

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار- عنابة

Faculté des sciences de la Terre
Département de Géologie

Année 2011

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat

**IMPACT DE LA MINÉRALISATION DES
FORMATIONS TRIASIQUES SUR LA QUALITÉ
DE L'EAU ET DU SOL EN ZONE
SEMI- ARIDE : Cas de la plaine Bekkaria-Tébessa
(Extrême Nord-est Algérien).**

Option

Hydrochimie

Par

GHRIEB Lassaad

(Magister en Hydrochimie)

DIRECTEUR DE THÈSE :

M : DJABRI Larbi

Professeur U.B.M. Annaba

DEVANT LE JURY

PRÉSIDENT

: M : HANI Azzedine

Professeur U .B.M.Annaba

EXAMINATEURS

M : PULIDO BOSCH Antonio

Professeur U. Almeria Espagne

M : BOUDOUKHA Abderahmane

Professeur U .H.L.Batna

M : LAOUAR Rabah

Professeur U .B.M.Annaba

M : MAOUI Amar

M.C.A. U.Guelma

REMERCIEMENTS

Le présent manuscrit, qui est le fruit de quatre longues années de recherches, n'aurait jamais vu le jour, si ce n'était l'assistance, la collaboration et la contribution de plusieurs personnes qui ont œuvré et veillé à ce qu'il s'achève et prenne cette forme.

Il m'est bien agréable de leur adresser mes remerciements et ce n'est pas avec ces quelques termes, si vénérables soient-ils, que j'arriverai à leur rendre hommage ni leur avouer reconnaissance et gratitude.

La première personne à qui je m'adresserai en premier c'est monsieur le professeur **L. DJABRI**, à qui je dois beaucoup. Sans son aide précieuse, son dévouement, son soutien indéfectible et surtout ses conseils qui m'ont été d'un apport démesuré, ce travail n'aurait jamais pu être mené à bien.

Il m'a fait l'honneur de diriger ce travail, avec sérénité et rigueur scientifiques et responsabilité exemplaire, et a toujours su me réserver le temps qu'il faut, malgré ses occupations multiples, pour me donner de plus amples éclaircissements sur les questions que nous avons discutées.

Je tiens à remercier également monsieur le professeur **A. HANI**, de l'université de Annaba, d'avoir accepté d'honorer par sa présence la présidence de ce jury, de n'avoir au grand jamais épargné aucun effort à mettre ses connaissances et son savoir à mon profit.

Je dois témoigner ma gratitude à messieurs, le professeur **R. LAOUAR** de l'université de Annaba, le professeur **A. BOUDOUKHA** de l'université de Batna, le professeur **ANTONIO Pulido Bosch**, de l'université d'Almería Espagne, et Docteur **A. MAOUI** de l'université de Guelma, d'avoir accepté d'examiner, d'évaluer ce travail et de siéger au jury, qu'il me soit ainsi permis de leur exprimer si humblement les meilleurs formules de respect et mes vifs remerciements.

Je ne manquerai jamais de remercier autant, monsieur le professeur **J. MUDRY**, qui m'a bien accueilli dans son laboratoire, et m'a vérifié toutes les conditions pour bien mener mon stage, qu'il trouve ici toutes les expressions de mon respect.

Je ne saurais oublier tous mes collègues, enseignants et administrateurs, de l'université **08 MAI 1945, GUELMA**, qui ne se sont jamais abstenus de me prodiguer conseils, encouragements et soutien.

Tous mes amis que j'ai toujours eus à mes côtés, lors de campagnes de mesure, d'échantillonnage, de traitement des données et d'interprétation des résultats ; ainsi que toutes les personnes qui ont contribué d'un effort, si minime soit-il, de près ou de loin.

Je voudrai en fin rendre un hommage particulier à la patience de mes parents qui ne se sont guère fatigués de prier pour moi, de me supporter, de me soutenir, surtout que je dérange toujours leur quiétude jusqu'à ce qu'ils soient parfaitement content de moi et pour moi. Sans omettre d'émettre un grand merci à tous mes frères et sœurs ainsi que tous les miens.

RÉSUMÉ

Le présent travail tend à soumettre à l'étude une zone semi-aride qu'est la plaine Bekkaria –Tébessa, dont l'objet et la portée sont l'impact de la minéralisation des formations triasiques sur la qualité du sol et des eaux.

La géologie dans ce secteur est marquée par une hétérogénéité perceptible, notamment sur les bordures sud, où affleurent des calcaires fissurés, pouvant influencer la recharge de la nappe, tandis que les formations évaporitiques se répandent du côté de Djebel Djebissa.

La région était sujette à de nombreux travaux, notamment ceux de géophysique, qui ont révélé que le niveau P1, correspondant à la nappe phréatique, est constitué de matériel à porosité d'interstice, se déposant à des épaisseurs variables avec quelques discontinuités. Les mesures de résistivité ont donné des valeurs oscillant de (5 à 100 Ω m).

À l'échelle de cette zone, règne un climat semi-aride, caractérisé par une pluviométrie, souvent en deçà des 350 mm/an. L'examen de l'historique des relevés de précipitation a montré que la région a été touchée par une aridité ponctuée, de périodes sèches, ce qui a un impact négatif sur la recharge de la nappe et ne peut être en mesure d'entretenir les stocks.

Les mesures de la piézométrie effectuées lors des diverses campagnes, dans les puits implantés à travers la région, et leur traitement ont permis de déceler un écoulement de direction Est - Ouest; autrement dit de Bekkaria vers Tébessa.

L'étude de la qualité des eaux a été entreprise dans une tentative de mettre en évidence l'influence des évaporites qui caractérisent la zone de Djebissa, ainsi que l'impact de la mine de fer qui s'y localise. Il est à signaler qu'un intérêt particulier a été accordé à l'étude des éléments traces métalliques dans la région.

L'interprétation des résultats obtenus à travers l'emploi de diverses techniques et méthodes d'analyse, montre un effet perceptible des paramètres suscités sur les dites eaux.

En effet, le phénomène de lessivage des formations gypsifères peut générer une augmentation de la salinité et la modification des caractéristiques du sol qui, au fait joue le rôle de filtre naturel par le piégeage des polluants.

Mot clés : Évaporites, Formations triasiques, Lessivage, Minéralisation, Métaux lourds Piégeage, Pollution.

ملخص

هذا البحث يرمي إلى دراسة منطقة شبه جافة وهي سهل بكارية- تبسة، و الهدف منها تأثير التكوينات الترياسية على نوعية المياه و التربة .

تتميز جيولوجيا المنطقة بتكوين غير متجانس ملموس : خاصة على الأطراف الجنوبية اين تظهر تكوينات كلسية متشققة تساهم في تغذية المائدة المائية. بينما تتميز منطقة جببسة بالتكوينات الترياسية.

شكلت المنطقة موضوع دراسات عدة خاصة الجيوفيزيائية منها و التي أظهرت المستوى P1 المتوافق مع المائدة المائية السطحية المتكون من مواد ذات مسامية حبيبية متوضعة بشكل متقطع بسمك مختلف. قياس المقاومة اظهر قيما تتراوح بين 5 إلى 100Ω.م.

يهيمن على المنطقة، موضوع الدراسة، مناخ شبه جاف، يتميز بكمية تساقط لا تتجاوز 350 مم/ سنة. ملاحظة تاريخ التساقط يوضح أن المنطقة تعرضت لفترات جفاف كن لها الأثر السلبي على تغذية المائدة المائية ولا من شأنها بأية حال تزويد المخزون.

القياسات البيزوميترية التي تم اجراؤها خال مختلف الحملات في آبار المنطقة و معالجتها توضح أن اتجاه الجريان يتم من الشرق نحو الغرب أي من بكارية نحو تبسة.

دراسة نوعية مياه المنطقة تم التطرق إليها في محاولة لمعرفة مدى تأثير التكوينات الترياسية المميزة لمنطقة جببسة ، وكذلك تأثير منجم الحديد الكائن بالجوار. تجدر الإشارة إلى أن عناية خاصة قد أوليت إلى دراسة المعادن الثقيلة في المنطقة.

ترجمة النتائج المحصل عليها حسب مختلف التقنيات و طرق التحليل ساعدت على إظهار مفعول ملموس للعوامل المذكورة أعلاه على نوعية المياه.

فعلا إن ظاهرة تدويب التكوينات الجبسية يمكن أن يولد زيادة نسبة الملوحة و تعديل خصائص التربة التي، في الواقع تقوم بدور مصفاة طبيعية لتفخيخ الملوثات.

الكلمات الجوهرية : التكوينات الترياسية، المعادن الثقيلة، التدويب، التمعدن، تفخيخ الملوثات ، التلوث.

ABSTRACT

This work tends to submit the study area that is semi-arid plain-Bekkaria Tebessa, the purpose and scope are the impact of the Triassic formations of mineralization on soil quality and water.

The geology in this area is marked by a noticeable heterogeneity, especially on the southern fringes, where outcrops of limestone cracks, which could affect the groundwater recharge, while the evaporite formations spread on the side of Jebel Djebissa.

The region was subject to numerous works, including geophysics, which revealed that the P1, corresponding to the water table, consists of material porosity gap, accumulating to thicknesses varying with some discontinuities. Resistivity measurements gave values ranging from (5 to 100 Ω m)

Across this zone, the climate is semiarid, characterized by high rainfall, often below 350 mm / year. The review of the history of recorded precipitation showed that the region was hit by a punctuated aridity, dry periods, which has a negative impact on groundwater recharge and may not be able to maintain stocks.

Measurements of piezometric performed at various companions in wells located throughout the region and their treatment have identified a flow of East - West direction, ie from Bekkaria to Tebessa.

The study of the quality of water was undertaken in an attempt to highlight the influence of evaporites that characterize the area Djebissa, and the impact of the iron mine that it locates. It should be noted that special attention was given to the study of trace metals in the region.

The interpretation of results obtained through the use of different techniques and methods of analysis, shows a noticeable effect raised parameters on these waters.

Indeed, the phenomenon of leaching of gypsiferous formations may generate an increase in salinity and changes in soil characteristics that, in fact acts as a natural filter for trapping pollutants.

Key words: Evaporites, Triassic formations, leaching, mineralization, heavy metals sequestration, pollution.

TABLE DES MATIÈRES

APERÇU GÉOLOGIQUE

I.1. Introduction.....	4
I.2. Géomorphologie	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'Éocène.....	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.....	13
I. 5 : Lithostratigraphie, tectonique et conséquences hydrogéologiques :	16
I. 6. Géologie du massif de djebissa.....	16
I. 6. 1. Introduction :.....	16
I.6. 2. Stratigraphie du Djebel Djebissa :	16
I.6. 2. 1. Trias :	16
I.6. 2. 2. Crétacé :	19
a – Aptien- albien :	19
b – Cénomaniens :.....	19
c – Turonien :	19
d – Le Pliocène.....	19
I.6. 2.3. Quaternaire :.....	19
I. 7. La Tectonique	20
I. 7. 1. les déformations souples	20
I. 7.2. Les accidents cassants.....	20
I. 8. Minéralisation :	20
I. 9. Conclusion.....	20

HYDROCLIMATOLOGIE

II. 1. Introduction	22
II. 2. Historique :	22
II. 3. Type de climat	26
II. 3. 1. Diagramme pluviothermique :	26
II. 3. 2. Évolution des facteurs climatiques sur la période 1972 à 2009 :	27
II. 3. 2. 1 Les précipitations:.....	27
II. 3. 2. 2 Variation inter annuelle des précipitations	27
II. 3. 2. 3 Variations mensuelles des précipitations:.....	28
II. 3. 2. 4 Répartition saisonnière des précipitations	29
II. 3. 2. 5. Les températures.....	30
II. 3. 2.6. La neige	31
II. 3. 3. Calcul du coefficient pluviométrique	31
II. 3.4. Détermination des indices climatiques	32
II. 3.4. 1. Climagramme d'Emberger	32
II. 3. 4. 2. Indice d'aridité de De. Martonne.....	33
II. 4. Le Bilan hydrique	35
II. 4. 1.Étude de l'évapotranspiration	35
a. Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP)	35
b. Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR)	36
II. 4. 2. Estimation des réserves facilement utilisables	36
II. 4. 3. Indice thermique mensuel.....	37
II. 4. 4. Indice thermique annuel	37
II. 4. 5. Répartition des précipitations	37
a. / Calcul du ruissellement	37
b. / Calcul de l'infiltration	37
II. 4. 6. Commentaire sur le bilan hydrique	42
II. 5. Variation de l'écoulement interannuel moyen.....	46
II.6. Hydrologie :	48
II.6. 1. Hydrographie :	48
II.6. 2. Écoulement de surface et régime hydrologique :	48
II.6. 2.1.Coefficient mensuel des débits (CMD) :	48
II. 7. Conclusion.....	51

