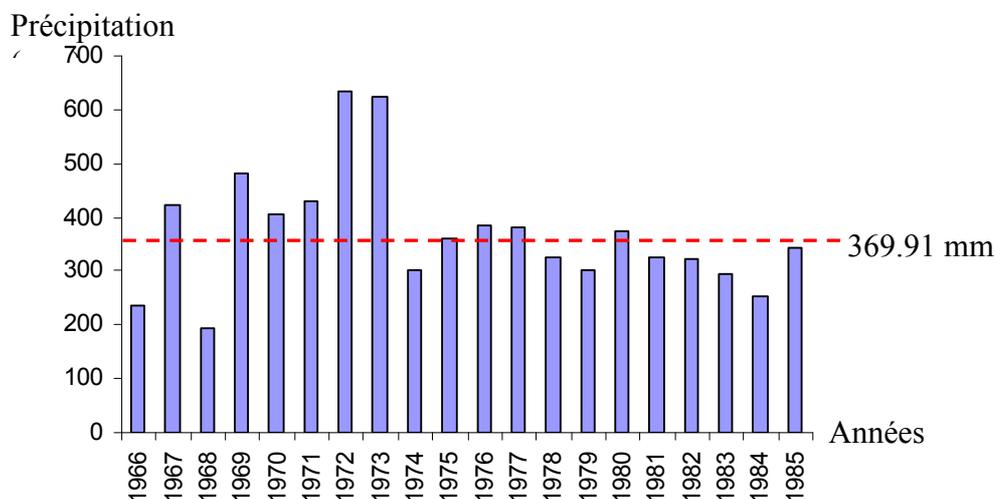


Fig. 19. Répartition interannuelle des précipitations (1966-1985)

***Période allant de 1986-2006 :**

La moyenne de pluviosité pour cette période atteint une valeur de 380,99mm où elle marque une hausse nettement visible par rapport aux années des périodes passées (fig. 20).on remarque que dix années sur vingt dépassent cette moyenne.

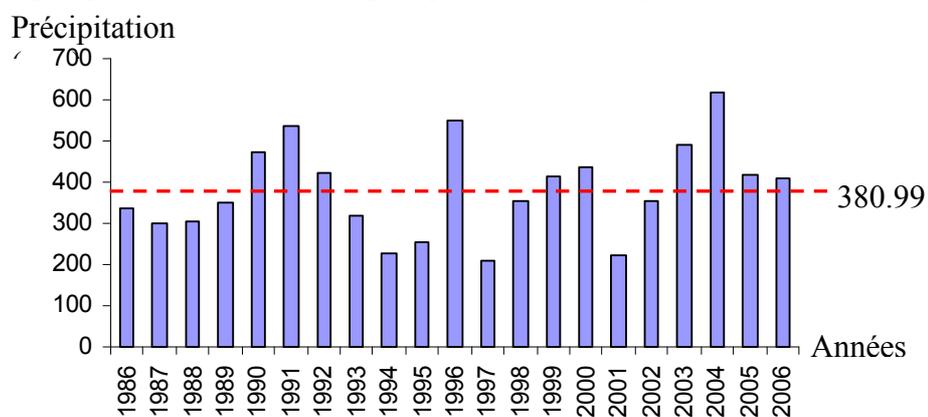


Fig. 20. Répartition interannuelle des précipitations (1986-2006)

Périodes	Max (mm)	Min (mm)	Moyenne (mm)	Ecart type
1906-2006	634.7	154.1	346.56	95.29
1906-1925	457.4	193.1	323.25	71.63
1926-1945	483	154.1	325.37	82.24
1946-1965	479	193.4	331.56	82.49
1966-1985	634.7	195.5	369.91	112.35
1986-2006	618.8	207.4	380.99	112.40

Tab. 2. Récapitulatif des données statistiques

La précipitation moyenne calculée sur cent années est de l'ordre de 346.56mm, au cours de cette même période le maximum et le minimum atteignent respectivement 634.7 mm et 154.1mm.

Au cours de la période allant de 1906 à 1925, la précipitation moyenne atteint 323.25 avec un maximum de précipitations de l'ordre de 457,4mm (1908) et un minimum de 193.1mm (1913).

La période 1926-1945 présente une valeur moyenne des précipitations de l'ordre de 325.37mm le maximum de pluviosité atteint 483,40mm (1938) et le minimum est de l'ordre de 154,1mm (1937).

La pluviosité atteint son maximum pour cette période de 1946-1965 avec 479mm (1958) et son minimum en 1946 avec 193.4mm. la moyenne est de l'ordre de 331,56mm

Cette période montre un minimum de 195.5mm en 1968 et un maximum de pluviosité en 1972 avec 634.7mm. la moyenne est de 369.91mm.

Pendant la période 1986-2006 un maximum de pluviosité est enregistré en 2004 avec 618.8mm et un minimum de 207.4mm en 1997. La moyenne atteint une valeur de 380,90mm Ce qui explique la hausse des précipitations plus ou moins considérables par rapport au début du siècle.

III. 3. Type de climat

III. 3. 1. Diagramme pluviothermique :

Les valeurs des précipitations et des températures enregistrées au niveau de la station de l'aéroport de Tébessa sur une période de 34 années, permettent l'établissement du diagramme (fig. 21), ce dernier montre la succession de deux saisons l'une sèche et l'autre humides. La première s'étale du mois de mai jusqu'au mois d'octobre la seconde va du mois de novembre jusqu'au mois d'avril compris. Les deux saisons durent en moyenne six mois par an.

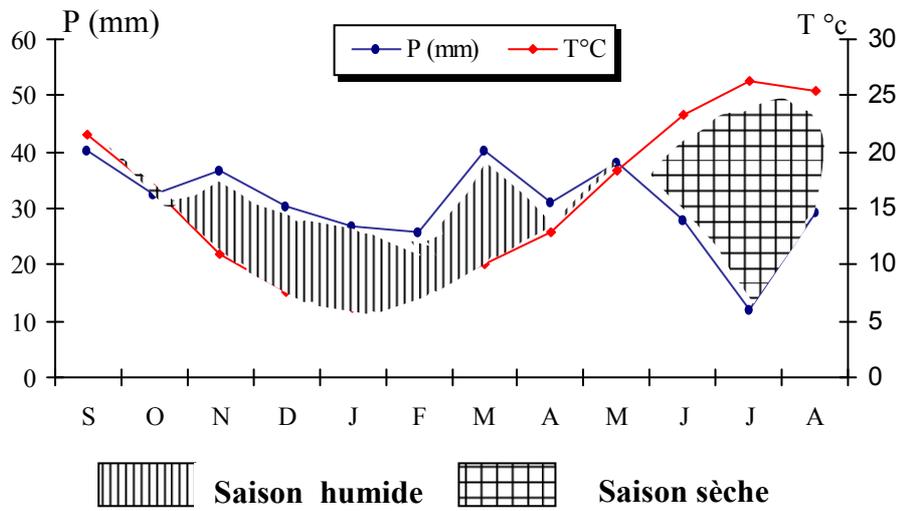


Fig. 21. Diagramme pluviothermique de la station de Tébessa. (1972-2006)

Un intérêt particulier a été accordé au climat régnant au cours des deux années extrêmes déterminées. Notons que la première se rapporte à l'année 1972-1973, considérée comme la plus arrosée avec une précipitation de l'ordre de 625.3 mm. Au cours de cette année (fig. 22) on remarque que la saison humide s'étale sur dix mois avec une baisse des précipitations au mois de novembre. A l'inverse l'année 1996/1997 avec 207.4 mm est supposée la plus sèche, le diagramme établi (fig. 23) montre que la saison humide s'étale sur deux mois (décembre et janvier) et elle recommence mi-Mars jusqu'à mi-Mai.

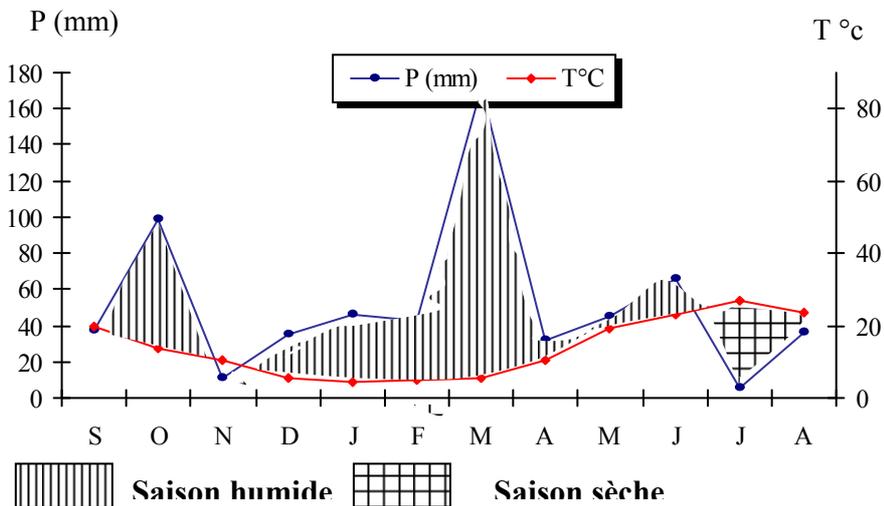


Fig. 22. Diagramme pluviothermique de l'année la plus arrosée à la station de Tébessa. (72/1973)

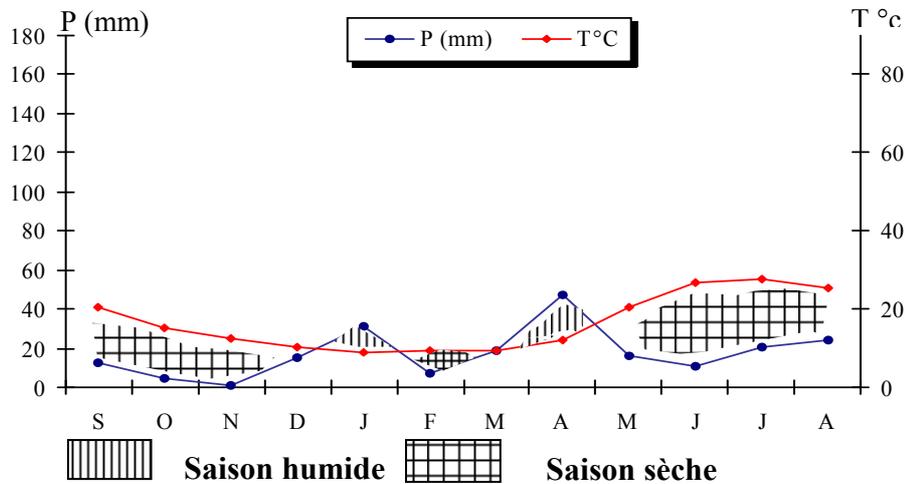


Fig. 23. Diagramme pluviothermique de l'année la plus sèche à la station de Tébessa. (96/97)

III. 3. 2. Evolution des facteurs climatiques sur la période 1972 à 2006 :

Le choix de cette période est dicté par le fait que nous disposons simultanément des enregistrements des températures et des précipitations pour cette période, ce qui nous permettra le calcul des paramètres climatiques et d'estimer le bilan hydrologique.

III. 3. 2. 1 Les précipitations:

Les précipitations constituent le premier facteur important dans le cycle de l'eau, leur distribution dans le temps et dans l'espace conditionne la forme des écoulements et les apports aux nappes. Le tableau (3), donne un aperçu sur la répartition des précipitations mensuelles au niveau de la station de Tébessa le long de la période considérée. On remarque que le mois de septembre et le mois de mai sont les plus pluvieux.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Moy	40.25	32.37	36.63	30.52	26.90	25.94	40.06	31.19	38.17	27.85	12.02	29.27

Tab. 3. Précipitations moyennes mensuelles (mm) à la station de Tébessa (72/2006)

III. 3. 2. 2 Variation inter annuelle des précipitations

L'analyse de la courbe des variations inter annuelles des précipitations sur une période de 34 ans (72/73-2005/06) (fig. 24), montre que l'année 72/73 est l'année la plus arrosée avec 625.3 mm/an par contre l'année 96/97 est la plus sèche avec 207.4 mm/an. Notons que les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre de 370.37mm/an.

Le tableau suivant (4) récapitule les années humide dépassant la moyenne, le reste des années sont considérées comme sèches.

Années humides	72/73	75/76	76/77	79/80	89/90	90/91	91/92
	95/96	98/99	99/2000	02/03	03/04	04/05	05/06

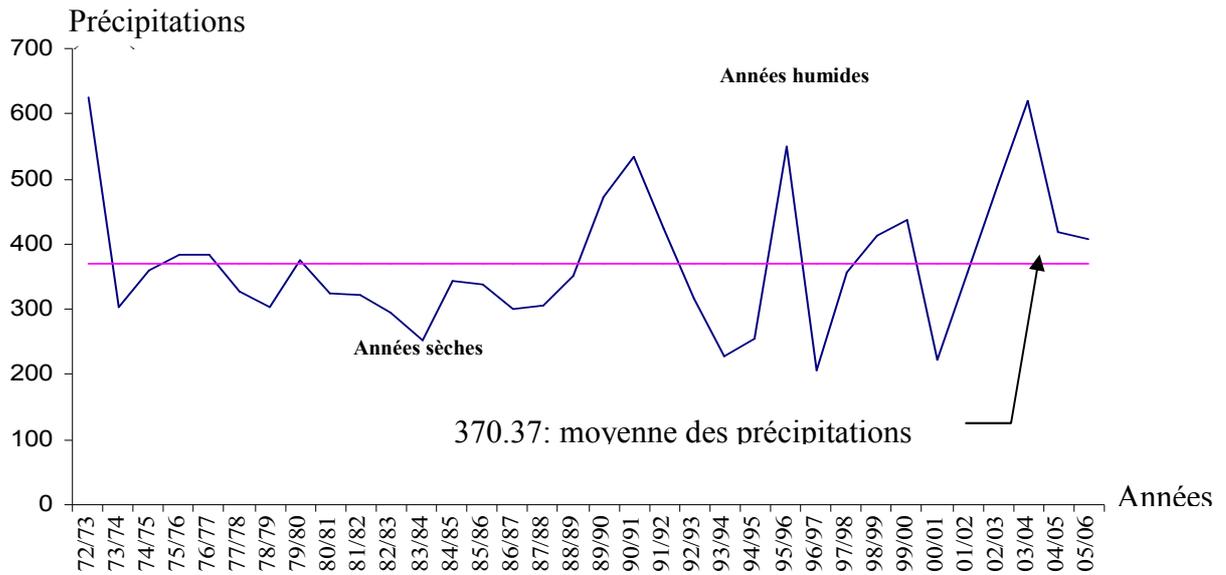


Fig. 24. Variation interannuelle des précipitations à la station de Tébessa (1972/2006)

III. 3. 2. 3 Variations mensuelles des précipitations:

La courbe de variation des moyennes mensuelles des précipitations, sur une période de 34 ans (72/73-05/06) (fig. 25), montre que le mois de septembre (40.25mm) est le plus pluvieux, par contre le mois de juillet avec 12.02mm est le plus sec.

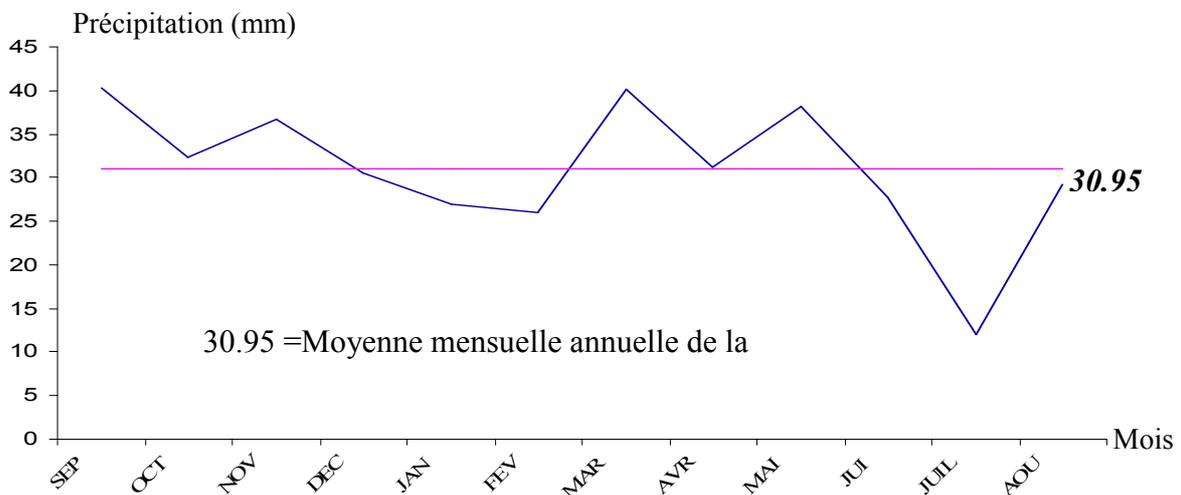


Fig. 25. Variation des moyennes mensuelles annuelles des précipitations à la station de Tébessa. (1972/2006)

III. 3. 2. 4 Répartition saisonnière des précipitations :

La subdivision des pluies de l'année pour chaque saison est faite suivant les saisons agricoles (automne : Sep, Oct, Nov, l'hiver : Déc, Jan Fév, printemps : Mar, Avr, Mai, été : Jui Juill, Aou).

Saison	Automne		Hiver		Printemps		Eté	
	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
72/2006	109.26	29	83.27	22	109.43	30	69.16	19
96/2006	131.79	34	94.36	24	92.01	23	74.52	19

Tab. 5. Répartition saisonnière des précipitations pour les périodes 72/2006 et 2001/2006

Période 72/2006:

En observant le tableau précédent, on note pour la période considérée que la saison printanière et la saison automnale sont les plus pluvieuses, au total, il tombe 218.69 mm soit 59 % des pluies annuelles. En hiver le total des précipitations est de l'ordre de 83.27 mm soit 22% du total annuel. La saison estivale est la plus sèche, la pluviométrie enregistrée est la plus faible de l'ordre de 69.16 mm soit 19 % de la totalité des pluies (Fig. 26).

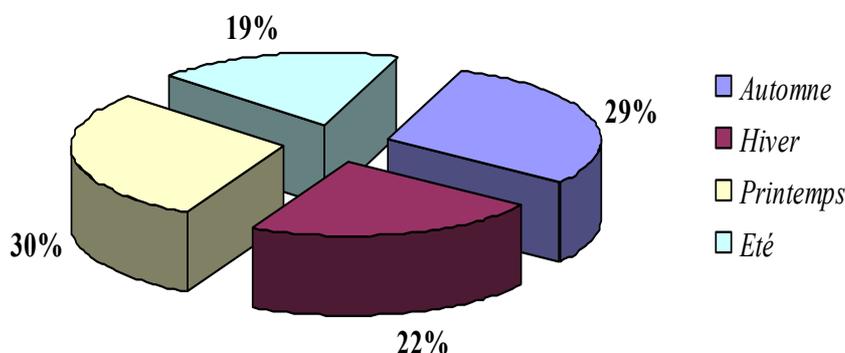


Fig. 26. Répartition saisonnière des précipitations (1972/2006).

Période de 96/2006:

Nous avons également étudié la variation des précipitations saisonnières au cours des dix dernières années. L'examen des résultats obtenus montre que la saison automnale est la plus pluvieuse, au cours de cette saison il tombe 131.79mm de précipitations soit 34 % du total annuel. En hiver et au printemps les précipitations enregistrées atteignent respectivement 94.36 mm et 92.01 mm correspondant à 24 % et à 23 % du total annuel. L'été reste la saison la plus sèche ou la pluviométrie est faible d'un ordre de 74.52 mm, soit 19 % de la totalité des pluies (Fig. 27).

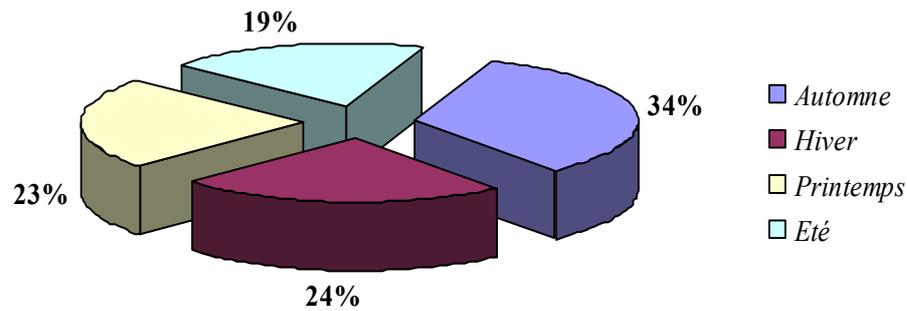


Fig. 27. Répartition saisonnière des précipitations (1996/2006).

III. 3. 2. 5. Les températures

La température est le deuxième élément important dans l'étude du climat, elle joue un rôle important dans la détermination des paramètres climatiques particulièrement la détermination du bilan hydrologique. Pour réaliser notre travail, nous nous sommes basé sur les données recueillies à la station de Tébessa aéroport. (Tableau 6)

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou
Moy	21.46	16.72	11.01	7.54	6.26	7.56	10.11	12.85	18.31	23.27	26.21	25.39

Tab. 6. Moyenne mensuelle des précipitations 72/2006

La période considérée s'étale de 1972 à 2006. L'observation des températures enregistrées montre qu'a:

-l'échelle mensuelle les hivers sont très froids et humides, les étés sont chauds et secs avec des enregistrements de température minimale de 6.26 °C au mois de janvier et maximale de 26.92 °C au mois de juillet. (Fig. 28)

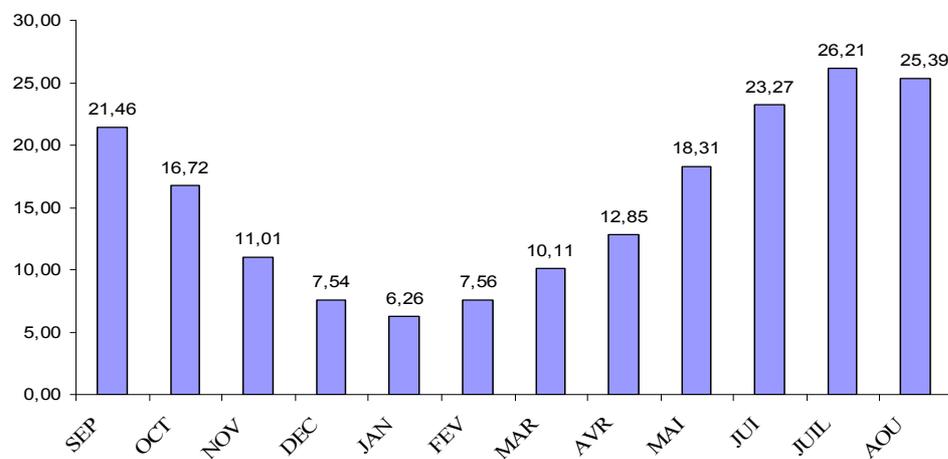


Fig. 28. Répartition mensuelle des températures 72/2006

-A l'échelle annuelle, une fluctuation thermique de faible amplitude donnant une certaine constance de l'allure générale. La moyenne annuelle est de 15.53°C. (Fig. 29)

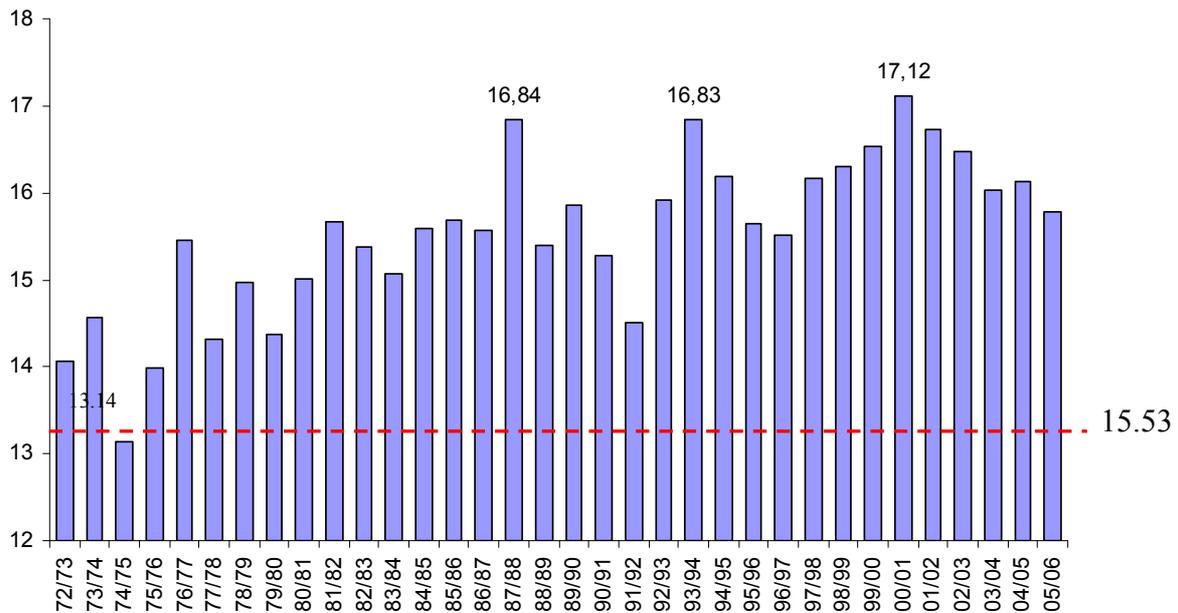


Fig. 29. Températures moyennes interannuelles à la station de Tébessa (72/2006)

III. 3. 2.6. La neige

Les sommets de la bordure sud du bassin versant de Tébessa sont enneigés en ligne droite Est-ouest depuis le djebel Bouroumane (1545m) au djebel meteguinaro (1712m).

La surface du bassin versant susceptible d'être enneigée est relativement faible, mais elle joue un rôle important car elle se situe sur des affleurements calcaires.

D'après Seltzer (1946) cette région se situe dans la zone d'enneigement moyen au sol de 5 à 10 jours/an.

III. 3. 3. Calcul du coefficient pluviométrique :

$$C_p = 365 \times P_i / P_n$$

P : précipitation.

P_i : précipitation du mois du rang.

n : nombre de jours par mois.

C_p : exprime le caractère plus ou moins pluvieux du mois.

On peut écrire la formule précédente sous la forme :

$$C_p = (365/n_i) \cdot (P_i/P) = K \cdot (P_i/P)$$

Avec:

K : coefficient dépendant du nombre de jours du mois considéré.

Si : n=31 jours k= 365/31=11.77.

Si : n=30 jours k=365/30=12.16.

Pour le mois de février 28 jours chaque trois ans et une fois 29 jours,

k= 365/(28 jours .3 ans +29)/4=12.92.

Pour la station de Tébessa avec p= 371.17 mm on a : C_p=k P_i/P.

Mois	Saison humide						Saison sèche					
	Nov	Dec	Jan..	Fév .	Mar.	Avr.	Mai.	Juin.	Juill.	Aout.	Sept.	Oct.
K	12.16	11.77	11.77	12.92	11.77	12.16	11.77	12.16	11.77	11.77	12.16	11.77
Pi	36.63	30.52	26.90	25.94	40.06	31.19	38.17	27.85	12.02	29.27	40.25	32.37
Cp	1.20	0.96	0.85	0.90	1.27	1.02	1.21	0.91	0.38	0.92	1.31	1.02

Tab. 7. Coefficient pluviométrique de la plaine de tébessa. (72/2006)

Saison

humide : Cp (sh) = 6.2

Saison sèche : Cp (ss)= 6.04

$R = C_p(ss)/C_p(sh)$

$6.04 / 5.88 = 1.02 \quad 1 < R < 1.75$ (Climat semi- aride)

Selon ces normes la région d'étude est soumise à un climat, semi-aride caractérisé par deux saisons ; l'une humide marquée par une moyenne de pluviosité allant du mois de novembre jusqu'au mois d'avril et par une faible température. L'autre sèche de forte température atteignant leur maximum au mois de juillet.

III. 3.4. Détermination des indices climatiques

III. 3.4. 1. Climagramme d'Emberger

Pour déterminer les types de climat de la zone méditerranéenne, L. Emberger a proposé la détermination d'un quotient pluviométrique Q (fig. 30). Ce quotient dépend de la précipitation moyenne annuelle et les moyennes des températures minima et maxima, respectivement des mois les plus froids et les plus chauds.

$$Q = \frac{P}{\frac{(M + m)(M - m)}{2}} \cdot 1000$$

P : Précipitation moyenne annuelle (mm)

M : moyenne des maxima du mois le plus chaud (degrés kelvin)

m. : moyenne des minima du mois le plus froid (degré kelvin).

Partant de ces données, il a établi un Climagramme où chaque station intéressée figure suivant ses coordonnées avec en abscisse m (minima en°C du mois le plus froid) et en ordonnées le quotient pluviométrique Q.

Le calcul de ce dernier dans la zone de Tébessa donne les valeurs suivantes :

$$Q = \frac{371.17}{(306.51) + 273.94) / 2(306.51 - 273.94)} \cdot 1000 = 39.26$$

D'après cette valeur on peut dire que la région de Tébessa possède un climat semi-aride.

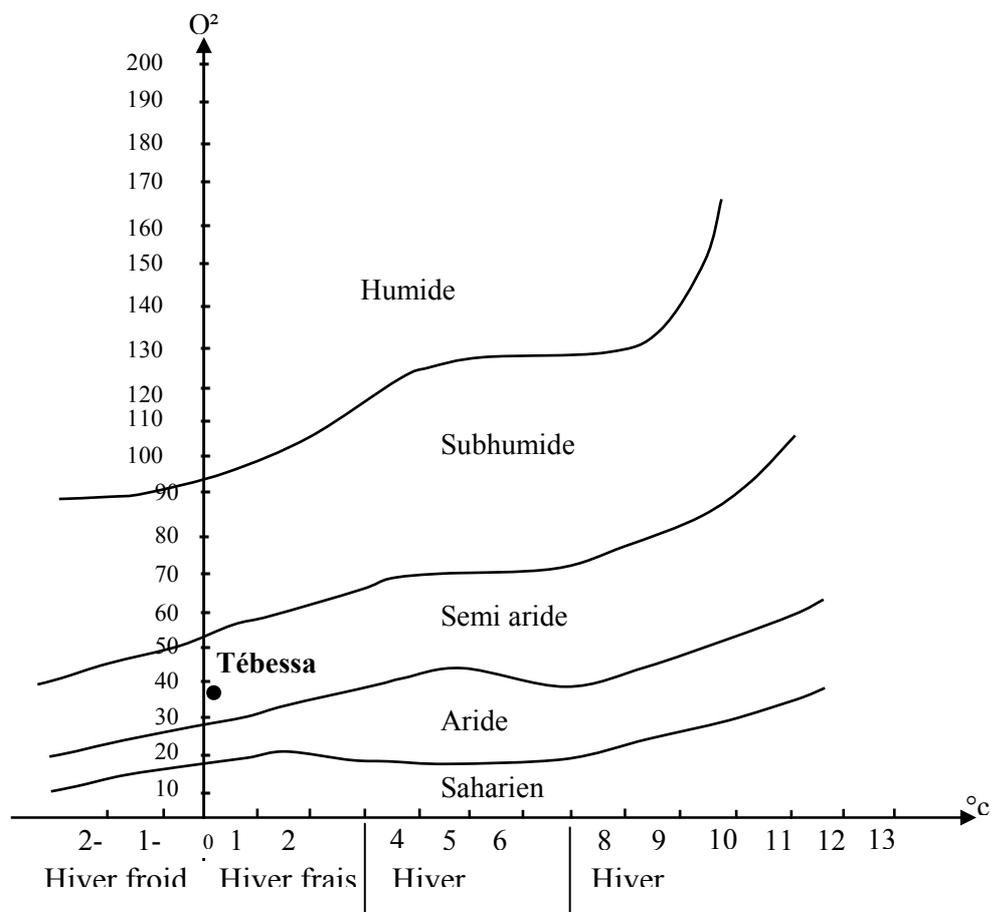


Fig. 30. Climagramme d'EMBERGER

III. 3. 4. 2. Indice d'aridité de De. Martonne:

En 1923 DE. Martonne avait établi un indice en fonction des températures et des précipitations (fig. 31)

Il est calculé par les relations suivantes :

$$I = P/T + 10$$

Où:

- P : précipitation annuelle moyenne (mm)
- T : température annuelle moyenne (°C)

Suivant les valeurs de I obtenues, DE. Martonne a établi la classification suivante :

- $I < 5$: Climat hyper aride.
- $5 < I < 7.5$: Climat désertique.
- $7.5 < I < 10$: Climat steppique
- $10 < I < 20$: Climat semi-aride.
- $20 < I < 30$: Climat tempéré

Application :

$P = 371.17$

$T = 15.53 \text{ }^\circ\text{C}$

ce qui donne : $I = 14.53$

D'après cette dernière on peut dire que le climat annuel de la région de Tébessa est de type semi-aride.