GÉOMÉTRIE DE L'AQUIFÈRE

III. 1. Introduction	52
III. 1. 1. Apports de l'étude géophysique de 1970	52
III. 2. Essai de corrélation entre la géologie et la géophysique.....	53
III. 2.1. Carte en Isopaches.....	54
III. 3. Détermination de la nature des roches	55
III. 3.1. Facteur de formation	55
III. 3.2. La porosité.....	55
III. 3.3. Lithologie des formations déterminées	58
III. 4. Mise en parallèle des profils géophysiques et des coupes lithologiques.....	58
III. 4. Conclusion.....	59

HYDROGÉOLOGIE

IV. 1. Introduction	60
IV. 2. La piézométrie des puits domestiques.....	60
a) Cartes piézométriques (1974/1985)	60
b) État de la piézométrie en 2001	62
a) État de la piézométrie (période des hautes eaux mars 2005)	62
b) État de la piézométrie (période des basses eaux juillet 2005)	63
a) État de la piézométrie (période des hautes eaux mars 2006)	64
b) État de la piézométrie (période des basses eaux juillet 2006)	64
a) État de la piézométrie (période des hautes eaux mars 2007)	65
b) État de la piézométrie (période des basses eaux juillet 2007)	65
a) État de la piézométrie (période des hautes eaux mars 2008)	66
b) État de la piézométrie (période des basses eaux juillet 2008)	66
a) Carte piézométrique de la période des hautes eaux (mars 2009).....	66
a) Carte piézométrique de la période des basses eaux (juillet 2009).....	67
IV. 2.1 Relation Oued -Nappe phréatique.....	67
IV. 2.2. Piézométrie de la région de Djebissa	68
IV. 2.3. Conclusion	68
IV. 3. Carte des conditions aux limites	69
IV.4. Détermination des paramètres hydrodynamiques de la nappe profonde	69
IV.4.1. Résultats des pompages d'essai	71
IV.4.2. Cartographie des paramètres hydrodynamiques	79
a) Carte de transmissivité (Fig.67)	79
b) Carte de perméabilité : (Fig.68)	80
IV. 5. Conclusion.....	80

QUALITÉ DES EAUX

V. 1. Introduction:	81
V. 2. Caractérisation des eaux de la région :	81
V. 2. 1. Caractéristiques des eaux des puits :	81
V. 2. 2. Prélèvements :	81
V. 2. 3. Variations des paramètres dosés.....	82
V. 2. 3. 1. Les paramètres physiques :	82
V. 2.3.2 : Les éléments chimiques majeurs.....	83
V.3. Apport de l'outil Statistique	86
V. 3.1. Analyse multidimensionnelle	86
V. 3. 1.1. L'analyse en composantes principales (ACP)	86
A/ Période des hautes eaux:	86
Analyse du cercle ACP (fig.79)	88
Analyse de l'espace des individus (fig.80).....	88
B/ Période des basses eaux:.....	90
Analyse du cercle ACP (fig.82) :	91
Analyse de l'espace des individus (fig.83).....	91
V.3. 2. Conclusion.....	93
V.4. Faciès caractéristiques des eaux	93
V. 4.1. Variations des anions ; (HCO_3^- , SO_4^{2-} et Cl^-) et la conductivité : (fig.77 E)	94
a- Graphique SO_4 - Conductivité :	94

b- Graphique Cl - Conductivité.....	94
c-Graphique HCO ₃ - Conductivité :	95
V. 4.2. Les éléments Cl ⁻ SO ₄ ²⁻ :	95
V. 5. Origines de la salinité des eaux de la région	96
V.5. 1. Facteurs régissant le chimisme des eaux.....	96
V. 5. 1. 1 Géologie	96
V. 5. 1. 2. Les bases de la thermodynamique.....	96
A/ Relation activité concentration.....	96
B/ L'activité ionique.....	97
V. 5. 1. 3. Étude de l'acquisition de la minéralisation	97
V. 5. 1. 3.1. Indice de saturation	97
V. 5. 1. 3. 2. Application aux eaux de la région étudiée	98
V. 5. 1. 3. 3. Évolution des valeurs des SI dans les eaux de la région	98
V. 5. 2. Paramètres influençant la composition chimique des eaux.....	100
V. 5. 2.1. Le climat.....	100
V. 5. 2.2. Le niveau statique.....	100
V. 5.2.3. Le titre natronique	100
V. 6. Caractéristiques du strontium.....	102
V. 6. 1. Impact des formations gypsifères de Djebel Djebissa sur la salinité des eaux	102
V. 6. 2. Évolution du rapport Sr ²⁺ /Ca ²⁺	103
V. 6. 3. Confirmation de l'influence des évaporites par la lixiviation.....	103
V. 6. 4. Variations spatio temporelle des rapports Sr ²⁺ /Ca ²⁺ :.....	104
V. 6. 5 Conclusion.....	105

IMPACT DE LA MINE

VI.1. Impact des terrils issus de la mine sur la qualité des eaux	106
VI.1. 1. Introduction.....	106
VI.1. 1. 1. Mise en évidence de l'impact.....	107
VI.1. 2. Le sol et les eaux de surface.....	108
VI.1. 2. 1. Variation du chimisme au niveau du point 1	108
VI.1. 2. 2. Variations du chimisme au niveau du point 2.....	109
VI.1. 2. 3. Variations du chimisme au niveau du point 3.....	111
VI.1. 2. 4. Variations du chimisme au niveau du point 4.....	112
VI.2. Approche statistique par l'analyse en composantes principales	113
VI.2 1. Analyse en composante principale globale (eau).....	113
VI.2 1.1. Matrice de corrélation	113
VI.2 1.2. Analyse du cercle ACP (fig.102).....	114
VI.21. 3. Analyse de l'espace des individus (fig.103)	115
VI.2.2. Analyse en composante principale globale (Sol).....	116
VI.2.2.1. Matrice de corrélation	116
VI.2. 2.2. Analyse du cercle ACP (fig.105).....	116
VI.2. 2.3. Analyse de l'espace des individus (fig.106)	117
VI.2.3. Paramètres Favorisant la pénétration des ETM	118
VI.2.3.1. Une constitution propice du sol	118
VI.2. 4. Spéciation, localisation et mobilité des principaux micro-polluants métalliques	119
VI.2. 5. Conclusion :	120

MODÈLE

VII. Réseaux de neurones artificiels	121
VII.1. Présentation de la méthode neuronale	121
VII.2. Connexions entre les neurones	121
VII. 3. Application du modèle de RNA (ou ANN)	123
VII. 3. 1. Architecture du réseau	123
VII. 3. 2. Choix des critères d'exécution:	123
VII. 4. Création du modèle.....	124
VII. 5. Calibrage et vérification du modèle:.....	127
VII. 5. 1. Détermination des modèles d'entrées	127
VII. 5. 1. 1. Résultats et discussion :.....	127
VII. 6.Conclusions:.....	134

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE.....	134
--------------------------	-----

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	Précipitations annuelles médianes « normales» (1965-95).....	22
11	Répartition interannuelle des précipitations sur une période de 103 ans 1906-2009.....	23
12	Répartition interannuelle des précipitations (1906-1925).....	23
13	Répartition interannuelle des précipitations (1926-1945).....	24
14	Répartition interannuelle des précipitations (1946-1965).....	24
15	Répartition interannuelle des précipitations (1966-1985).....	25
16	Répartition interannuelle des précipitations (1986-2009).....	25
17	Diagramme pluviothermique de la station de Tébessa.....	27
18	Variation interannuelle des précipitations à la station de Tébessa (1972/2009).....	28
19	Variation des moyennes mensuelles annuelles des précipitations (72/2009).....	28
20	Répartition saisonnière des précipitations (1972/2009).....	29
21	Répartition saisonnière des précipitations (1999/2009).....	30
22	Répartition mensuelle des températures 72/2009.....	30
23	Températures moyennes interannuelles à la station de Tébessa (72/2009).....	31
24	Climagramme d'EMBERGER.....	33
25	Abaque de l'Indice d'aridité Annuel de DE Martone 1923.....	34
26	Abaque de l'Indice d'aridité Mensuel de DE Martone 1923.....	35
27	Représentation graphique du bilan de Thornthwaite (1972/2009).....	43
28	Représentation graphique du bilan de Thornthwaite (1999/2009).....	44
29	Représentation graphique du bilan de Thornthwaite (1972 /73).....	45
30	Représentation graphique du bilan de Thornthwaite (1996 /97).....	46
31	Écoulement interannuels moyens dans la zone d'étude (1965-1995).....	47
32	Carte des oueds de la plaine de Tébessa.....	48
33	Évolution des débits instantanés en (l/s) de l'oued Ksob pour la période (2005-2009).....	49
34	Évolution du coefficient mensuel des débits en (m ³ /s) de l'oued Ksob pour la période (2005-2009).....	50
35	Évolution des débits mensuels de l'oued Ksob en fonction des précipitations pour la période (2005-2009).....	50
36	Carte d'implantation des sondages électriques.....	52
37	Profils géo électriques Coupe de U à W.....	53
38	Profils géo électriques Coupes X, YZ.....	54

39	Carte en isopaches P1.....	54
	Abaque de (J.L.ASTIER, 1971) donnant la porosité totale d'une formation aquifère saturée non argileuse en fonction du facteur de formation F.....	57
40	Carte de répartition de la lithologie du niveau P1 Région de Dj. Djebissa.....	59
41	Carte d'inventaire des points d'eau.....	60
42	Carte piézométrique de la période des hautes eaux (Ricard 1974).....	61
43a	Carte piézométrique de la période des basses eaux (Ricard 1974).....	61
43b	Carte piézométrique de la période des hautes eaux (Djabri 1985).....	61
43c	Carte piézométrique de la période des basses eaux (Djabri 1985).....	62
43d	Carte piézométrique Décembre 2001(Bouchagoura).....	62
44	Carte piézométrique Mars 2005 Plaine de Tébessa.....	63
45	Carte piézométrique Juillet 2005 Plaine de Tébessa.....	63
46	Carte piézométrique Mars 2006 Plaine de Tébessa.....	64
47	Carte piézométrique Juillet 2006 Plaine de Tébessa.....	64
48	Carte piézométrique Mars 2007 Plaine de Tébessa.....	65
49	Carte piézométrique Juillet 2007 Plaine de Tébessa.....	65
50	Carte piézométrique Mars 2008 Plaine de Tébessa.....	66
51	Carte piézométrique Juillet 2008 Plaine de Tébessa.....	66
52	Carte piézométrique Mars 2009 Plaine de Tébessa.....	67
53	Carte piézométrique Juillet 2009 Plaine de Tébessa.....	67
54	Piézométrie de la région de Djebissa.....	68
55	Carte des conditions aux limites.....	69
56	Variations lithologiques des aquifères.....	69
57	Log de forage Z1 bis Bekkaria.....	70
57a	Log de forage NHA Merdja.....	70
57b	Log de forage F2-3 Ain chabro.....	70
57d	Carte d'inventaire des forages Plaine de Tébessa.....	70
58	Courbe d'essai par pompage (Descente).....	72
59	Courbe d'essai par pompage (Remontée).....	73
60	Courbe d'essai par pompage forage M2 Bis.....	74
61	Courbe d'essai par pompage forage J2-3.....	75
62	Courbe d'essai par pompage (Descente).....	76
63	Courbe d'essai par pompage (Remontée).....	76
64	Courbe d'essai par pompage (Descente).....	78
65	Courbe d'essai par pompage (Remontée).....	78
66	Carte des transmissivités.....	79
67	Carte des perméabilités.....	80
68	Carte de la répartition des échantillons dans la zone d'étude.....	81
69	Évolution du PH dans les eaux des puits.....	82
70	Évolution de la conductivité électrique dans les eaux des puits.....	83
71	Évolution du calcium dans les eaux des puits.....	83
72	Évolution du magnésium dans les eaux des puits.....	84
73	Évolution du sodium dans les eaux des puits.....	84
74	Évolution des chlorures dans les eaux des puits.....	85
75		