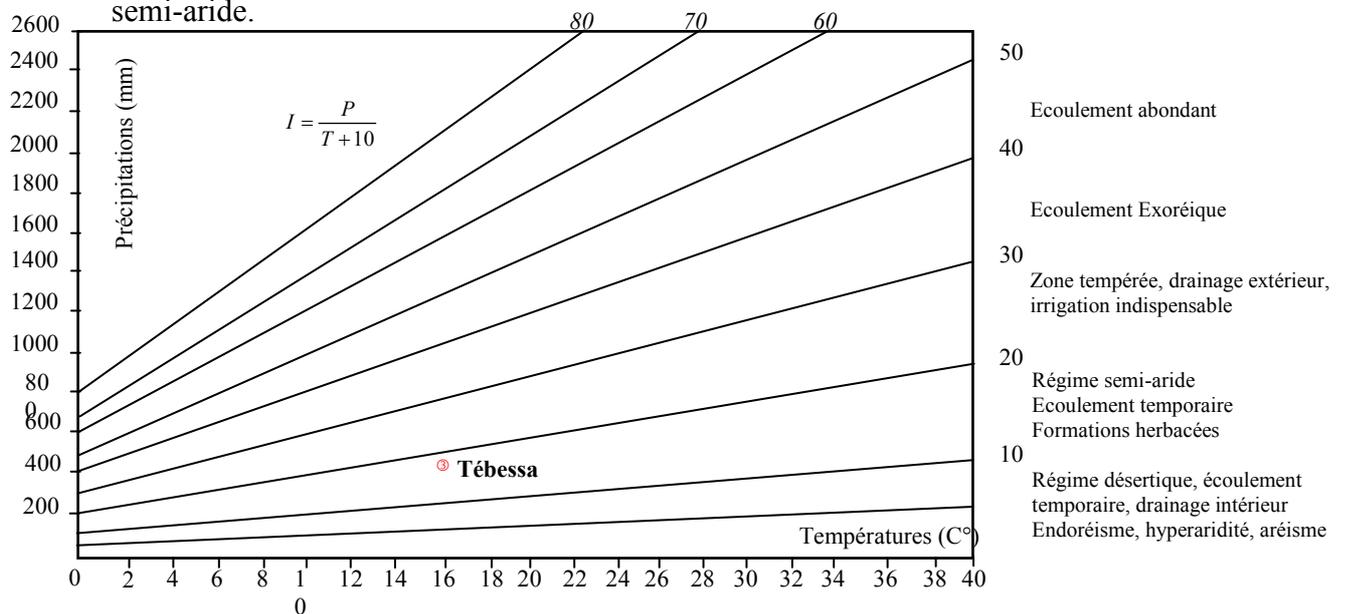


Fig. 31. Abaque de l'Indice d'aridité Annuel de DE Martone 1923

Indice d'aridité mensuelle:

L'indice d'aridité mensuel i donné par la formule

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

Avec:

P : précipitation mensuelle moyenne (mm)

T : température mensuelle moyenne ($^\circ\text{C}$)

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juill	Août
I	15.35	14.53	20.92	20.88	8.85	17.72	23.90	16.37	16.17	10.04	3.98	13.83

Tab. 8. Indice d'aridité mensuel

D'après les résultats présentés dans le tableau (8) on remarque que le mois de juillet présente un climat hyperaride, les mois de novembre, décembre, et mars jouissent d'un climat tempéré. le mois de juin présente un climat steppique alors que le climat semi-aride marque le reste des mois.(Fig. 32)

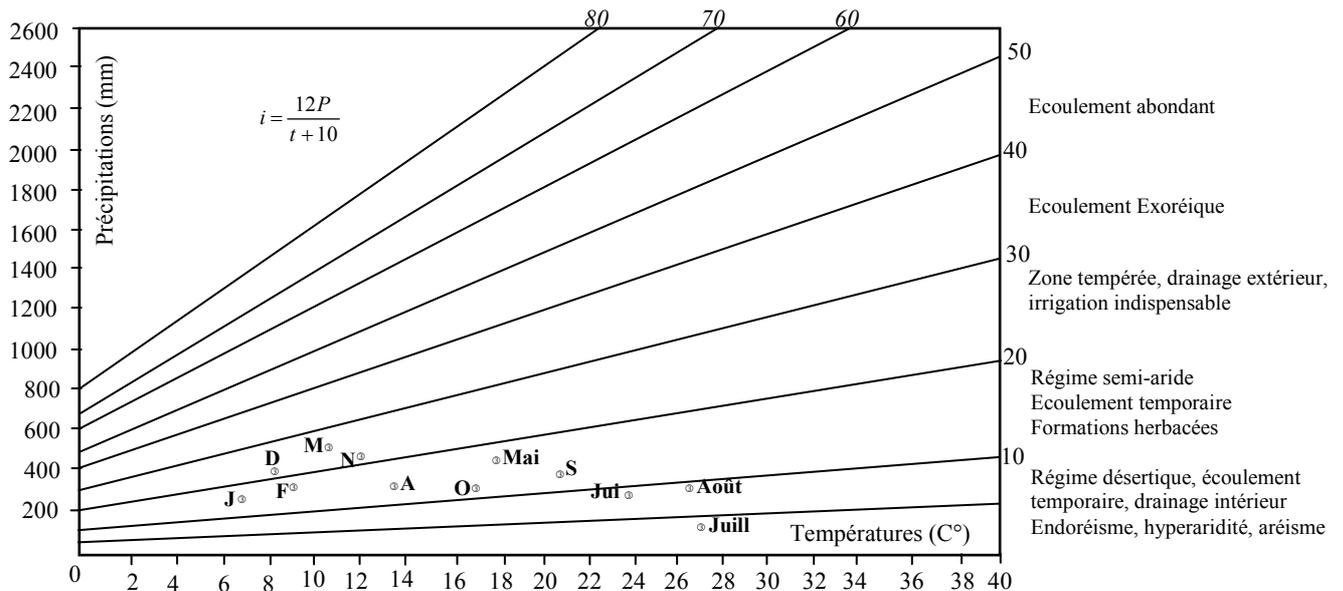


Fig. 32. Abaque de l'Indice d'aridité Mensuel de DE Martone 1923

III. 4. Le Bilan hydrique

Le bilan hydrique exprime le processus que suit une quantité d'eau arrivant au sol par précipitation ou neige avant de se retourner à l'atmosphère.

Le bilan hydrologique naturel peut se calculer par la formule suivante (Castany 1982) :

$$P = ETR + R + I$$

- ETR : l'évapotranspiration annuelle (mm).
- I : infiltration.
- P : précipitation.
- R : ruissellement.

III. 4. 1. Etude de l'évapotranspiration

C'est un terme important du cycle hydrique qui résulte de deux phénomènes, l'un physique (l'évaporation), l'autre biologique (la transpiration); l'évapotranspiration est fonction de plusieurs facteurs (l'humidité, la température, l'insolation et la couverture végétale.

a. Estimation de l'évapotranspiration potentielle : (ETP)

Pour l'estimation de l'ETP, on utilise la formule de Thornthwaite.

$$\text{ETP (mm/mois)} = 16 \left(\frac{10T}{I} \right)^a \cdot k$$

$$i = (T/5)^{1.514}$$

$$I = \sum i \quad a = (1.6/100) I + 0.5$$

- T : température moyenne du mois considéré en $^{\circ}C$
- ETP : évapotranspiration potentielle du mois considéré en mm.
- K : coefficient de correction de la latitude. - I : indice thermique annuel.
- i : indice thermique mensuel.

b. Estimation de l'évapotranspiration réelle: (ETR)

Les pertes d'eau d'un sol atteignent l'ETP si elles sont supérieures ou égales au stock d'eau de la RFU.

En cas d'insuffisance elles sont limitées à une quantité plus petite, cette limite est appelée l'évapotranspiration réelle (G. Castany). Cette estimation se fera à partir des formules de Turc, de Coutagne, et de Thornthwaite.

Formule de Turc:

Cette formule permet d'évaluer directement l'ETR annuelle d'un bassin à partir de la hauteur annuelle de pluie et de la température moyenne annuelle.

$$\text{ETR} = P / (0.9 + P^2 / L^2)^{1/2} \text{ (mm/an)}$$

- $L = 300 + 25T + 0.05 T^3$ (facteur qui tient compte des échanges de chaleur) ;
- P : Précipitation moyenne annuelle en mm ;
- T : Température moyenne annuelle en $^{\circ}C$.

Evapotranspiration réelle par la formule de Thornthwaite

Pour l'établissement du bilan mensuel on utilise l'évapotranspiration potentielle et réelle moyenne par la méthode de C.W. Thornthwaite.

Ce bilan repose sur l'hypothèse suivante :

- la satisfaction de l'ETR est prioritaire sur l'écoulement.
- Le calcul de \Rightarrow l'ETR peut s'effectuer suivant deux cas :
 1^{er} cas : $P > ETP \Rightarrow ETR = ETP$ on a alors un excédent.
 2^{ème} cas: $P < ETP \Rightarrow ETR = P + RFU$.

Sur le tableau suivant (Tab. 9) figurent les valeurs de l'ETR en (mm) et en (%) d'après les deux méthodes L. Turc et Thornthwaite d'où on remarque une différence nettement distincte.

Méthode	ETR (mm)	ETR (%)
Thornthwaite	332.72	89.64
Turc	354.44	95.49

III. 4. 2. Estimation des réserves facilement utilisables:

Elle présente la quantité d'eau emmagasinée dans le sol, son degré de saturation dépend de plusieurs facteurs :

- la nature, la lithologie et l'épaisseur de la couche superficielle
- la profondeur du niveau piézoélectrique de la nappe aquifère
- le climat de la région
- le type de la couverture végétale

J.Richard a évalué la RFU pour la plaine de Tébessa, en tenant compte de tous ces facteurs entre 25 et 26

III. 4. 3. Indice thermique mensuel

Cet indice est calculé à partir de la température moyenne mensuelle (t) du mois $i.=(t/s).1.5$ considéré.

III. 4. 4. Indice thermique annuel

C'est la somme des indices mensuel des 12 mois de l'année.

$$I=\sum i$$

III. 4. 5. Répartition des précipitations

a. / Calcul du ruissellement

Le ruissellement (R) peut être calculé par la formule suivante d'après (Tixeront Berkallof):

Avec la $R= P^3/3(ETP)^2$ condition de $P < 600$ mm

Avec :

- R : ruissellement en m ;
- P : précipitation moyenne mensuelle en m ;
- ETP : évapotranspiration potentielle en m.

Périodes	Pr (m)	ETP (m)	R (m)	R (%)
72/2006	0.371	0.828	0.024	6.68
96/2006	0.392	0.577	0.060	15.40
72/73	0.625	0.630	0.204	32.77
96/97	0.207	0.708	0.005	2.82

Tab. 10. Résultats du ruissellement Pour les différentes périodes

b. / Calcul de l'infiltration:

D'après le bilan hydrologique l'infiltration efficace peut être calculer comme suit:

Alors:

$$P = ETR + R + I$$

$$I = P - R - ETR$$

Périodes	Infiltration (mm)	Infiltration (%)
72/2006	13.64	3.67
96/2006	1.23	0.31
72/73	56.01	8.95
96/97	00	00

Tab. 11. Résultats de l'infiltration pour les différentes périodes

Périodes	Pr	ETR	% ETR	R	% R	I	% I
72/2006	371.17	332.72	89.64	24.81	6.68	13.64	3.67
96/2006	392.68	330.94	84.27	60.51	15.40	1.23	0.31
72/73	625.3	364.34	58.26	204.95	32.77	56.01	8.95
96/97	207.4	207.4	100	00	00	00	00

Tab. 12. Récapitulatif des résultats de ETR, R, I, pour les différentes périodes

En examinant les résultats (Tableau 12) on distingue que :

Période 72/2006

La lame d'eau précipitée d'environ 371.17 mm, plus de 89% est évapotranspiré (332.72 mm), pour le volume infiltré aboutissant aux nappes souterraines, il est de 13.64 mm (3.67 %), qui varie fortement avec la nature des terrains. Le ruissellement est plus important que l'infiltration 24.81 mm (6.88%) qui est du à la présence des pentes dans le terrain traversé ainsi que la nature du terrain.

Période 96/2006

Sur un total précipité de 392.68 mm, (84.27%) d'eau est évapotranspiré (330.94), l'eau ruisselée est plus importante que celle infiltrée avec 60.51 mm (15.40 %) et 1.23 mm (0.31 %) respectivement et cela revient à la nature du terrain de la région.

Période pluvieuse 72/73

La lame d'eau précipitée est d'environ (207.4 mm), 58.26 % est évapotranspiré (364.34 mm), une grande quantité de cette eau ruisselle qui est de l'ordre de 204.95 mm (32.77 %) et le reste de 56.01 mm (8.95 %) rejoint les eaux souterraines par infiltration à travers les formations perméable de la région.

Période sèche 96/97

La lame d'eau tombée 207.4 mm est a 100% évapotranspirée et ne laisse pas la part de l'infiltration ni du ruissellement ce qui reflète réellement l'année sèche.

Les tableaux suivant montrent les bilans hydriques à la station de Tébessa pour une période de 34 ans, 10 ans année pluvieuse et année sèche, allant de l'année 72 jusqu'au 2006.

Mois	T ⁰ C	i	K	Pr	ETP	BH	RFU	ETR	Def	Exc
Sep	21.46	9.10	1.03	40.25	97.8	-57.5	0	40.3	57.5	0
Oct	16.72	6.2	0.97	32.37	61.2	-28.9	0	32.4	28.9	0
Nov	11.01	3.3	0.86	36.63	27.4	9.2	9.2	27.4	0	0
Dec	7.54	1.9	0.81	30.52	13.9	16.6	25.8	13.9	0	0
Jan	6.26	1.4	0.87	26.90	11	15.9	26	11	0	15.7
Fev	7.56	1.9	0.85	25.94	14.7	11.3	26	14.7	0	11.3
Mar	10.11	2.9	1.03	40.06	28.6	11.5	26	28.6	0	11.5
Avr	12.85	4.2	1.10	31.19	45.2	-14	12	45.2	0	0
Mai	18.31	7.1	1.21	38.17	88.6	-50.4	0	50.2	38.4	0
Jui	23.27	10.3	1.22	27.85	132.2	-104.4	0	27.9	104.4	0
Jul	26.21	12.3	1.24	12.02	163.2	-151.2	0	12	151.2	0
Aou	25.39	11.7	1.16	29.27	145	-115.7	0	29.3	115.7	0
Tot		72.3		371.17	828.75	-457.58		332.72	496.04	38.45

Tab. 13. Bilan hydrique global d'après la méthode de Thornthwaite
(Station de Tébessa sur une période de 34ans 72/2006)

- T : température mensuelle en C⁰ -Pr : précipitation mensuelle en (mm)
- i : indice thermique - RFU : réserve facilement utilisable en (mm)
- k : coefficient de latitude - ETR : évapotranspiration réelle en (mm)
- ETP : évapotranspiration potentielle en (mm) - Def : déficit agricole en (mm)
- BH: Bilan Hydrique - EXC : excédent en (mm)

Formules de vérification:

$$P = \sum ETR + \sum EX \quad A.N: P = 332.72 + 38.45 = 371.17$$

$$ETP = \sum ETR + \sum DA \quad A.N: ETP = 332.72 + 496.04 = 828.75$$

mois	T ⁰ C	i	K	Pr	ETP	BH	RFU	ETR	Def	Exc
S	21.7	9.2	1.03	44.2	97.6	-53.4	0	44.2	53.4	0
O	17.9	6.9	0.97	42.7	65.7	-23	0	42.7	23	0
N	11.7	3.6	0.86	44.9	27.8	17.1	17.1	27.8	0	0
D	7.9	2	0.81	44.9	13.2	31.7	26	13.2	0	22.8
J	6.5	1.5	0.87	34.3	10	24.3	26	10	0	24.3
F	7.5	1.9	0.85	15.1	12.8	2.3	26	12.8	0	2.3
M	11.3	3.5	1.03	24.4	31.5	-7.2	18.8	31.5	0	0
A	13.4	4.4	1.10	32.9	45.1	-12.2	6.6	45.1	0	0
M	19.8	8	1.21	34.8	97.3	-62.2	0	41.4	55.9	0
J	24.5	11.1	1.22	31	143	-112	0	31	112	0
J	27.7	13.4	1.24	15.5	17.8	-2.3	0	15.5	2.3	0
A	26.5	12.5	1.16	28	15.7	12.4	12.4	15.5	0	0
Total		90.5		392.68	577.52	-184.84		330.94	246.59	49.39

Tab. 14. Bilan hydrique d'après la méthode de Thornthwaite
(Station de Tébessa sur une période de 10 ans 96/2006)

Formules de vérification:

$$P = \sum ETR + \sum EX \quad P = 330.94 + 49.39 = 392.68$$

$$ETP = \sum ETR + \sum DA \quad ETP = 330.94 + 246.59 = 577.52$$

mois	T ⁰ C	i	K	Pr	ETP	BH	RFU	ETR	Def	Exc
S	19.8	8	1.03	36.9	89.1	-52.2	0	36.9	52.2	0
O	13.7	4.6	0.97	99.3	48.2	51.1	26	48.2	0	25.1
N	10.7	3.2	0.86	11.2	29.5	-18.3	7.7	29.5	0	0
D	5.7	1.2	0.81	34.9	10.7	24.2	26	10.7	0	5.9
J	4.4	0.8	0.87	46	7.8	38.2	26	7.8	0	38.2
F	4.8	0.9	0.85	42.7	8.7	34	26	8.7	0	34
M	5.6	1.2	1.03	171.1	13.3	157.8	26	13.3	0	157.8
A	10.5	3.1	1.10	31.3	36.6	-5.3	20.7	36.6	0	0
M	19.9	8.1	1.21	44.7	105.5	-60.8	0	65.4	40.1	0
J	23.1	10.1	1.22	65.5	133.1	-67.6	0	65.5	67.6	0
J	26.9	12.8	1.24	5.3	17.3	-12.0	0	5.3	12	0
A	23.6	10.5	1.16	36.4	130.7	-94.3	0	36.4	94.3	0
Total		64.5		625.3	630.59	-5.29		364.34	266.25	260.96

Tab.15. Bilan hydrique d'après la méthode de Thornthwaite
(Station de Tébéssa année pluvieuse) 72 /73

Formules de vérification:

$$P = \sum ETR + \sum EX \quad P = 364.34 + 260.96 = 625.3$$

$$ETP = \sum ETR + \sum DA \quad ETP = 364.34 + 266.25 = 630.59$$

mois	T ⁰ C	i	K	Pr	ETP	BH	RFU	ETR	Def	Exc
S	20.3	8.3	1.03	12.4	87.1	-74.7	0	12.4	74.7	0
O	15	5.3	0.97	4.1	48.7	-44.6	0	4.1	44.6	0
N	12.4	4	0.86	1.2	31.1	-29.9	0	1.2	29.9	0
D	10.2	2.9	0.81	15	20.9	-5.9	0	15	5.9	0
J	8.7	2.3	0.87	31.6	17.1	14.5	14.5	17.1	0	0
F	9.3	2.6	0.85	7.1	18.7	-11.6	2.9	18.7	0	0
M	9.3	2.6	1.03	18.9	22.7	-3.8	0	21.8	0.9	0
A	12.2	3.9	1.10	46.8	38.7	8.1	8.1	38.7	0	0
M	20.4	8.4	1.21	16.1	103.2	-87.1	0	24.2	79	0
J	26.2	12.3	1.22	10.3	160.3	-150	0	10.3	150	0
J	27.5	13.2	1.24	20.2	17.8	2.4	2.4	17.8	0	0
A	25.2	11.6	1.16	23.7	142.5	-118.8	0	26.1	116.4	0
Total		77.4		207.4	708.82	-501.42		207.4	501.42	0

Tab.16. Bilan hydrique d'après la méthode de Thornthwaite
(Station de Tébessa année sèche) 96/97

Formules de vérification:

$$P = \sum ETR + \sum EX \quad P = 207.4 + 0 = 207.4$$

$$ETP = \sum ETR + \sum DA \quad ETP = 207.4 + 501.42 = 708.82$$

III. 4. 6. Commentaire sur le bilan hydrique

Le bilan hydrique nous a permis d'évaluer la part de chaque paramètre hydrologique. D'après l'établissement de ces bilans on a pu tirer ces quelques conclusions :

Bilan hydrique global période allant de 72-2006:

-Le déficit agricole se remarque à partir du mois de mai et se poursuit jusqu'à octobre, période pendant laquelle la RFU est épuisée (Tab. 13).

La figure ci-dessous (Fig. 33) illustre les résultats du tableau (13) sur 34 ans (72/2006), sur le bilan de Thornthwaite, qui nous permet une lecture simple des différents éléments du bilan.

-Les hauteurs de précipitation atteignent leurs maximum au mois de septembre (40.25 mm) où l'ETP atteint en janvier un minimum (11 mm)

-L'ETP atteint son maximum au mois de juillet (163.2 mm) où les précipitations atteignent (12.02 mm).

Pendant le mois de novembre le stock se reconstitue ou la RFU atteint son maximum (26 mm) au mois de janvier puis demeure jusqu'au mois d'avril ensuite diminue jusqu'à l'épuisement total (Mai).

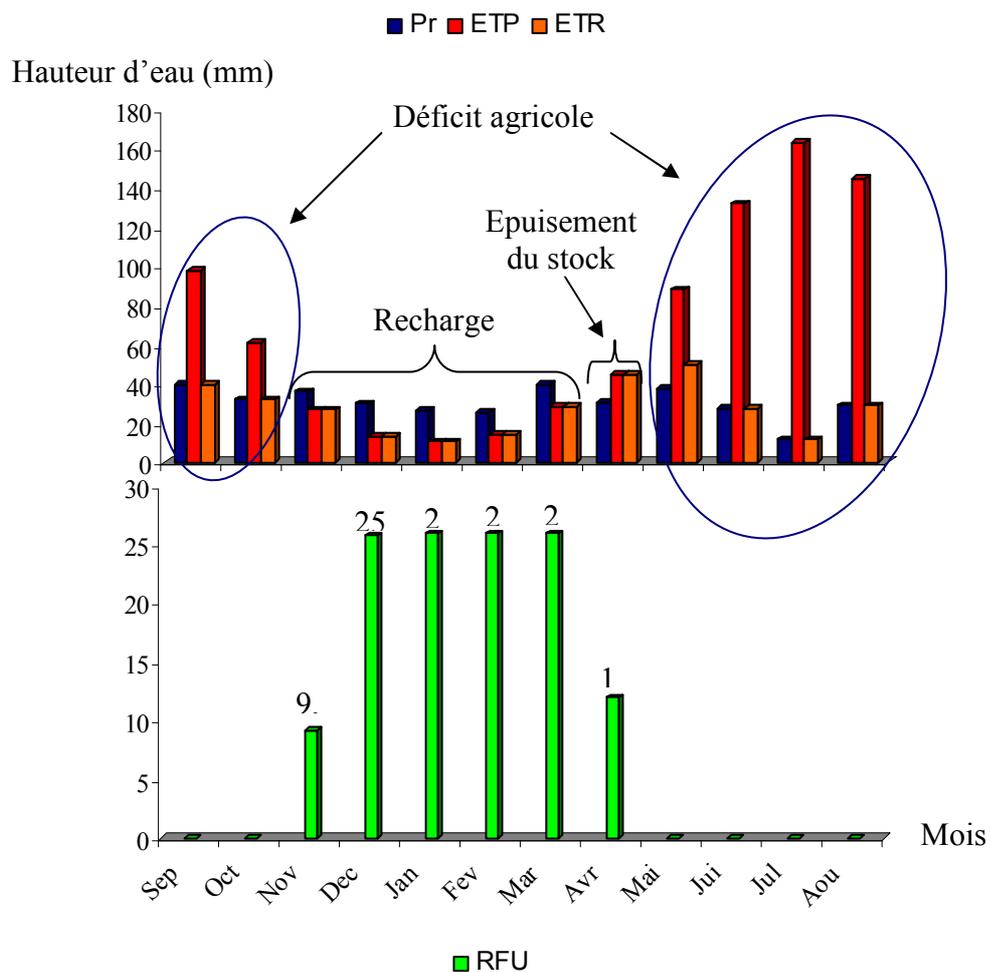


Fig. 33. Représentation graphique du bilan de Thornthwaite à la station de Tébessa (1972/2006).

Bilan hydrique période allant de 96-2006:

Sur cette période qui s'étale de l'année 96 au 2006 (Tab. 14) on remarque que :

La réserve facilement utilisable est épuisée à partir du mois de Mai jusqu'au mois d'octobre, période marquée par un déficit agricole ; Notons que le mois d'août enregistre un apport en précipitation dépassant l'ETP et l'ETR.

Pendant le mois de novembre le stock se reconstitue atteignant un maximum au mois de décembre (26 mm) puis diminue en Mars jusqu'à l'épuisement total en Mai. L'écoulement commence au mois de décembre et se termine en mois de Février avec un maximum d'écoulement en janvier et un minimum en mois de Février (figure 34).

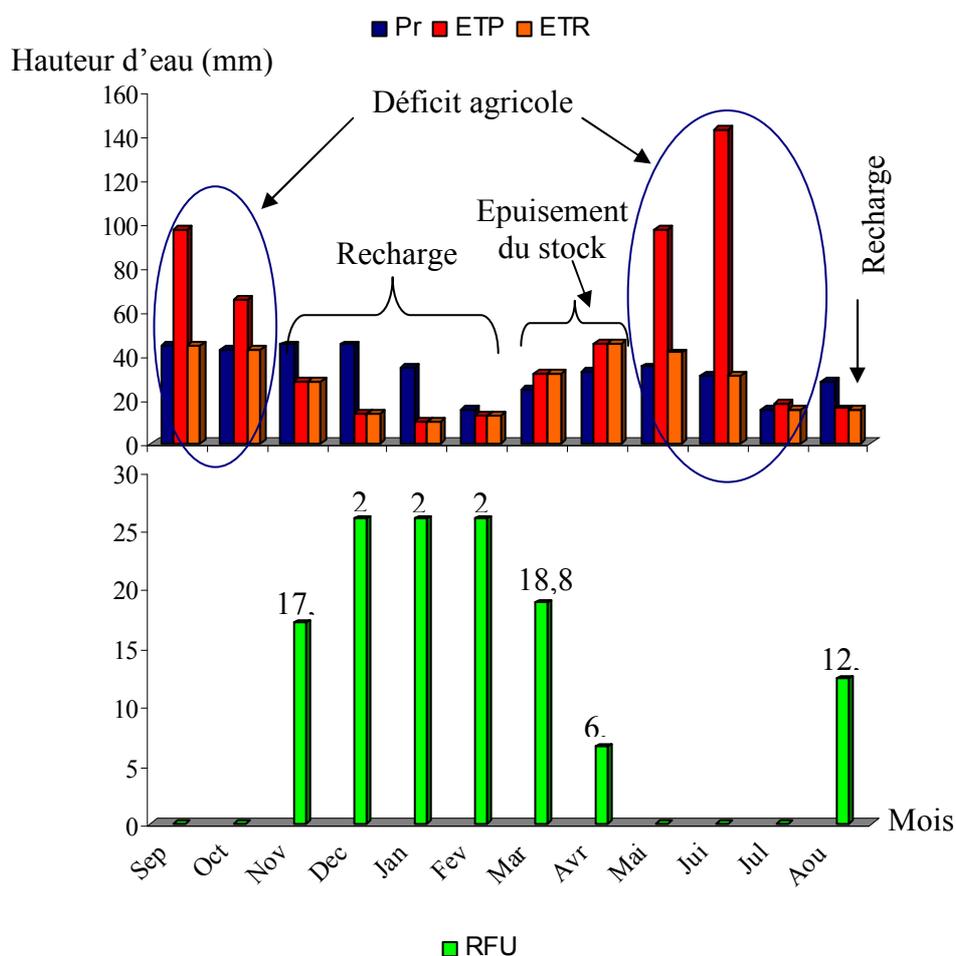


Fig. 34. Représentation graphique du bilan de Thornthwaite à la station de Tébessa (1996/2006).

Bilan hydrique année pluvieuse 72/73:

Sur une période de trente quatre ans l'année 72/73 est la plus humide marquée par une pluviosité considérable.

D'après le bilan de Thornthwaite pendant cette période (Tab. 15), on remarque ce qui suit :

Le déficit agricole se remarque à partir du mois de mai et se poursuit jusqu'à septembre, période pendant laquelle la RFU est épuisée. Pendant le mois d'octobre le stock se reconstitue ou la RFU atteint son maximum (26 mm) au mois de Décembre puis demeure jusqu'au mois de Mars ensuite diminue jusqu'à l'épuisement total (Mai) (Figure 35).

L'excédent touche les mois d'octobre, décembre, janvier, février et mars avec un maximum au mois de mars de et minimum au mois de décembre. C'est une année excédentaire.

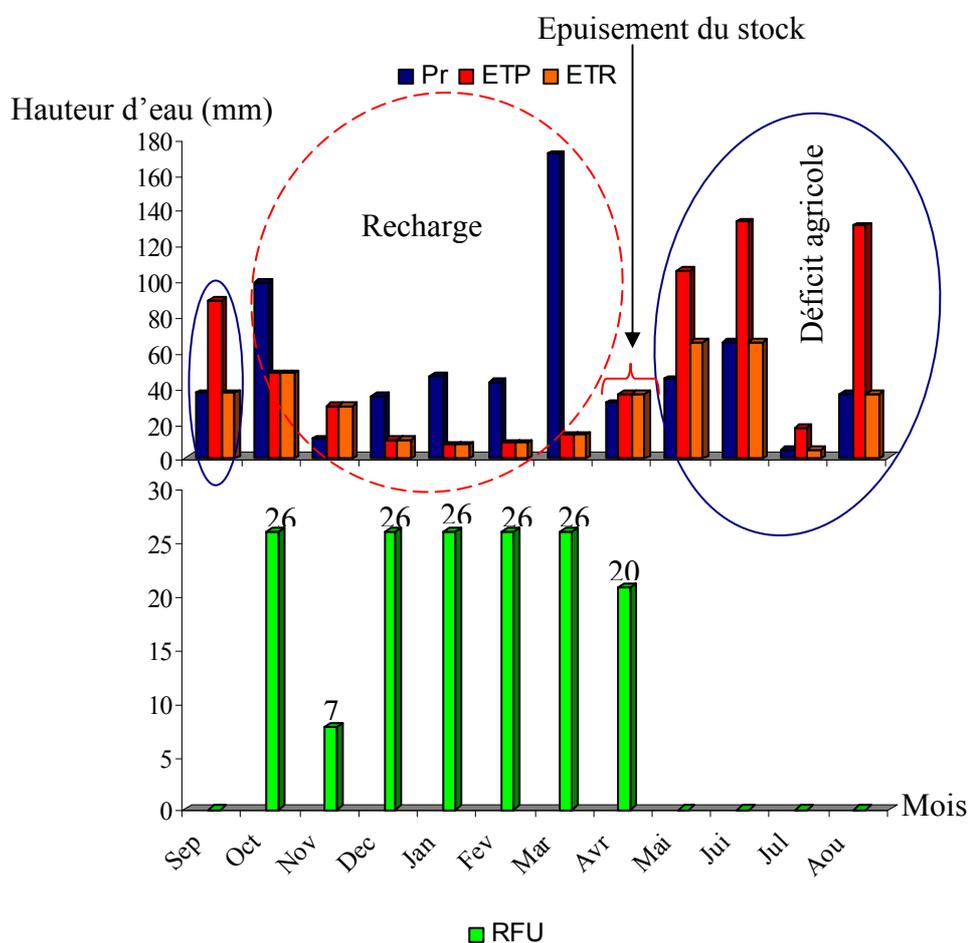


Fig. 35. Représentation graphique du bilan de Thornthwaite à la station de Tébessa (1972 /73)

Bilan hydrique année sèche 96/97:

Cette année est la plus sèche pendant une période de trente quatre ans (72/2006). L'établissement du bilan hydrique de Thornthwaite (Tab 16) nous a aidé a montré que : Le déficit agricole commence à partir du mois de mai et se poursuit jusqu'au mois de décembre période, pendant laquelle la RFU est épuisée. La RFU est reconstitué pour quelques mois mais avec des quantités très minimes L'écoulement (excédent) est nul c'est une année déficitaire (Figure 36).

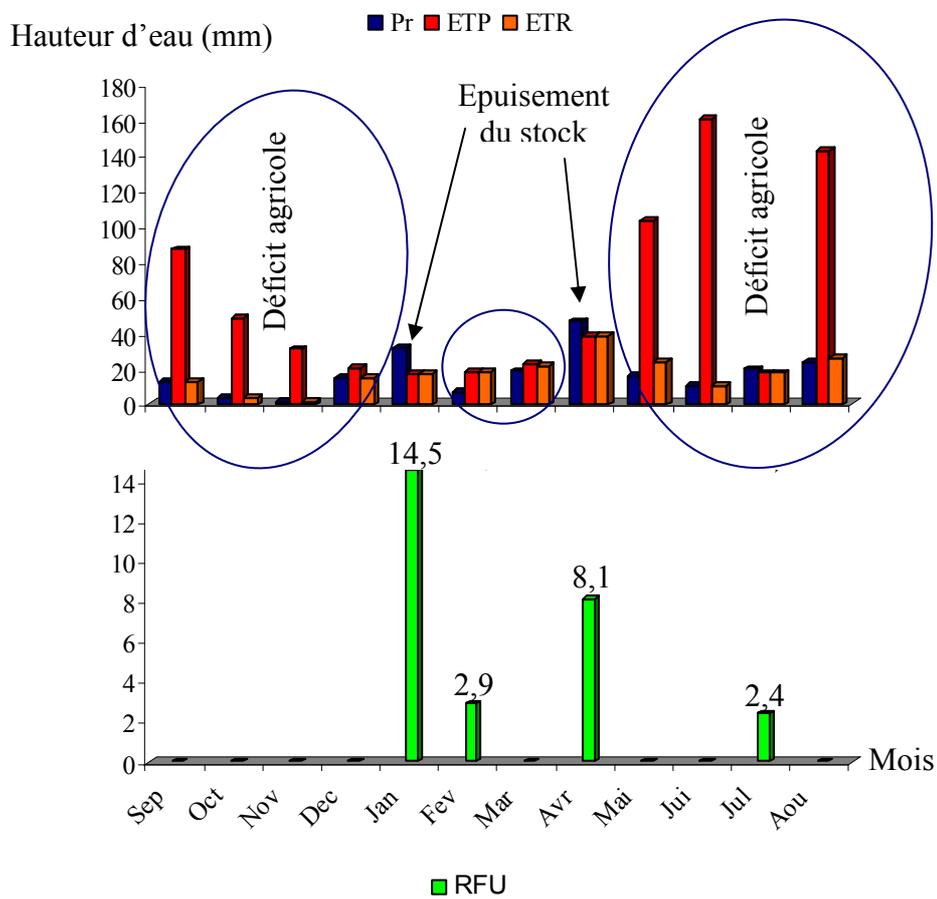


Fig. 36. Représentation graphique du bilan de Thornthwaite à la station de Tébessa (1996 /97)

III. 5. Variation de l'écoulement interannuel moyen :

Les écoulements mensuels sont reconstitués à partir de l'information disponible sur les pluies et l'ETP mensuels dans les différents bassins d'étude.

Les données traitées de (1965-1995) ont permis de connaître la lame d'eau moyenne écoulée, qui varie de moins de 50 mm par an sur les hautes plaines et à plus de 500 (peut aller jusqu'à 1000 mm) sur les massifs du tell maritime (Figure 37). (A.Mebarki, 2003)

La région d'étude, telle que délimitée sur la carte reçoit une moyenne des précipitations de 370 mm/an, dont la lame d'eau moyenne écoulée varie de 5 à 100 mm/an

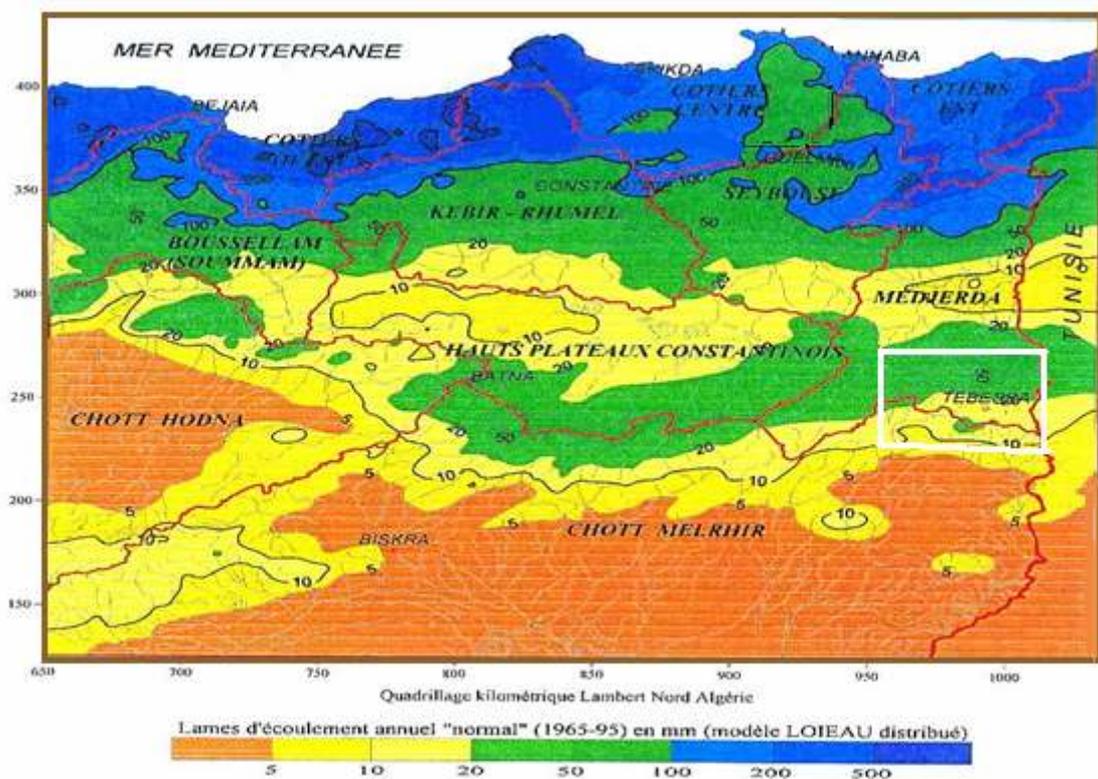


Fig. 37. Ecoulement interannuel moyen dans la zone d'étude (1965-1995)

III. 6. Conclusion

L'étude climatologique de la région de Tébessa permet de distinguer que le climat est typiquement semi-aride de type continental (hiver froid et été chaud). La température moyenne annuelle qui y règne est de 15.53 °C.

Les précipitations moyennes annuelles, sur une période de 34 ans (72/73 – 2005/2006), sont estimées à 371.17 mm. L'évapotranspiration réelle est estimée à 332.72 mm soit 89.64 % des précipitations. Le ruissellement bénéficie que de 6.68 % des précipitations ce qui représente 24.81 mm.

L'infiltration ne laisse percoler que 13.64 mm, qui ne représente que 3.67 % des précipitations, ceci nous laisse penser que l'alimentation de la nappe ne se base pas, uniquement sur l'infiltration efficace, mais aussi sur les calcaires fissurés qui bordent la nappe. Sur une période de trente quatre ans 72/2006 l'année la plus sèche est 96/97 avec une pluviosité de 392 ,6mm, l'année la plus humide est 72/73 avec une moyenne de 625,4mm.

CHAPITRE IV : APERÇU HYDROGÉOLOGIQUE

L'hydrogéologie constitue un outil de base pour connaître les différents éléments permettant de définir les caractéristiques d'une nappe. A partir de l'interprétation piézométrique nous pourrions déterminer le sens de l'écoulement des eaux par la définir les relations qui pourront exister entre les différents systèmes.

La détermination des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère (transmissivité et perméabilité) renseigne sur les caractéristiques de la nappe.

IV. 1. INTRODUCTION :

La plaine de Tébessa recèle trois niveaux d'eau (P1, P2 & P3), ces niveaux sont captés soit par des puits domestiques cas du niveau P1 par contre les deux autres restants sont captés par des forages. Notre travail va porter sur le puits captant le niveau P1 et les forages profonds captant le niveau P3, notons par ailleurs que le niveau P2 a été exploité dans le cadre du Plan National de Développement Agricole et nous ne disposons d'aucun renseignement sur ces ouvrages.

IV. 2. La piézométrie des puits domestiques :

Elle sera basée sur les relevés effectués sur les 30 puits domestiques (fig. 38). Les mesures ont été réalisées au cours du mois de mars 2006 et pendant le mois de juillet 2006).

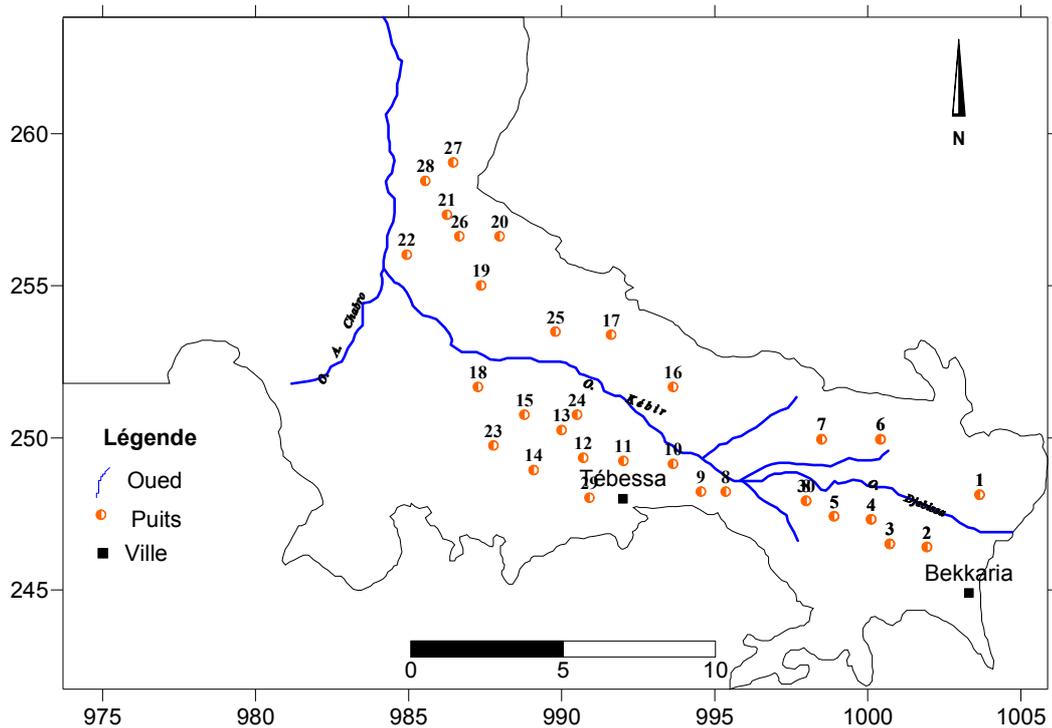


Fig. 38. Carte d'inventaire des points d'eau

IV. 2. 1. Interprétation des cartes piézométriques :

a. / Carte piézométrique de la période des hautes eaux (mars 2006) :

L'observation de la carte montre une surface piézométrique irrégulière, la morphologie des courbes indique un écoulement de direction Sud-Est Nord-Ouest. Elle permet également d'identifier trois secteurs distincts : (Fig. 39)

- A l'Est, le secteur de Bekkaria, l'espacement des courbes est presque régulier, avec des lignes de courant de direction Est-Ouest. L'alimentation de cette zone se fait par les bordures de la plaine. Le gradient hydraulique varie entre 0.003 et 0.005
- Au niveau de la zone de Tébessa la morphologie des courbes est assez régulière, c'est probablement l'effet de pompage des puits et des forages l'espacement est plus important au Nord par rapport au Sud.

Les gradients hydrauliques varient de 0.005 au nord à 0.1 au sud. On remarque une certaine alimentation de la nappe par les apports des bordures calcaires situées au sud de Tébessa.

- La région de Ain Chabro, située à l'ouest de la zone d'étude, est caractérisée par une dépression de la surface piézométrique qui reflète une zone de drainage due probablement aux effets de pompage.

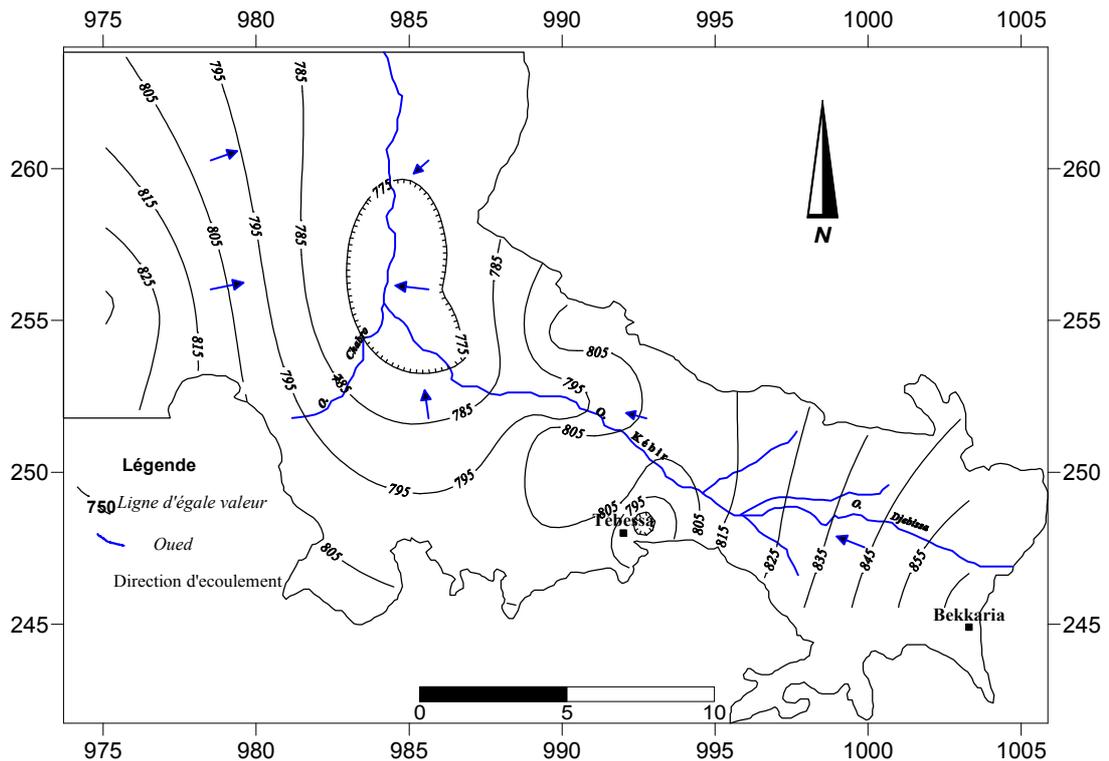


Fig. 39. Carte piézométrique Mars 2006
Plaine de Tébessa

b. / Carte piézométrique de la période des basses eaux (juillet 2006) :

L'examen des courbes piézométriques permet d'identifier trois zones pratiquement identiques à celles précédentes. Dans l'ensemble, la surface piézométrique présente la même morphologie avec un écoulement générale dirigé du Sud-Est vers le Nord-Ouest cependant, nous pouvons noter l'apparition d'une zone dépressive très accentuée située au nord de Ain chabro. L'exploitation des forages s'accompagne par celle des puits, les gradients hydrauliques sont en général de même ordre. (Fig. 40)

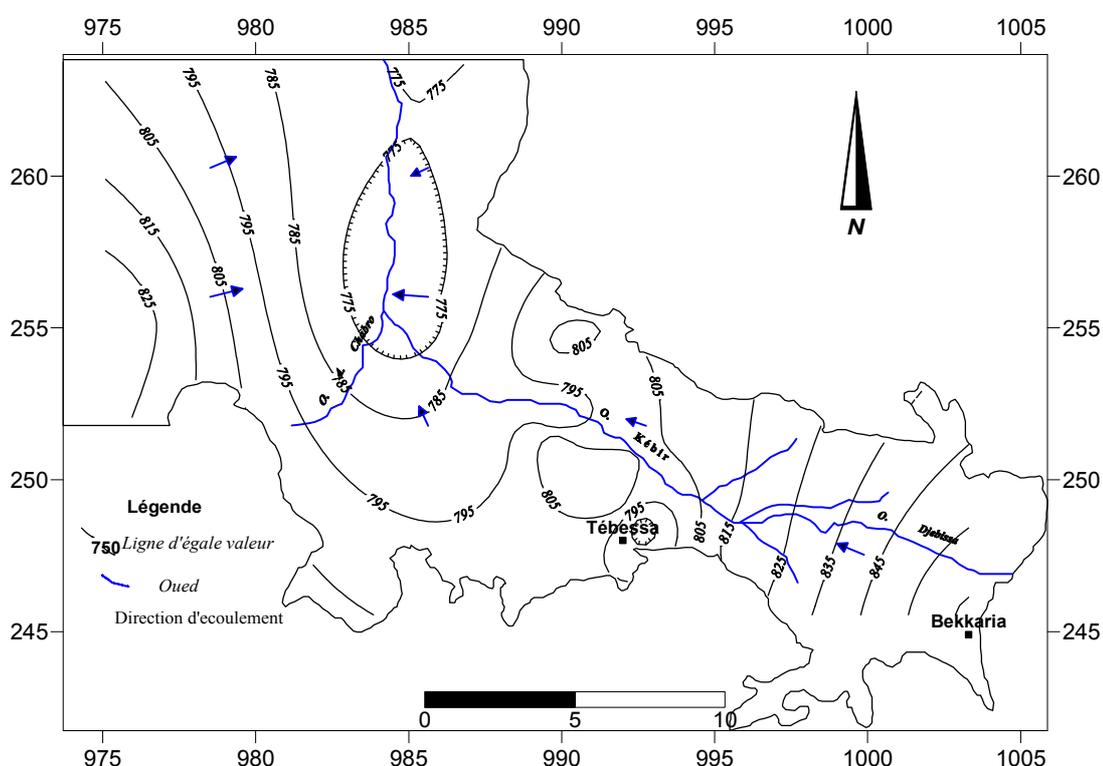


Fig. 40. Carte piézométrique Juillet 2006
Plaine de Tébéssa

IV. 2. 2. Conclusion

En général les deux cartes piézométriques montrent un écoulement dirigé de l'Est vers l'Ouest conformément à la topographie de la région qui montre une surélévation de la région de Bekkaria avec une altitude de 900m par rapport aux autres régions (Tébéssa et Ain Chabro 800m). Le drainage de la nappe s'effectue principalement par oued el kebir et ses affluents, il est compensé par une alimentation provenant des bordures calcaires situées dans la partie sud et nord de la région. A cette alimentation s'ajoute la recharge qui se fait à partir des précipitations.

IV. 4. Détermination des paramètres hydrodynamiques de la nappe profonde :

Dans le but de déterminer la transmissivité et la perméabilité, et par manque de données d'essai de débit sur les puits nous avons utilisé les résultats des essais définitifs de pompage des forages (Fig. 41).

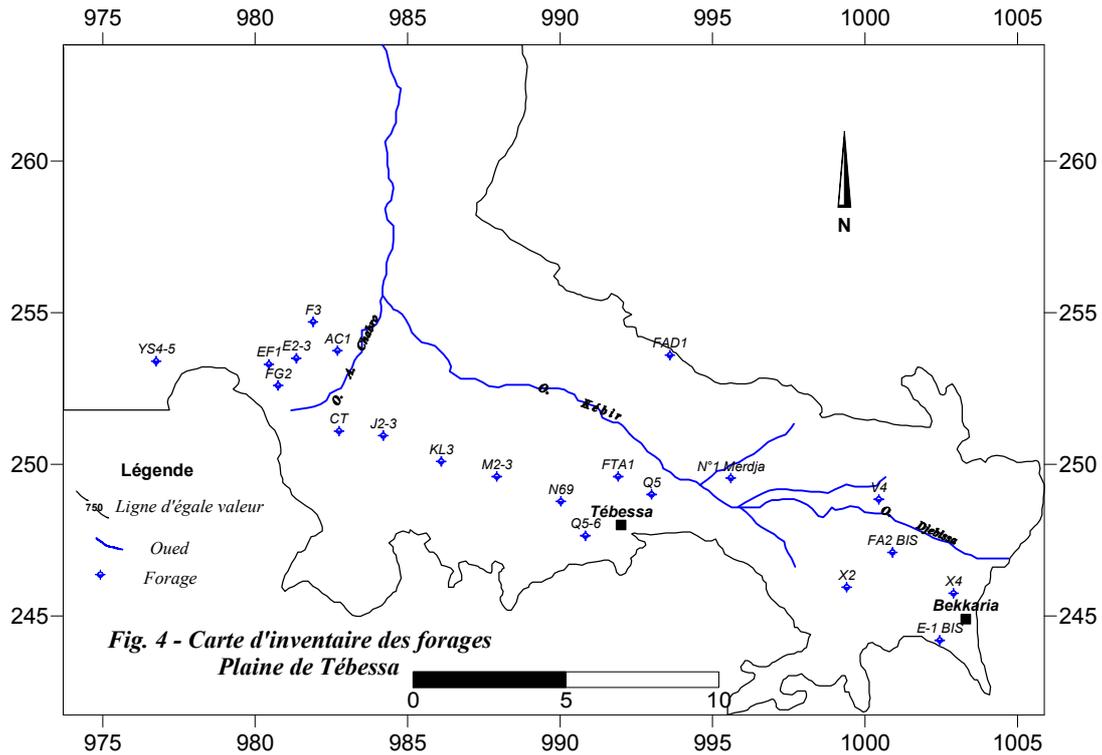


Fig. 41. Carte d'inventaire des forages
 Plaine de Tébessa

Leur interprétation graphique est basée sur l'expression de l'approximation logarithmique de **C.E Jacob (1950)**.

$$s = \frac{0.183 \cdot Q}{T} \log \frac{2.25 T \cdot t}{R \cdot S} \quad \text{Où :}$$

- s : rabattement en m.
- T : transmissivité en m²/s.
- Q : débit de pompage en m³/s.
- S : coefficient d'emmagasinement.
- t : temps écoulé depuis le début de pompage en (seconde).
- R : distance entre le piézomètre et le forage en m.

L'application de cette expression se fait en reportant, sur un papier Semi-logarithmique, les rabattements exprimés en mètre en ordonnée arithmétique et le temps de pompage exprimé en secondes en abscisses logarithmiques. La transmissivité est déterminée à partir de la pente de la droite obtenue $d=f(\log t)$, pour un cycle logarithmique, par la formule suivante :

$$T = \frac{0.183Q}{C} \quad \text{Où :}$$

T : Transmissivité en (m²/s).

Q : débit de pompage (m³/s).

C : pente de la droite.

Quant à la perméabilité, elle est déterminée en se basant sur la transmissivité et l'épaisseur de la couche mouillée de l'aquifère.

$$K = \frac{T}{e}$$

K : perméabilité (m/s).

T : transmissivité (m²/s). e : épaisseur de la couche mouillée aquifère (m).

Exemple

Détermination de K et de T du forage X4 (tableau 17). (Fig. 42)

Ce forage, ayant pour coordonnées $x = 1002.10$ km et $y = 246,850$ km il débite 15,12 l/s. se situe à Bekkaria. Les courbes de descente et de remontée sont parallèles et donnent une transmissivité moyenne de $8,3.10^{-4}$ m²/s. En tenant compte de l'épaisseur de l'aquifère et de la transmissivité, on déduit la valeur de la perméabilité $K = 0,75.10^{-5}$ m/s.

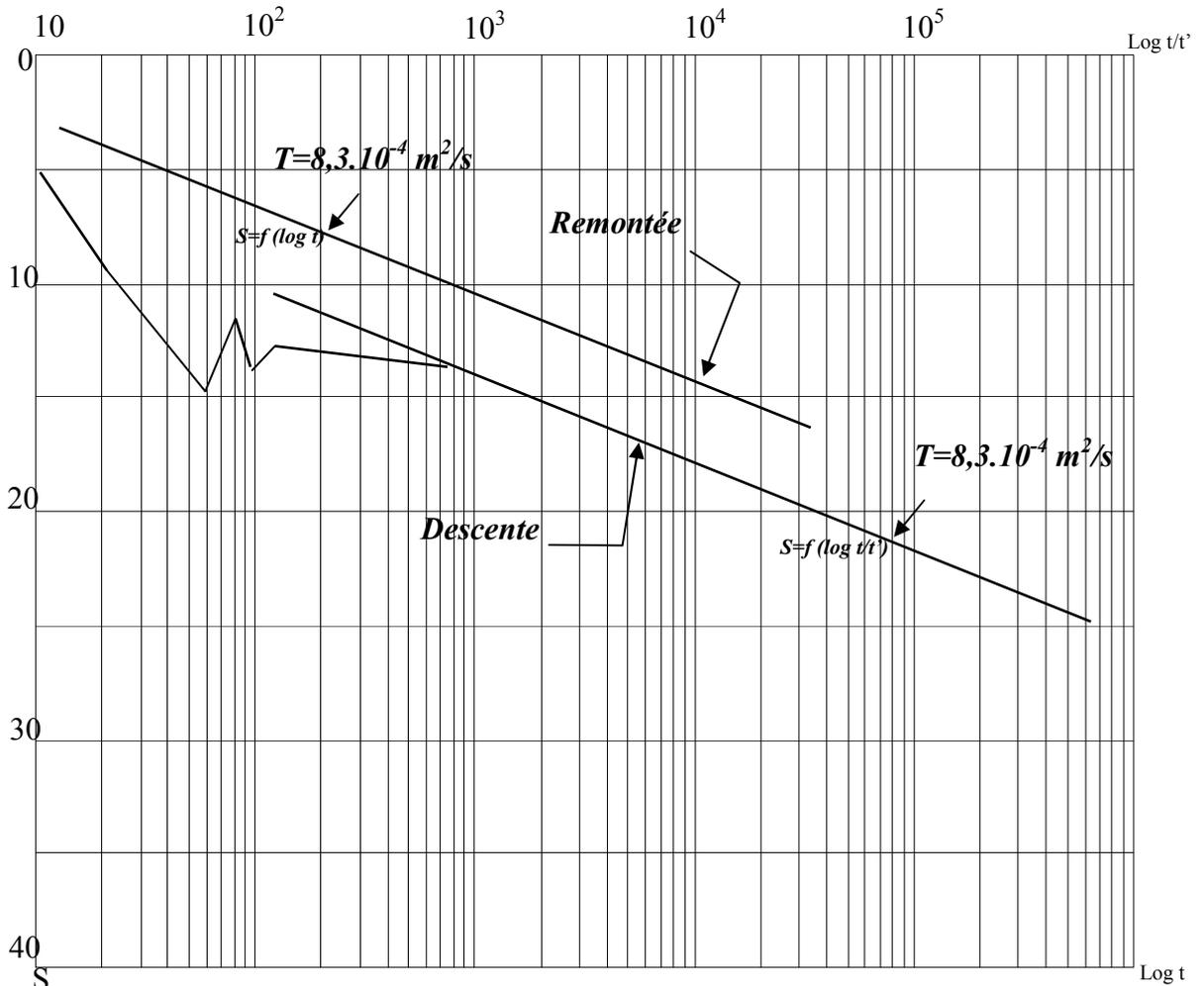


Fig. 42. Courbe de remontée et de descente du forage X4

Tableau. 17 : valeurs de quelques paramètres hydrodynamique des forages

Zone	forages	X (km)	Y(km)	T (m ² /s).10 ⁻³	K(m/s).10 ⁻⁵
Ain Chabro	EF1	980.450	253.300	4.25	3.03
	FG2	980.750	252.600	4.55	4.55
	J2-3	984.200	250.950	2.80	2.94
	AC1	982.700	253.750	1.15	0.76
	AC1 BIS	982.710	253.750	1.15	0.78
	F3	981.900	2543.700	0.89	1.11
	E2-3	981.350	253.500	2.96	3.74
	QR5	975.100	251.500	0.22	0.20
	YS4-5	976.750	253.400	0.84	0.88
	CT	982.750	251.100	0.25	
Tébessa	Q5	993.000	249.010	0.43	0.34
	M1	992.860	249.100	1.83	1.98
	M2 BIS	992.700	249.035	0.66	0.62
	Q5-6	990.830	247.650	1.30	0.92
	Q3-4	991.730	248.625	2.2	1.5
	N69	990.025	248.780	0.8	0.47
	M2-3	987.925	249.600	0.24	0.33
	KL3	986.100	250.100	0.52	0.4
	FAD1	993.600	253.600	0.71	0.12
	FTA1	991.900	249.600	0.91	0.95
	N° 1 Merdja	995.600	249.550	1.06	0.69
NH4	992.700	249.025	0.96	1.3	
Bekkaria	W2 BIS	999.825	246.925	1.83	1.59
	E-1 BIS	1002.450	244.200	2.36	3.20
	X2	999.400	245.950	0.92	0.68
	V4	1000.450	248.850	0.58	0.60
	X4	1002.900	245.750	0.83	0.75
	FA2 BIS	1000.900	247.100	0.60	0.64
	BM1	1001.200	244.050	0.30	0.43
	A89 BIS	1004.080	241.400	0.86	0.62

L'observation du précédent tableau selon la répartition géographique des ouvrages montre :

-La région de Ain Chabro présente les meilleures caractéristiques hydrodynamiques, avec une transmissivité variant entre 0.25 et 4.55 10⁻³ m²/s et une perméabilité oscillant entre 0.2 et 4.55 10⁻⁵ m/s.

-Le secteur de Bekkaria présente une transmissivité allant de 2.36 à 0.3 10⁻³ m²/s par contre la perméabilité va de 0.43 à 3.20 10⁻⁵ m/s,

-enfin la région de Tébessa se caractérise par les plus faibles valeurs avec une transmissivité oscillant entre 0.24 et 1.83 10⁻³ m²/s et une perméabilité allant de 0.12 à 1.98 10⁻⁵ m/s

IV. 3. Carte des conditions aux limites :

IV. 3. 1. Conditions aux limites et apports souterrains

L'interprétation des cartes piézométrique a montré un écoulement général de direction E-W , une partie de ces eaux convergent vers l'oued Kebir qui joue le rôle d'un axe de draine de la nappe superficielle. Par ailleurs les forages exécutés sur les bordures ont montrés la présence de formations calcaires qui joue un rôle important dans la recharge de la nappe donc alimentent la nappe. Les résultats obtenus par l'étude géophysique viennent corroborés les constatations suivantes : L'alimentation de la nappe se fait par la bordure nord et la bordure sud.

A l'Est la nappe n'est pas alimentée (trias), tandis qu'à l'ouest une alimentation partielle existe par l'intermédiaire des calcaires turoniens.

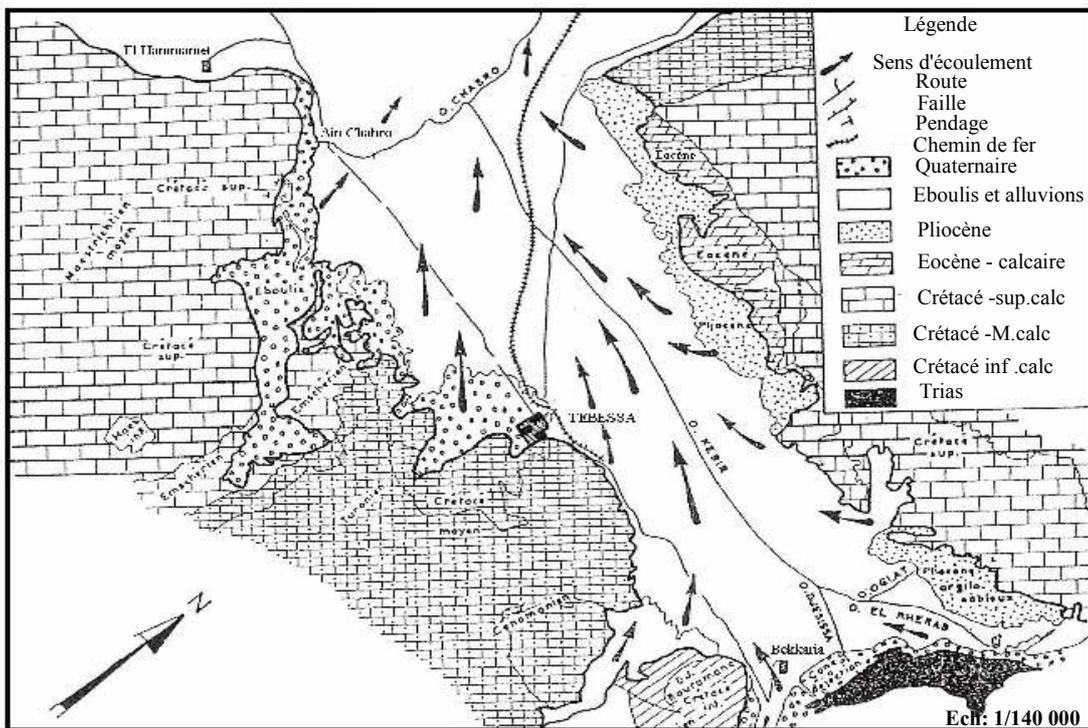


Fig. 43. Carte Géologique et des conditions aux limites.
Géologie d'après CGG 1970. In Diabri 1987

IV. 5. Conclusion

L'étude piézométrique montre que l'écoulement est dirigé de l'est vers l'ouest, elle a, également, mis en évidence des apports latéraux par les formations calcaires. Des échanges hydrauliques caractérisés par une relation mixte entre l'Oued Kebir et la nappe a été démontré. Par ailleurs les changements de farcies mis en évidence par l'étude géophysique provoquant la discontinuité des niveaux P1, P2 & P3, provoquent un débordement de la nappe dans le secteur de tébessa. Démontré également par Mallem T). Les données de forage disponible ont permit le classement des zones de Bekkaria, Tébessa et Ain Chabro selon leurs caractéristiques hydrodynamiques.

CHAPITRE V : QUALITE DES EAUX

La qualité des eaux reste un facteur déterminant pour l'utilisation pour toute ressource hydrique. Elle conditionne l'alimentation en eau de l'être humain, l'utilisation dans les secteurs industriel et agricole. Pour se fier à une qualité donnée le chercheur doit au préalable connaître les divers modes d'analyse utilisés et la précision de chaque méthode. Pour réaliser le présent travail nous avons effectués des analyses dans les laboratoires suivants : le laboratoire des sciences de la terre université Annaba, le laboratoire du centre d'étude et de recherche appliquées au développement Pherphos, HYDROSID,DRA, laboratoire de l'université de Lille et de Besançon en France.

Ce qui a nécessité l'utilisation des méthodes suivantes :

Eléments majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} et HCO_3^-), le Sr^{2+} , les éléments métalliques en traces (Fe (total), Mn^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+}).

. Trois méthodes d'analyses ont été utilisées (annexe) :

- dosage titrimétrique (HCO_3^-) ;
- dosages colorimétriques (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-) ;
- dosages par spectrométrie d'absorption atomique (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , et Sr^{2+} Fe (total), Mn^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+}).

V. 1. Introduction:

La réalisation de ce travail a été faite a partir des échantillons prélevés au niveau des puits domestiques et des oueds kebir et Djebissa. Notre travail va être scindé en deux parties, une première ayant attrait aux eaux des puits et l'Oued Kebir et a pour but la visualisation de la qualité des eaux et ses origines. La deuxième partie portera sur l'impact de la mine de fer abandonnée (KHANGUET).

V. 1. 1. Caractéristiques des eaux des puits :

V. 1. 2. Echantillonnage

Les échantillons analysés sont prélevés sur une trentaine de puits domestiques (fig. 44) dont la profondeur moyenne est inférieure à 50 m et ont portés sur les caractéristiques chimiques de ces derniers.

Caractéristiques chimiques :

Les éléments suivants ont été dosés : Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-}

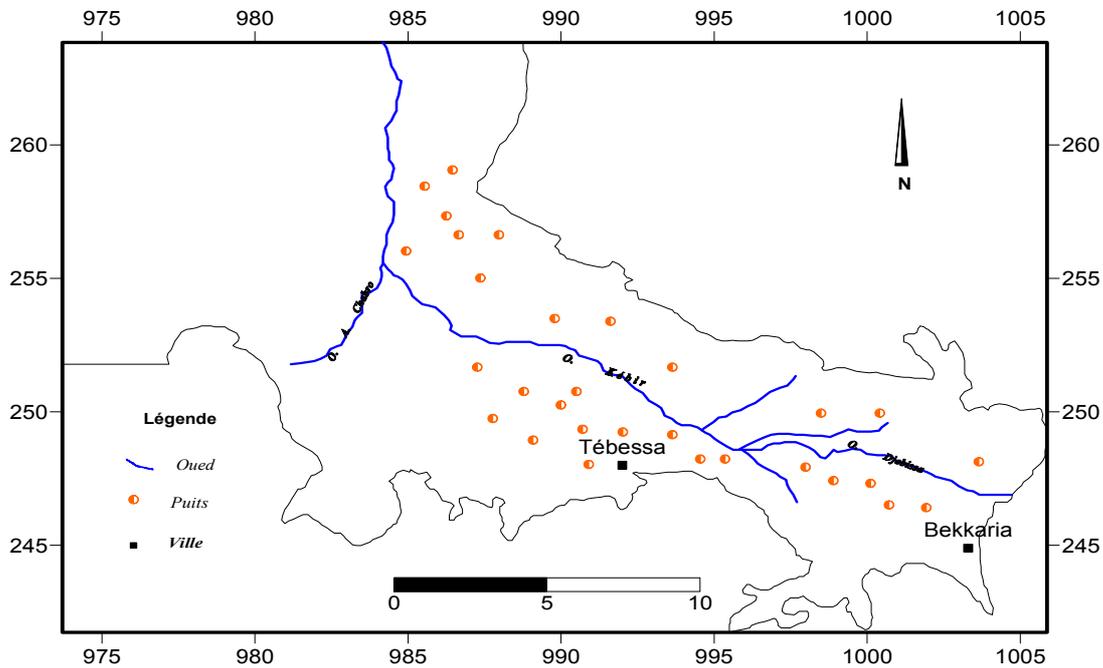


Fig. 44. Carte de la répartition des échantillons dans la zone d'étude

V. 2. Caractérisation hydrochimique des eaux souterraines

V. 2. 1. Statistiques monodimensionnelles

Les paramètres statistiques des deux périodes basses et hautes eaux pour l'année 2006 (Min, Max, Moyenne, écart type) sont calculés et résumés dans le tableau suivant:

Variables	Moyenne mg/l		Minimum mg/l		Maximum mg/l		Ecart type	
	Hautes eaux	Basses eaux	Hautes eaux	Basses eaux	Hautes eaux	Basses eaux	Hautes eaux	Basses eaux
Ca⁺⁺ mg/l	194.06	179.03	123.6	20	393.2	300.2	56.17	60.96
Mg⁺⁺ mg/l	81.05	71.66	24	23.9	640.64	160	108.49	31.94
Na⁺ mg/l	109.33	125.99	39.79	36.66	389.84	390.44	67.53	74.43
K⁺ mg/l	13.53	17.82	4.68	5.3	26.33	34.56	6.29	6.13
Cl⁻ mg/l	397.38	386.78	140.45	99.40	1668.0	1960	283.45	336.63
SO₄ mg/l	287.28	332.56	130.87	117.3	1250	1305	209.87	215.11
HCO₃ mg/l	368.01	484.19	100.85	201.36	564.9	601.8	121.81	211.7
CE μS/cm	1752.1	2295.7	711	803	6610	8490	1132.4	1684.9

Tableau 18. Paramètres statistiques

Les teneurs en calcium, magnésium et en potassium, en moyenne, sont inférieures aux normes internationales pour les deux périodes hautes et basses eaux.