76	Évolution des sulfates dans les eaux des puits.....	85
77	Évolution des bicarbonates dans les eaux des puits.....	86
78	Histogramme des valeurs propres.....	87
79	Cercle de corrélation des variables dans le plan formé par l'axe 1 et l'axe 2.....	88
80	Projection des individus sur le plan formé par les deux premiers axes hautes eaux.....	89
80A	Position des ouvrages analysés et cadre géologique.....	89
81	Histogramme des valeurs propres.....	90
82	Cercle de corrélation des variables dans le plan formé par l'axe 1 et l'axe 2.....	91
83	Projection des individus sur le plan formé par les deux premiers axes hautes eaux.....	92
83A	Carte montrant l'emplacement des familles de minéralisation.....	92
84A	Évolution et distribution du faciès chimique période des hautes eaux.....	93
84B	Évolution et distribution du faciès chimique période des basses eaux.....	93
84C	Évolution et distribution du faciès chimique période des hautes eaux.....	93
84D	Évolution et distribution du faciès chimique période des basses eaux.....	93
85A	Évolution des sulfates en fonction de la conductivité électrique.....	94
85B	Évolution des chlorures en fonction de la conductivité électrique.....	94
85C	Évolution des bicarbonates en fonction de la conductivité électrique.....	95
86	Évolution du rapport Cl/SO_4^{2-} en fonction de la conductivité électrique.....	95
87	Évolution des indices de saturation dans les eaux de la région. (Bouchagoura, 2002).....	99
88	Évolution des indices de saturation dans les eaux de la région.....	100
89	Carte des indices natroniques	101
90	Variations du rapport Sr^{2+}/Ca^{2+} dans la zone d'étude.....	102
91	Position des puits analysés par rapport au Djebel Djebissa	102
92	Variations du rapport Sr^{2+}/Ca^{2+} au niveau des puits extrêmes (P1 & P 8) 2006.....	103
93	Variation du rapport Sr^{2+}/Ca^{2+} dans les Lixiviats de Djebissa.....	104
94	Zone de dépôt des terrils (pollution).....	106
95	Répartition des points de prélèvement des eaux de surface et du sol.....	108
96	Évolution des métaux lourds au point 1 (Eau).....	108
96A	Évolution des métaux lourds au point 1 (Sol) période pluvieuse.....	109
96B	Évolution des métaux lourds au point 1 (Sol) période sèche.....	109
97	Évolution des métaux lourds au point 2 (Eau).....	110
97A	Évolution des métaux lourds au point 2 (Sol) période pluvieuse.....	110
97B	Évolution des métaux lourds au point 2 (Sol) période sèche.....	110
98	Stock de terrils de la mine de fer.....	111
99	Évolution des métaux lourds au point 3 (Eau).....	111
99A	Évolution des métaux lourds au point 3 (Sol) période pluvieuse.....	111
99B	Évolution des métaux lourds au point 3 (Sol) période sèche.....	112
100	Évolution des métaux lourds au point 4 (Eau).....	112
100A	Évolution des métaux lourds au point 4 (Sol) période pluvieuse.....	112
100B	Évolution des métaux lourds au point 4 (Sol) période sèche.....	113
101	Histogramme des valeurs propres.....	114
102	Cercle de corrélation des variables dans le plan formé par l'axe 1 et l'axe 2.....	114
103	Projection des individus sur le plan formé par les deux premiers axes hautes eaux.....	115

103A	Localisation des échantillons par rapport au stock des terrils	115
104	Histogramme des valeurs propres.....	116
105	Cercle de corrélation des variables dans le plan formé par l'axe 1 et l'axe 2.....	117
106	Projection des individus sur le plan formé par les deux premiers axes hautes eaux.....	117
107	Coupe montrant la succession des formations dans la zone d'étude.....	118
108	Carte de répartition de la lithologie du niveau P1 Région de Dj. Djebissa.....	118
109	Schéma d'un neurone artificiel.....	121
110	Schéma d'un neurone biologique.....	121
111	Illustration du réseau à 3 couches (MLP).....	125
112	Fonction de transfert sigmoïde.....	126
113	Architecture du modèle RNA : (CE)	128
114	Corrélation entre la conductivité simulée et mesurée.....	129
115	Architecture du modèle RNA : (SO4)	130
116	Corrélation entre les sulfates simulés et mesurés.....	131
117	Architecture du modèle RNA : (Fe)	132
118	Corrélation entre le fer simulé et mesuré.....	133

LISTE DES TABLEAUX

N°		Page
1	Récapitulatif des données statistiques.....	26
2	Précipitations moyennes mensuelles (mm) à la station de Tébessa (72/2009).....	27
3	Récapitulation des années humide dépassant la moyenne.....	28
4	Répartition saisonnière des précipitations pour les périodes 72/2009 et 99/2009.....	29
5	Moyenne mensuelle des précipitations 72/2009.....	30
6	Coefficient pluviométrique de la plaine de Tébessa.....	32
7	Indice d'aridité mensuel.....	34
8	Valeurs de l'ETR.....	36
9	Résultats du ruissellement Pour les différentes périodes.....	37
10	Résultats de l'infiltration pour les différentes périodes.....	37
11	Récapitulatif des résultats de ETR, R, I, pour les différentes périodes.....	38
12	Bilan hydrique global d'après la méthode de Thornthwaite (72/2009).....	39
13	Bilan hydrique d'après la méthode de Thornthwaite (Station de Tébessa de 99/2009) ...	40
14	Bilan hydrique d'après la méthode de Thornthwaite (année pluvieuse 72 /73).....	41
15	Bilan hydrique d'après la méthode de Thornthwaite (année sèche 96/97).....	42
16	Estimation des débits instantanés en (m ³ /s) de l'oued Ksob pour la période (2005-2009).....	49
17	Coefficient mensuel des débits de l'oued Ksob pour la période (2005-2009).....	49
18	Type de roche d'après le rapport de résistivités (ASTIER 1971).....	55
19	Valeurs calculées du facteur de formation F et de la porosité.....	56
20	Nature lithologique des roches.....	57
21	Lithologie de la zone de Djebel Djebissa.....	58
22	Compagnes d'échantillonnage dans la zone d'étude.....	82
23	Coefficient de corrélation entre les variables initiales.....	87
24	Coefficient de corrélation entre les variables initiales.....	87
25	Valeurs propres et pourcentages des axes principaux.....	87
26	Coefficient de corrélation entre les variables initiales.....	90
27	Coefficient de corrélation entre les variables initiales.....	90
28	Valeurs propres et pourcentages des axes principaux.....	90
29	Variations saisonnières des faciès.....	94
30	Valeurs limites de l'activité (moles/l).....	97
31	Indice de saturation calculé 2002,2009.....	99
32	Répartition de l'indice natronique dans la région d'étude.....	101
33	Variations temporelles du rapport Sr ²⁺ /Ca ²⁺ , dans les lixiviations réalisées.....	104
34	Compagnes d'échantillonnage dans la zone d'étude.....	107
35	Coefficient de corrélation entre les variables initiales	113
36	Valeurs propres et pourcentages des axes principaux.....	114
37	Coefficient de corrélation entre les variables initiales	116
38	Valeurs propres et pourcentages des axes principaux.....	116
39	Analogie entre les neurones biologiques et artificiels.....	122
40	L'erreur RMS dans différents réseaux de neurone.....	128

41	Paramètres statistiques de régression	129
42	Classement des variables par analyse de sensibilité.....	129
43	L'erreur RMS dans différents réseaux de neurone.....	130
44	Paramètres statistiques de régression	131
45	Classement des variables par analyse de sensibilité.....	131
46	L'erreur RMS dans différents réseaux de neurone.....	132
47	Paramètres statistiques de régression	133
48	Classement des variables par analyse de sensibilité.....	133

INTRODUCTION

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. La survie des écosystèmes planétaires, la santé et le bien être de l'humanité reposent sur cette source vitale qui est l'eau. Le problème des ressources en eau mobilisables ne se pose pas uniquement en termes de quantité disponible, la qualité de ces eaux commence à poser de sérieux problèmes.

Nous sommes maintenant devant la nécessité d'utiliser, de gérer, et de protéger l'eau de façon durable, et de garantir son équilibre entre les besoins et les utilisations 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 profit et de commerce lucratif.

Au moment même où une pénurie sérieuse menace toute forme de vie sur terre, des gouvernements et des institutions internationales préconisent la marchandisation de l'eau douce, une solution qui ne fera qu'empirer le problème.

En effet l'Algérie perd des quantités importantes en eau dues à la salinité engendrée par l'interaction eau roche, suite au lessivage des formations géologiques, qui ont un effet indésirable sur la qualité de cette ressource.

Nous rappelons que selon les normes de l'organisation mondiale de santé, une eau fortement minéralisée est déconseillée pour la consommation humaine. Par ailleurs l'utilisation de telles eaux en irrigation engendre une asphyxie des plantes.

Cette étude a été menée dans ce sens, avec l'intention de déceler les facteurs provoquant cette salinité, et de localiser leurs foyers.

Pour ce faire, et dans une tentative de mieux comprendre l'impact des paramètres climatiques et lithologiques sur la qualité des eaux et du sol, un suivi des caractéristiques physico-chimiques ainsi que de la piézométrie a été réalisé, s'appuyant sur des données relatives à la géologie, l'hydrodynamique, la chimie...etc.

Les explications des phénomènes et l'interprétation des résultats objets de cette thèse seront présentées comme suit :

- Le premier chapitre, concerne l'étude géologique de la région.
- Le second, traite l'étude des différents paramètres climatiques.
- Le troisième, a été consacré à la géométrie de l'aquifère, basée sur la prospection électrique.
- Le quatrième chapitre, traite les caractéristiques hydrogéologiques, où nous avons abordé les conditions aux limites, la piézométrie, les paramètres hydrodynamiques de la nappe.
- Le cinquième chapitre, présente l'évolution spatio-temporelle des paramètres physico-chimiques par le traitement des mécanismes de l'acquisition de la minéralisation du sol, des eaux de surface et souterraines.
- Le sixième chapitre traite l'influence de la mine de fer, de Khanguet El Mouahed, sur la pollution des eaux et du sol du secteur de Djebissa.

- Le dernier chapitre concerne la modélisation par l'application de réseau de neurones artificiels.

À cet effet, et à travers ces parties on a pu faire ressortir deux aspects:

- ✓ 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.

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.

Cadre 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.

La plaine de Tébéssa est entourée au Nord par les monts de Dyr et Dj Bou-Rebaia et au Sud par les monts de Dj Bouroumane, Dj Doukkane, Dj Anoual, et Dj Ozmor, elle est drainée par les oueds El kebir et Chabro.

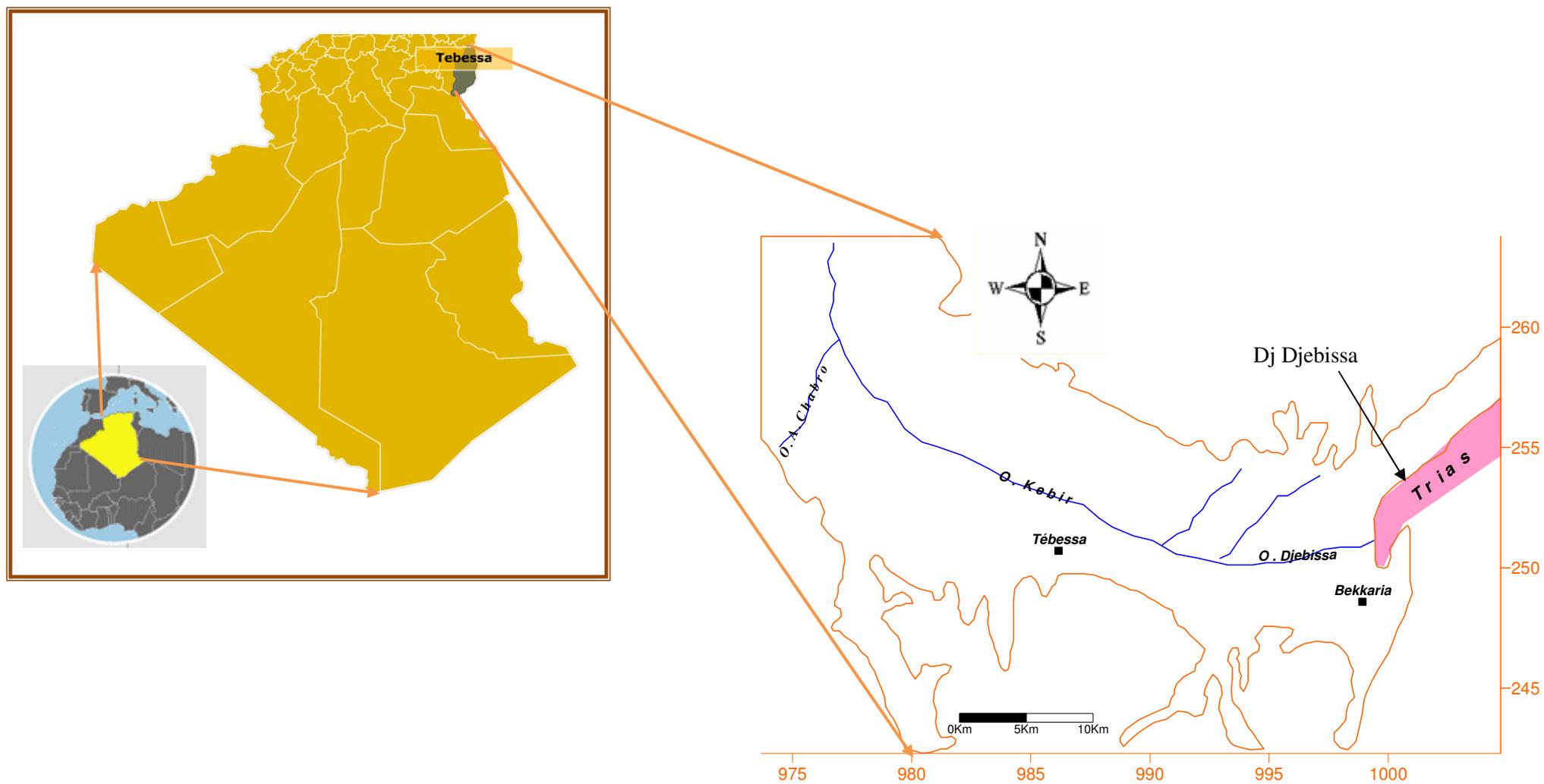


Fig.1. Situation géographique de la région d'étude

CHAPITRE I

GÉOLOGIE

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. GÉOMORPHOLOGIE

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).