Par contre les chlorures et les sulfates ont des teneurs largement supérieures aux normes. Quant à la conductivité électrique elle dépasse largement la norme internationale tolérable pendant les hautes et les basses eaux.

V. 2. 2. Analyse multidimensionnelle

V. 2. 2. 1. L'analyse en composantes principales (ACP)

L'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode statistique essentiellement descriptive ; son objectif est de présenter, sous une forme graphique, le maximum de l'information contenue dans un tableau de données (Diday & al. 1982 ; Philipeau, 1992). Ce tableau doit être constitué, en lignes, par des individus sur lesquels sont mesurées des variables quantitatives (Gaudin, 1982 ; Diday & al.1982 ; Philipeau, 1992 ; Dervin, 1992).

Pour des raisons évidentes de faciliter la visualisation des individus, l'ACP réduit les dimensions des espaces. Les espaces retenus seront donc à une dimension (c'est-à-dire des droites) ou, et c'est le cas le plus fréquent, à deux dimensions (c'est à dire des plans) (Philipeau, 1992).

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

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

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

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

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

V. 2. 2. 2. Etude des variables:

V. 2. 2. 3. Période des hautes eaux:

a - Corrélation linéaire :

Avant d'entamer l'analyse des résultats par utilisation de l'ACP, il est intéressant d'avoir une idée sur les liaisons existantes entre les variables prises deux à deux (Tab. 19), il en ressort ce qui suit :

- Les fortes corrélations entre CE, Na, Cl et SO₄ ainsi que le rapport Sr/Ca prises deux à deux.

	Ca ⁺⁺ mg/l	Mg ⁺⁺ mg/l	Na ⁺ mg/ l	K ⁺ mg/ l	Cl ⁻ mg/ l	SO ₄ - mg/ l	HCO 3 mg/l	Sr/Ca ‰	CE µS/cm
Ca ⁺⁺ mg/l	1								
Mg ⁺⁺ mg/l	0,63	1							
Na ⁺ mg/l	0,24	0,05	1						
K ⁺ mg/l	0,04	- 0,17	0,22	1					

Cl ⁻ mg/l	0,39	0,03	0,81	0,42	1				
SO ₄ mg/l	0,63	0,45	0,24	0,21	0,75	1			
HCO ₃ mg/l	0,003	0,02	0,25	0,13	- 0,23	- 0,42	1		
Sr/Ca ‰	-0,04	- 0,19	0,24	- 0,22	0,68	0,78	0,005	1	
CE µS/cm	0,14	- 0,04	0,53	0,29	0,89	0,83	- 0,14	0,76	1

Tableau 19 : Coefficient de corrélation entre les variables initiales

b – Valeurs propres :

Une valeur propre représente la variation des individus sur l'axe correspondant. Dans un but de faciliter leur interprétation, ces valeurs sont exprimées en pourcentage des valeurs propres totales.

Numéro	Valeur propre	Pourcentage	Pourcentage cumulé
1	3,0793	46,21	46.21
2	1,6921	19,80	66.01
3	1,2862	11,29	77.3
4	1,0169	8,30	85.6
5	0,7652	6,50	92.1
6	0,6589	3,32	95.42
7	0,3173	2,54	97.96
8	0,1471	1,63	99,59
9	0,0371	0,41	100,00

Tableau 20: Valeurs propres et pourcentages des axes principaux

Le premier axe principal a une valeur propre égale à 3,07 il explique 46.21 % de la variation totale, la seconde composante égale à 1,69 explique 19.80 % de la variance totale. Les pourcentages de variation sont assez élevés pour les deux premiers axes avec un cumul de 66.01 %. Nous allons donc nous limiter à ces deux axes pour nos interprétations.

c- étude des variables

La contribution de chaque variable dans la formation d'une composante principale est donnée par le coefficient de corrélation entre la variable et l'axe considéré ; autant que ce coefficient est important, autant la variable contribue à la formation de l'axe.

Le tableau 21 montre que les corrélations des variables avec l'axe 1 sont négatives, Ces variables seront les mieux représentées sur le plan.

Les bicarbonates ont une représentation médiocre sur l'axe 1, mais assez bien corrélés sur l'axe 2.

Libellé de la variable	Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4	Axe 5

Ca^{++} mg/l	-0,17	0,67	-0,27	0,25	-0,33
Mg^{++} mg/l	0,02	-0,01	0,80	-0,36	0,26
Na^+ mg/l	-0,63	-0,41	0,35	0,25	0,09
K^+ mg/l	-0,33	0,12	-0,58	-0,69	0,06
Cl^- mg/l	-0,93	-0,03	0,02	0,12	0,11
SO_4 mg/l	-0,84	-0,41	-0,07	0,07	0,08
HCO_3^- mg/l	0,26	0,75	-0,16	-0,13	0,48
Sr/Ca ‰	0,53	-0,32	-0,31	0,49	0,46
CE $\mu\text{S}/\text{cm}$	-0,96	0,02	-0,03	0,09	0,19

Tableau 21 : Corrélations des variables aux axes principaux

L'étude du cercle de corrélation permet de ressortir les variables corrélées entre elles et par conséquent les dissemblances et les ressemblances entre ces dernières.

La figure 1 montre que dans le plan principal formé de l'axe 1 et l'axe 2, les éléments Cl, Na, CE, Sr/Ca, et SO_4 sont bien corrélés entre eux et, donc, bien représentés sur le graphe.

Les bicarbonates forment, à eux seuls, un groupe qui s'oppose aux autres éléments.

Facteur2- 19.80%

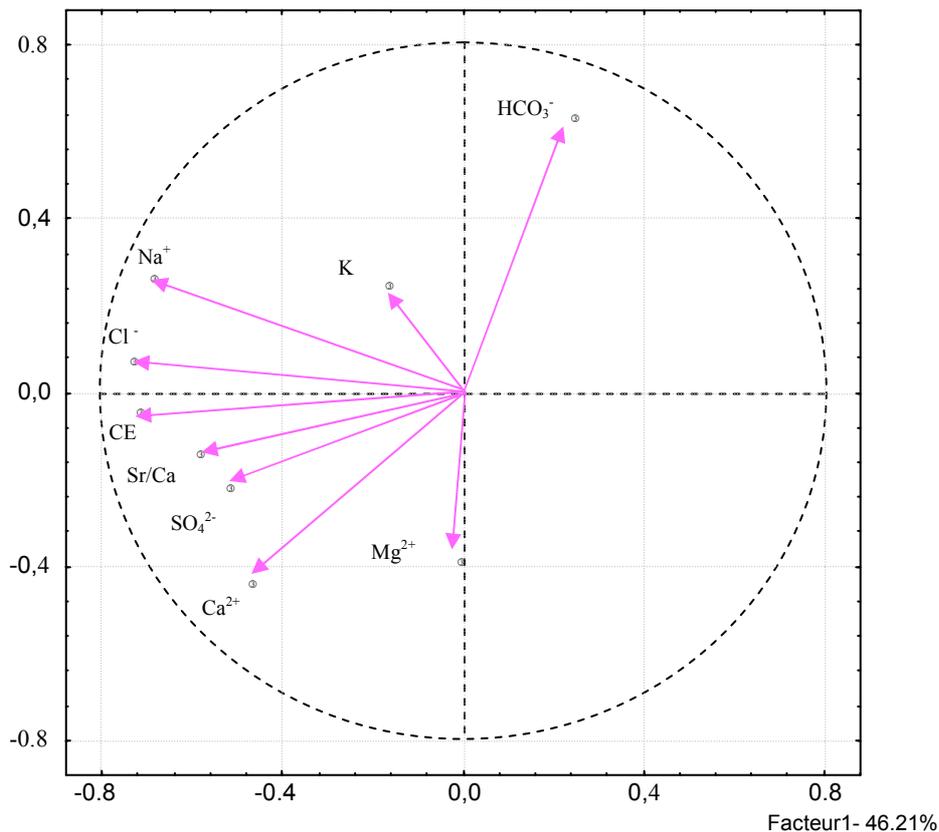


Fig. 45. Cercle de corrélation des variables dans le plan formé par l'axe 1 et l'axe 2.

La projection des individus (échantillons) sur le plan est en rapport avec la distance de rapprochement entre ceux-ci. Par cette relation de distance on essaye de repérer d'éventuels groupements qui forment des unités homogènes et cohérentes indiquant un même comportement.

Il apparaît alors qu'il y a une discrimination entre les individus essentiellement selon l'axe 1, avec toutefois une part non négligeable de l'axe 2. Cette évolution dans la représentation des individus est liée aux différents groupes de variables représentées dans le cercle de corrélation. On a tout de même pu faire ressortir trois groupes distincts (fig. 45).

V. 2. 2. 3. Etude des individus

D'après la disposition des individus on peut voir une distribution en trois différents groupes.

Le premier groupe marqué par une dominance du Ca, Mg.

Un second groupe avec une dominance des éléments Na, Cl, SO₄, Na, où la salinité est considérable, cette minéralisation observée est engendrée par une contamination liée à la dissolution des minéraux des formations géologiques particulièrement le trias gypsifère.

Le troisième groupe avec dominance des bicarbonates résultants de la précipitation des dolomites.

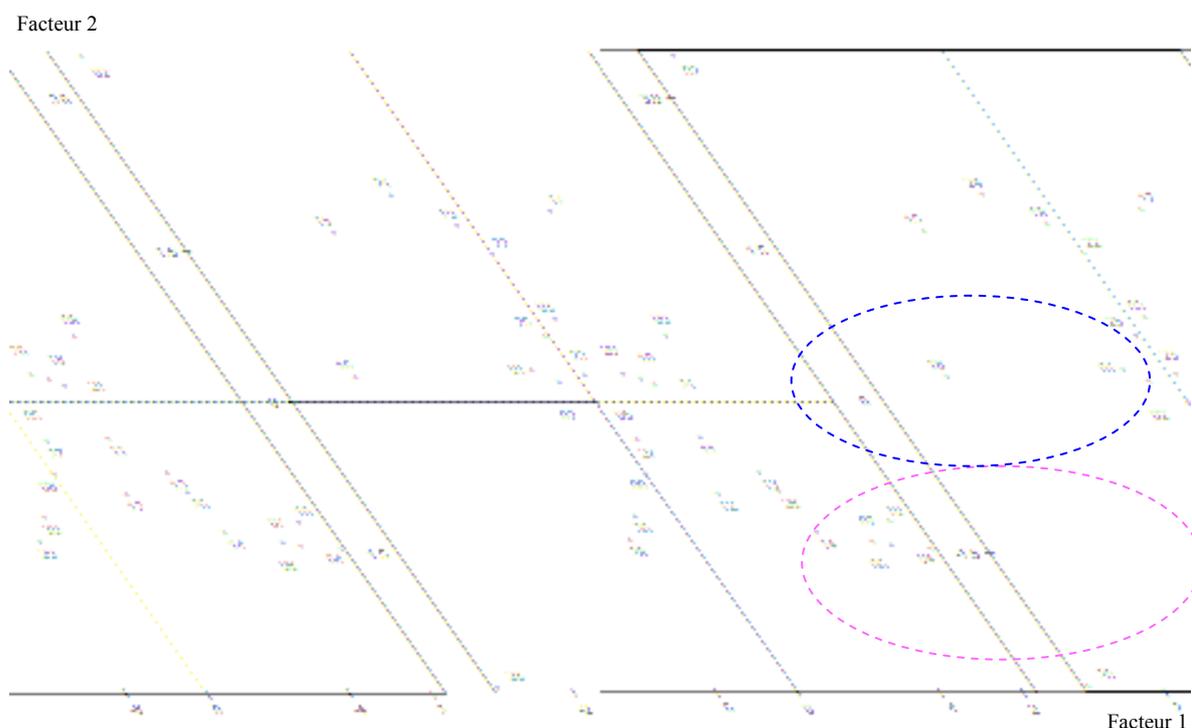


Fig. 46. Projection des individus sur le plan formé par les deux premiers axes hauts eaux

V. 2. 2. 4. Période des basses eaux

a - Corrélation linéaire :

Le tableau de corrélation entre les variables prises deux à deux révèle ce qui suit:

En plus de la corrélation entre les éléments régissant la salinité pendant la période des hautes eaux on marque une corrélation entre le Ca et le Mg ainsi qu'une corrélation négative entre ces deux éléments et le K.

	Ca ⁺⁺ mg/l	Mg ⁺⁺ mg/l	Na ⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	Cl ⁻ mg/l	SO ₄ ⁻ mg/l	HCO ₃ mg/l	Sr/Ca ‰	CE μS/cm
Ca ⁺⁺ mg/l	1,00								
Mg ⁺⁺ mg/l	0,85	1,00							
Na ⁺ mg/l	0,17	0,26	1,00						
K ⁺ mg/l	0,26	-0,29	0,16	1,00					
Cl ⁻ mg/l	0,28	0,13	0,88	0,36	1,00				
SO ₄ mg/l	0,61	0,36	0,13	0,14	0,80	1,00			
HCO ₃ mg/l	0,02	0,05	0,33	0,01	0,17	-0,03	1,00		
Sr/Ca ‰	-0,12	0,04	0,46	0,002	0,69	0,73	0,006	1,00	
CE μS/cm	0,22	0,02	0,66	0,05	0,87	0,79	-0,02	0,74	1,00

Tableau 22 : Coefficient de corrélation entre les variables initiales

b – Valeurs propres :

La valeur propre pour le premier axe principal est égale à 3,59 il explique 48.95 % de la variation totale, la seconde composante égale à 1,66 explique 20.54 % de la variance totale. Nous allons donc nous limiter comme pour la période humide à ces deux axes pour nos interprétations.

Numéro	Valeur propre	Pourcentage	Pourcentage cumulé
1	3,5957	48,95	49,95
2	1,6688	20,54	69,49
3	1,2026	10,36	79,85
4	1,0760	7,96	87,81
5	0,6445	5,16	92,97
6	0,4878	3,32	96,29
7	0,1761	1,96	98,25
8	0,0904	1,10	99,35
9	0,0581	0,65	100,00

Tableau 23 : Valeurs propres et pourcentages des axes principaux

c- étude des variables

Le tableau 24 montre que les variables Cl, SO₄, HCO₃, corrént bien avec l'axe 1, Ces variables seront les mieux représentées sur le plan, les corrélations des variables Na, CE, Sr/Ca, sont négatives.

Par contre les variables Ca, Mg, Na, présentent une meilleure corrélation avec l'axe 2.

Libellé de la variable	Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4	Axe 5
Ca ⁺⁺ mg/l	-0,20	-0,51	-0,56	0,27	0,56
Mg ⁺⁺ mg/l	-0,36	-0,75	0,12	0,01	-0,16
Na ⁺ mg/l	-0,61	-0,58	0,57	0,07	-0,06
K ⁺ mg/l	0,03	-0,44	-0,66	-0,39	-0,41
Cl ⁻ mg/l	0,95	0,12	-0,08	-0,03	-0,03
SO ₄ mg/l	0,87	0,35	-0,03	-0,08	0,07
HCO ₃ mg/l	0,55	0,38	-0,23	-0,13	-0,08
Sr/Ca ‰	-0,72	-0,12	0,20	-0,21	0,35
CE µS/cm	-0,94	-0,16	0,12	0,06	0,02

Tableau 24 : Corrélations des variables aux axes principaux

La figure 47 montre pour cette période de basses eaux que les deux variables Ca et Mg Corréle bien entre elles, les éléments Régissant la salinité sont corrélés entre eux et, donc, bien représentés sur le graphe. Les bicarbonates forment toujours, à eux seuls, un groupe.

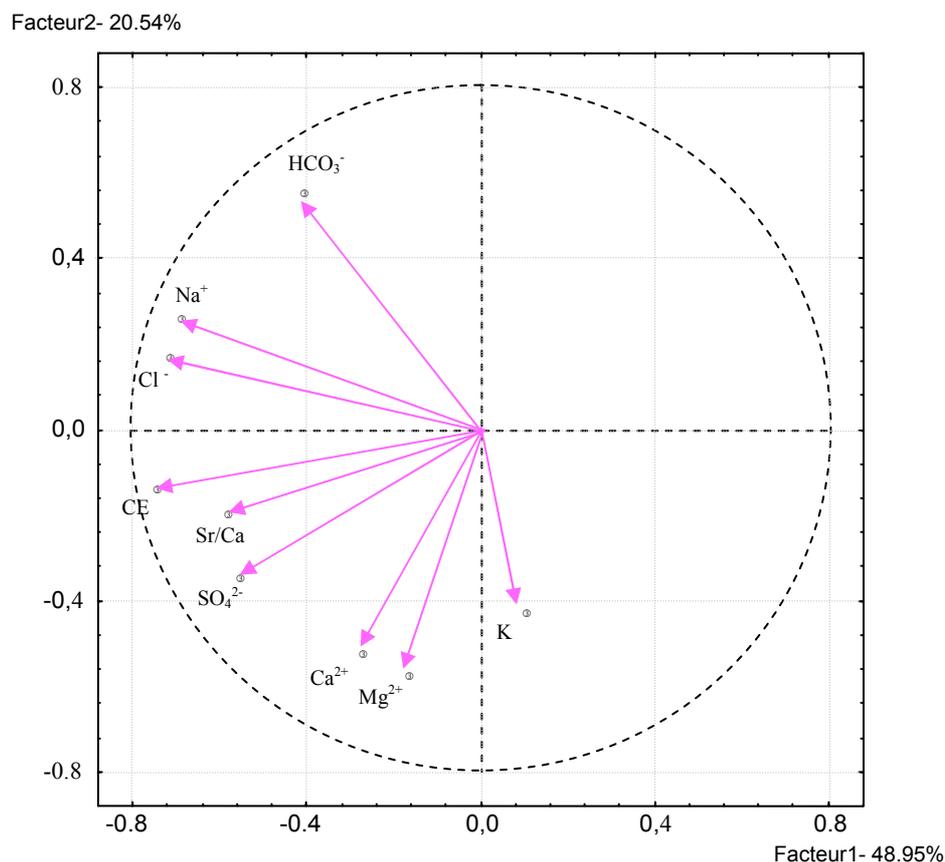


Fig. 47. Cercle de corrélation des variables dans le plan formé par l'axe 1 et l'axe 2.

V. 2. 2. 5. Etude des individus

Si on se maintient au plan principal, on peut voir une distribution en trois différents groupe comme pour la période humide.

La projection des individus, montre l'existence de trois ensembles qui présentent des positions différentes sur le plan. La partie amont est caractérisée par une forte minéralisation qui traduit une Salinité due au lessivage des formations triasique de Djebel Djebissa, et au phénomène de l'évapotranspiration pour la période sèche. Tandis que la partie intermédiaire est représentée par une Dominance des éléments alcalineux terreux. Enfin la partie aval qui montre des eaux bicarbonatées ce qui peut être expliqué par une alimentation par les bordures.

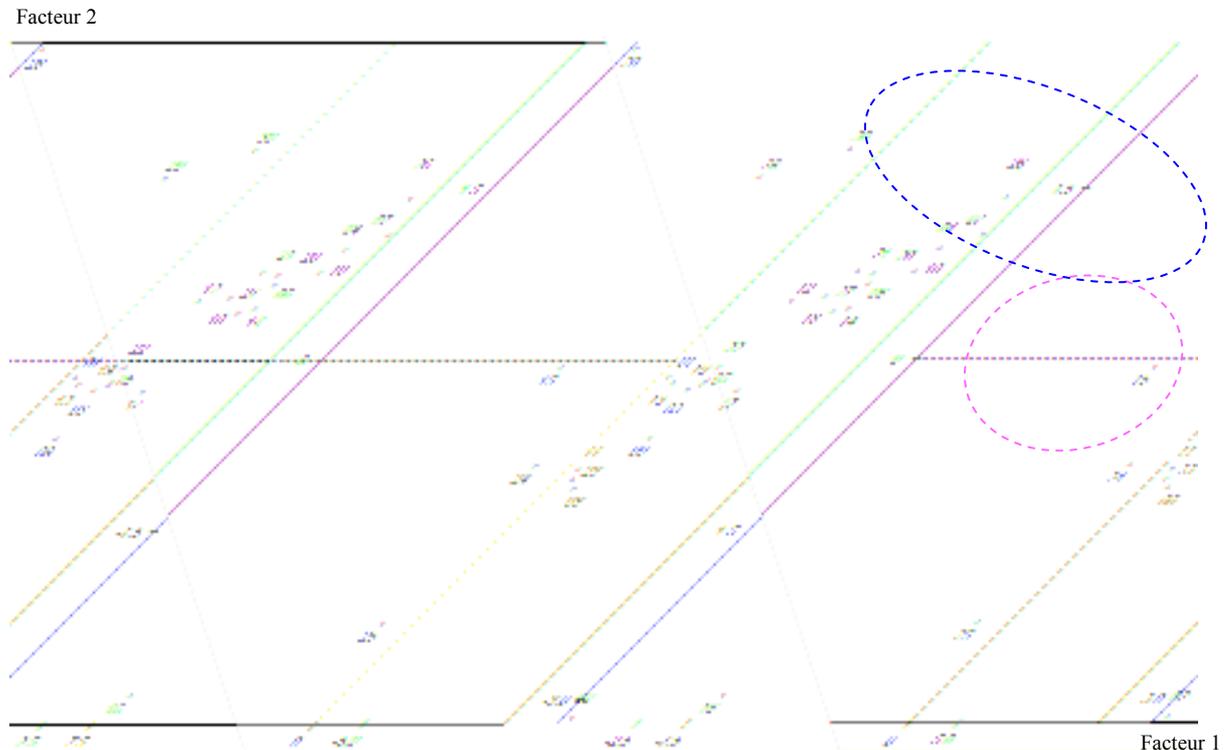


Fig. 48. Projection des individus sur le plan formé par les deux premiers axes basses eaux

V. 2. 3. Conclusion:

Le regroupement de l'ensemble des résultats statistiques (matrice de corrélation linéaire, axes principaux, plan de projection des variables) exprime les mêmes résultats qui sont quelques fois complémentaires

Il est donc clairement ressorti que les variables qui interviennent le plus dans la dégradation de la qualité des eaux de la nappe alluviale de Tébessa sont tous de nature

géologique. L'analyse statistique a donné de forte corrélation entre ces variables prises deux à deux.

L'analyse en composantes principales montre que :

Les chlorures, les sulfates, le sodium présentent des concentrations importantes, ce qui traduit la salinité des puits situés à l'Est et a un degré moindre au centre de la plaine. Ceci peut être expliqué par le lessivage des sels pendant la période des hautes eaux et à l'évaporation pour les basses eaux.

Les bicarbonates présentent des teneurs importantes montrant ainsi l'effet des apports qui se font par les bordures calcaires.

V. 3. L'Outil Géostatistique

La géostatistique est une méthode d'interpolation relativement récente pour étudier la variabilité spatiale. Elle est basée sur la théorie des variables régionalisées (Matheron, 1965).

L'intérêt de la géostatistique est de permettre, à la fois, une estimation des propriétés des variables dans l'espace et une mesure de la qualité de cette estimation par krigeage (Mc Bratney & al., 1982 ; Webster & Burgess, 1983 ; Oliver, 1984 ; Douaoui, 1993 ; Chappell, 1998 ; Walter et al., 2001).

Dans ce travail, il s'agit d'appliquer la géostatistique multiparamétrique qui consiste à représenter spatialement les différents éléments chimiques influençant la qualité des eaux souterraines de la zone d'étude (Goulard et al. 1987 ; Douaoui, 1993).

V. 3. 1. Analyse Géostatistique

V. 3. 1. 1. Calcul du variogramme

Le variogramme, qui est l'outil principal de l'analyse structurale de la variable régionalisée, est estimé par la relation suivante:

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

n : Le nombre de couples distant de h

$Z(x_i) - Z(x_i + h)$: Valeur de la VR en (x_i) et $(x_i + h)$

Voltz (1986) admet que le variogramme n'est étudié que sur des distances inférieures à la moitié de la plus grande longueur de la surface d'échantillonnage de la VR, au delà de ce seuil, l'estimation de $\gamma(h)$, par cette formule diverge fortement par rapport au variogramme théorique.

Le calcul se fait point par point de la façon suivante :

- On choisit un pas de calcul pour former un certain nombre de classes.
- On fait la répartition des couples $((x_i), (x_i + h))$ dans les classes formées en fonction de la distance qui sépare les couples
- En fin, on calcule le variogramme pour chaque classe par la formule $\gamma(h)$

De plus, il est bon d'indiquer le nombre N de couple ayant servi à l'estimation des points expérimentaux :

$$N = \frac{n(n-1)}{2}$$

Avec N : nombre de points expérimentaux

V. 3. 1. 2. Le krigeage

Le krigeage est la seconde étape de l'analyse géostatistique. Dans notre travail nous avons utilisé le krigeage ordinaire pour l'estimation de la VR.

a / Krigeage ordinaire

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

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

n : est le nombre de points X_i

λ_i : le poids affecté à chaque point

Les paramètres de la structure spatiale de la variable krigée sont déterminés à partir de l'ajustement du variogramme à modèle théorique (Gaussien, Sphérique, exponentiel, ...etc.)

V. 4. Estimation des classes de la CE

V. 4. 1. Estimation de la CE par krigeage ordinaire

V. 4. 1. 1. Variographie de la CE

A- Période des hautes eaux:

Les valeurs de la conductivité électrique se sont ajustées à un variogramme expérimental à modèle Sphérique avec un effet de pépité de 143000, un palier de 1250000 et une portée de 3.228 m. (Fig. 49).

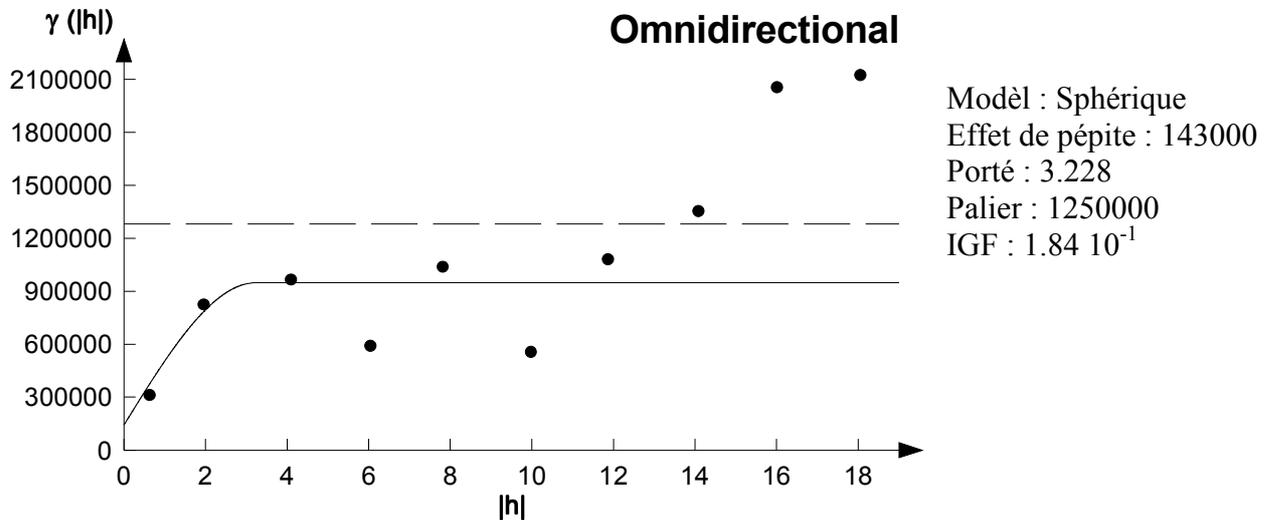
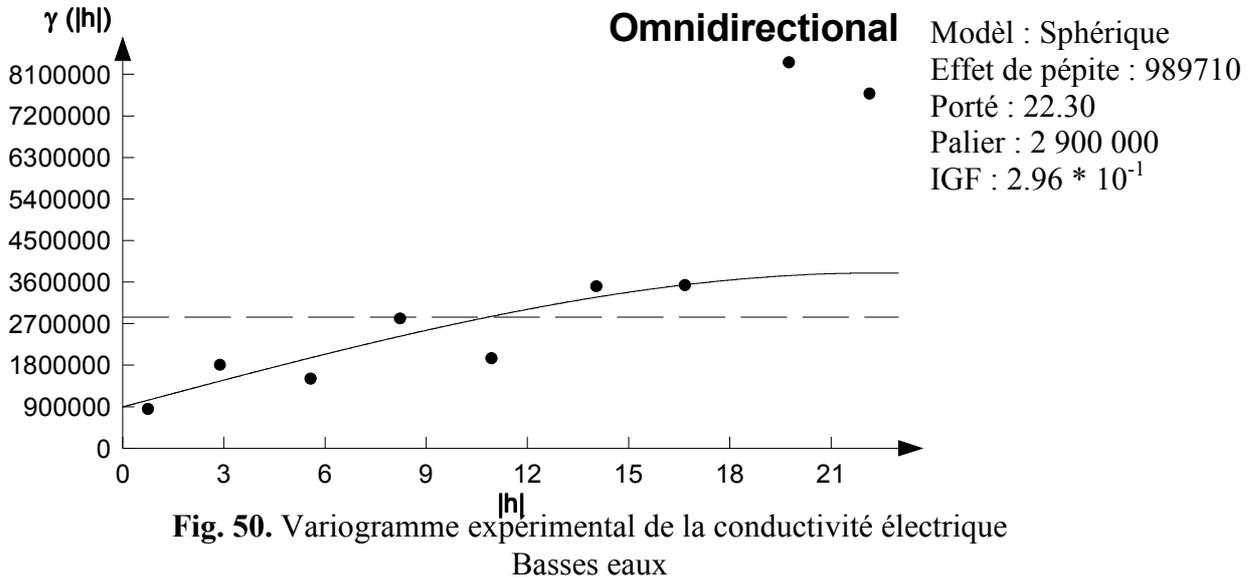


Fig. 49. Variogramme expérimental de la conductivité électrique Hautes eaux

B- Période des basses eaux:

Le variogramme expérimental pour cette période est ajusté à un modèle Sphérique avec un effet de pépite de 989710, un palier de 2900000 et une portée de 22.30 m. (Fig. 50).



V. 4. 1. 2. Cartographie de la CE

La carte d'écart type d'estimation de la CE qui n'est autre que l'erreur standard en statistique montre les plages qui sont plus ou moins estimées.

C'est ainsi qu'on peut voir les plages dont l'erreur de krigeage (interpolation) est la plus faible sont représentée par les couleurs claires et celles qui dont l'erreur est élevée sont représentées par les couleurs sombre.

L'écart type d'estimation est représenté par la carte qui lui correspond. Pour la période des hautes eaux (figure 51), cette carte ne marque pas une grande différence sur l'ensemble de la zone d'étude. Il apparaît clairement que les deux classes de l'écart type estimés, inférieur à 900 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et celle comprise entre 900 et 1100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sont localisées sur toute la plaine. Les deux autres classes comprise entre 1100 et 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et celle supérieure à 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, de mauvaise estimation sont localisées : au nord de la zone d'étude

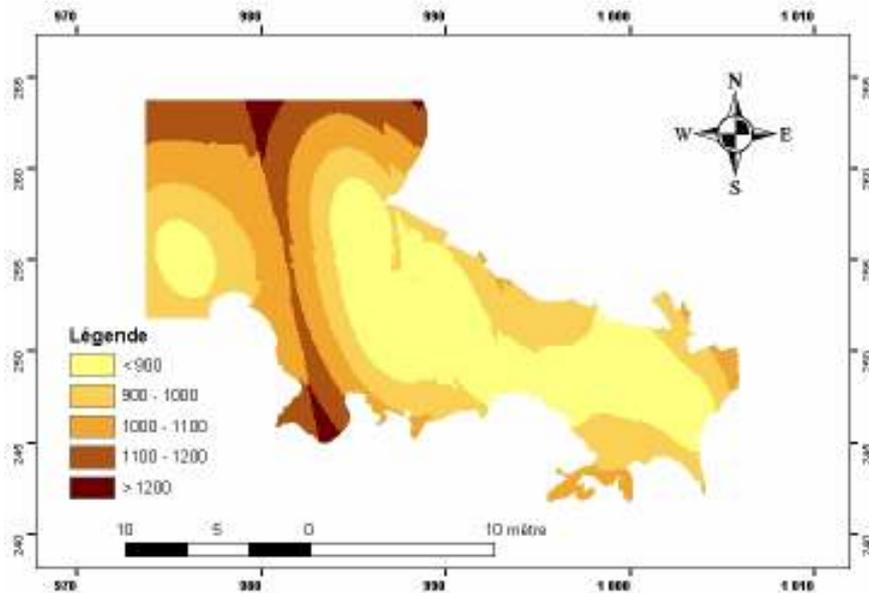


Fig. 51. Carte des écarts types d'estimations de la Conductivité électrique Hautes eaux

La carte des écarts types d'estimation de la CE pour la période des basses eaux (fig. 52) montre une nette différence sur l'ensemble de la zone d'étude où on remarque que les deux classes de l'écart type estimé inférieur à 900 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et celle comprises entre 900 et 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et qui sont de bonne estimation sont localisées à l'Est (secteur de Djebissa) et au centre de la plaine. La classe supérieure à 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ avec une mauvaise estimation se localise sur le reste de la zone d'étude et surtout sur les bordures.

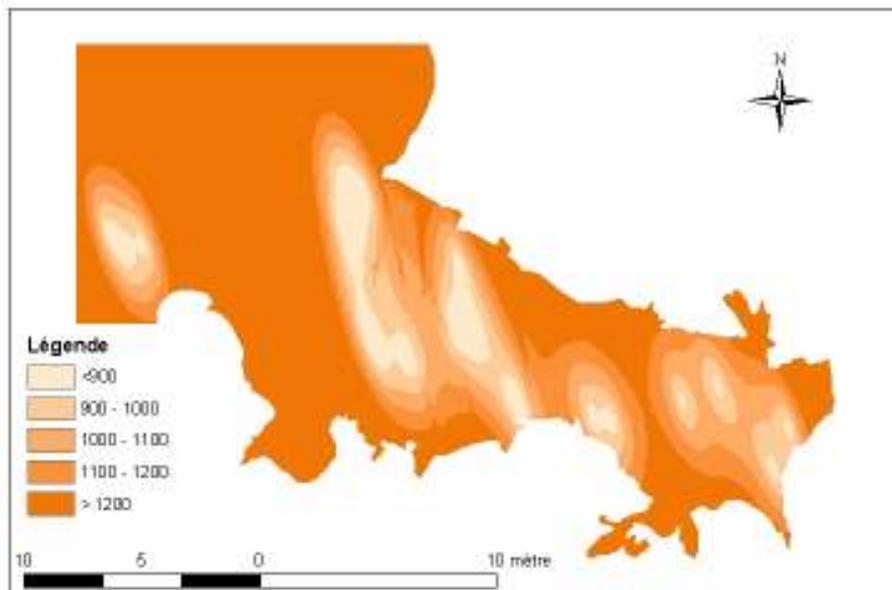


Fig. 52. Carte des écarts types d'estimations de la Conductivité électrique Basses eaux

Pour la période des hautes eaux la carte de la conductivité électrique obtenue par krigeage ordinaire (fig. 53) montre clairement que la classe des eaux de forte salinité ($CE > 3000 \mu\text{S}/\text{cm}$) se localise à l'Est de la zone d'étude (secteur de Djebissa). Due probablement au lessivage des formations triasiques.

Les classes comprises entre (1500 à 2000 et 2000 à 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) marquent le centre de la plaine. Les eaux souterraines avec une ($CE < 1500$) dans la région de Ain Chabro et au nord de la zone d'étude.

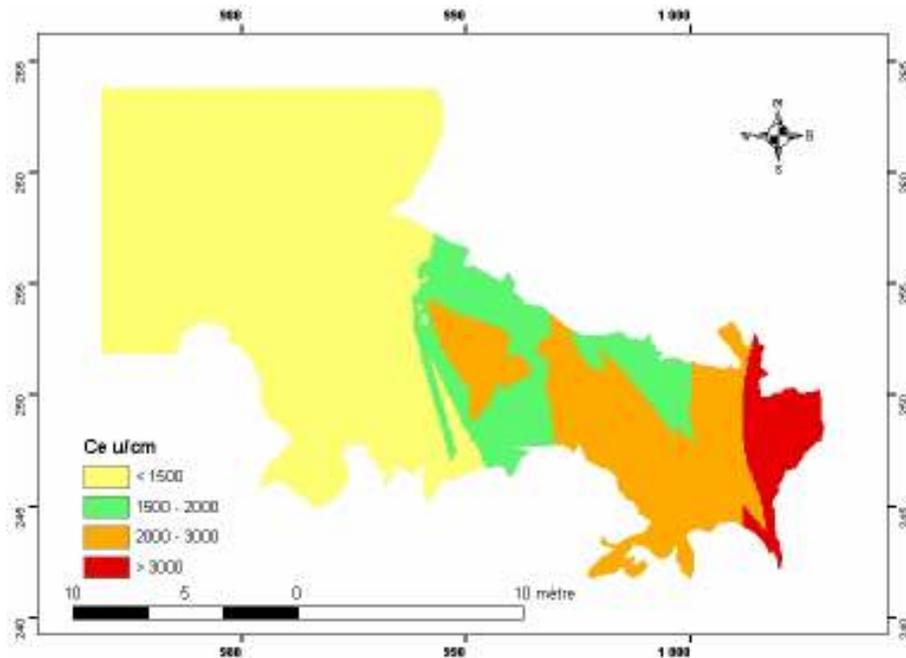


Fig. 53. Carte d'estimation de la Conductivité électrique par krigeage ordinaire
Hautes eaux

On remarque bien que pour la période des basses eaux, la classe de CE comprise entre 1000 et 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ marque la presque totalité de la zone d'étude. Pour la classe des eaux de forte salinité ($CE > 5000 \mu\text{S}/\text{cm}$) se localise à l'Est de la zone d'étude (secteur de Djebissa) et un peu au centre de la plaine. Les classes comprises entre (1500 à 2000 et 2000 à 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) marquent le centre de la plaine.(Fig. 54)

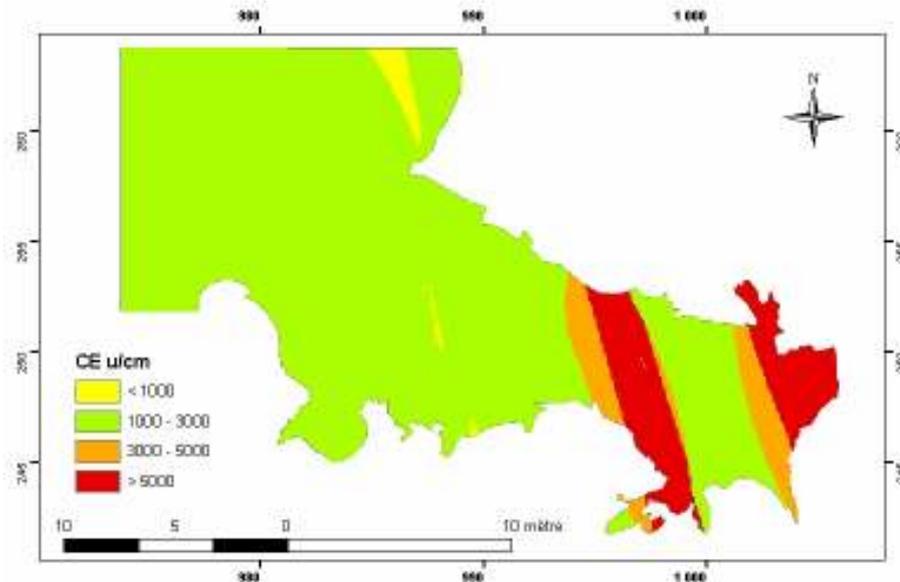


Fig. 54. Carte d'estimation de la Conductivité électrique par krigeage ordinaire
Basses eaux

V. 4. 1. 3. Estimation spatiale des fonctions indicatrices

Les fourchettes de probabilité retenues pour la présentation des cartes des fonctions indicatrices sont de 0 – 20 % (risque faible), 20 – 40 % (risque faible à moyen), 40 – 60 % (risque assez élevé), 60 – 80 % (risque élevé), 80 – 100 % (risque très élevé).

Nous avons construit les variogrammes des fonctions indicatrices obtenues par le seuil choisi, à savoir : $CE > 1000 \mu\text{S}/\text{cm}$. Le comportement de ces variogrammes des deux périodes hautes et basses eaux est montré sur le tableau suivant:

Périodes	Modele	Effet de pépité	Palier	Portée	IGF
Hautes eaux	Sphérique	0.074	0.125	2.52	$1.18 * 10^{-1}$
Basses eaux	Sphérique	0.032	0.094	2.34	$1.74 * 10^{-1}$

Tableau 25. Paramètres d'ajustement des variogrammes expérimentaux de la CE

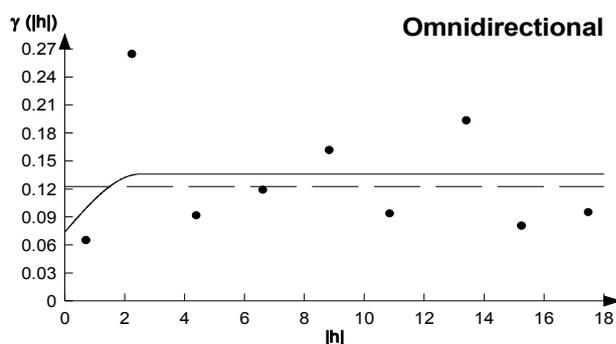


Fig. 55. Variogramme de la fonction indicatrice au seuil supérieur à 1000 de la CE des hautes eaux

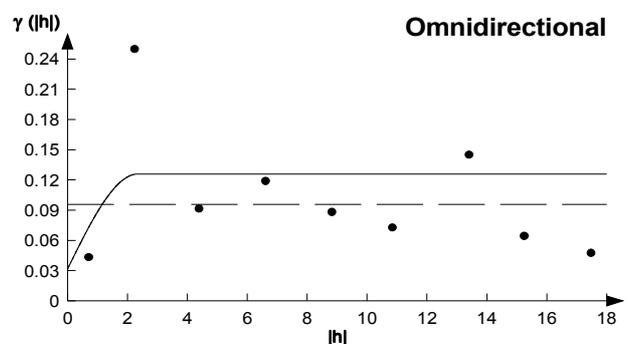


Fig. 56. Variogramme de la fonction indicatrice au seuil supérieur à 1000 de la CE des basses eaux

Les deux variogrammes moyens des fonctions indicatrices correspondants au seuil $CE > 1000 \mu\text{S}/\text{cm}$ (Fig. 55, 56), présentent une bonne structure spatiale. Le risque de dépasser ce seuil critique est élevé presque sur la totalité de la zone d'étude. Ces fortes teneurs en sels peuvent s'expliquer par l'apport par le lessivage des formations triasiques de Djebel Djebissa en période des hautes eaux et par le phénomène d'évaporation en période des basses eaux où les concentrations en sels augmentent.

Ce risque est moins (< 0.4) dans : dans une partie au centre de la plaine. L'estimation spatiale des fonctions indicatrices au seuil choisi de la conductivité électrique (CE) montre la probabilité de dépasser ce seuil pour chaque classe. Si on admet que le dépassement d'une probabilité de 40 % est un seuil significatif, il apparaît alors que la majeure partie des eaux souterraines de la zone d'étude dépasse le seuil de $1000 \mu\text{S}/\text{cm}$. Pour les deux périodes hautes et basses eaux (Fig. 57, 58). Il est à signaler aussi que la classe de probabilité faible à moyenne prend de l'espace pour ce seuil (Fig. 57).

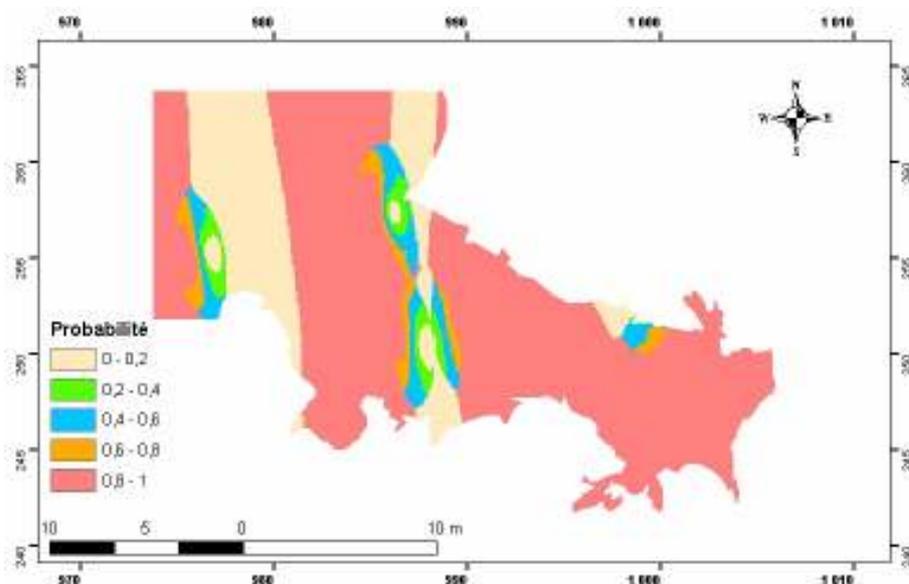
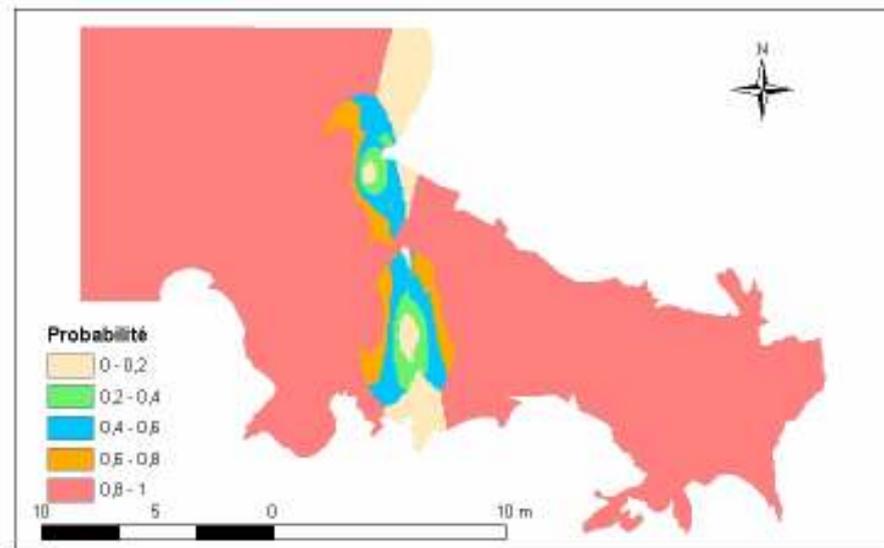


Fig. 57. Carte de de probabilité de seuil de dépassement de la Conductivité électrique >1000 des Hautes eaux



V. 4. 2. Conclusion

L'application du krigeage ordinaire pour l'estimation de la CE des eaux souterraines de la région de Tébessa a montré que ce paramètre présente une variabilité locale et régionale importante. La cartographie par ce type de krigeage a permis de faire une description de la distribution spatiale avec une sous-estimation des valeurs élevées et excessivement élevées.

Fig. 58. Carte de probabilité de seuil de dépassement de la Conductivité électrique >1000 des Basse eaux

Cette méthode a montré l'état de salinité des eaux de la nappe. Nous allons essayer d'expliquer les origines de cette salinité des eaux en faisant appel à diverses méthodes.

Origines de la salinité des eaux de la région :

L'eau au cours de son déplacement peut subir des modifications, ces dernières sont engendrées par l'environnement immédiat de la ressource, ce qui revient à l'impact de la géologie sur la qualité des eaux. Cette relation peut être mise en évidence par le biais de la thermodynamique ou par les éléments traceurs.

V. 5. Facteurs régissant le chimisme des eaux:

Nous nous intéressons aux facteurs influençant le comportement chimique des eaux. Notons que les formations géologiques, le climat ou la proximité du niveau statique sont des paramètres accélérants les changements de la qualité des eaux. Nous étudions l'influence de chaque paramètre sur la qualité des eaux.

V. 5. 1. Géologie:

Les formations qu'elles soient à l'affleurement ou cachées peuvent modifier la composition des eaux. Cette modification peut être mise en évidence par la thermodynamique.

V. 5. 1. 1. Les bases de la thermodynamique:

Les éléments dominants ont été déterminés selon divers critères: activités ioniques, constantes d'équilibre, indices de saturation, le logiciel utilisé pour réaliser ce travail est FREEQ.

A/ Relation activité concentration :

Les énergies d'interaction entre deux molécules A et B en solution idéale sont identiques à celles entre deux molécules A ou B : il en est ainsi d'une solution aqueuse diluée à l'infini. Les activités ioniques a_i d'une solution idéale seront égales à la concentration $[C_i]$, d'où :

$$a_i = [C_i]$$

En solution réelle, solution aqueuse d'espèces ioniques, il existe des interactions électrostatiques entre les ions. Comme les ions sont entourés par des régions où les molécules d'eau sont arrangées selon une structure différente de celle de l'eau pure (Drever, 1988), l'écart à l'idéalité est quantifié par l'introduction d'un coefficient d'activité γ_i dans l'équation ($a_i = [C_i]$), d'où :

$$a_i = \gamma_i [C_i]$$

La détermination du coefficient d'activité sera basée sur la théorie de Debye-Hückel où les interactions électrostatiques entre les ions distribués selon la théorie de Boltzmann. Cette théorie comporte deux équations où l'activité a_i est reliée à la force ionique I (en mole/l) de la solution avec :

Pour $I < 10^{-2,3}$

$$\log \gamma_i = -A Z_i^2 \sqrt{I}$$

Où A est une constante, fonction de la température T et de la pression P ;

Z_i = la charge de l'ion considéré i.

$$I = \frac{1}{2} \sum_i [C_i] Z_i^2$$

Pour $10^{-2,3} < I < 0,1$, cette formule est généralisable:

$$\log \gamma_i = -A Z_i^2 \sqrt{I} / (1 + B a_0 \sqrt{I})$$

Où B est une constante, fonction de la température T et de la pression ;

a_0 : le rayon hydraté de l'ion considéré.

Il existe d'autres formules semi empiriques dérivées de cette théorie pour déterminer γ_i , comme la formule de (Davies, 1962), pour $I < 0,5$:

$$\log \gamma_i = -A Z_i^2 [\sqrt{I} / (1 + B a_0 \sqrt{I}) - bI]$$

où b est une constante.

Dans le cas d'espèces non chargées, l'approximation de Plummer et Makenzie (1974) (in Djabri 1996) aboutit au calcul de γ_i avec :

$$\gamma_i = 10^{-0,1I}$$

B/ L'activité ionique

Pour comprendre l'importance des activités ioniques, on a essayé d'estimer la gamme de variation de l'activité des eaux et du coefficient gamma (tab1).

Constituant	Activité ionique a_i (nappe)		Log Activité Ionique		Coefficient d'Activité γ
	Valeur Inférieure	Valeur Supérieure	Valeur Inférieure	Valeur Supérieure	
Anhydrite	$7,6 \times 10^{-7}$	$1,9 \times 10^{-5}$	-6,14	-4,7	-4,6
dolomite	$2,05 \times 10^{-20}$	$1,02 \times 10^{-5}$	-19,7	-4,9	-16,7
Gypse	$7,66 \times 10^{-7}$	$1,98 \times 10^{-5}$	-6,11	-4,07	-4,6
Calcite	$1,85 \times 10^{-10}$	$1,8 \times 10^{-7}$	-9,3	-6,7	-8,01

Tableau 26. Valeurs limites de l'activité (moles/l).

La faiblesse des valeurs d'activité ionique, en moyenne de l'ordre de 10^{-4-6} souligne que la concentration n'est pas directement liée qu'à l'activité ionique.

Les valeurs du coefficient d'activité gamma ne varient pas beaucoup, elles restent constantes. Ceci nous amène à dire que le lessivage est important dans la région et qu'il influence directement la composition chimique de l'eau.

V. 5. 1. 2. Indice de saturation

D'après la loi d'action de masse, pour une solution aqueuse en équilibre avec un minéral, le produit d'activité ionique du minéral est égal à la constante d'équilibre thermodynamique. Le degré de saturation d'une eau peut être représenté par un indice de saturation (SI) qui est le logarithme du quotient du produit d'activité ionique IAP divisé par la constante d'équilibre (K):

$$SI = \log (IAP/K_{sp})$$

L'indice de saturation atteint une valeur de zéro quand la solution est en équilibre avec une phase solide. Un indice de saturation positif indique une sursaturation, et un indice négatif une sous-saturation vis-à-vis des minéraux.

V. 5. 1. 2. 1. Application aux eaux de la région étudiée :

Les résultats obtenus sont issus des traitements réalisés en utilisant le logiciel FREEQ contenu dans le programme diagramme de l'université d'Avignon (France). Les températures de calculs ont été ramenées à 25 °c dans le but d'harmoniser les calculs des indices de saturation. Les résultats indiquent la présence de plusieurs minéraux particulièrement : l'anhydrite, le gypse, la calcite et la dolomite dont les indices de saturation varient dans un faible intervalle. Le tableau 2 donne les valeurs de l'indice de saturation calculé pour les eaux de la région de Tébessa.

Tab. 27. Valeurs de l'indice de saturation.

Nom du puits	X	Y	SI Anhydrite	SI calcite	SI dolomite	SI gypse
P1	1 003,30	245,55	-1,27	0,71	1,61	-1,05
P2	996,45	247,70	-1,15	0,88	2,01	-0,92
P3	971,75	249,30	-1,59	0,7	1,47	-1,37
P4	998,70	253,65	-1,08	1,18	2,4	-0,85
P5	985,00	257,50	-1,74	0,64	1,29	-1,52
P6	976,60	255,20	-1,55	0,4	1,03	-1,34
P7	987,90	250,55	-1,39	0,77	1,66	-1,17
P8	995,60	247,80	-1,17	0,91	1,78	-0,95
P9	992,30	248,40	-1,42	0,66	1,52	-1,21
P10	989,95	254,50	-1,3	0,7	1,56	-1,08
P11	989,80	251,30	-1,72	1,25	2,62	-1,5
P12	975,80	254,90	-0,6	1,42	2,71	-0,38
P13	975,10	255,65	-0,44	1,66	2,26	-0,23
P14	986,00	257,35	-0,72	0,86	1,55	-0,5
P15	990,55	252,10	-0,1	1,89	3,05	0,12
P16	989,85	251,90	-0,71	0,82	1,32	-0,49
P17	992,60	248,45	-0,03	1,19	2,06	0,19
P18	985,70	255,80	-0,54	0,05	0,05	-0,32
P19	985,10	255,85	-1,51	0,43	0,92	-1,29
P20	985,30	255,10	-1,05	1,1	1,95	-0,83
P21	985,35	255,40	-1,04	1,06	1,78	-0,82
P22	985,40	257,80	-0,95	1,15	1,98	-0,73

P23	990,55	251,30	-0,89	0,8	1,21	-0,67
P24	986,55	250,70	-0,87	0,75	1,06	-0,65
P25	986,15	251,20	-0,94	0,55	0,82	-0,72
P26	987,70	250,40	-1	0,88	1,42	-0,77
P27	986,10	251,70	-0,82	0,23	0,05	-0,6
P28	996,6	247,68	-0,28	1,39	2,29	-0,06
P29	990,82	247,65	-1,11	1,12	1,99	-0,9
P30	993,92	247,9	-1,3	0,75	1,35	-1,08

V. 5. 1. 2. 2. Evolution des valeurs des SI dans les eaux de la région :

Le dépouillement des résultats, nous a permis de déterminer les minéraux pouvant influencer la composition chimique (fig 59). Parmi les plus importants nous notons :

La calcite (Ca CO_3):

Toutes les valeurs sont positives, ceci est dû à une précipitation de la calcite, d'où un enrichissement possible des eaux en bicarbonate de calcium

La dolomite ($\text{Ca Mg (CO}_2)_2$)

Toutes les analyses présentent une sursaturation vis-à-vis de la dolomite. Ceci entraîne une précipitation avec formation de bicarbonates de magnésium.

Le gypse ($\text{Ca SO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$):

L'indice de saturation est négatif pour toutes les analyses, ce qui traduit une sous saturation s'expliquant par une dissolution qui enrichit les eaux en Ca^{2+} et SO_4^{2-} .

L'anhydrite (Ca SO_4):

L'indice de saturation négatif pour toutes les analyses, ce qui indique une sous saturation augmentant la minéralisation des eaux.

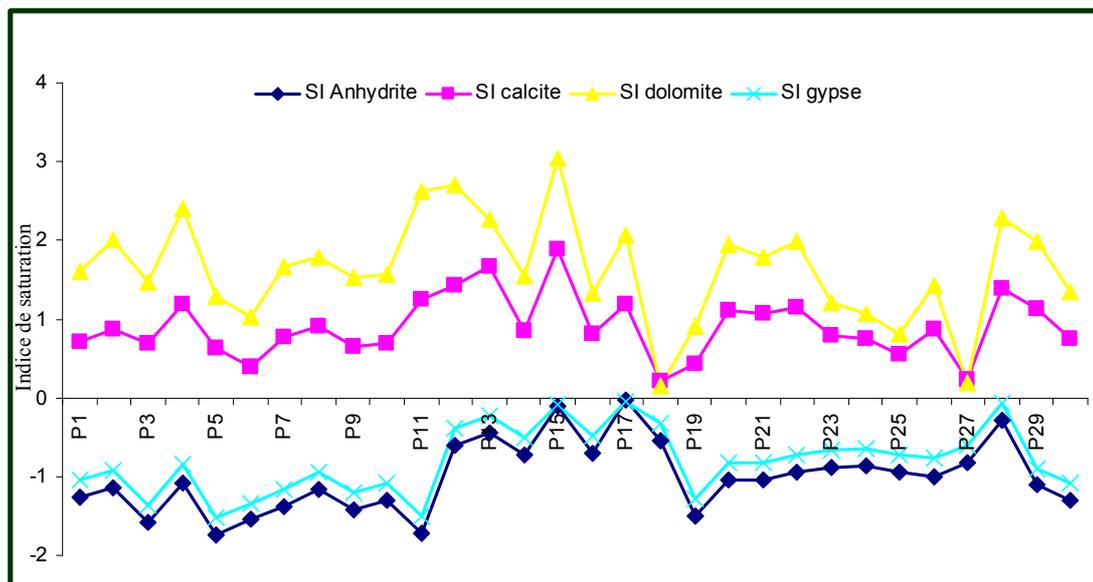


Fig. 59. Evolution des indices de saturation dans les eaux de la région

La figure précédente montre une sur saturation des eaux vis-à-vis des indices de saturation mettant en évidence l'influence des formations carbonatées caractérisées par la calcite et la

dolomite, par opposition on note pour tout les points une sous saturation vis-à-vis des indices accélérant le processus de salinité qui sont l'anhydrite et le gypse. Cette augmentation de la salinité se fait par dilution.

V. 5. 1. 3. Caractéristique du strontium:

L'étude du rapport Sr^{2+}/Ca^{2+} donne un aperçu de l'influence du trias gypso salifère sur la salinité des eaux. Le strontium est lié aux évaporites. Il est très faiblement intégré dans le réseau des carbonates et est peu absorbé par les argiles. Les fortes teneurs en Sr^{2+} dans les eaux ne s'expliquent que par la dissolution de la Celestite ($SrSO_4$); minéral associé au gypse, il forme ainsi un bon marqueur de la présence des évaporites.

Les calculs effectués montrent que le rapport Sr^{2+}/Ca^{2+} varie entre 0,8‰ et 28‰, ce qui nous a permis la détermination des trois familles suivantes :

- a- Groupe A ($Sr/Ca < 2‰$): Comprend a peu près 10% des échantillons, caractérisant les eaux de la bordure Nord.
- b- Groupe B ($2‰ < Sr/Ca < 3‰$): Comprend 12% des échantillons caractérisant les eaux des bordures Sud et la région de Ain Chabro.
- c- Groupe C ($Sr/Ca > 3‰$): comprend 78% des échantillons, se localisant au centre de la plaine et au secteur de Djebissa

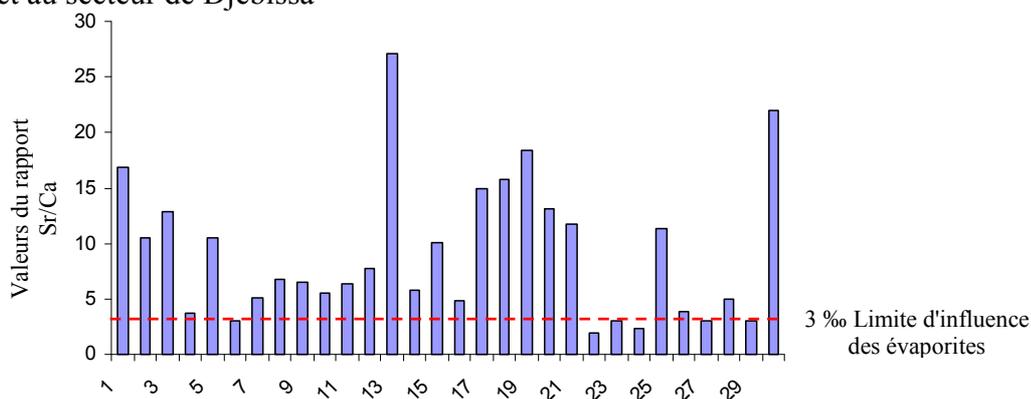


Fig. 60. Histogramme montrant les variations du rapport Sr^{2+}/Ca^{2+}

On note que 78% des échantillons présentent un rapport $Sr^{2+}/Ca^{2+} > 3‰$ mettant en évidence l'influence des formations évaporitiques sur la salinité des eaux souterraines. Les eaux dont le rapport $Sr^{2+}/Ca^{2+} < 3‰$, caractériseraient les eaux en provenance des bordures Nord et Sud confirmant l'alimentation de la nappes par les bordures latérales. Les zones éloignées particulièrement la région de Ain Chabro se caractérise par une faible valeur du rapport.

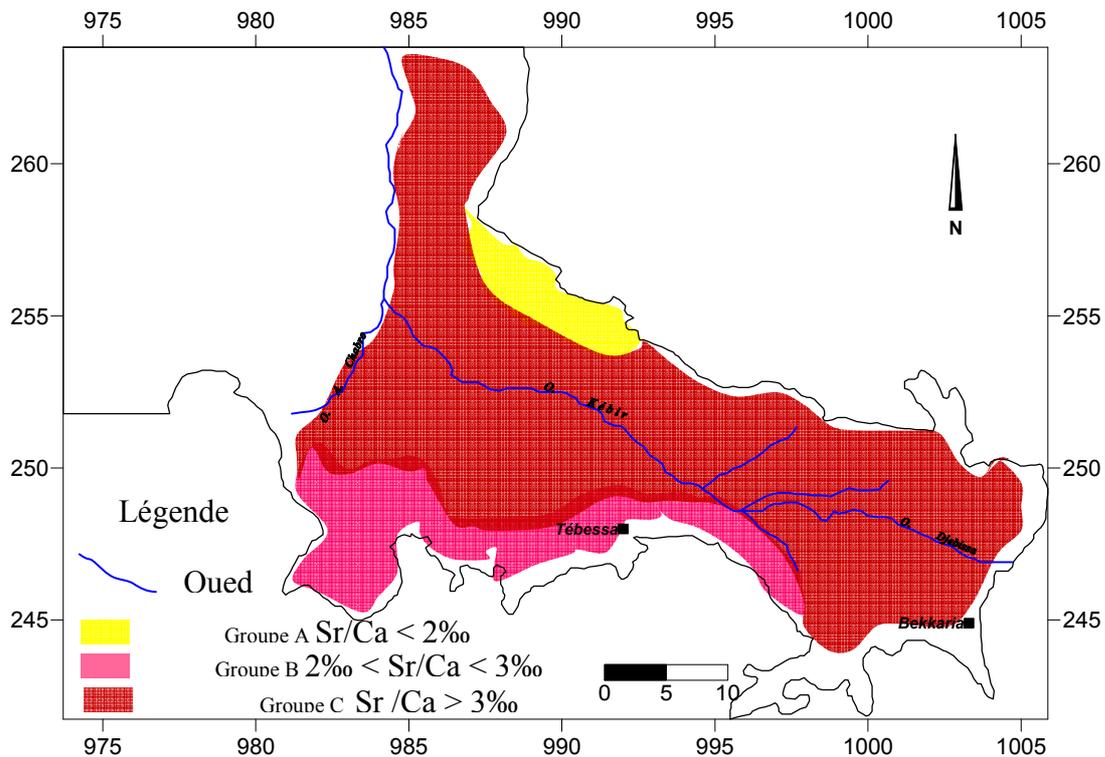


Fig. 61. Carte de répartition des rapports $\text{Sr}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$

Les écoulements (cf. piézométrie) se font d'Est en Ouest entraînant un déplacement des minéraux ce qui provoque la contamination par les formations gypsifères.

V. 5. 2. Le climat:

La zone d'étude possède un climat semi aride. Le bilan hydrique calculé a donné de fortes valeurs de l'évapotranspiration 700-800 mm/an. Celle-ci agit sur le chimisme en augmentant la salinité des eaux.

V. 5. 3. Le niveau statique:

Plus ce dernier est proche de la surface du sol plus les échanges sont importants. Dans la zone d'étude le niveau statique oscille entre 3 et 7 m par rapport de la surface du sol. En période sèche la remontée de l'eau se fait par capillarité, au cours de son parcours des échanges avec la roche ont lieu se qui provoque un changement de la composition chimique des eaux.

V. 6. Impact de la mine abandonnée sur la qualité des eaux de surface :

L'évolution du chimisme des eaux superficielles a fait l'objet de cette étude.

Les analyses ont porté sur 8 points se répartissant sur les deux oueds; Djebissa et oued el Kebir de l'Est en Ouest suivant la direction des écoulements.

Les éléments analysés sont : éléments majeurs (Ca, Mg, Na+K, Cl, SO₄, HCO₃), quelques éléments traces, et le rapport Sr²⁺ /Ca²⁺.

Nous avons effectué plusieurs campagnes d'analyse d'eau, ces dernières ont été réalisées au laboratoire des sciences de la terre université Annaba, le laboratoire du centre d'étude et de recherche appliquées au développement Pherphos, HYDROSID, DRA, laboratoire de l'université de Lille, celui de l'université de Besançon et le laboratoire d'hydrogéologie d'Avignon en France.