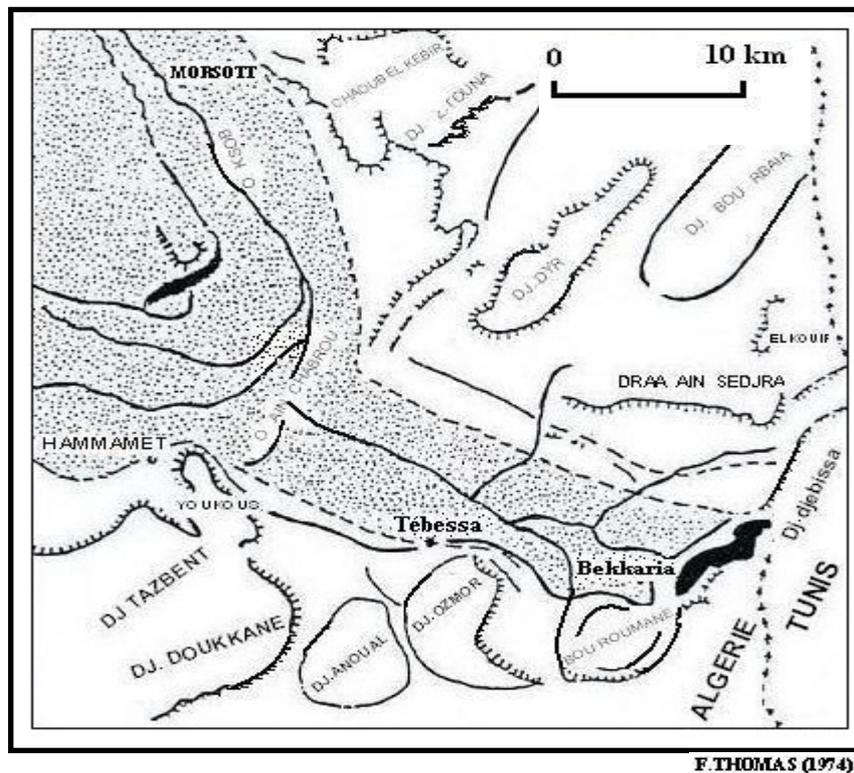


Fig. 2. Croquis géomorphologique de la région de Tébessa

- | | | | | |
|------------|------------------|--------------------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| ■ | ▨ | — | - - - | - - - |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 : Trias, | 2 : Quaternaire, | 3 : Limite d'unité géomorphologique, | 4 : Frontière Algéro-Tunisienne, | 5 : Accident tectonique. |

I. 2. 2. Les monts septentrionaux

Le passage des hautes plaines de Mellègue 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 FACIÈS

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 débiterait 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.

		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.
PALÉOZOIQUE		Eocène		200	Calcaires marneux à silex et intercalations de phosphates par endroits dans le mur.
					Calcaires gris clairs, calcaires crayeux et marnes argileuses avec intercalation d'argiles dans la partie supérieure.
	CRAI	Maest.		250-300	Marnes argileuses gris-foncées et des calcaires blancs dans la partie moyenne et supérieure.
		Campan.		500-600	Marnes argileuses grises et grises bleuâtres.
		Con-Sant.		④ 500-600	Calcaires en bancs, partiellement marneux à teinte noire et gris-foncée.
	SÉNONOIS	Turo		180-250	Marnes gris-verdâtres et grises dans la partie supérieure, avec intercalations de calcaires marneux.
		Cénom.		③ 900-1000	Marnes et marnes-argileuses avec intercalations de calcaires argileux et argilites.
		Vracon.		② 500-600	Marnes grises et gris-foncées, noires dans la partie supérieure avec de minces intercalations de calcaires argileux.
	MÉSOZOIQUE	Albien		480-600	Marnes grises, gris-jaunes partiellement avec des intercalations de calcaires.
		Clans		100-200	1- Faciès clastique, marnes argileuses avec intercalations de marnes sableuses et grès calcaires. 2- Faciès carbonaté, calcaires organo-détritiques, bioclastes, ooclastes et interclastes.
		Apvien		① 300-600	Calcaires et dolomies, argilites et argiles dans la partie supérieure (Grès à Mesloul).
		Barrém		< 250	Formations marno-gypsifères bariolées avec peu d'intercalations de grès à grains fins, dolomies et calcaires marno-dolomitique.
		Jurassique			
	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).

Les affleurements les plus importants sont ceux de Djebissa, Ouenza, Boukhadra, Mesloula, 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-apتيennes 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-apتيens 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 Mesloula et le long de l'oued Batma et au NW de Dehar Mesloula (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. À 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 grés 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 milioles, 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 métalotecte 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. Á 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 Cénomanién

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

La sédimentation cénomaniénienne s'est déposée dans des conditions abyssales (profondes). Cette époque est caractérisée par des décrochements traduisant un raccourcissement NE-SW (Othmanine, 1987). À 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 Cénomanién 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 Cénomanién-Turonien ainsi que dans le Turonien inférieur, l'âge turonien inférieur pour ces niveaux est admis et confirmé.

À 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'Éocène

Des calcaires à silex et d'autres à Nummulites caractérisent l'Éocène 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 grés dont l'épaisseur peut atteindre dans le bassin de Oulad Soukiès (NW de l'Ouenza) 1000 m (Dubourdiou, 1956; Kowalski et Hamimed, 2000). À 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'Éocène 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 (Dubourdiou, 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 (Dubourdiou, 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:

- **Éboulis 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, prés de Tébessa).

À 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)

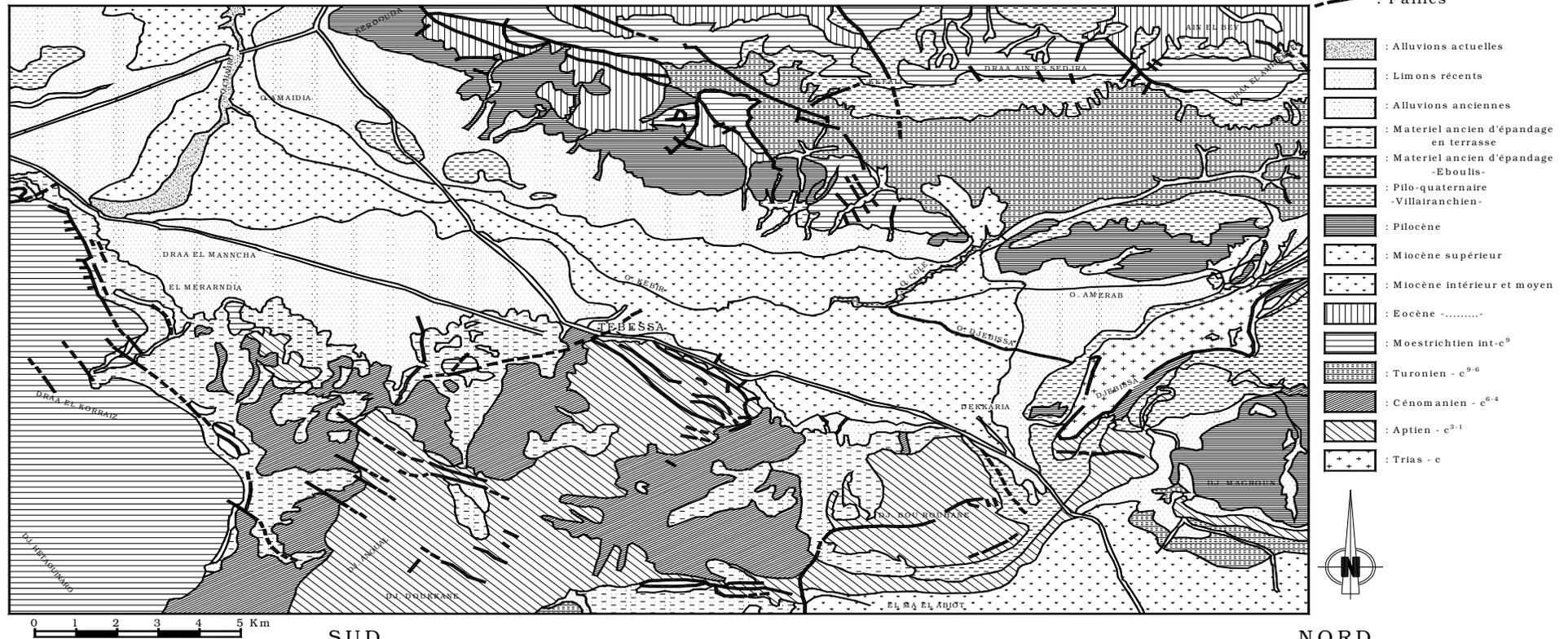
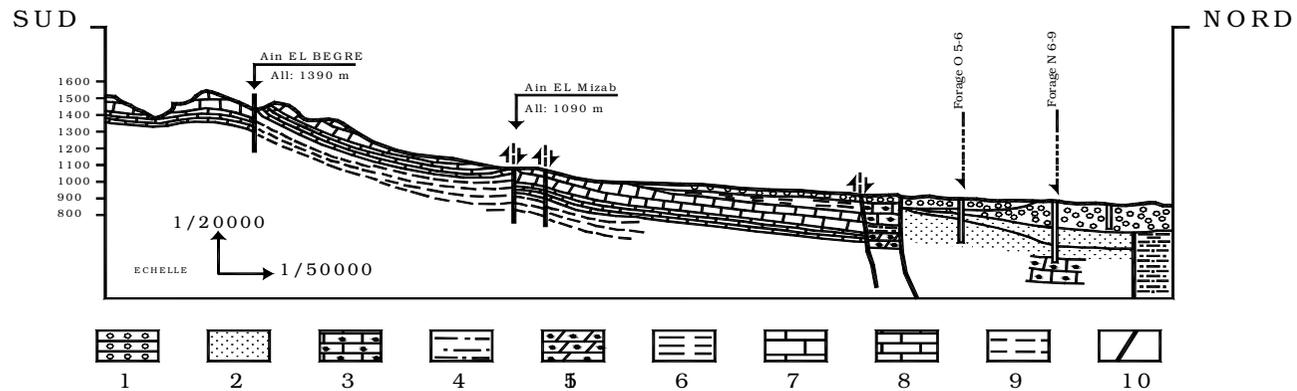


Fig. 4 b. Coupe schématique dans les formations géologiques de la région de Tébessa



1: Quaternaire, 2: Mio-plicène, 3: Maestrictien moyen, 4: Maestrictien inférieur, 5: Campanien, 6: Turonien supérieur, 7: Turonien moyen, 8: Turonien inférieur, 9: Cénomaniens supérieur, 10: Failles.

I. 4 : TECTONIQUE DE LA RÉGION :

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 Belkif-Hameimat (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. Á cette phase appartiennent l'anticlinal de Djebel Belkif, 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.

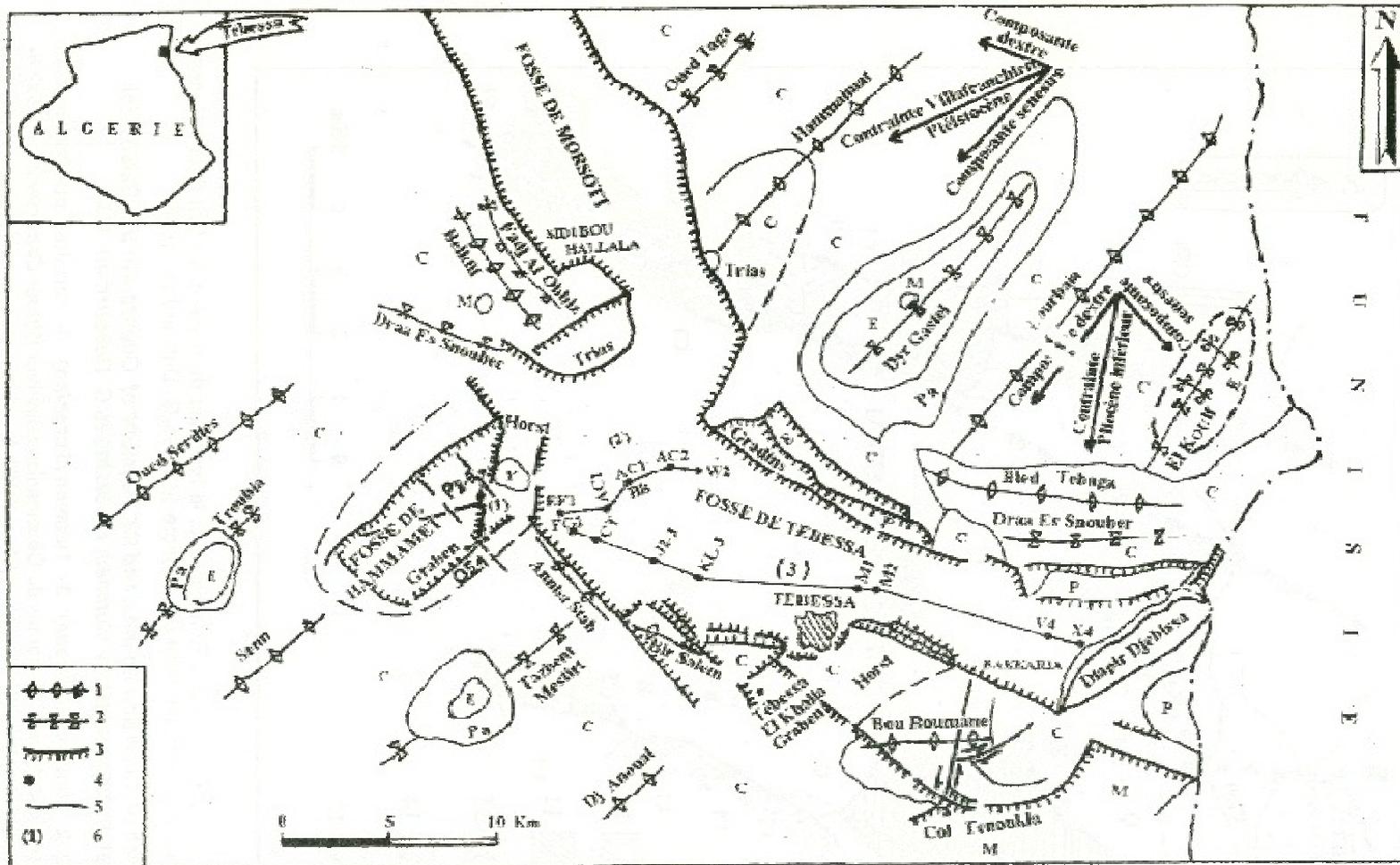
Les puissantes séries de cailloutis témoignent dans le fossé de Tébessa de l'importance du deuxième stade d'effondrement du Pléistocène inférieur.