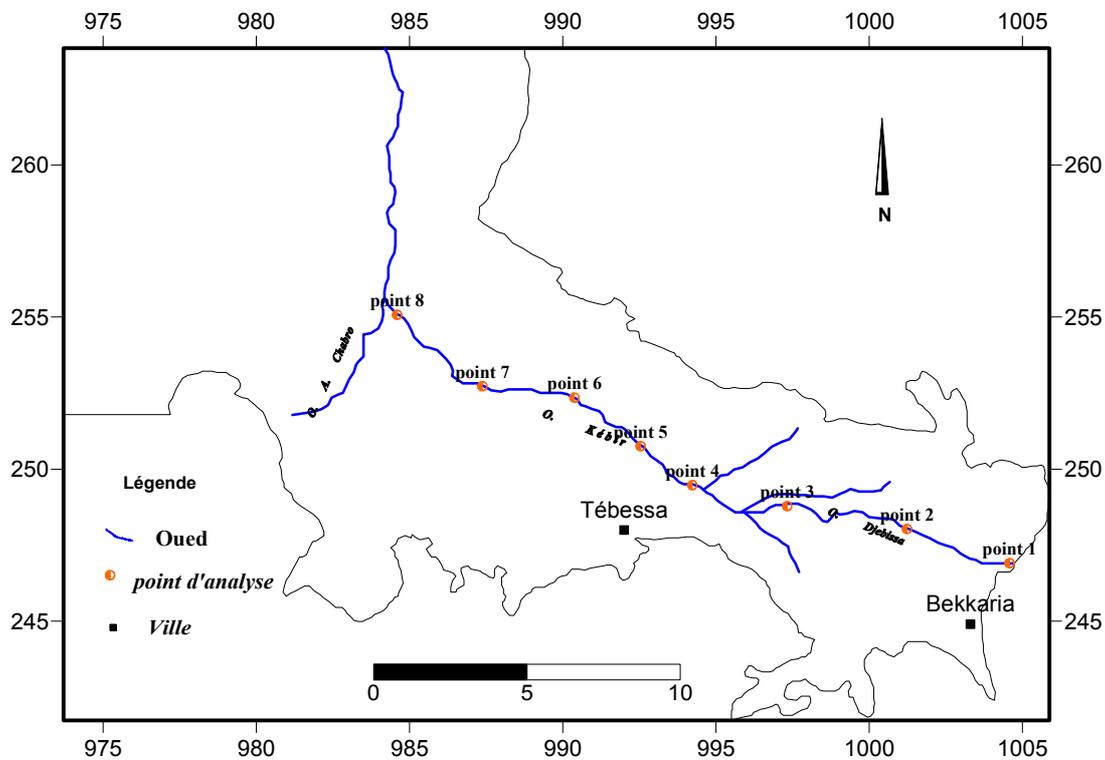


Fig. 62. Répartition des points de prélèvement des eaux de surface

V. 6. 1. Caractéristiques des eaux de surface :

La figure précédente (Fig. 62) montre l'emplacement des points analysés selon une direction E.O, selon le sens de l'écoulement des eaux. Cette position présente l'avantage de visualiser les modifications que subiront les eaux suivant le sens de l'écoulement.

V. 6. 1. 1. Caractéristiques des eaux au niveau du point 1 :

Ce point est situé en amont du village de Bekkaria. L'observation du graphe se rapportant aux éléments majeurs montre une domination des sulfates pour sept périodes sur les huit considérées. Le prélèvement effectué au de juin 2006 montre une dominance des chlorures qui serait dues à la dissolution de l'halite. En ce qui concerne les cations le sodium domine provoquant la salinité des eaux observée.

Pour mettre en évidence les origines de cette salinité nous nous sommes intéressé à l'évolution du rapport Sr^{2+} / Ca^{2+} , on remarque que ce rapport présente des valeurs oscillant entre 20 et 30 ‰, ce qui traduit l'influence des formations évaporitiques sur la salinité des eaux (fig. 63).

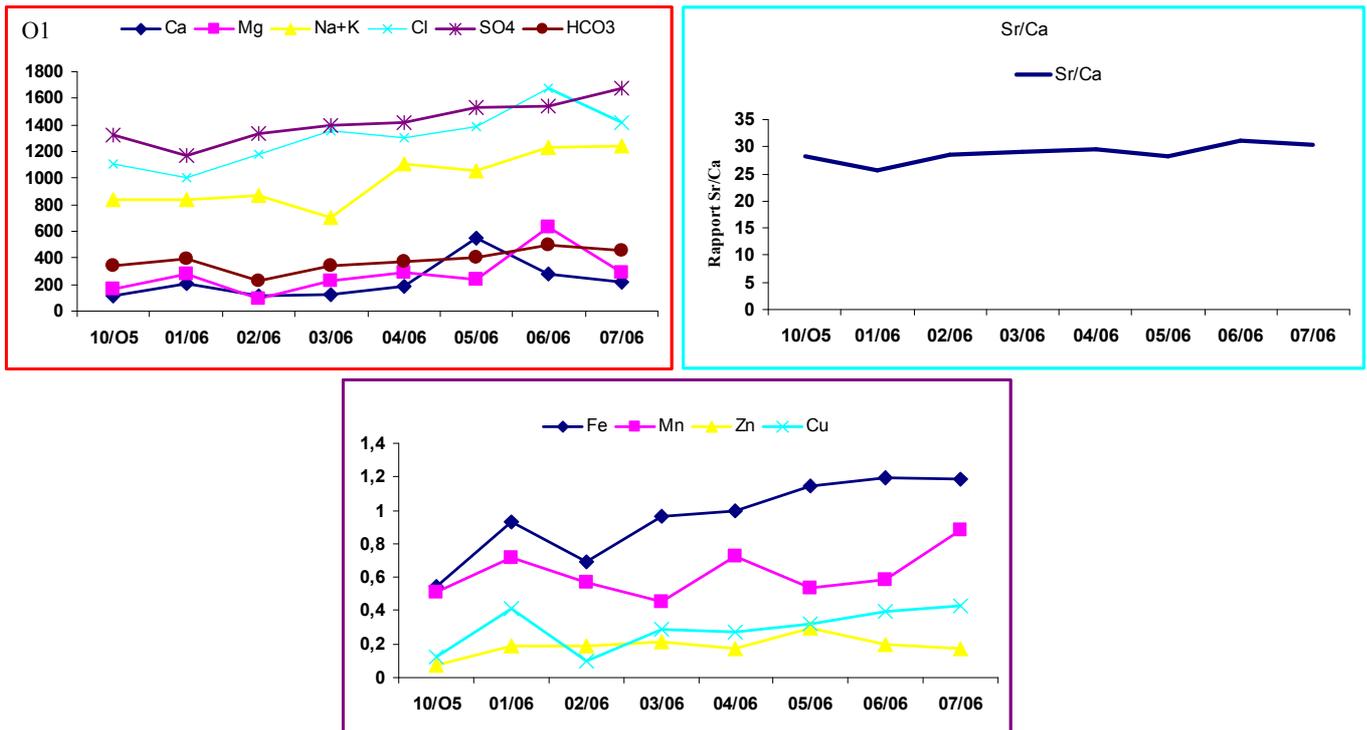


Fig. 63. Evolution du chimisme au point 1

Le graphe montrant l'évolution des métaux lourds, montre des concentrations en fer et manganèse importantes tandis que le zinc et le cuivre présentent des concentrations n'excédant pas 0.4 mg/l, les teneurs en cuivre croissent surtout au cours de la période estivale caractérisée par des écoulement très faibles ne pouvant entraîner un piégeage de cet élément.

V. 6. 1. 2. Caractéristiques des eaux au niveau du point 2 :

Ce second point se situe aux alentours du Djebel Djebissa et se caractérise par une domination des sulfates pour toutes les observations, ces sulfates s'accompagnent de sodium au lieu de calcium ceci traduit un échange de base entre les argiles et l'eau, cette dernière libère le calcium ou le magnésium et capte le sodium. Le graphe relatif au rapport Sr^{2+} / Ca^{+2} ,

Reste important et traduit donc l'influence des formations évaporitiques sur la salinité des eaux (fig. 64).

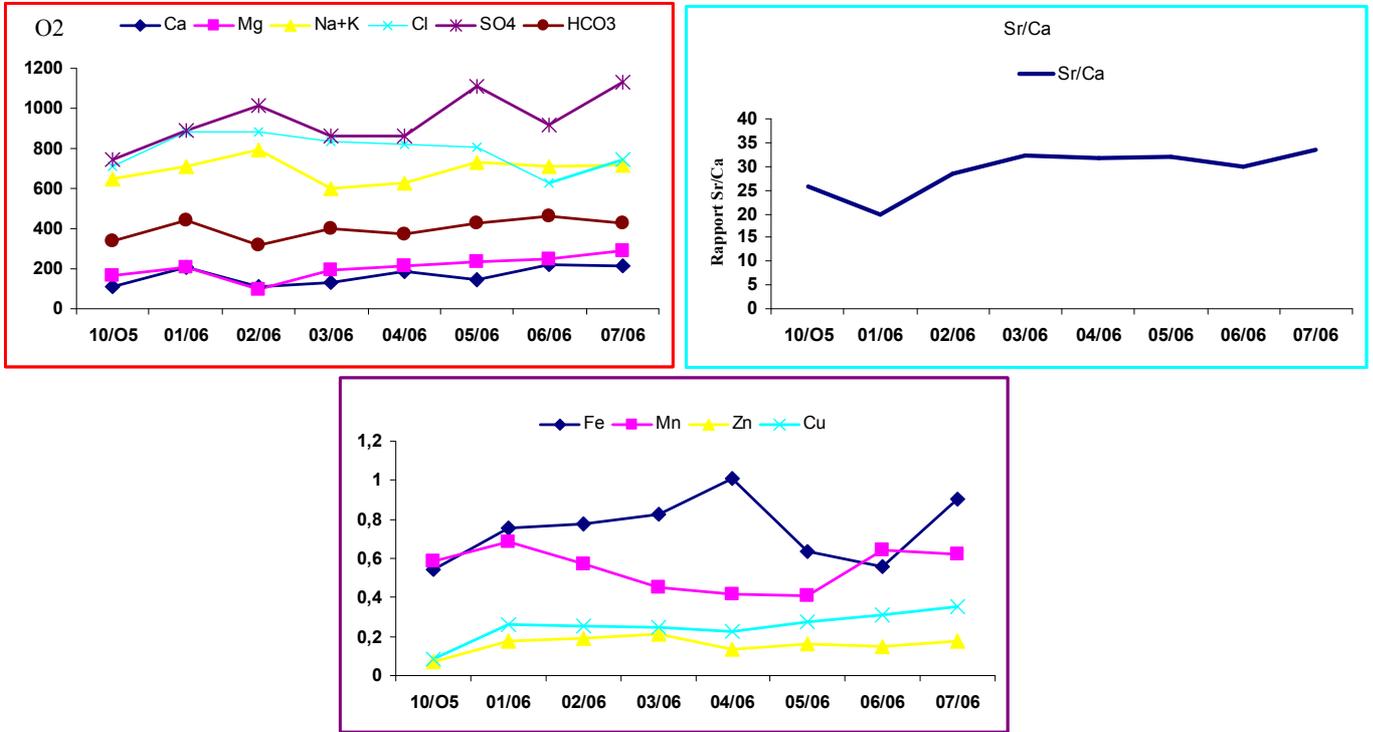


Fig. 64. Evolution du chimisme au point 2

L'observation du graphe relatif aux métaux lourds montre une évolution inverse entre le fer et le manganèse particulièrement au cours de la période pluvieuse, cette situation résulte du fait que ces points sont situés à proximité des terrils de la mine, ce qui a tendance à l'augmentation des concentrations en fer (fig. 64-a). Le zinc et le cuivre présentent des concentrations caractérisées par un accroissement continu, ce qui signifie que ces éléments ne sont pas piégés par les sédiments.

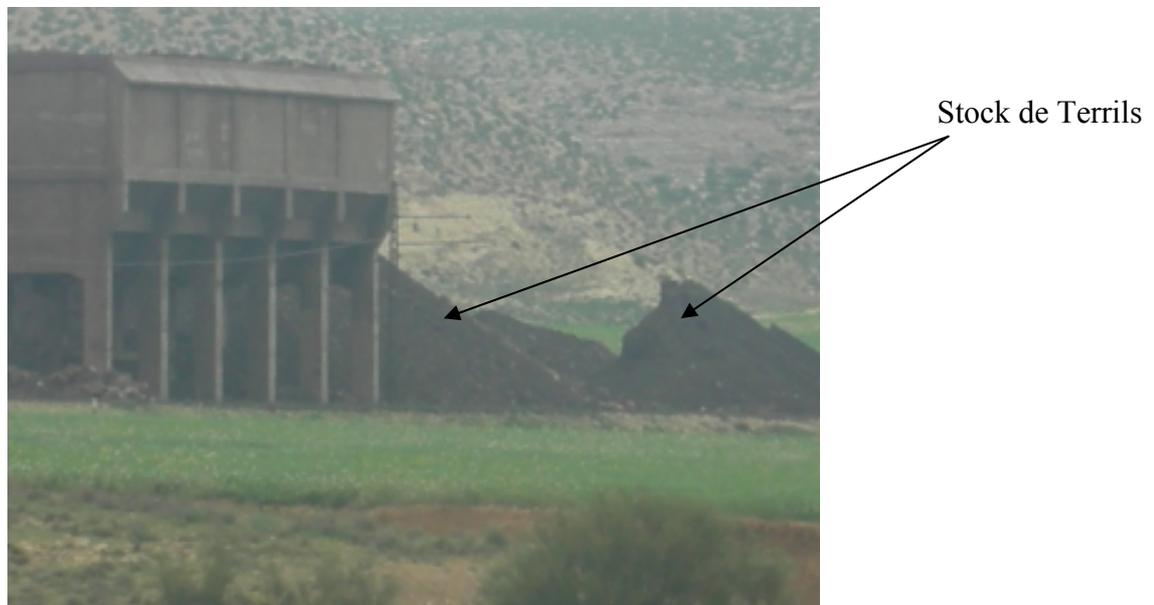


Fig. 64-a. Stock de terrils de la mine de fer

V. 6. 1. 3. Caractéristiques des eaux au niveau du point 3 :

Le troisième point est situé dans le prolongement du précédent, le graphique réalisé montre que les eaux sont riches en sulfates pour toutes les périodes d'observations, ces derniers s'accompagnent du sodium conférant ainsi à l'eau la salinité observée.

Le graphique relatif à l'étude du rapport Sr^{2+}/Ca^{+2} , est dans sa globalité supérieur à 3 ‰, indiquant un impact direct des formations évaporitiques sur la salinité des eaux. (fig. 65)

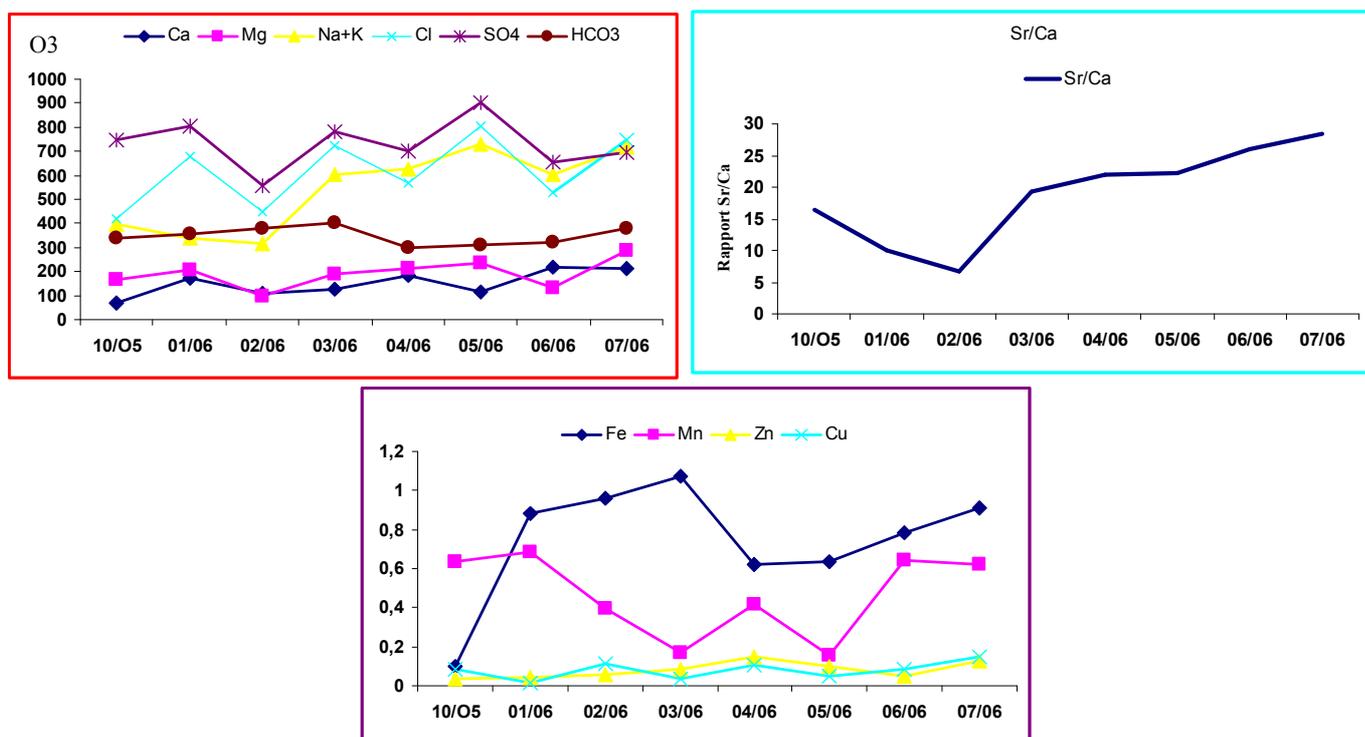


Fig. 65. Evolution du chimisme au point 3

Le graphique montrant l'évolution des métaux lourds montre deux tendances :

*les concentrations en fer et en manganèse restent importantes mais évoluent de manière inverse particulièrement entre le mois de janvier et le mois de juin (début), caractérisant la période pluvieuse donc à écoulement important, cette évolution peut s'expliquer par l'influence des terrils de la mine abandonnée qui enrichissent les eaux en fer.

* le cuivre et le zinc ont des concentrations faibles dues soit à l'éloignement de la source d'apports soit à leurs piégeage par les sédiments.

V. 6. 1. 4. Caractéristiques des eaux au niveau du point 4 :

Ce point est situé à l'entrée de la ville de Tébessa, le graphe relatif aux éléments majeurs montre la même évolution que les précédents, caractérisé par une domination des sulfates et du sodium.

Le graphe relatif à l'étude du rapport Sr^{2+}/Ca^{+2} , malgré une baisse reste dans sa globalité supérieur à 3 ‰, indiquant un impact direct des formations évaporitiques sur la salinité des eaux (fig. 66).

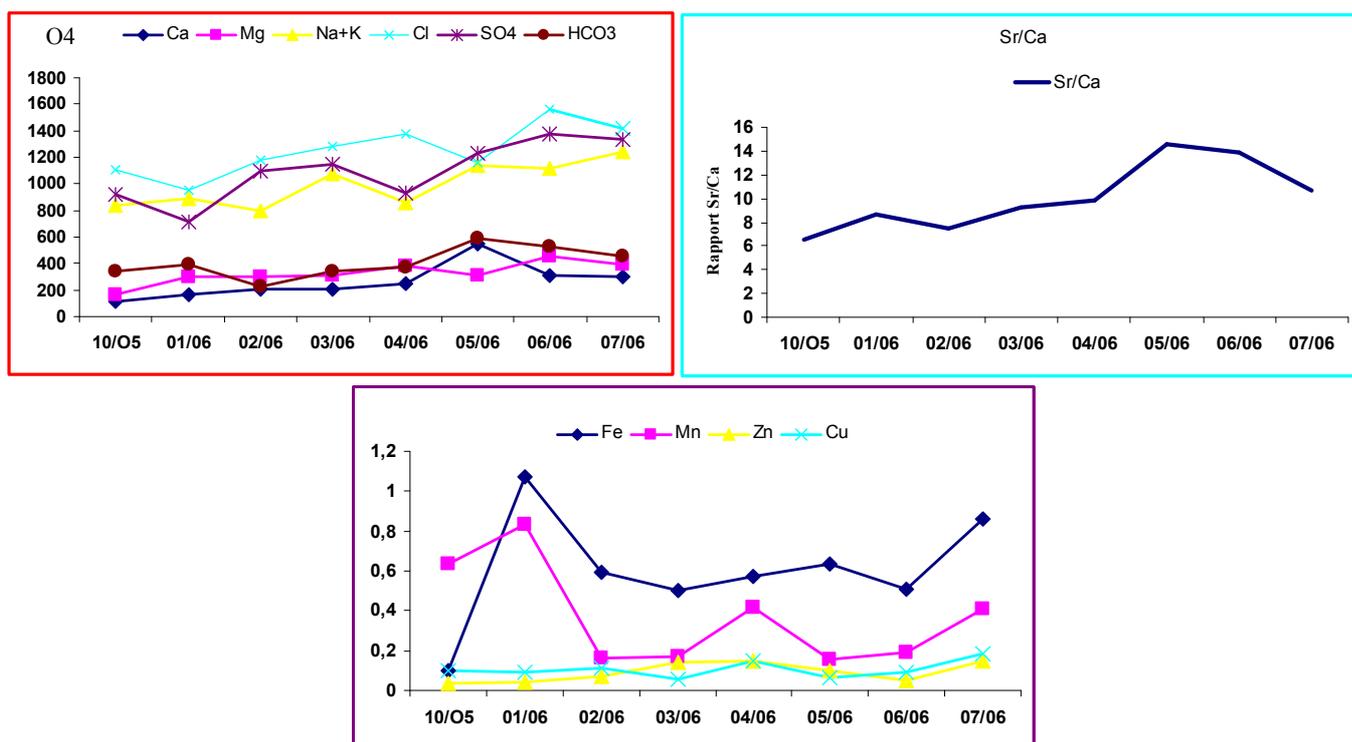


Fig. 66. Evolution du chimisme au point 4

On remarque que les métaux lourds se caractérisent par une baisse sensible des concentrations pour les quatre éléments étudiés, cependant le cuivre et le zinc montrent une tendance à l'accroissement en été, ce qui indique probablement un apport de ces éléments par les rejets des eaux usées.

V. 6. 1. 5. Caractéristiques des eaux au niveau du point 5 :

Le point de prélèvement est situé à l'Ouest de l'aéroport et montrent contrairement aux précédents points une domination des chlorures et du sodium. Cette tendance se traduit par une baisse des valeurs du rapport Sr^{2+}/Ca^{+2} , ces valeurs restent supérieures à 3 ‰ (fig. 67).

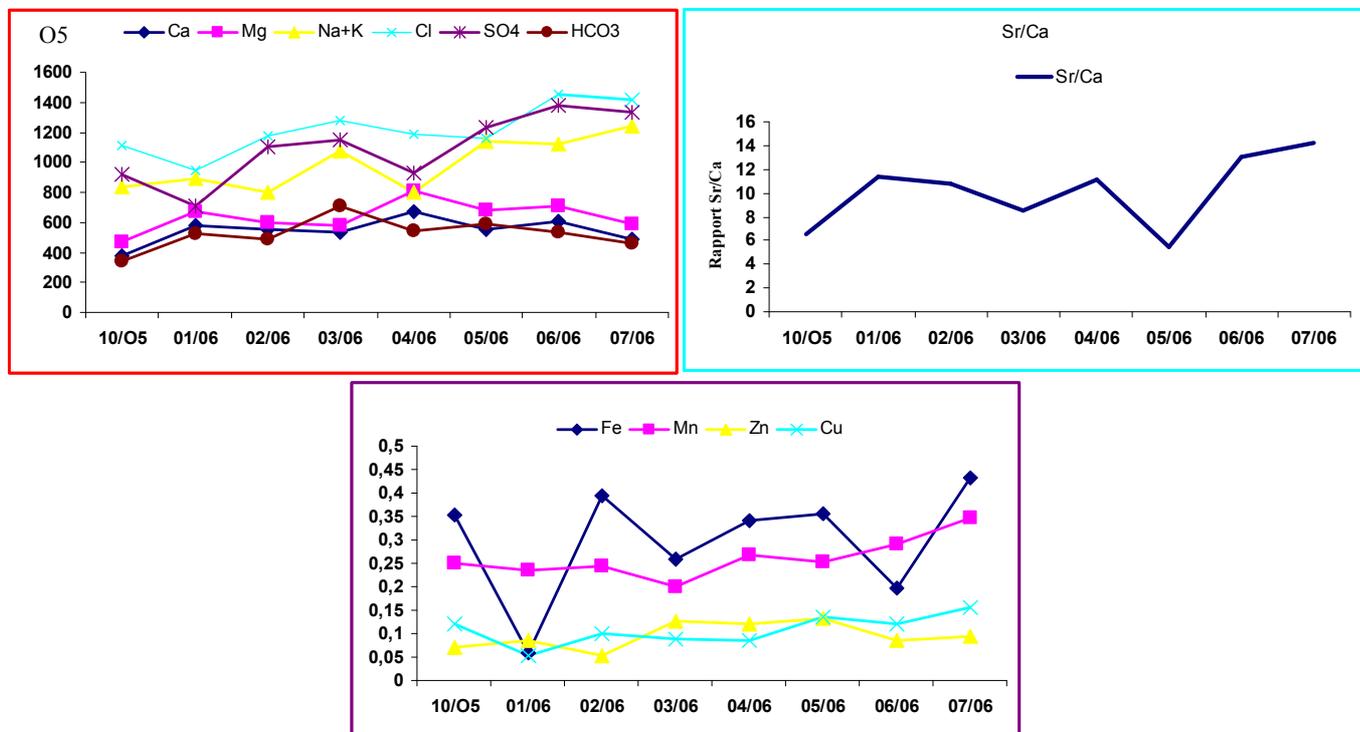


Fig. 67. Evolution du chimisme au point 5

Les graphes visualisant l'évolution des métaux lourds indiquent une baisse très sensible des concentrations, ce qui traduit un éloignement par rapport à la source de ces métaux.

V. 6. 1. 6. Caractéristiques des eaux au niveau du point 6 :

Ce point est situé sur l'axe routier Tébessa-Annaba, le graphe montre une baisse des concentrations en général, on remarque que tantôt les bicarbonates dominent tantôt se sont les chlorures et tantôt les sulfates sont importants dans quatre prélèvements, cette répartition peut s'expliquer par les apports en eaux riches en bicarbonates pendant les mois pluvieux. Le rapport Sr^{2+}/Ca^{2+} , suit la même tendance, c'est-à-dire quand les bicarbonates dominent celui-ci est faible et inversement il est important et traduit l'influence des formations évaporitiques sur la salinité quand les sulfates dominent (fig. 68).

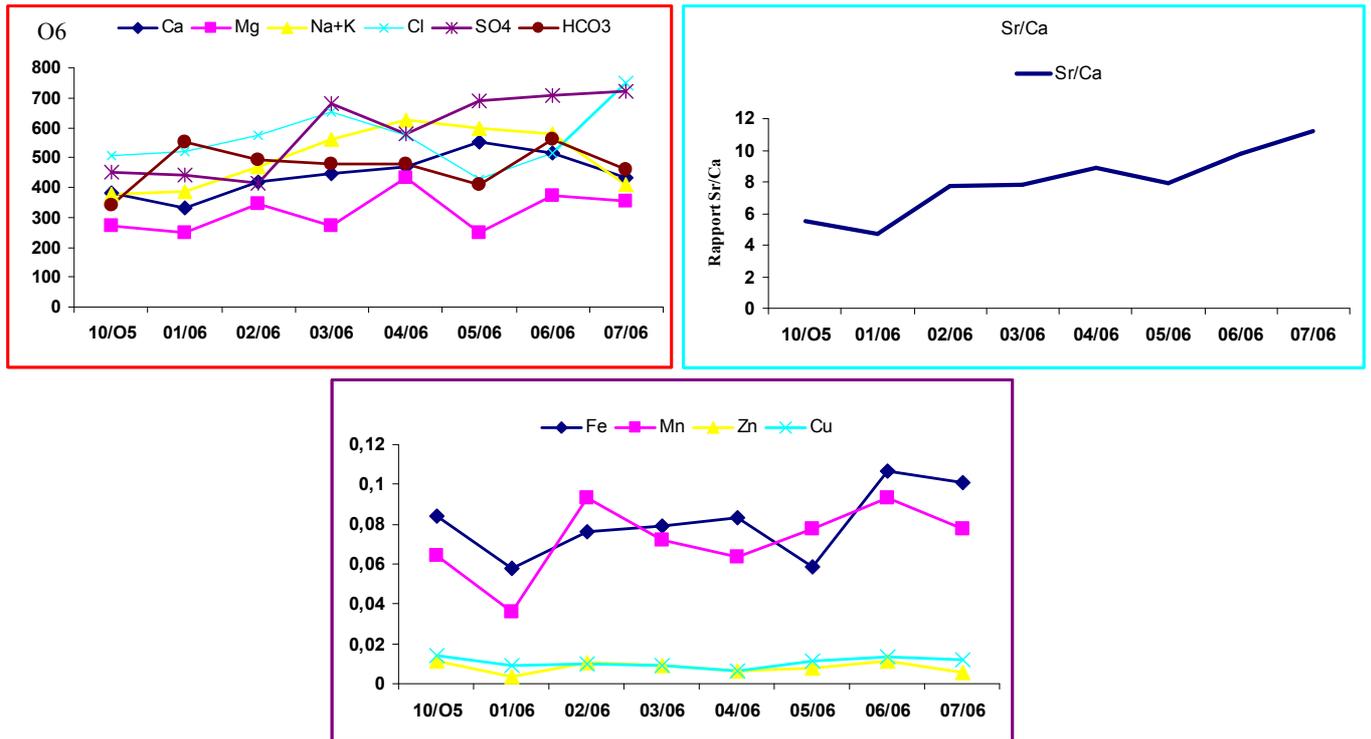


Fig. 68. Evolution du chimisme au point 6

Les métaux lourds présentes des concentrations très faibles, indiquant un éloignement de la source d'apport.

V. 6. 1. 7. Caractéristiques des eaux au niveau du point 7 :

Le point d'observation est situé en aval du centre universitaire de Tébessa, son observation montre une domination des bicarbonates, traduisant une alimentation des eaux de la plaine par les calcaires de bordures, par ailleurs le fond de l'oued est constitué de galets et de graviers calcaires, le calcium accompagne les bicarbonates et confirme donc l'influence des formations calcaires sur la composition chimique de ces eaux.

Le graphe Sr^{2+}/Ca^{2+} , montre pour la première fois des valeurs inférieurs à 3 ‰, traduisant l'absence de relation entre la composition chimique des eaux et les formations évaporitiques (fig. 69).

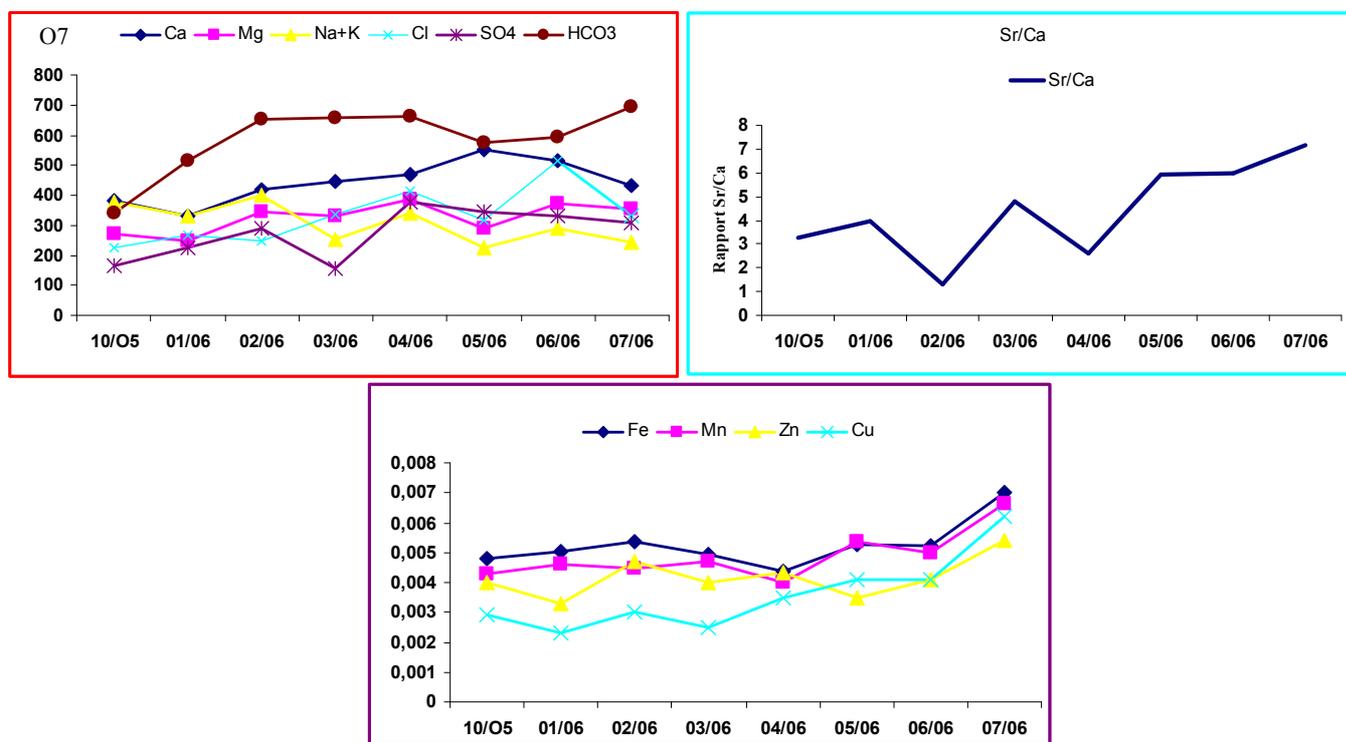


Fig. 69. Evolution du chimisme au point 7

Les métaux lourds présentent des concentrations de plus en plus faibles, les valeurs atteintes ne sont pas alarmantes

V. 6. 1. 8. Caractéristiques des eaux au niveau du point 8 :

Ce point est situé sur la confluence Oued Kebir Oued Chabro, les bicarbonates dominent et sont accompagnées par le calcium. Ceci marque l'influence des calcaires sur la composition chimique des eaux.

Le rapport Sr^{2+}/Ca^{2+} , dépasse 6‰, uniquement pendant l'été mais pour le reste il oscille autour de 2‰, ce qui revient à dire que la salinité des eaux n'est pas engendrée par les formations évaporitiques (fig. 70).