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- quaternaire.

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 2002

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 ses 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'Éocène. 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.

À 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).

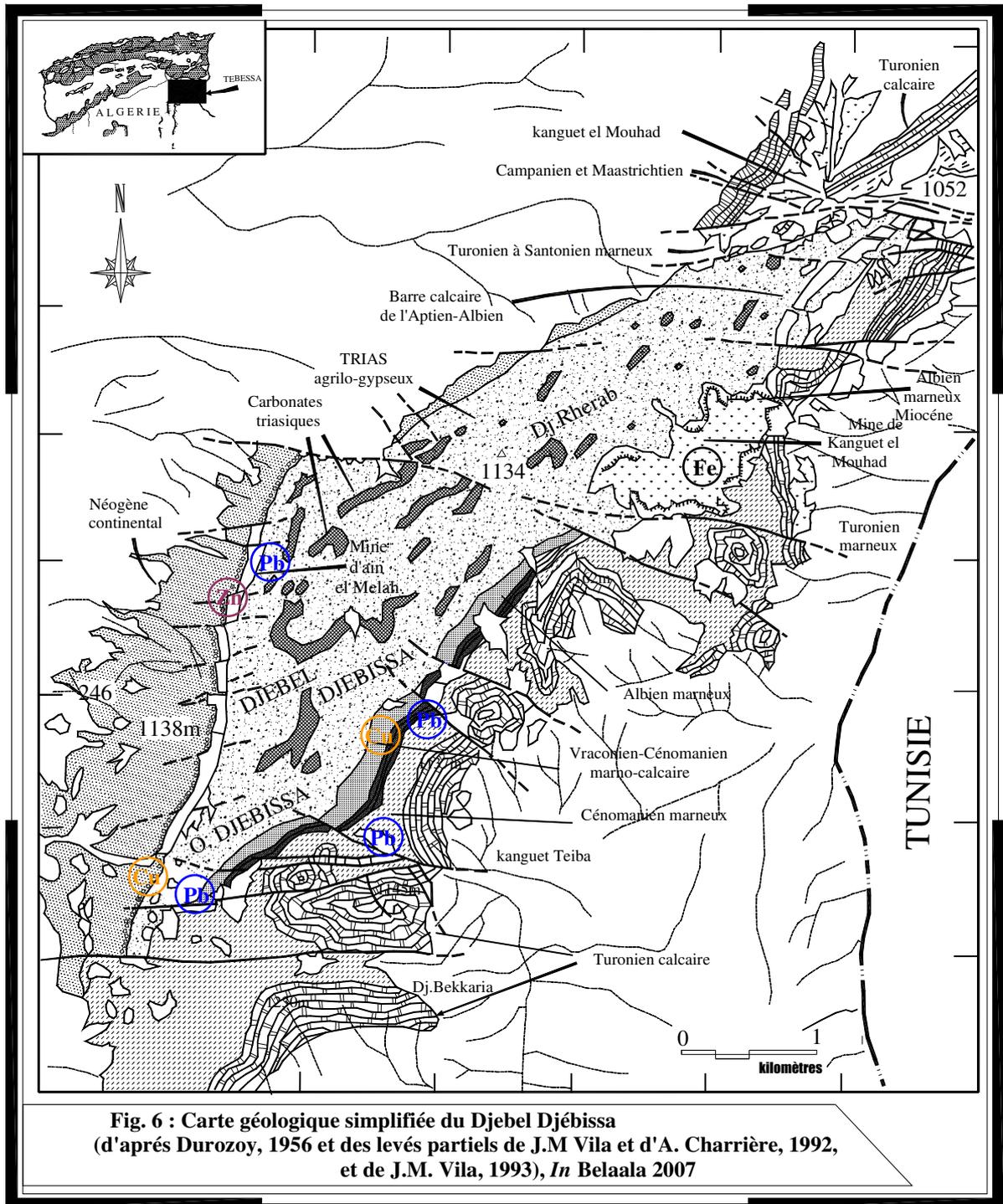
Une partie de cette étude se rapporte au Djebel Djebissa caractérisé par une minéralisation polymétallique pouvant entraîner une modification de la composition chimique des eaux par dissolution des minéraux tel que le fer, le plomb, zinc...résultant de l'exploitation de la mine, par ailleurs les formations 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. GÉOLOGIE 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 triasique 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.



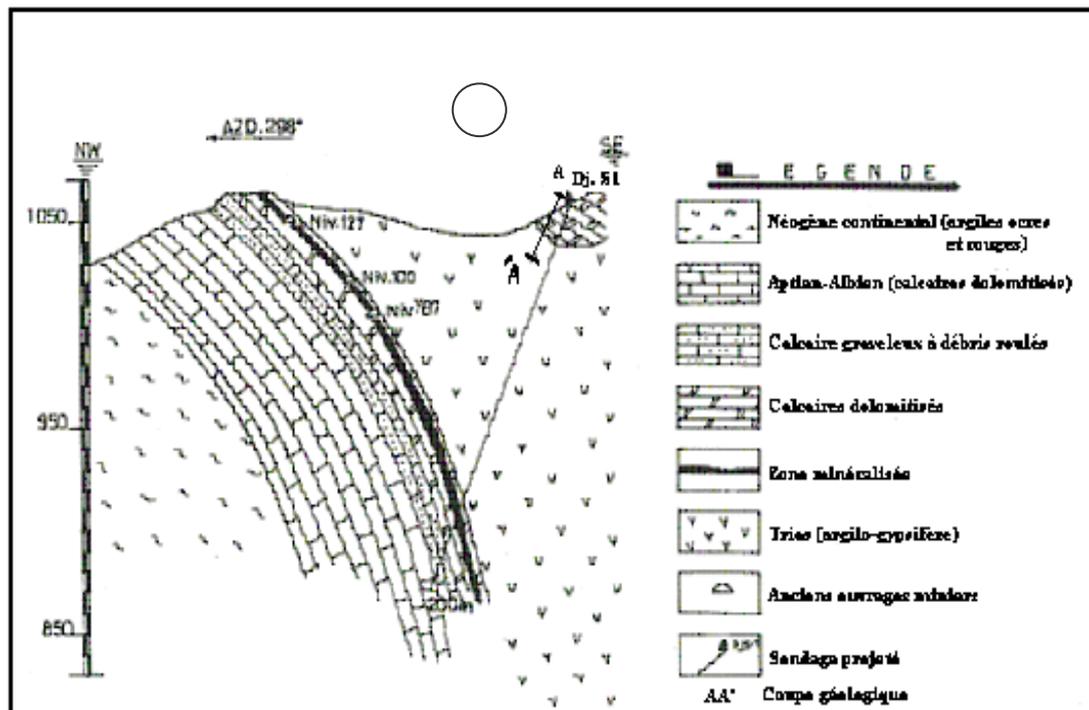


Fig. 7. Coupe géologique montrant la position de la zone minéralisée par rapport au sondage Dj-S1 et la coupe AA'.
D'après ORGM

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 évaporitiques, 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).

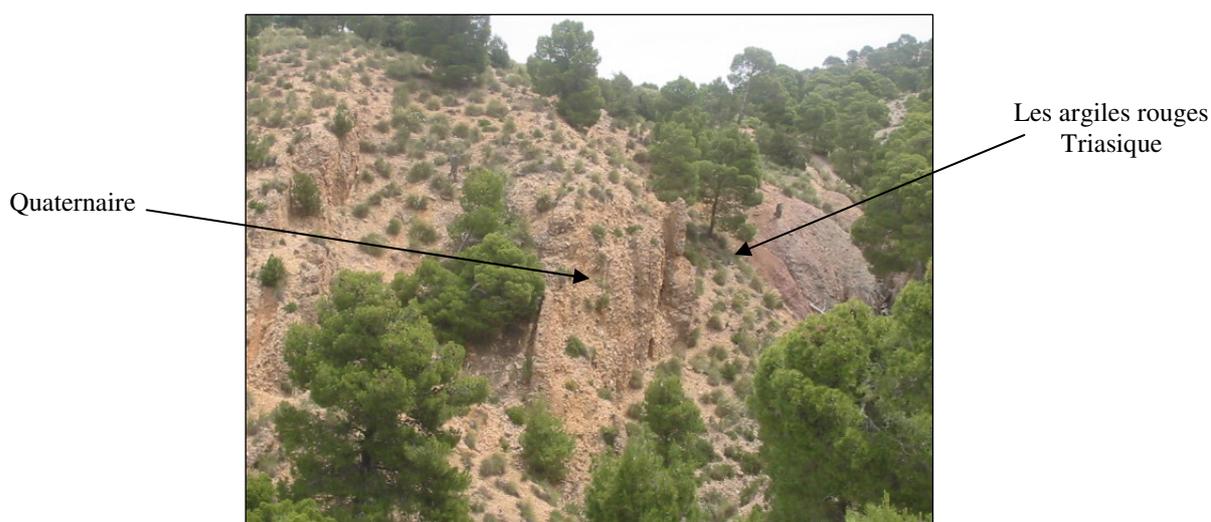


Fig. 8. Les argiles rouges du Trias en contact avec les formations du Quaternaire verticalisées.

I.6. 2. 2. Crétacé :

a – Aptien- albien :

Sur le flanc Ouest, la datation de Vila et Charrière (1993) incluent la présence du Crétacé inférieur. À 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.

b – Cénonanien :

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).

c – 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.

d – Le Pliocène

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

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 Cénonaniennes, 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. 7. 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. 7. 1. les déformations souples

La principale déformation souple est le plissement de la région, ce qui explique la structure anticlinal 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. 7.2. 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. 8. 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 polymétallique 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 Cénomaniens 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 Cénomaniens 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. 9. 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-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. 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

HYDROCLIMATOLOGIE

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.

II. 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.

II. 2. Historique :

La station référence fonctionne depuis plus d'un siècle (103ans), 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 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. 10), montre que les précipitations sont de l'ordre de 300 mm/an, ce qui constitue un faible apport.

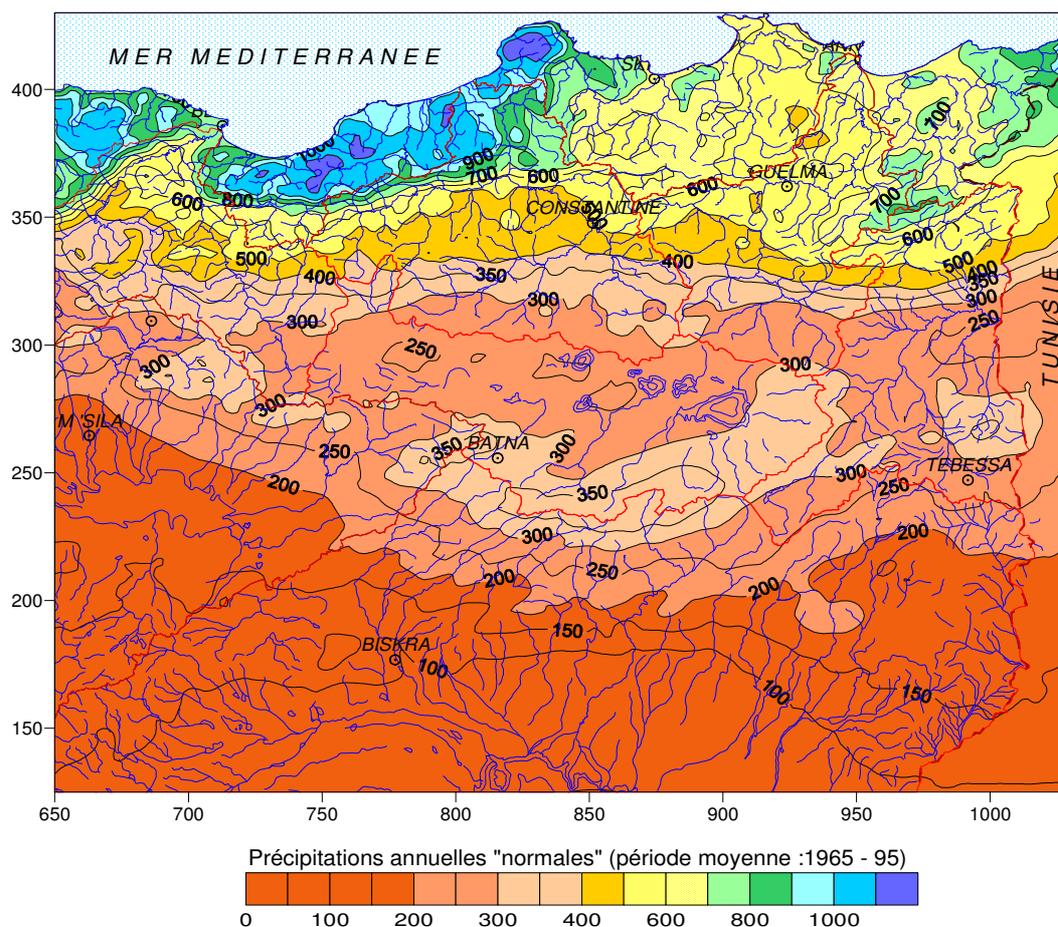


Fig. 10. Précipitations annuelles médianes « normales » (1965-95) (d'après étude ANRH-GTZ ,2003)
In Azzedine MEBARKI (*) et Jean-Pierre LABORDE (**)

Les précipitations enregistrées sur 103 années, nous ont permis d'étudier l'évolution des précipitations.

La valeur moyenne calculée (346.83 mm), montre les variations annuelles des précipitations, la fig. 11.

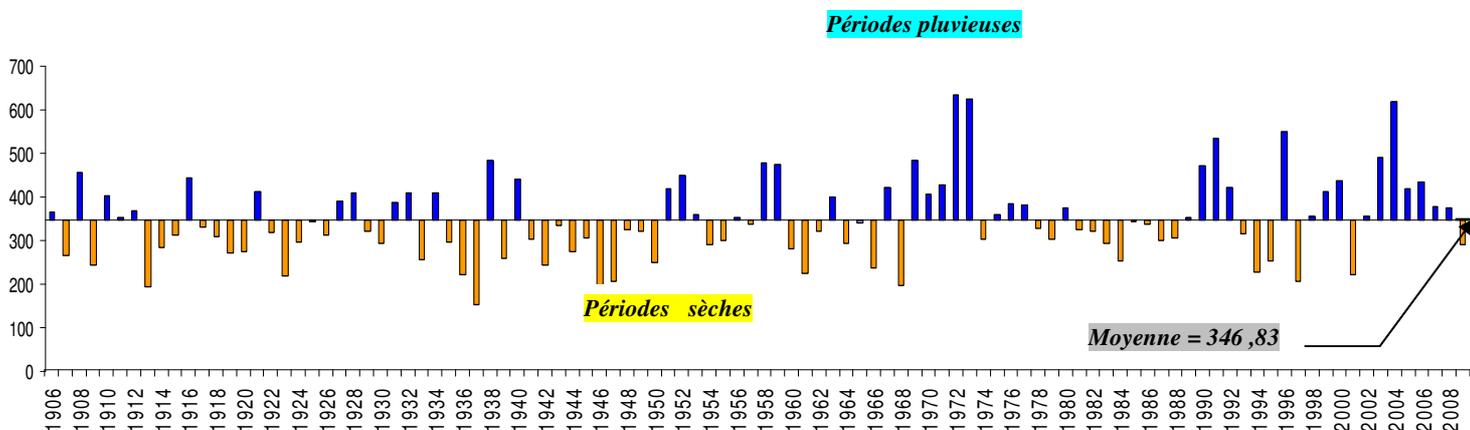


Fig.11. Répartition interannuelle des précipitations sur une période de 103 ans, 1906-2009

L'observation de la précédente figure, visualise, la succession des épisodes pluvieux et secs. Au début des enregistrements, on remarque que les épisodes secs sont plus importants, en effet les périodes sèches durent en moyenne dix (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:**

Au cours de cette période d'observation, la moyenne des précipitations est de 323.25mm, comparée a celle-ci, nous remarquons (fig.12), une parité entre les années pluvieuses et les années sèches.

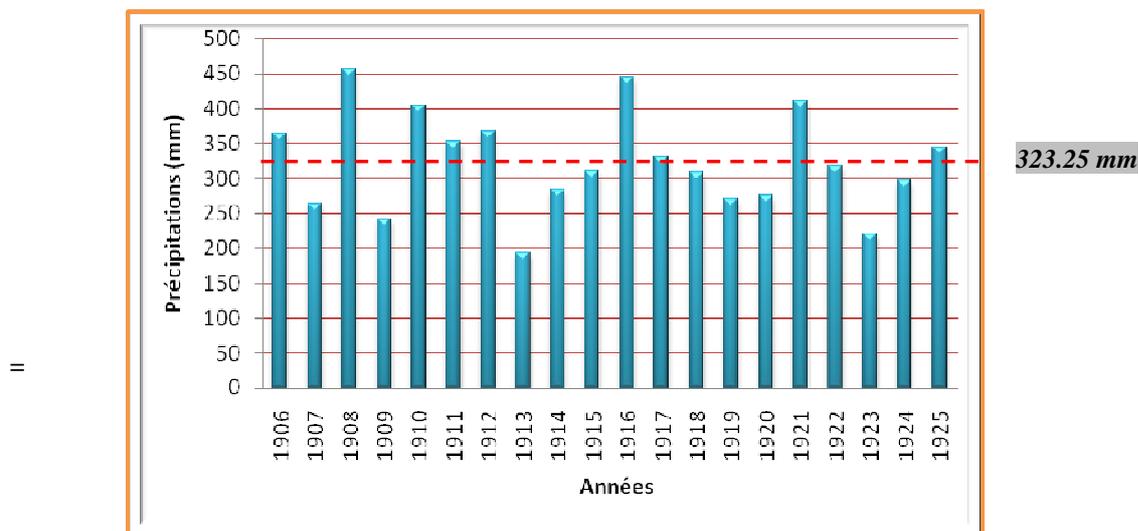


Fig. 12. Répartition interannuelle des précipitations (1906-1925)

***Période 1926-1945:**

La précipitation moyenne est analogue à la précédente. L'observation de détail (fig.13), montre une domination des années sèches par rapport aux années humides.

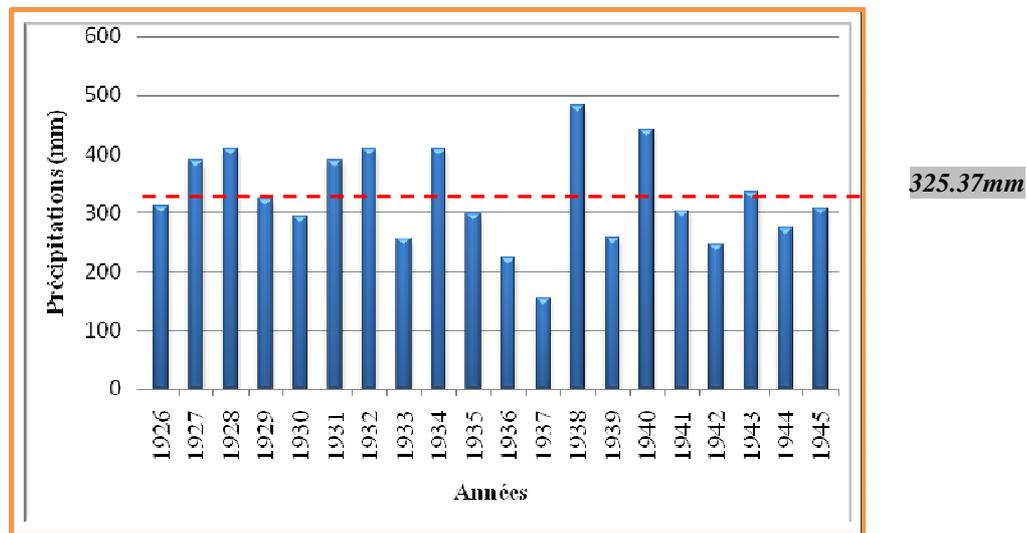


Fig. 13. Répartition interannuelle des précipitations (1926-1945)

***Période 1946-1965 :**

On remarque une augmentation de la valeur des précipitations moyennes, elle est de l'ordre de 331.56mm, ce qui traduit une période pluvieuse. Cependant cette augmentation ne se remarque pas au niveau des années, en effet le nombre des années sèches domine par rapport aux années pluvieuses (fig.14).

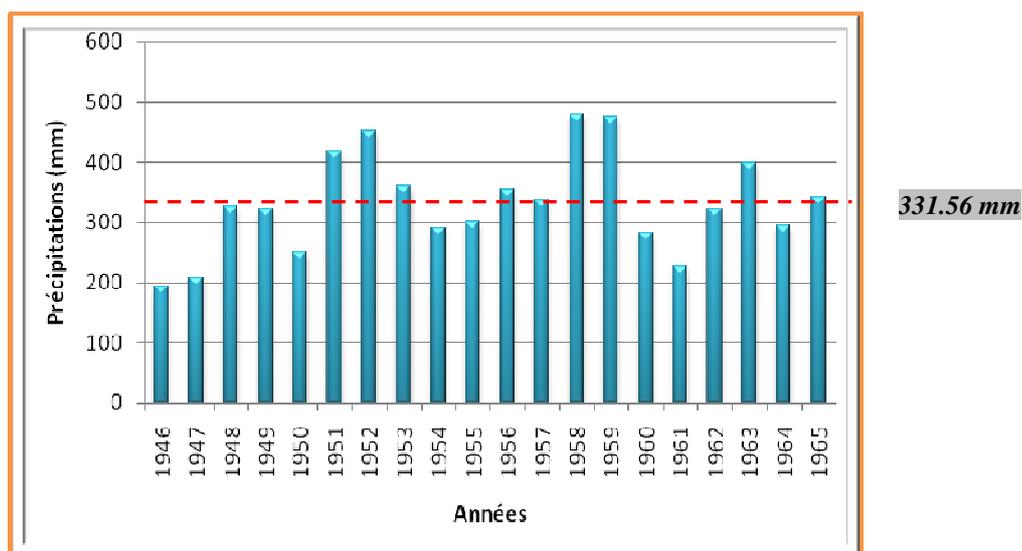


Fig. 14. Répartition interannuelle des précipitations (1946-1965)

***Période 1966-1985 :**

La valeur de la précipitation moyenne atteint 369.91 mm, ce qui indique un épisode pluvieux. Les années excédentaires se remarquent par un doublement des précipitations

particulièrement pour les années 1972 et 1973, où le taux de précipitations atteint 620mm (fig.15), on remarque une parité entre les années sèches et les années pluvieuses.

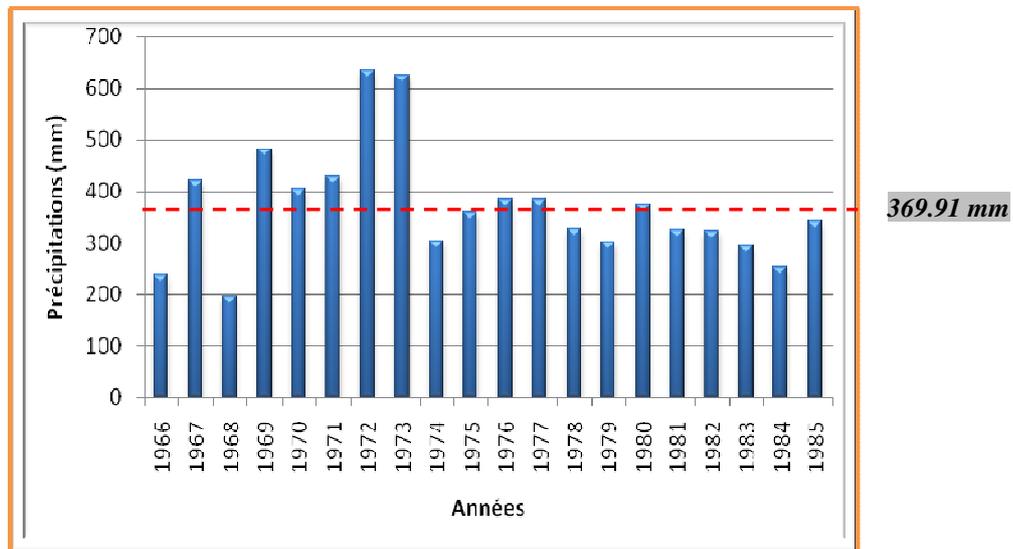


Fig.15. Répartition interannuelle des précipitations (1966-1985)

***Période 1986-2009 :**

Au cours de cette période la valeur moyenne des précipitations atteint 377,87mm, ce qui implique un épisode pluvieux. L'observation de la figure 16, montre une parité entre les années sèches et les années pluvieuses. Nous remarquons que les années 1996 et 2004, se caractérisent par de fortes pluviométries.