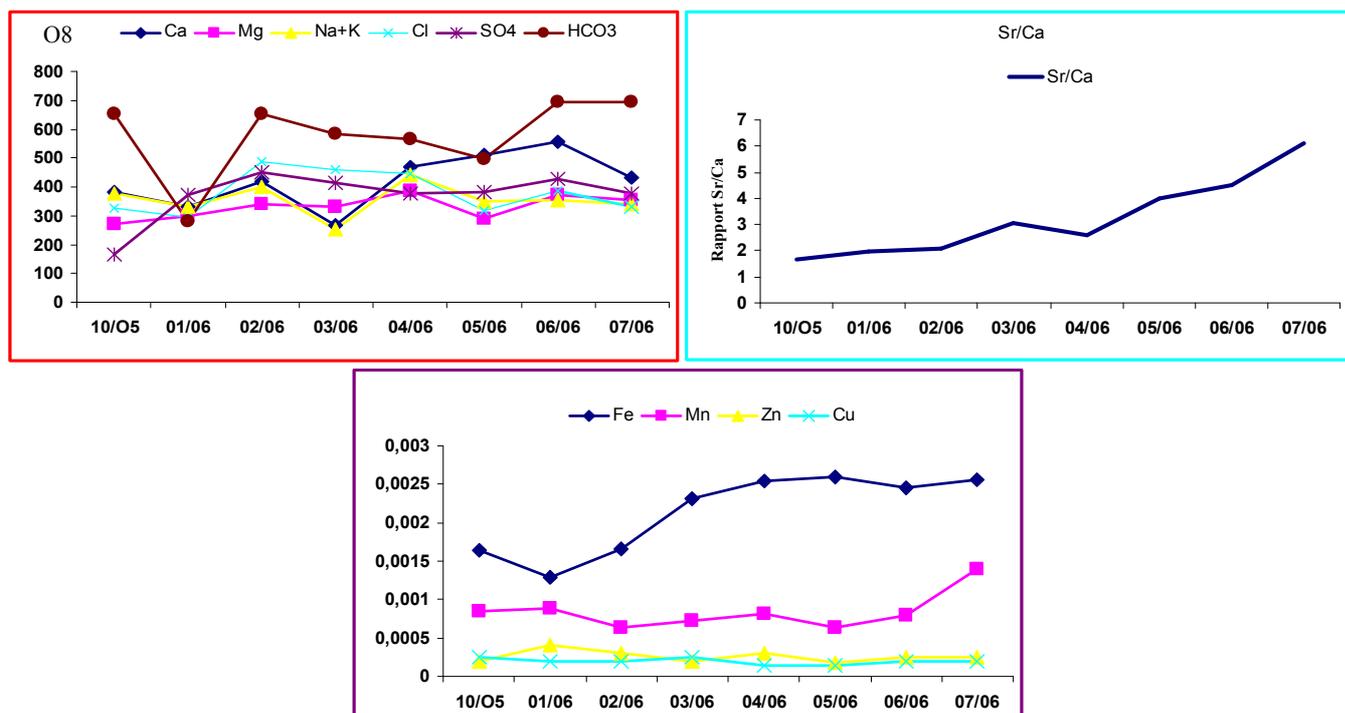


Fig. 70. Evolution du chimisme au point 8

Le présent graphe confirme les précédents et montre des concentrations de plus en plus faibles.

Au niveau de l'Oued la qualité des eaux est conditionnée par les formations géologiques traversées et par leur position vis-à-vis des sources de pollution. En effet dans le secteur de Djebel Djebissa Bekkaria les formations gypsifères dominent et enrichissent les eaux en sulfates par contre en allant de Tébessa vers l'Oued Chabro les calcaires influencent la composition chimique des eaux. Cette évolution est corroborée par l'évolution du graphe Sr^{2+}/Ca^{2+} , qui suit la même évolution que les sulfates.

Les concentrations en métaux lourds dans la zone d'étude restent très influencées par lamine de Khanguet et par les terrils de cette mine. Au delà de cette zone les concentrations sont en nette baisse.

V. 6. 2. Evolution du chimisme dans les puits de Djebissa :

Pour cette partie nous avons pris uniquement 3 puits dans la région de Djebissa se répartissant de part et d'autre des rives de l'oued (fig. 71).

Comme pour les eaux de surface on a établi plusieurs graphes montrant l'évolution des éléments majeurs, du rapport Sr^{2+}/Ca^{2+} , et les éléments traces, dans les puits à une profondeur de 20m.

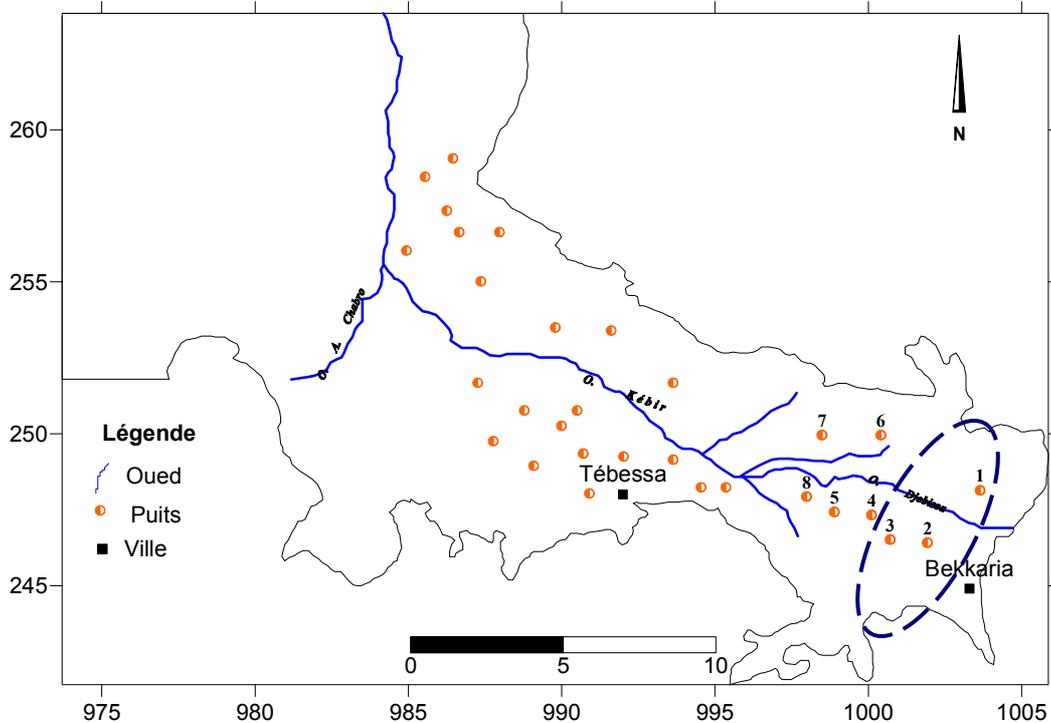


Fig. 71. Répartition des points de prélèvement des eaux des puits

V. 6. 2. 1. Caractéristiques des eaux au niveau du puits 1 :

Ce puits est situé avant le Djebel Djebissa et ce caractérise par une domination des eaux chlorurées voire sulfatées sodiques. Le rapport Sr^{2+}/Ca^{2+} , reste important et atteint des valeurs supérieures à 3 ‰.

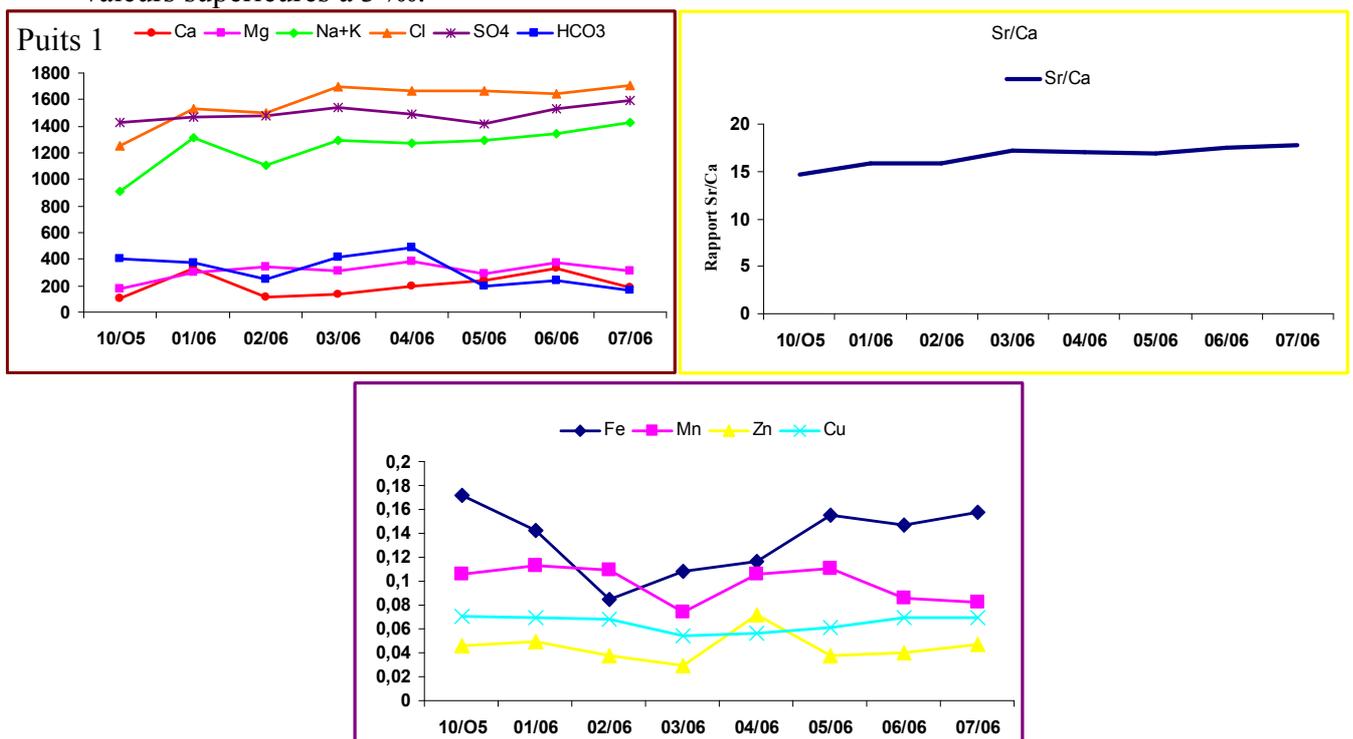


Fig. 72. Evolution du chimisme au puits 1

Le graphe montrant l'évolution des métaux lourds montre et comparativement aux eaux de l'oued une baisse des concentrations au niveau des puits, l'alimentation de ces derniers se fait par infiltration des eaux. La présente évolution montre un piégeage de ces métaux au niveau de la matrice constituant la partie intermédiaire entre le niveau d'eau dans l'oued et dans le puits (fig. 72).

V. 6. 2. 2. Caractéristiques des eaux au niveau du puits2 :

Le second puits est situé au nord du précédent et se caractérise par des concentrations analogues à celles rencontrées au niveau 1 (fig. 73).

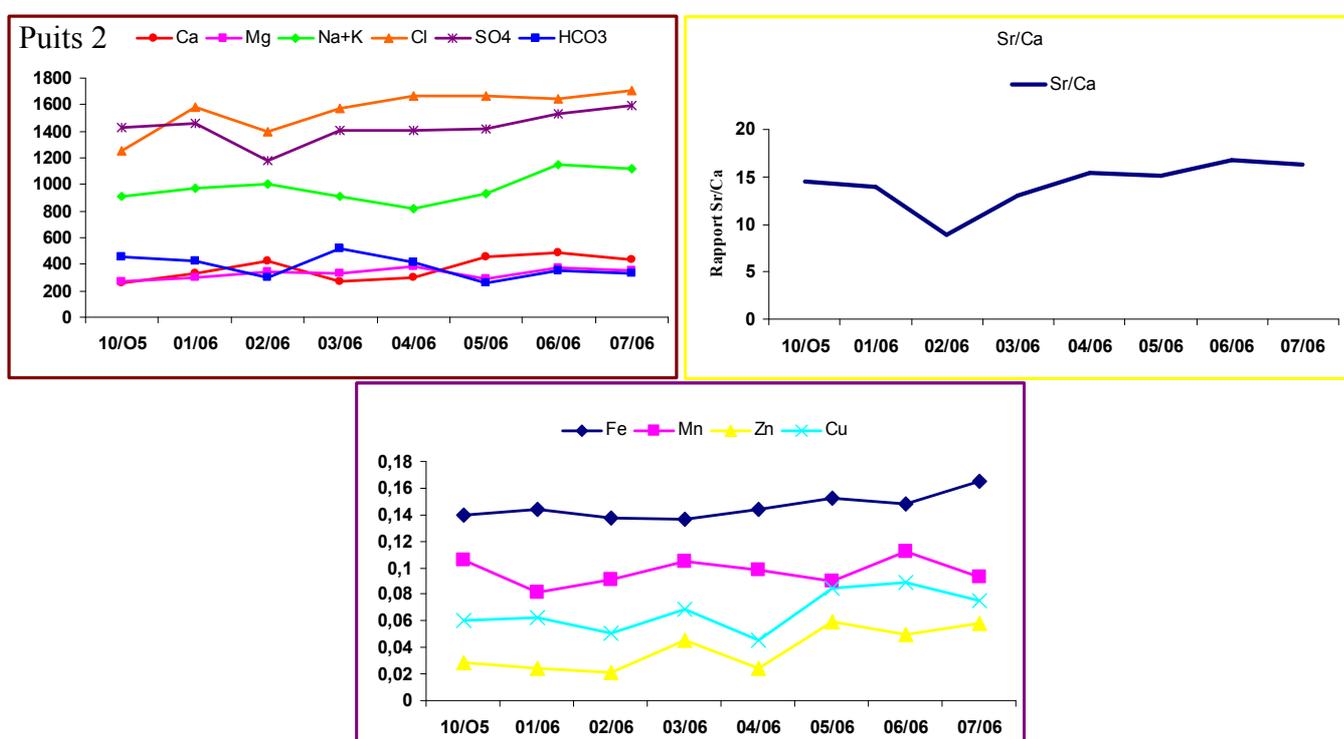


Fig. 73. Evolution du chimisme au puits 2

Les concentrations en métaux lourds restent faibles et caractériseraient donc un piégeage de ces derniers au niveau des sédiments.

V. 6. 2. 3. Caractéristiques des eaux au niveau du puits 3 :

Le puits trois est situé au Nord ouest du précédent et se caractérise par une domination des chlorures au cours des premières mesures ensuite les sulfates dominant et s'accompagnent de sodium. Le rapport Sr^{2+}/Ca^{2+} , reste important et atteint des valeurs supérieures à 3 ‰.

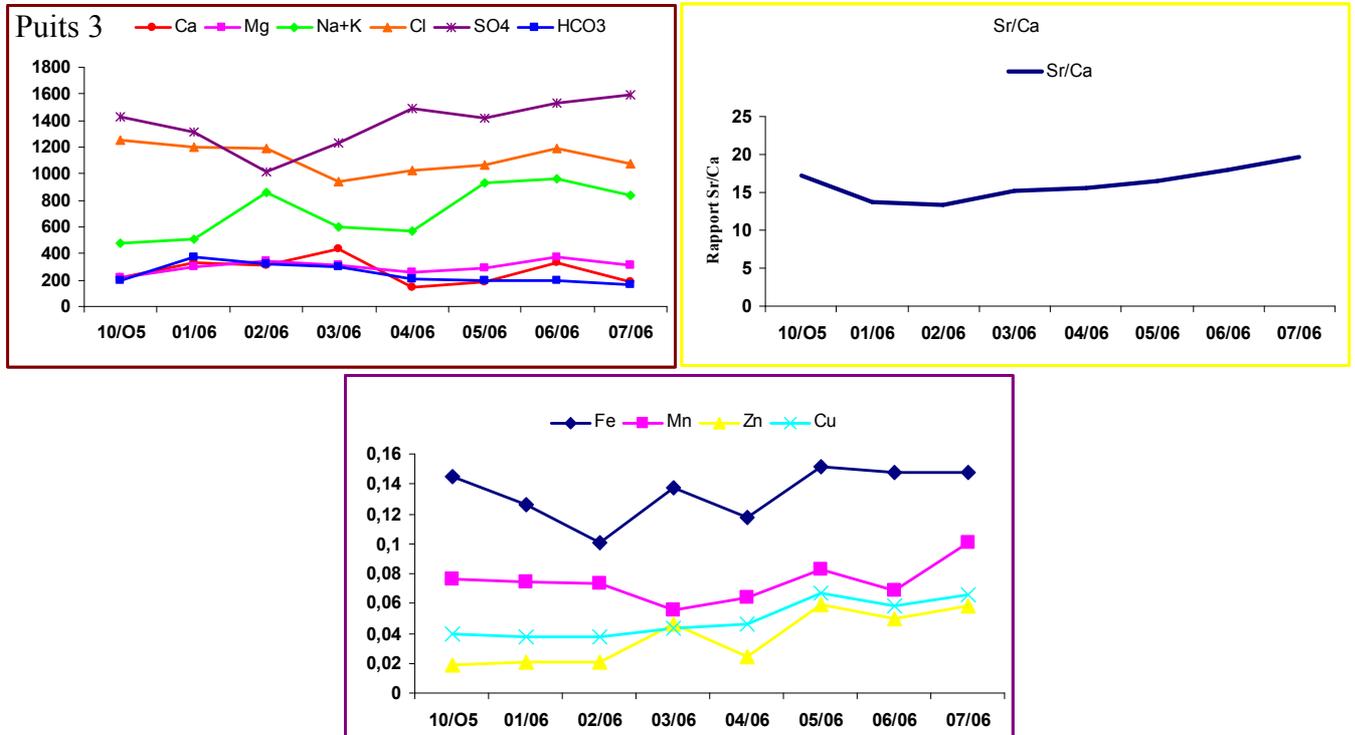


Fig. 74. Evolution du chimisme au puits 3

Les métaux lourds présentent des concentrations peu importantes, caractérisant ainsi un piégeage par les sédiments (fig. 74).

V. 8. Conclusion :

Cette interprétation amène aux constatations suivantes :

- les formations évaporitiques de djebel Djebissa alimente les puits et les cours d'eau, cette situation a été confirmée par les valeurs du rapport Sr^{2+}/Ca^{2+} , dont la valeur est toujours supérieure à 3‰. Cette alimentation se fait par lessivage par ces formations.
- Les formations calcaires du mæstrichtiens alimentent les oueds et la nappe dans le secteur dans le secteur de chabro. Cette relation est confirmée par la domination des bicarbonates et par les écoulements se faisant de la bordure vers le centre de la plaine.
- Un intérêt particulier a été accordé à l'étude des métaux lourds et on remarque que ces derniers sont importants au niveau des oueds et restent faibles au niveau des puits jouxtant les oueds, ce qui traduit un piégeage de ces métaux par les sédiments.

- Au niveau des terrils de la mine abandonnée le fer et le manganèse sont importants mais au-delà deviennent faibles, ce qui traduit une pollution très localisée.

V. 9. Conclusion du chapitre :

L'étude des ACP montre que :

Les chlorures, les sulfates, le sodium présentent des concentrations importantes, ce qui traduit la salinité des puits situés à l'Est et à un degré moindre au centre de la plaine.

Ceci peut être expliqué par le lessivage des sels pendant la période des hautes eaux et à l'évaporation pour les basses eaux. Les bicarbonates présentent des teneurs importantes montrant ainsi l'effet des apports qui se font par les bordures calcaires.

L'application du krigeage ordinaire pour l'estimation de la conductivité électrique des eaux souterraines de la région de Tébessa a montré une variabilité locale et régionale importante.

La cartographie par ce type de krigeage a permis de faire une description de la distribution spatiale avec une sous-estimation des valeurs élevées et excessivement élevées.

Cette méthode a montré l'état de salinité des eaux de la nappe.

L'indice de saturation montre une sur saturation vis-à-vis des indices mettant en évidence l'influence des formations carbonatées caractérisées par la calcite et la dolomite, par opposition on note pour tous les points une sous saturation vis-à-vis des indices accélérant le processus de salinité qui sont l'anhydrite et le gypse. Cette augmentation de la salinité se fait par dilution.

Le rapport Sr^{2+}/Ca^{2+} présente des valeurs importantes caractérisant ainsi une alimentation par les formations gypsifère. Les zones éloignées particulièrement la région de Ain Chabro se caractérise par une faible valeur.

Les formations calcaires du mæstrichtiens alimentent les oueds et la nappe dans le secteur dans le secteur de Chabro. Cette relation est confirmée par la domination des bicarbonates et par les écoulements se faisant de la bordure vers le centre de la plaine.

Un intérêt particulier a été accordé à l'étude des métaux lourds et on remarque que ces derniers sont importants au niveau des oueds et restent faibles au niveau des puits jouxtant les oueds, ce qui traduit un piégeage de ces métaux par les sédiments.

Au niveau des terrils de la mine abandonnée les fer et le manganèse sont importants mais au-delà deviennent faibles, ce qui traduit une pollution très localisée.

CHAPITRE VI : MODELE

VI. Réseaux de neurones artificiels

VI.1. Présentation de la méthode neuronale

Les réseaux de neurones artificiels (**RNA** ou **ANN**) constituent une nouvelle approche de modélisation des systèmes complexes, particulièrement utile lorsque ces systèmes sont difficiles à modéliser à l'aide des méthodes statistiques classiques. Les réseaux de neurones artificiels sont issus des premiers travaux réalisés dans le domaine de l'intelligence artificielle pour modéliser le fonctionnement du cerveau humain (McCulloch et Pitts, 1943) en se basant principalement sur le concept des neurones. Il s'agit d'un modèle empirique non linéaire (Fortin et *al.*, 1997). Il se compose d'éléments de traitement interconnectés (neurones) travaillant conjointement pour résoudre un problème spécifique. R. Hecht Nielsen 1990 donne la définition suivante : un réseau de neurones est un système de calcul composé d'éléments de traitement simples fortement interconnectés, qui traitent l'information par leur changement d'état dynamique en réponse à une entrée externe.

VI.2. Connexions entre les neurones

Les réseaux de neurones sont organisés en couches ; ces couches se composent d'un certain nombre de neurones interconnectés qui contiennent une fonction d'activation. Des entrées (X_1, X_i, \dots, X_n) sont présentées au réseau par l'intermédiaire de la couche d'entrée, qui les communique aux couches cachées où le traitement s'effectue en utilisant des connexions pondérées.

Puis, les couches cachées transmettent la réponse à la couche de sortie (S). Les connexions entre les neurones se font par des poids (W_1, W_i, \dots, W_n) (Fig. 75).

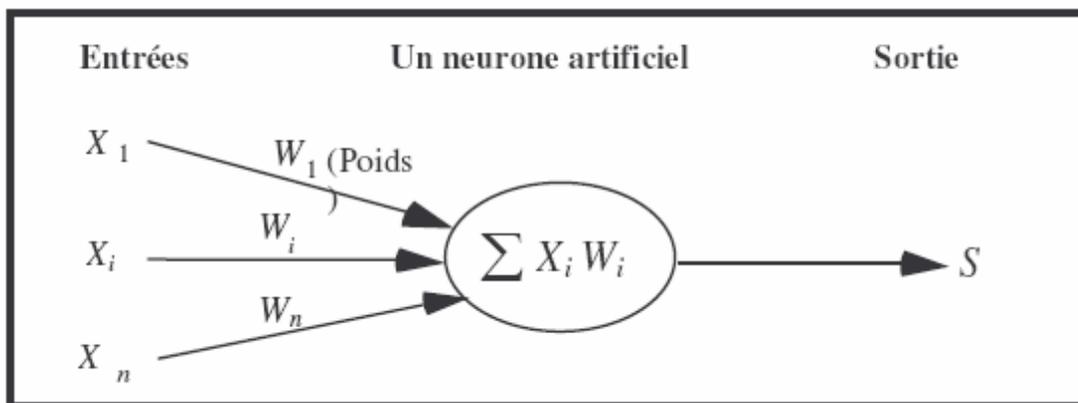
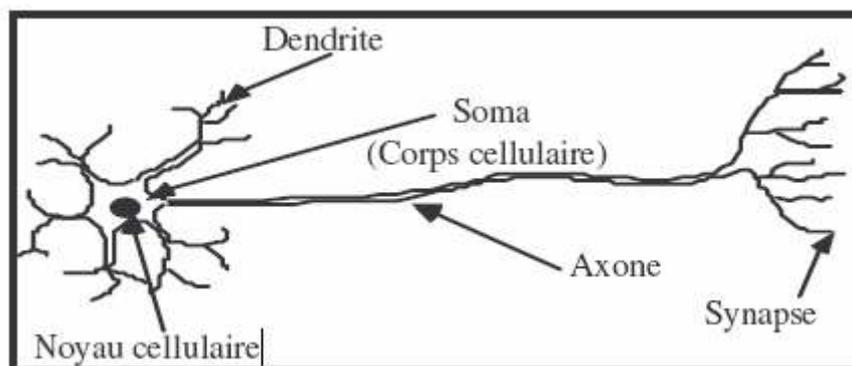


Fig. 75. Schéma d'un neurone artificiel

Le fonctionnement d'un neurone artificiel s'inspire du fonctionnement schématisé du neurone humain (Fig. 76).



Le tableau suivant entre les neurones artificiels (Tab 28).

Fig. 76. Schéma d'un neurone biologique résume l'analogie biologiques et

Neurone biologique	Neurone artificiel
Soma	Neurone
Dendrite	Entrée (Input)
Axone	Sortie (Output)
Synapse	Poids

Tab. 28: Analogie entre les neurones biologiques et artificiels

Il existe une grande variété d'agencements possibles de neurones artificiels (Lippmann, 1987), mais le type de réseau le plus utilisé est le Perceptron Multicouche (PMC). Ce réseau comporte une ou plusieurs couches de neurones artificiels pour capter les entrées, une ou plusieurs couches cachées (MLP ou MultiLayers Perceptron) et une couche de neurones artificiels pour émettre les sorties du modèle. Chaque couche contient des unités de calcul (neurones) connectées à d'autres neurones par la voie des poids (W_{ij} et W_{jk}) [Najjar and Zhang (2000), Najjar and Ali (1998a) & (1998b)].

La fonction de transfert ou d'activation de non linéarité peut avoir plusieurs formes différentes. La fonction la plus utilisée est en général une somme pondérée de type sigmoïde car il s'agit d'une fonction continue, non décroissante, différentiable et bornée, mais aussi elle introduit de la non linéarité et dérivée d'elle-même.

A chaque connexion entre les neurones de deux couches successives est associé un poids modifiable au cours de l'apprentissage en fonction des jeux de données en entrée et en sortie.

Si les états des neurones de la couche d'entrée sont déterminés par les variables à l'entrée du réseau, les autres neurones (de la couche cachée et de sortie) doivent évaluer l'intensité de la simulation en provenance des neurones de la couche précédente par la relation suivante :

$$S_j = \sum_{i=1}^n X_i W_{ij} + b_j$$

Avec S_j : somme des poids entre les entrées du j ème neurone de la couche cachée ;
 X_i : valeur de sortie du i ème neurone de couche précédente ; W_{ij} : poids synaptique du neurone i de la couche d'entrée au neurone j de la couche cachée, b_j est le biais ou le seuil d'activation du neurone j .

La réponse des neurones est une fonction d'activation non linéaire de type sigmoïde qui est défini par la formule suivante :

$$f(s_j) = \frac{1}{1 + e^{-s_j}}$$

$f(s_j)$ est pratiquement linéaire entre 0 et 1.

Les valeurs des variables d'entrée ont été normalisées entre [0, 1] par le modèle selon l'équation suivante :

$$\overline{X} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$$

Avec : X est la valeur de la variable d'entrée, X_{\min} est sa valeur minimale, X_{\max} est sa valeur maximale et \overline{X} est la valeur de la variable normalisée.

VI. 3. Application du modèle de RNA (ou ANN):

Les réseaux de neurones artificiels, connus généralement sous l'acronyme **ANN** (**Artificial Neural Network**), sont des modèles mathématiques non linéaires de type "boîte noire" capables d'établir des relations entre les entrées et les sorties d'un système.

Les performances de ces derniers dans la modélisation non linéaire ont été prouvées dans plusieurs domaines de l'ingénierie et de la science.

VI. 3. 1. Architecture du réseau

L'architecture du réseau précise le nombre de couches qui le composent et le nombre de neurones dans chaque couche, ainsi que le poids des connexions. Un réseau de neurones artificiels est organisé en couches, chacune de ces couches comportant plusieurs neurones. Chacun de ces neurones qui se présente comme unité de calcul autonome, est relié à la totalité ou à certains neurones de la ou des couches précédentes par l'imposition de poids.

VI. 3. 2. Choix des critères d'exécution:

Les données des paramètres de qualité des eaux souterraines analysés au laboratoire du centre des études et de recherches appliquées au développement de Pherphos, au laboratoire de l'université de Lille en France, ainsi qu'au laboratoire des sciences de la terre de l'université Badji Mokhtar Annaba pour l'an 2006 ont été employées pour créer le modèle du RNA en utilisant le logiciel STATISTICA neural network version 4.0.

Les paramètres de qualité de l'eau incluent : La concentration en ion de calcium (Ca^{2+}), de magnésium (Mg^{2+}), de sodium (Na^+), de potassium (K^+), de chlorure (Cl^-), de sulfate (SO_4^{2-}), de bicarbonate (HCO_3^-), de Nitrate (NO_3^-), d'hydrogène (pH), de minéralisation (M), et du rapport strontium sur calcium ($\text{Sr}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$). Ces paramètres qui représentent la qualité de l'eau sont considérés comme variables d'entrée tandis que la variable de rendement de cible (sortie) est la conductivité électrique (CE).

Les paramètres statistiques utilisés dans ce travail sont : L'erreur moyenne des carrés RMSE (Root Mean Square Error), et le coefficient de détermination R^2 . Ces paramètres sont donnés par les relations suivantes :

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(CE_i - \hat{CE}_i)^2}{N}}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (CE_i - \hat{CE}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (CE_i - \overline{CE})^2}$$

Où CE_i est la valeur mesurée de la conductivité électrique, \hat{CE}_i est la conductivité calculée par le modèle, \overline{CE} est la moyenne de la conductivité mesurée et N le nombre de données de l'ensemble de calage.

R^2 montre la variation de la valeur de la conductivité électrique calculée ou estimée par le modèle de la régression linéaire.

En outre, le RMSE a été employé pour comparer l'exécution de MLP à d'autres types communs du RNA comprenant le RBF, le GRNN et linéaire.

VI. 4. Création du modèle

Dans ce travail, un réseau de Perceptron multicouche a été choisi comme modèle du système où le réseau traite un vecteur d'entrée se composant des variables comprenant Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3 , PH, M, et Sr^{2+}/Ca^{2+} . Ce vecteur d'entrée produit d'un vecteur de rendement (sortie) qui est la conductivité électrique (CE). Le réseau de MLP peut être représenté par la forme compacte suivante :

$$\{CE\} = ANN [Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, K^+, Cl^-, SO_4^{2-}, HCO_3^-, NO_3, PH, M, \text{Minéralisation}, Sr^{2+}/Ca^{2+}].$$

Un schéma de ce réseau est donné sur la figure 77. Il montre une structure typique avec des signaux qui découlent des noeuds d'entrée, traversant les noeuds cachés, atteignant par la suite le noeud de sortie. La couche d'entrée n'est pas vraiment neurale: ces noeuds servent simplement à présenter les valeurs normalisées des variables d'entrée à la couche cachée voisine sans n'importe quelle transformation. Les noeuds des différentes couches; cachées, de sortie et même d'entrée sont reliés entre eux.

Cependant, les noeuds dans chaque couche ne sont pas reliés.

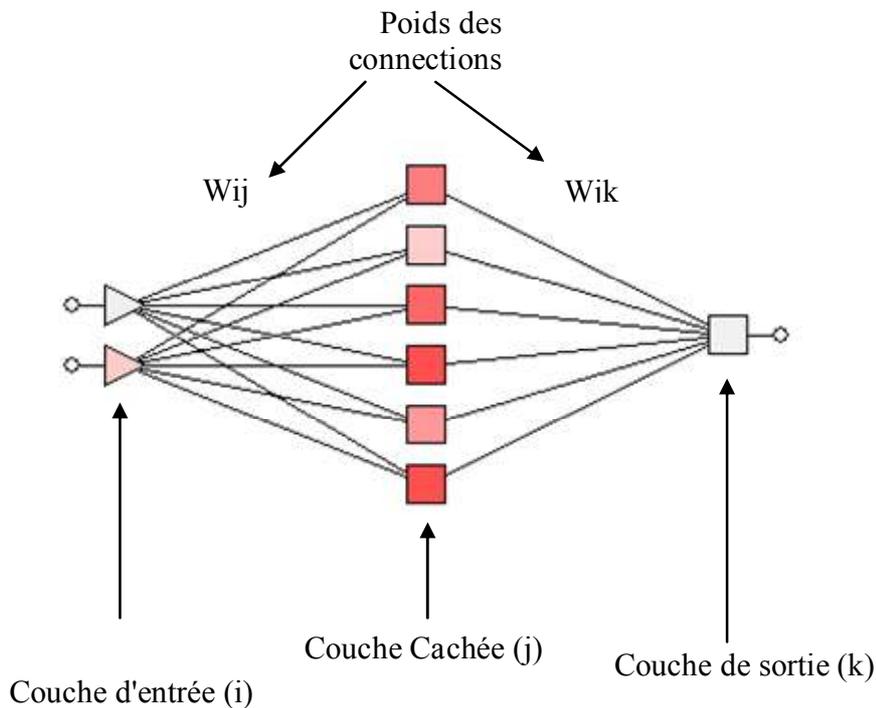


Fig. 77. Illustration du réseau à 3 couches (MLP)

Un poids numérique est associé à chacun de raccordements d'entre-noeud. Le poids de W_{ij} représente la force des raccordements des noeuds entre l'entrée et la couche cachée tandis que W_{jk} représente la force des raccordements des noeuds entre la couche cachée et de sortie. Chaque noeud caché (j) reçoit des signaux de chaque noeud d'entrée (i) qui porte des valeurs standard (X_i) d'une variable d'entrée.

Chaque signal vient à travers une connection à un poids (W_{ij}).