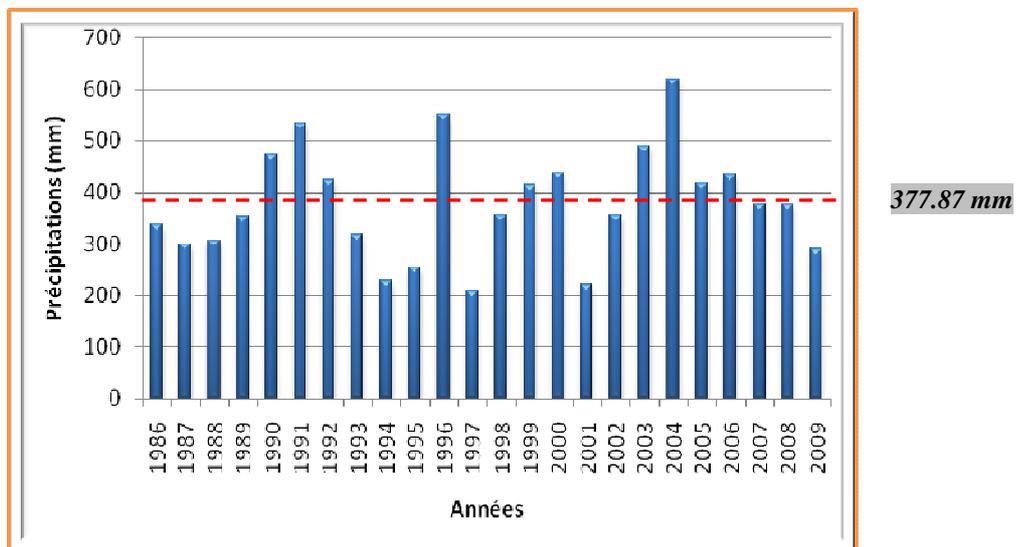


Fig.16. Répartition interannuelle des précipitations (1986-2009)

Les précédentes interprétations nous permettent de tirer les constatations suivantes, résumées dans le tableau 1.

Périodes	Max (mm)	Min (mm)	Moyenne (mm)	Ecart type
1906-2006	634.7	154.1	346.83	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
1986-2009	618.8	207.4	377.87	112.40

Tab. 1. Récapitulatif des données statistiques.

La précipitation moyenne calculée sur cent trois années est de l'ordre de 346.83mm, 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 calculée est de 331,56mm.

Cette période (1966-1985) 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 1986-2009 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 377,87mm

Ce qui explique la hausse des précipitations plus ou moins considérables par rapport au début du siècle.

II. 3. Type de climat

II. 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 38 années, permettent l'établissement du diagramme (fig. 17), 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.

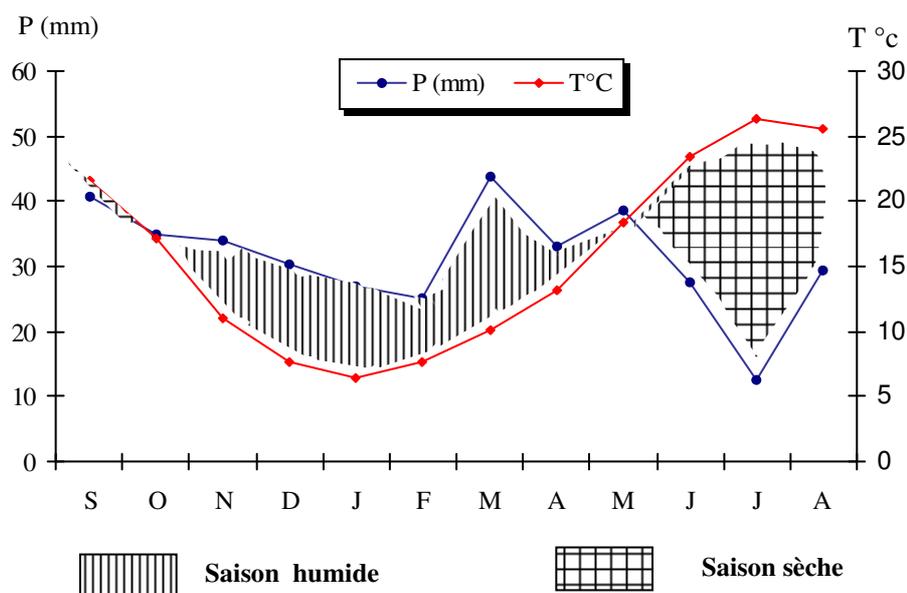


Fig. 17. Diagramme pluviothermique de la station de Tébessa. (1972-2009)

II. 3. 2. Évolution des facteurs climatiques sur la période 1972 à 2009 :

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.

II. 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 (2), 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	40,63	34,79	33,86	30,30	26,79	25,03	43,65	32,93	38,68	27,55	12,49	29,51

Tab. 2. Précipitations moyennes mensuelles (mm) à la station de Tébessa (72/2006)

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

L'analyse de la courbe des variations inter annuelles des précipitations sur une période de 38 ans (1972/2009) (fig. 18), montre que l'année 1972 est l'année la plus arrosée avec 634.7 mm/an par contre l'année 1997 est la plus sèche avec 207.4 mm/an. Notons que les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre de 376.20 mm/an.

Le tableau suivant (3) récapitule les années humides dépassant la moyenne, le reste des années sont considérées comme sèches.

Années humides	1972	1973	1976	1977	1990	1991	1992
	1996	1999	2000	2003	2004	2005	2006
	2007	2008					

Tab. 3. Les années humides durant la période de suivi.

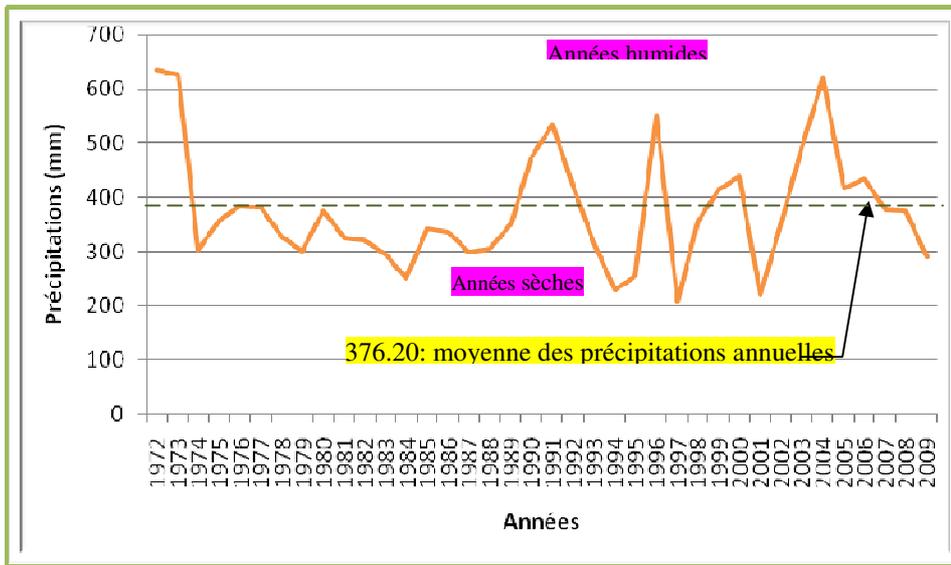


Fig. 18 Variation interannuelle des précipitations à la station de Tébessa (1972/2009)

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

La courbe de variation des moyennes mensuelles des précipitations, sur une période de 38 ans (1972-2009) (fig. 19), montre que le mois de septembre (40.63mm) est le plus pluvieux, par contre le mois de juillet avec 12.49mm, est le plus sec.

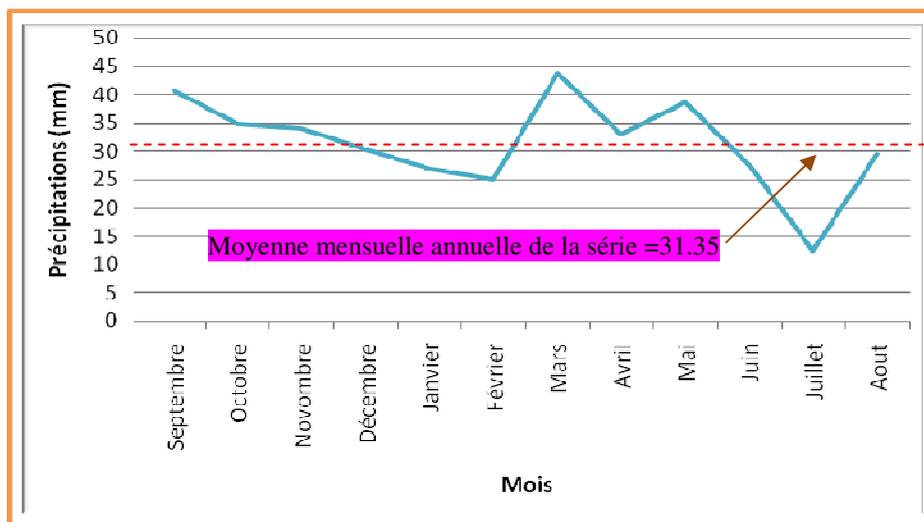


Fig. 19. Variation des moyennes mensuelles annuelles des précipitations/ Station de Tébessa. (1972/2009)

II. 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), Hiver : (Déc, Jan Fév), Printemps : (Mar, Avr, Mai), Été : (Jui Juill, Aou).

Saisons	Automne		Hiver		Printemps		Eté	
Années	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
72/2009	109.28	29	82.12	22	115.27	31	69.55	18
99/2009	123.45	31	94.24	23	105.90	26	79.26	20

Tab. 4. Répartition saisonnière des précipitations pour les périodes 72/2009 et 99/2009

Période 72/2009

En observant le tableau précédent et la figure suivante, nous remarquons pour la période considérée, que la saison printanière et la saison automnale sont les plus pluvieuses, au total, il tombe 224.54 mm soit 60 % des pluies annuelles. En hiver le total des précipitations est de l'ordre de 82.12 mm soit 22% du total annuel. La saison estivale est la plus sèche, la pluviométrie enregistrée est la plus faible de l'ordre de 69.55 mm soit 18 % de la totalité des pluies (Fig. 20).

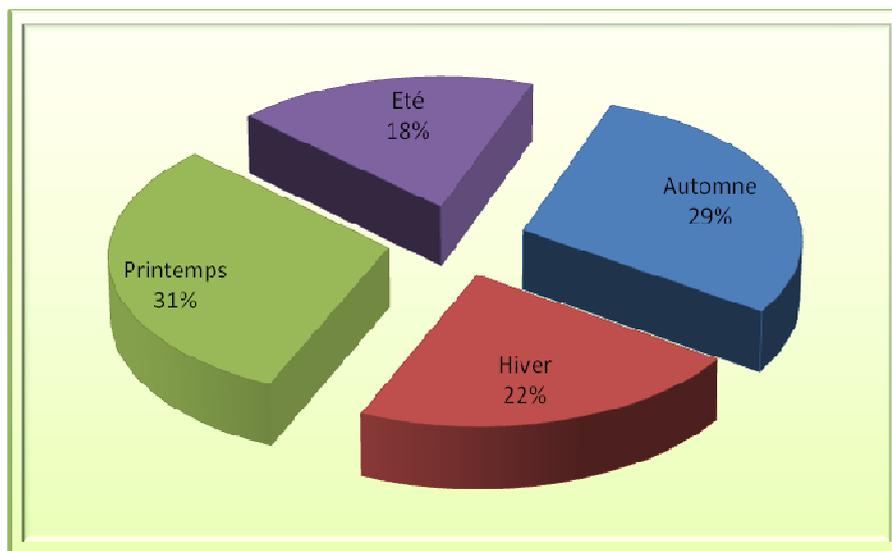


Fig. 20. Répartition saisonnière des précipitations (1972/2009).

Période de 99/2009:

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 123.45mm de précipitations soit 31 % du total annuel. En hiver et au printemps les précipitations enregistrées atteignent respectivement 94.24 mm et 105.90 mm correspondant à 23 % et à 26 % du total annuel. L'été reste la saison la plus sèche où la pluviométrie est faible de l'ordre de 79.26 mm, soit 20 % de la totalité des pluies (Fig.21).