Le signal entrant net reçu par un noeud caché (Net_j) est la somme de poids des signaux entrants, X_i , et les poids correspondants (W_{ij}), plus une constante reflétant la valeur seuil de noeud (TH_j).

$$Net_j = \sum_{i=1}^n \overline{X_i} W_{ij} + TH_j$$

Le signal net dans un noeud caché (Net_j) est transféré de sa part à un noeud de sortie (O_j) en utilisant une fonction de transfert non linéaire (f) de type sigmoïde, donné par l'équation suivante:

$$O_j = f(Net) = \frac{1}{1 + e^{-Net_j}}$$

O_j passe comme signal au noeud de sortie (k).

Les signaux nets d'un noeud de sortie (Net_k)

$$Net_k = \sum_{j=1}^n O_j W_{jk} + TH_k$$

Les signaux nets d'un noeud de sortie (Net_k) sont transformés en utilisant une fonction de type sigmoïde à un résultat standard ou de mesure (O_k) qui est :

$$\overline{OK} = f(Net_k) = \frac{1}{1 + e^{-Net_k}}$$

\overline{OK} : standard pour produire le résultat de sortie

$$OK = \overline{OK}(O_{\max}(k) - O_{\min}(k) + O_{\min}(k))$$

La fonction sigmoïde devrait être continue, différentiable et limitée entre un intervalle de $[0, 1]$. Riad et al (2004). La figure 78 montre le graphique de la fonction sigmoïde. L'erreur calculée entre la valeur réelle observée et la valeur calculée de la même variable est propagée par le réseau et les poids sont ajustés. Les processus cycliques de l'alimentation et de la propagation d'erreur sont répétés jusqu'à ce que l'erreur de vérification soit minimale (Liu et al, 2003).

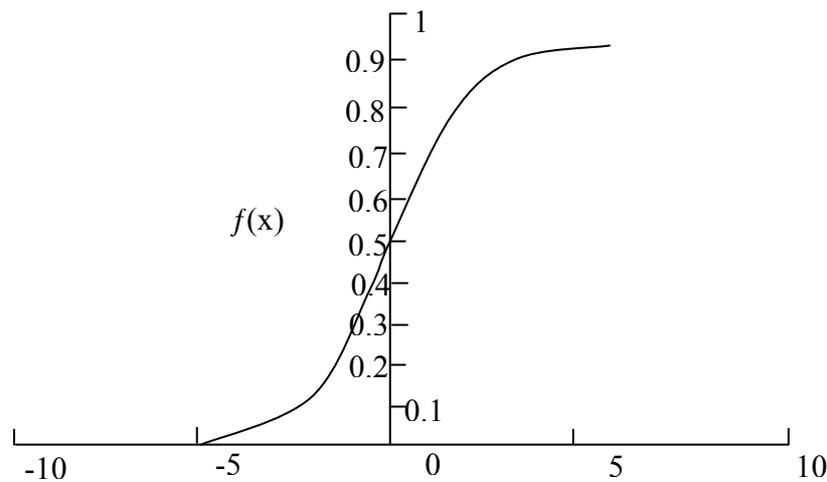


Fig. 78. Fonction de transfert sigmoïde

VI. 5. Calibrage et vérification du modèle:

La vérification a été employée pendant l'arrêt des critères de détermination du nombre optimal de noeuds de la couche cachée (Braddock, Kremmer et Sanzogni, 1997) tout en évitant l'excès dans l'apprentissage (Campolo, M., Andreussi, P., & Soldati, A. (1999). La vérification en travers est une technique utilisée généralement en modèles d'ANN, elle a prouvé un impact significatif sur la division des données (Bruden, Brereton et Walsh, 1997). Cette technique vise à former le réseau en utilisant un ensemble de données, et à comparer la performance par rapport à un modèle vérifié non utilisé dans l'apprentissage. Ceci examine la capacité du réseau de généraliser correctement sur l'ensemble des données en observant si l'erreur de vérification est raisonnablement basse.

L'apprentissage sera arrêté quand l'erreur de vérification commence à augmenter (Lallahem et Mania, 2002). Le Modèle a été divisé en sous-ensembles, un pour le calibrage (apprentissage), un pour la vérification en travers du réseau et un pour l'essai (validation).

Cinquante pour cent des données ont été choisies pour la formation, 25% pour la vérification et les 25% restant pour examiner la validité de la prévision de réseau.

VI. 5. 1. Détermination des modèles d'entrées

Les modèles d'ANN ont la capacité de déterminer quelles entrées sont critiques. Ils sont utiles principalement pour des problèmes complexes où le nombre d'entrées est grand où aucune connaissance *a priori* n'est disponible pour déterminer les entrées appropriées (Lachtermacher et Fuller, 1994).

Dans ce travail, une analyse de sensibilité a été effectuée pour identifier l'importance des variables d'entrée. Ceci a indiqué quelles variables sont considérées les plus utiles pour être maintenues par le modèle RNA.

Les modèles RNA ont également la capacité d'éliminer les variables de basse sensibilité (c'est-à-dire qui n'ont aucun effet significatif sur l'exactitude du modèle).

VI. 5. 1. 1. Résultats et discussion :

Les types de réseaux considérés sont : MLP (3 et 4 couches), RBF, GRNN, et linéaire. Pendant l'analyse, 697 réseaux ont été examinés. Le meilleur modèle optimal du RNA trouvé est le MLP (3 couches) avec 6 noeuds cachés (figure 3). L'erreur minimale est de 0.3125517 comparé aux autres types de réseaux RNA (tableau 29).

Type de réseau	Erreur (RMS)
GRNN	3.312591
RBF	3.085885
Linear	2.149379
MLP (4 couches)	1.169872
MLP (3 couches)	0.3125517

Tab. 29. L'erreur RMS dans différents réseaux de neurone

Le modèle a une excellente performance dans la vérification avec un rapport de régression de 0.016661 et un coefficient de corrélation plus haut que 99% pour l'apprentissage, la vérification et la validation (tableau 29); il montre un excellent accord entre la conductivité observée et simulée (Fig. 79).

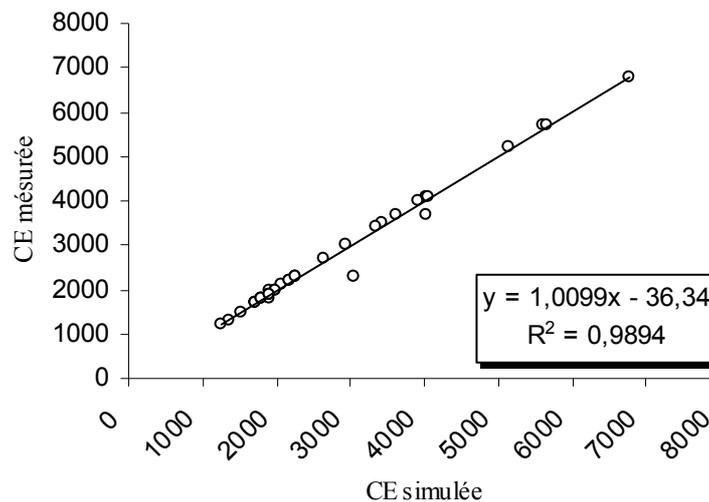


Fig. 79. Corrélation entre la conductivité simulée et mesurée

	Tr. CE	Ve.CE	Te.CE
Data Mean	3046.842	2511.111	2251.111
Data S.D	1433.147	1712.779	612.7896
Error Mean	9.065143	-5.944085	24.99978
Error S.D	183.7065	28.53741	117.1496
Abs E. Mean	82.72142	18.07498	65.60018
S.D. Ratio	0.128184	0.01666	0.1911742
Correlation	0.9920684	0.9999169	0.9933773

Tab. 30. Paramètres statistiques de régression

La figure 80 montre l'erreur dans le modèle d'apprentissage pour les cas indépendants. Elle représente graphiquement l'erreur de RMS du réseau pendant les itérations de l'apprentissage. En outre, elle trace les lignes séparées pour l'erreur de RMS sur les sous-ensembles de formation et de vérification des cas indépendants après la dernière itération de l'apprentissage. Le graphique indique que la gamme de l'erreur de RMS pour l'apprentissage et la vérification est petite.

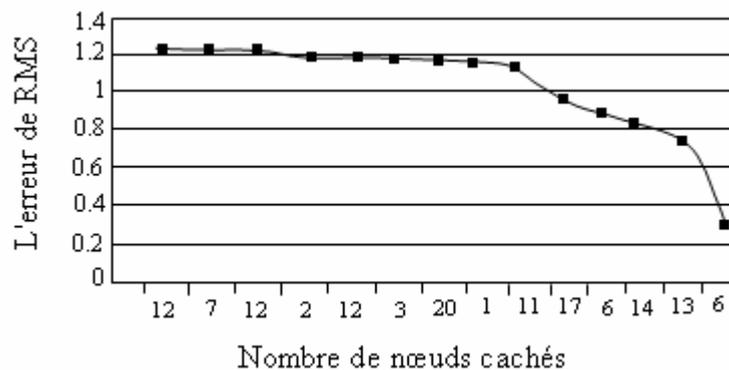


Fig. 80. Erreur RMS avec nombre de nœuds cachés

L'analyse de sensibilité du RNA des variables de qualité de l'eau en phases de l'apprentissage et de vérification indique que la minéralisation (M) et le rapport strontium sur calcium (Sr^{2+}/Ca^{2+}) sont les facteurs les plus importants influençant la conductivité électrique dans les eaux souterraines.

VI. 6. Conclusions:

Les résultats obtenus dans cette étude indiquent que ce sont les réseaux de MLP qui s'avèrent être la meilleure structure du RNA pour modéliser et prévoir l'interaction des éléments influençant la qualité des eaux souterraines.

L'originalité de ce travail de modélisation réside dans l'utilisation des réseaux neuronaux (approche connexionniste) qui sont fondés sur des modèles qui tentent d'établir des relations entre les paramètres d'entrée et de sortie par interconnexions des neurones.

L'intérêt de ces modèles réside dans leur capacité d'apprendre des relations complexes à partir de données numériques. C'est pourquoi le choix et l'application d'un modèle neuronal demeure un domaine de recherche très actif contrairement aux modèles stochastiques classiques.

Par comparaison avec d'autres modèles plus classiques, les résultats obtenus indiquent que les modèles connexionnistes possèdent un meilleur pouvoir prévisionnel.

Le recours à ces méthodes neuronales plus complexes constitue donc une alternative pleinement justifiée et privilégiée dans le domaine de la gestion et de la qualité des eaux. Le choix judicieux du vecteur d'entrée et de la taille du réseau (ou nombre total de couches et de neurones dans la couche cachée du réseau) constituent des étapes difficiles dans la définition de l'architecture d'un RNA, mais le choix de la structure du réseau (type d'interconnexion entre les couches de neurones) reste plus facile à effectuer parce qu'il n'existe que deux formes principales de structure : la forme dite "feedforward" et la forme récursive avec "feedback".

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail a été réalisé en zone semi-aride, il concerne la région de Tébessa à l'extrême est Algérien. Il s'est donné pour objectif l'étude d'impact des formations triasiques sur les eaux de la plaine de Tébessa-Bekkaria.

Un aperçu géologique nous a permis de connaître les différentes formations qui constituent notre région. Nous pouvons retenir quelques niveaux qui sont d'une perméabilité en grand, ce sont les calcaires du Maestrichtien, Turonien, et de l'Eocène. Nous rappelons que ces formations bordent la plaine de Tébessa aussi bien au Nord qu'au Sud.

A l'intérieur de la plaine on a des formations alluvionnaires, qui sont d'une perméabilité en petit, qui se constituent à partir des sédiments de la série plio-quaternaire ; ces formations bénéficient d'un granoclassement de la bordure vers l'axe de la plaine (en bordure se sont des gros cailloutis, voire des galets calcaires et au centre des limons récents à faible perméabilité). L'étude, qui se rapporte à Djebel Djebissa, montre qu'il s'agit en grande partie de formations argilo-grès-calcaire à gypse très abondant, d'âge triasique, en contact tectonique avec des formations carbonatées essentiellement dolomitiques de l'Aptien-Albien non différencié. L'abondance de ce matériel évaporitique, témoigne d'une grande activité diapirique et une ascension intense.

La partie géophysique montre l'existence de différentes formations aquifères : dans la zone d'étude affleurent les formations alluvionnaires d'âge quaternaire qui constituent le matériel de remplissage du bassin. Ces formations sont d'une porosité d'interstice ; leurs résistivités varient de 20 à 100 Ω m. Le premier niveau supposé être aquifère correspondant à la nappe phréatique est constitué de matériel, à porosité d'interstice, se déposant avec quelques discontinuités et des épaisseurs variables. Les résistivités varient de 5 à 100 Ω m. On remarque que la résistivité diminue des bordures vers le centre de la plaine. En tenant compte de la nature du matériel de remplissage et de sa relation avec la répartition de la résistivité, on peut juger que la zone étudiée est caractérisée par une hétérogénéité du matériel aquifère.

L'aperçu climatique de la région de Tébessa montre que le climat qui y règne est semi-aride de type continental (hiver froid et été chaud). La pluviométrie ne dépasse pas les 350 mm/an. L'observation de l'historique des précipitations sur 100 ans a montré une domination des années sèches, ce qui se répercute sur la recharge de la nappe.

L'étude piézométrique montre que l'écoulement est dirigé de l'Est vers l'Ouest, elle a, également, mis en évidence des apports latéraux par les formations calcaires. Des échanges hydrauliques caractérisés par une relation mixte entre l'Oued Kebir et la nappe. Par ailleurs, les changements de faciès mis en évidence par l'étude géophysique, provoquant la discontinuité des niveaux P1, P2 & P3, d'où résulte un débordement de la nappe dans le secteur de Tébessa, démontré également par (Malle M). Les données de forage disponible ont permis le classement des zones de Bekkaria, Tébessa et Ain Chabro selon leurs caractéristiques hydrodynamiques.

L'étude de la qualité des eaux d'après les différents résultats statistiques montre que les variables qui interviennent le plus dans la dégradation de cette qualité sont tous de nature géologique. L'analyse statistique a donné de forte corrélation entre ces variables prises deux à deux.

L'analyse en composantes principales montre que :

Les chlorures, les sulfates, le sodium présentent des concentrations importantes, ce qui traduit la salinité des puits situés à l'Est et à un degré moindre au centre de la plaine.

Ceci peut être expliqué par le lessivage des sels pendant la période des hautes eaux et à l'évaporation en période des basses eaux.

Les bicarbonates présentent des teneurs importantes montrant ainsi l'effet des apports qui se font par les bordures calcaires.

L'estimation de la conductivité électrique des eaux souterraines, déterminée par l'application du krigeage ordinaire, a montré que ce paramètre présente une variabilité locale et régionale importantes.

Cette méthode a montré l'état de salinité des eaux de la nappe.

Les valeurs importantes du rapport Sr^{2+}/Ca^{2+} confirment l'influence des formations évaporitiques sur la qualité des eaux des puits et des cours d'eaux.

Les formations calcaires du Mæstrichtien alimentent les oueds et la nappe dans le secteur de Chabro. Cette relation est confirmée par la domination des bicarbonates et par les écoulements se faisant de la bordure vers le centre de la plaine.

L'étude d'impact de la mine de Dj. Djebissa sur la qualité des eaux montre que la teneur en métaux lourds est importante au niveau des oueds et reste faible au niveau des puits jouxtant les oueds, ce qui traduit un piégeage de ces métaux par les sédiments.

Au niveau des terrils de la mine abandonnée, le fer et le manganèse sont importants, mais au-delà deviennent faibles, ce qui traduit une pollution très localisée.

Les résultats obtenus d'après le modèle appliqué indiquent que la minéralisation (M) et le rapport (Sr^{2+}/Ca^{2+}) sont les facteurs les plus importants influençant la conductivité électrique dans les eaux souterraines.

Références bibliographiques

- Aoudjehane M., Bouzenoune A, Rouvier H. et Thibiéroz J. (1992):** Halocinèse et dispositifs d'extrusions du Trias dans l'Atlas saharien oriental (NE algérien). *Géol. Médit.*, Marseille, XIX, 273-287.
- Blés J. L. (1969):** Contribution à l'étude des déformations cassantes de la feuille de Morsott (SE Constantinois – Algérie). Les microfracturations et leurs relations avec les failles et les plis. Publications du Service Géologique de l'Algérie, (Série N° 11), Bulletin N° 39, pp. 7-17.
- Blés J. L. et Fleury (1970):** Carte géologique 1/50 000 Morsott et notice explicative. Publ. Serv. Geol. Algérie.
- Braddock, R.D., Kremmer, M.L. and Sanzogni, L.: 1997,** Feed-forward artificial neural network model for forecasting rainfall run-off. Proceedings international congress on modelling and simulation (Modsim). The modelling and simulation society of Australia Inc., Hobart, Australia, pp. 1653-1658.
- Burden, F.R. Brereton, R.G. and Walsh, P.T. : 1997 ,** Cross- validatory selection of test and validation sets in multivariate calibration and neural networks as applied to spectroscopy. *Analy.* **122 (10)**, 1015-1022.
- Chevenine A., Popov Y., Douha Dj. et Benzeroual M. (1989):** Rapport sur les résultats de l'étude géologique complémentaire des feuilles 124 (Oued Kebarite), 125 (Ouenza), 150 (El Ouinet) et 151 (Boukhadra) pour la préparation à l'édition des cartes géologiques au 1/50.000. Partie 1, texte (1987-1988) O.R.G.M. Algérie (Rapport inédit).
- Beghoul M. (1974):** Etude géologique de la région des Hamimat (SE Constantinois). Application à la recherche pétrolière des confins algéro-tunisiens. Thèse Doct. Ing., Univ. Pierre et Marie Curie, Paris VI, France. 140p. (inédit).
- Bouchagoura et al. (1996)** Synthèse hydrogéologique du système alluvial Hammamet-Tébessa- Bekkaria, Mémoire d'Ing. Univers. Annaba, 84p.
- Boukouss.Z (2000)** Vulnérabilité de la nappe alluviale Tébessa- Morsott par la méthode drastic Mémoire d'Ing. (C.U Tébessa).
- Bouzenoune A. (1993):** Minéralisations périadiapiriques de l'Aptien calcaire: les carbonates de fer du gisement hématitique de l'Ouenza (Algérie Orientale). Thèse de Doctorat, Université Paris VI, 209 p.
- Burollet P. F. (1973):** importance des facteurs salifères dans la tectonique tunisienne. *Ann. Min. Géol. Tunis*, n°26, pp. 111-120.
- Campolo, M., Andreussi, P., & Soldati, A. (1999).** River flood forecasting with a neural network model. *Water Resources Research* 35 : 1191-1197.

- Castany G. (1963)** Traité pratique des eaux souterraines. Dunod Edit. Paris, 641p.
- Castany G., 1982.** Principes et méthodes de l'hydrogéologie, Ed. DUMOND, Paris.
- Chikhi-Aouimeur F. (1980):** les Rudistes de l'Aptien supérieur de djebel Ouenza (algérie NE). Paléontologie, Contexte stratigraphique et paléogéographie. Thèse 3ème cycle, USTHB, Alger, 114 p.
- David L. (1956):** Etude géologique des monts de la haute Medjerda. Thèse Sci. Paris. Publ. Serv. Carte Géol. Algérie, N.S. Bull, n°11, 304p.
- 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, N.E. algérien. Thèse de Doc. De l'Univ. De Franche-Comté, 200 p.
- Diday E. ; Lemaire J. ; Pouget J. ; Testu M., 1982** Eléments d'analyse de données. Ed. BORDAS. 463p
- Djabri L. (1987):** Contribution à l'étude hydrogéologique de la nappe alluviale de la plaine d'effondrement de Tébessa - Essai de modélisation - Thèse de Doc. Ing. de l'Univ. des Sci. et Tech. de Franche-Comté - Besançon - 176 pages.
- Djabri L. (1996):** Mécanismes de la pollution et vulnérabilité des eaux de la Seybouse - Origines géologiques, industrielles, agricoles et urbaines - Doctorat ès-Sciences de l'Université de Annaba - 280 pages.
- Djabri L., Hani A., ManiA J. & Mudry J. (2001):** Mise en évidence du processus de salinité des eaux superficielles - Vérification par les ACP dans le secteur Annaba-Boucheouf-Guelma. Tribune de l'Eau - Vol. 54 - N°610 - pp. 29-43.
- Djenane.A, Messai. L (1997)** Synthèse hydrochimique et vulnérabilité à la pollution (région de Khenchela). Mémoire d'Ing. (C.U Tébessa) .
- Douaoui A., 1993.** Variabilité spatiale de quelques propriétés physico-chimiques des sols du moyen Chéouf, incidences cartographique. Thèse Magist., INA Alger. PP 22 97
- Durozoy G. (1956):** Carte géologique de Tébessa. Feuille 206.
- Dubourdiou G. (1956):** Etude géologique de la région de l'Ouenza (confins algéro-tunisiens). Thèse des Sciences, Paris, Publications du Service de la Carte Géologique de l'Algérie, Bulletin N° 10, Vol. 1, 659 p.
- Fortin, V., Ouarda, T., Rasmussen, T.P. et Bobée, B., (1997).** Revue bibliographique des méthodes de prévision des débits. Revue des Sciences de l'Eau, 4 : pp. 461-487.
- Gaudin G., 1982.** Mathématique et informatique, analyse en composantes principales. INA PG. 43P.

Gouaidia. L (2000) Approche hydrochimique d'une nappe en zone semi-aride cas de la nappe alluviale de la plaine de tébessa extrême Nord-est Algérien. mémoire de magistère Université de Annaba.

Goulard M. ; Voltz M. : Monestitez P., 1987. Comparaison d'approches multivariées pour l'étude de la variabilité spatiale des sols. *Agronomie*, 7 (9).

Hecht-Nielsen, R., (1990). *Neuro-computing*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, USA.

Solution for a distributed hydrological model and applications, pp. 89-93.

Hsissou Y. (1997): Dynamique et salinité de la nappe côtière d'agadir (Maroc): Influence du biseau salé et des faciès évaporitiques. *Hydrochemistry*, IAHS Publ., N° 244.

Jalala, S. and Mania, J. : 2004, Artificial neural networks for defining the water quality determinants of groundwater abstraction in the Middle East. *Wat. Policy.*(submitted).

Kowalski W.M. et Hamimed M. (2000): Diapirisme polyphasé ou glacier de sel albien? Dilemme du matériel triasique des confins algéro-tunisiens. *Bulletin du Service Géologique de l'Algérie*. Vol.11, n°1 pp.29-60, 12 fig.,2000.

Laborde, J.P., (1982). *Eléments d'hydrologie de surface*. Tome 2 : Critique et analyse statistique des

Lachtermacher, G., & Fuller, J.D., (1994). Backpropagation in hydrological time series forecasting.

In : K. W. Hipel, A.I. MacLeod, U.S. Panu & V. P. Singh (eds), *Stochastic and statistical methods in hydrology and environmental engineering*, Vol. 3, Time series analysis in hydrology and environmental engineering : 229-242.

Lallehem, S. & Mania, J., (2002). A linear and non-linear rainfall-runoff model using neural network

technique : Example in fractured porous media. *Journal of Mathematical and Computer Modelling*.

N°1, Vol. 55, N° 615.

Lippmann, R.P., (1987). An Introduction to Computing with Neural Nets. *IEEE ASSP Magazine*,

April 1987, 4 (2), 4-22.

données hydrologiques. *Ecol. Nat. Sup. de Géol. Appli/ Inst. Nat. Polytech. De Lorraine*, 95 p.

Liu J., Savenije H.H.G. and Xu J. : 2003, Forecast of water demand in Weinan City in China using WDF-ANN model. *phys. and chemist. of the Earth* **28**, 219-224.

Madre M. (1969): Contribution à la l'étude géologique et métallogénique du djebel Ouenza (Est Algérien). Thèse de 3^{ème} Cycle, Université de Paris, 90 p.

MATERON G., 1965. Les variables régionalisées et leurs estimations. Ed Masson, Paris. 305 P

- Mahtali. C et al (1997)** Approche hydrogéologique de la nappe alluviale de la plaine d'effondrement de tébessa. Essai de bilan Mémoire d'Ing. (C.U Tébessa)
- Masse J. P. et Chikhi-Aouimeur F. (1982):** La plate forme carbonatée de l'Ouenza (Sud constantinois, Algérie). Organisation et dynamique durant l'Aptien supérieur. Géol. Méditer., Marseille, vol.IX, n°3, pp. 259-267.
- McCulloch, W.S. and Pitts, W., (1943).** A logical Calculus of the Ideas Imminent in Nervous Activity. Bulletin of Mathematical Biophysics, 5: pp. 115-133.
- Mokkadem. A (2000)** Qualité physico-chimique des eaux de l'oued cherf et leur aptitude à l'irrigation. mémoire d'Ing. (C.U Tébessa).
- Najjar, Y and Ali, H., (1998a).** On the Use of BPNN in Liquefaction Potential Assessment Tasks. Artificial Intelligence and Mathematical Methods in Pavement and Geomechanical Systems, Attoh-Okine (Editor): pp. 55-63.
- Najjar, Y. and Ali, H., (1998b).** CPT-Based Liquefaction Potential Assessment : A Neuronet Approach. ASCE Geotechnical Special Publication No.75, Dakoulas, P. et. Al. (Editors), (1) : pp. 542-553.
- Najjar, Y. and Zhang, X., (2000).** Characterizing the 3D Stress-Strain Behavior of sandy Soils: A Neuro-Mechanistic Approach. ASCE Geotechnical Special Publication No. 96, Filz, G. and Griffiths, D. (Editors) : pp. 43-57.
- Nedjari-Belahcène S. et Nedjari A. (1984):** Le Boukhadra: esquisse paléogéographique aptienne. 5^{ème} séminaire Nationale des Sciences de la Terre, Alger, pp. 102.
- O.R.G.M (1976) :** Rapport sur les résultats des travaux de recherche et d'estimation sur la fluorine de la fluorine dans les confins algéro-tunisiens Rapport. Inéd. (Jakentaieve).
- O.R.G.M (1992) :** Rapport informatif sur les derniers résultats des travaux réalisés sur les minéralisations péridiapiriques de l'Est algérien. Rapport. Inéd. (Makoudi- Mankov).
- O.R.G.M (1996) :** Rapport sur les résultats des travaux de prospections des polymétaux dans les confins algéro-tunisiens (El Ouasta, El Khanga, Dj. Ladjbel, Elma Labiod et Selsoul El Agab). Rapport. Inédit. (Bounames, A.).
- ORGM (2002) :** Projet de prospection des polymétaux dans le secteur de Dj. Harraba, Méridéf, Dj. Def, et Es Souabaa (Région de Ouenza-El Aouinet). Rapport annuel 2002 (**D. Bessekri et M. Benzeroual**)

- Othmanine A. (1987):** Les minéralisations en fluorine, barytine, Pb, Zn et fer sidéritique autour du fossé de Tebessa-Morsott (Algérie). Relation entre paléogéographie aptienne, diapirisme, structure et métallogénie. Thèse de 3ème Cycle, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, France, 221 p.
- Perthuisot V., (1994):** Structures et géométrie des diapirs maghrébins. Essai de synthèse. Mémoires du Service Géologique de l'Algérie. N°6., pp.153-159, 5 fig., 1994
- Philipeau G., 1992.** Comment interpréter les résultats d'une analyse en composantes principales? Collection STA-ITCF. 93P.
- Pohl W., Amouri M., Kolli O., Scheffer R. et Zachmann D. (1986):** A new genetic model for the North african metasomatic siderite deposits. Mineral Deposita, pp.228-233.
- Riad, S., Mania, J. et Bouchaou, L., (2003).** Variabilité hydroclimatique dans les bassins versants de du Haut Atlas de Marrakech (Maroc). Revue de Sécheresse. (sous press).
- Riad, S., 2003 :** Typologie et analyse hydrologique des eaux superficielles a partir de quelques bassins versants représentatifs du Maroc thèse de doctorat es sciences université des sciences et technologie de Lille.
- Rodier J. (1978)** Analyse de l'eau. Dunod Edition 430 pages.
- Rouabhia.A (2006)** Vulnérabilité et risques de pollution des eaux souterraines de la nappe des sables miocène de la plaine d'El MA EL ABIODE Nord-Est Algerien . thèse de doctorat es- science université de Annaba .197 pages.
- Rouvier H., Perthuisot V. et Mansouri A. (1985):** Pb-Zn Deposits and salt-bearing diapirs in Southern Europe and North Africa. Economic Geology, 80, pp. 666-687.
- Salmi-Laouar S., Laouar R., Boyce A.J., Zerdazi A. et Arrouche Y. (2004):** Rapport isotopiques du soufre de l'oxygène et du carbone dans le massif de Boujaber, NE algérien: Origine des minéralisations à Pb-Zn-Ba et Source des fluides. Bulletin du Service Géologique de l'Algérie Vol. 15, n°1, pp.3-25.
- Schoeller H.(1962)** Les eaux souterraines. Hydrologie dynamique et chimique. Recherche, exploitation et évaluation des ressources. Masson et Cie. Editions, 642 pages.
- Sheppard S.M.F., Charef A. et Bouhlef S. (1996):** Diapirs and Zn-Pb mineralisation: A general model based on tunisian (N. Africa) and Gulf Coast (U.S.A.) deposits. Soc. of Geol. Special Publication, n°4, pp. 230-243.
- Tesco-Visiterv, 1982** Régularisation de l'oued Kebir Ouest (étude hydrologique). 35 pages
- Thibiéroz J. et Madre M. (1976):** Le gisement de sidérite du Dj. Ouenza (Algérie) est contrôlé par un golf de mer aptienne. Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle de l'Afrique du nord, 67, 3-4, pp.

- Vila J. M. et Charrière A. (1993):** Découverte d'Albien calcaire et du Trias resédimenté au Dj. Boujaber (partie ouest Algérie); corrélation avec les forages et conséquences sur l'organisation du Crétacé inférieur des confins algéro-tunisiens. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, t.316, Série II, pp. 243-249.
- Vila, J.M. (1993) :** Livret-guide Trias'93. Société Alg. Sci. Géol. Centre de Recherche et Développement, Boumerdès (11-12 septembre 1993). 26.
- Vila J. M. (1994):** Mise au point et données nouvelles sur les terrains triasiques des confins algéro-tunisiens: Trias allochtone « glacier de sel » sous marins et vrais diapirs. Mémoire du Service Géologique de l'Algérie, N° 6, pp. 105-152.
- Voltz M., 1986.** Variabilité spatiale des propriétés physique en milieu alluvial : essai de cartographie quantitative des paramètres hydrodynamiques. Thèse Doc. Ing ENSAM. 198P.
- Walter C., 2002.** Cours de géostatistique. ENSA – INRA Rennes. 20 P.
- Webster R., 1985.** Quantitative spatial analysis of soil in the field in advecens. Soil Science Vol3, sparinger-verlag New York inc. 56 P.
- Zerdazi A. 1990.** Etude gravimétrique du môle d'Ain M'lila et de l'Atlas saharien septentrional. Thèse de Doctorat des Sciences, Faculté des Sciences, Université de Lausanne, 227p., inédit.

ANNEXE

Annexe

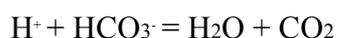
Analyses des éléments chimiques au niveau du laboratoire :

Trois méthodes d'analyses sont utilisées pour déterminer les concentrations des différents éléments chimiques.

Méthode volumétrique (Titrimétrie) :

Cette méthode a été utilisée pour le dosage des teneurs en bicarbonates, elle permet de déterminer la concentration d'une solution à partir du volume de solution que l'on met en présence.

Pour le dosage par titrimétrie des bicarbonates, on a travaillé sur un volume précis d'échantillon (50 ml) sur lequel on a fait agir une solution de concentration connue d'acide sulfurique H_2SO_4 (1N/50), la réaction qui se produit est due à la neutralisation des ions de bicarbonate par les ions H^+ de l'acide sulfurique :



Généralement dans les eaux naturelles, le pH d'équilibre est observé pour un pH = 4,5, La concentration des bicarbonates est calculée selon la relation:

$$C_{HCO_3} = 24,4 * V_V$$

V_V : volume de H_2SO_4 versé dans les 50 ml d'échantillon pour abaisser le pH à 4,5.

La précision obtenue est de l'ordre de 0,01 sur le pH est de 1 mg.l⁻¹ pour HCO_3^- .

Méthode colorimétrique :

Principe de fonctionnement :

La couleur de chaque objet que nous voyons est déterminée par l'absorption et l'émission de rayonnement électromagnétique (lumière).

L'analyse colorimétrique est basée sur le principe que certains composants spécifiques réagissent avec d'autres par la production d'une couleur, ce qui permet de mesurer la concentration de l'ion mesuré.

Lorsqu'une substance est exposée à un faisceau lumineux d'une intensité I_0 , une partie du rayonnement est absorbée par les molécules et un rayonnement d'intensité émergente I , plus petit que l'intensité I_0 est émis :

La quantité du rayonnement absorbé est donnée par la loi de LAMBERT – BEER

$$\text{Log } I_0 / I = \epsilon c d$$

Dans laquelle l'expression $\text{Log } I_0 / I$ est appelée absorbance (A) ou densité optique.

ε = Coefficient d'extinction molaire de la substance pour la longueur d'onde choisie;

c = Concentration molaire de cette substance ;

d = Distance que le faisceau lumineux parcourt dans l'échantillon (longueur de la cuve).

La substance absorbe toujours la couleur complémentaire de celle émise ; par exemple une substance apparaît jaune parce qu'elle absorbe une lumière bleue, les analyseurs utilisés émettent une lumière complémentaire par rapport à la réaction colorimétrique.

La cellule photoélectrique mesure le rayonnement I qui n'a pas été absorbé par l'échantillon et le convertir en un signal électrique.

Spectrophotométrie à absorption atomique :

Cette méthode a été utilisée pour analyser les cations majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+)

Principe : Cette méthode mesure l'émission d'une radiation par les atomes. Lorsqu'un atome d'un élément est excité par une énergie, il devient instable, et va donc restituer cette énergie sous forme de radiation lumineuse pour revenir à son état initial. L'utilisation de ce phénomène constitue la base de la spectrométrie d'émission.

Le même élément dispersé à l'état atomique dans une flamme possède également la propriété d'absorber tout rayon de la même fréquence F . Il en résulte une absorption du rayonnement incident lié à la concentration de l'élément considéré par une relation de la forme :

$$\text{Log } I_0 / I = K L C$$

I_0 , intensité de la radiation incidente ;

I , intensité de la radiation après la traversée de la flamme ;

L , longueur du chemin optique ;

C , concentration dans la solution de l'élément considéré ;

K , constante.