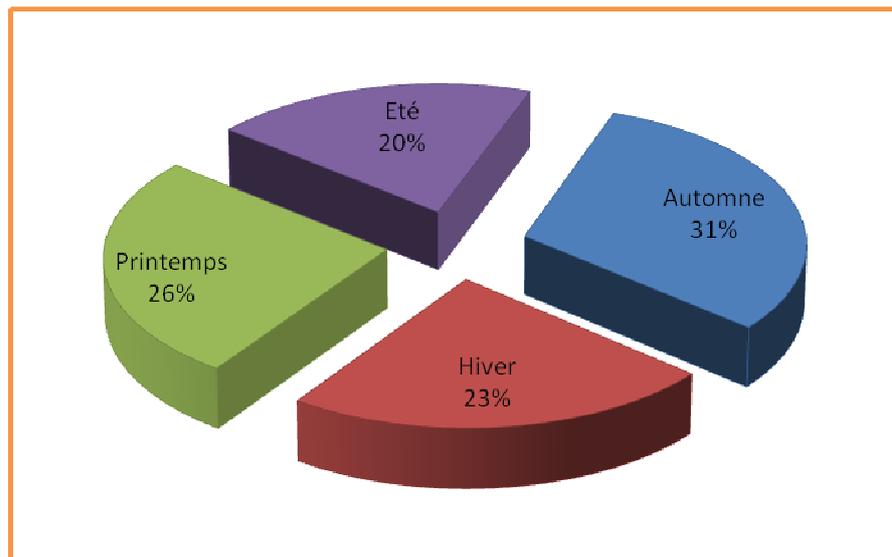


Fig. 21. Répartition saisonnière des précipitations (1999/2009).

II. 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 5)

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou
Moy	21,48	17,17	11,04	7,83	6,57	7,89	10,50	13,28	18,52	23,36	26,17	25,40

Tab. 5. Moyenne mensuelle des températures 72/2009.

La période considérée s'étale de 1972 à 2009. L'observation des températures enregistrées montre :

- L'échelle mensuelle les hivers sont très froids et humides, les étés sont chauds et secs avec des enregistrements de température minimale de 6.57 °C au mois de janvier et maximale de 26.17 °C au mois de juillet. (Fig. 22)

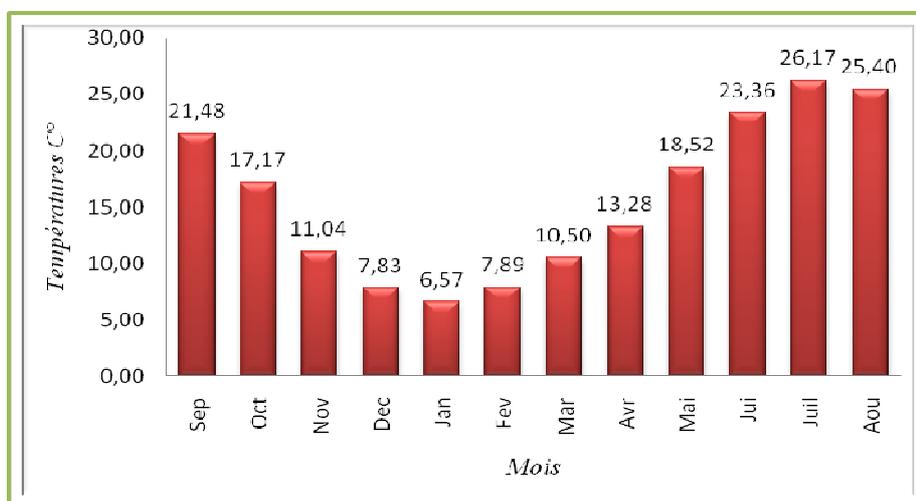


Fig. 22. Répartition mensuelle des températures 73/2009

- À l'échelle annuelle, on note une fluctuation thermique de faible amplitude (de 13,14 °C à 19,08°C) donnant une certaine constance de l'allure générale. La moyenne annuelle est de 15.66°C. (Fig. 23).

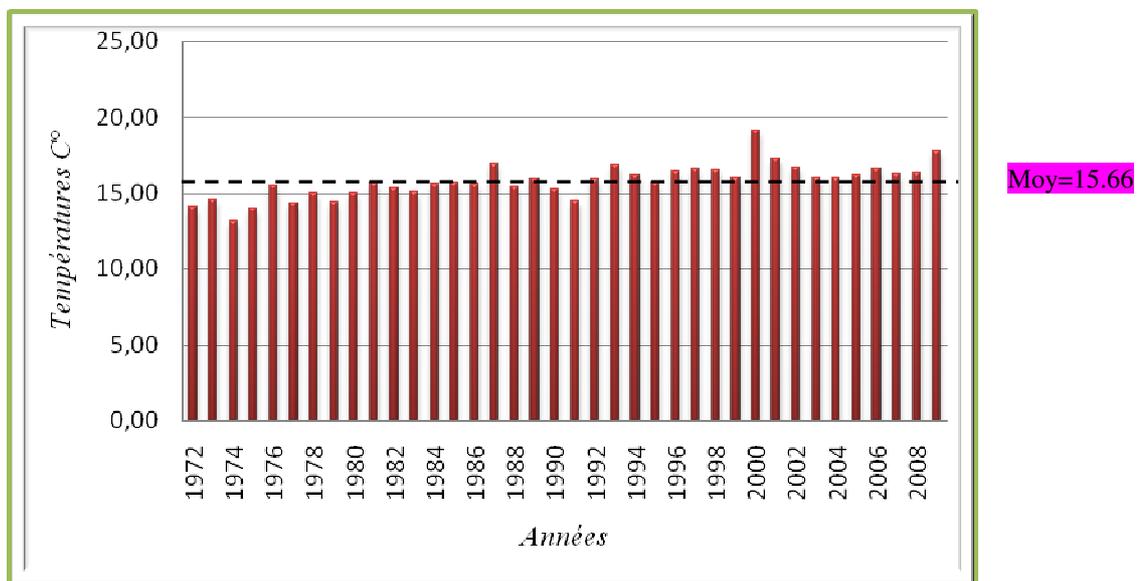


Fig. 23. Températures moyennes interannuelles à la station de Tébessa (72/2009)

II. 3. 2.6. La neige

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

La surface du sous bassin 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.

II. 3. 3. Calcul du coefficient pluviométrique

$$C_p = 365 \times P_i / P_n \text{ , Avec :}$$

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 :

$$C_p = (365/n_i) \cdot (P_i/P) = K \cdot (P_i/P) \quad \text{Avec:}$$

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,

$k = 365 / (28 \text{ jours} \cdot 3 \text{ ans} + 29) / 4 = 12.92$.

Pour la station de Tébessa avec $p = 376.20 \text{ mm}$ 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	1,18	0,95	0,84	0,89	1,25	1,01	1,19	0,90	0,38	0,92	1,30	1,01

Tab. 6. Coefficient pluviométrique de la plaine de Tébessa. (72/2009).

Saison humide : Cp (sh) = 6.13

Saison sèche : Cp (ss)= 5 .70

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

$6.13 / 5.70 =1.08 \quad 1 < R < 1.75$ (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.

II. 3.4. Détermination des indices climatiques

II. 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.24). 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 :

$$Q = \frac{376.20}{(306.51) + 273.94) / 2 (306.51 - 273.94)} \cdot 1000 = 39.79$$

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

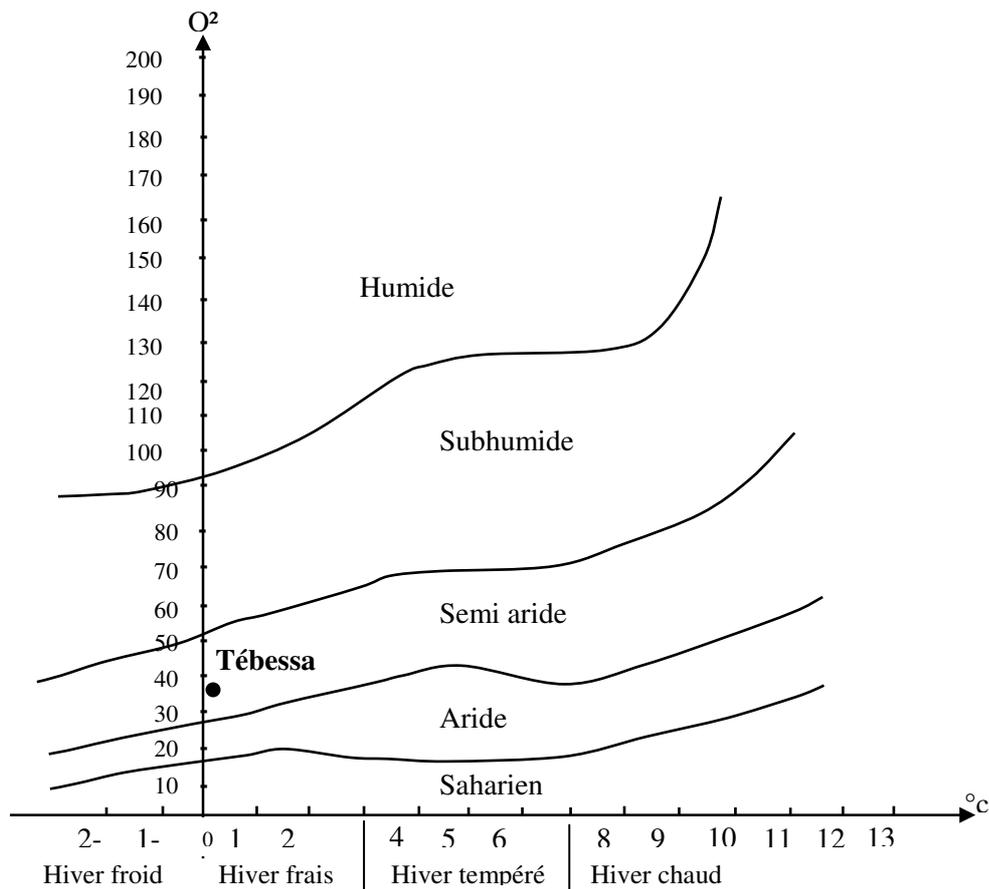


Fig. 24. Climagramme d'EMBERGER

II. 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. 25). 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 :

$P = 376.20$ et $T = 15.66$ °C, ce qui donne : $I = 14.66$

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

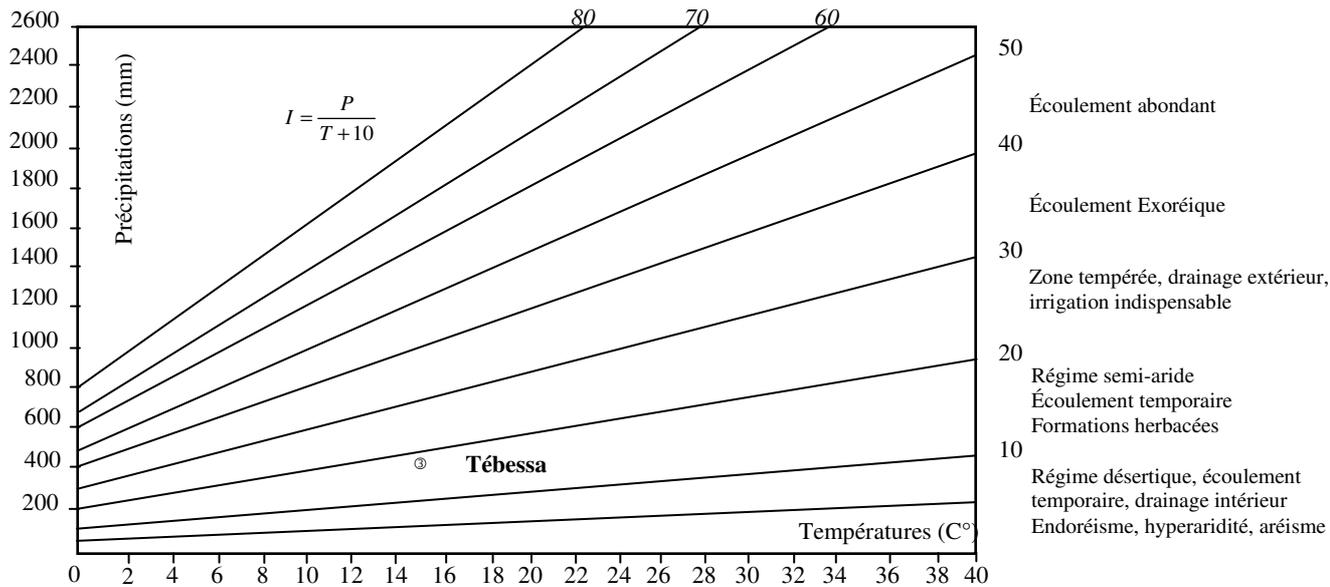


Fig. 25. Abaque de l'Indice d'aridité Annuel de DE Martone 1923

Indice d'aridité mensuelle:

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

$$I = 12.P/T + 10$$

Avec:

P : précipitation mensuelle moyenne (mm)

T : température mensuelle moyenne (°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. 7. Indice d'aridité mensuel

D'après les résultats présentés dans le tableau (7), 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 de l'année (Fig.26).

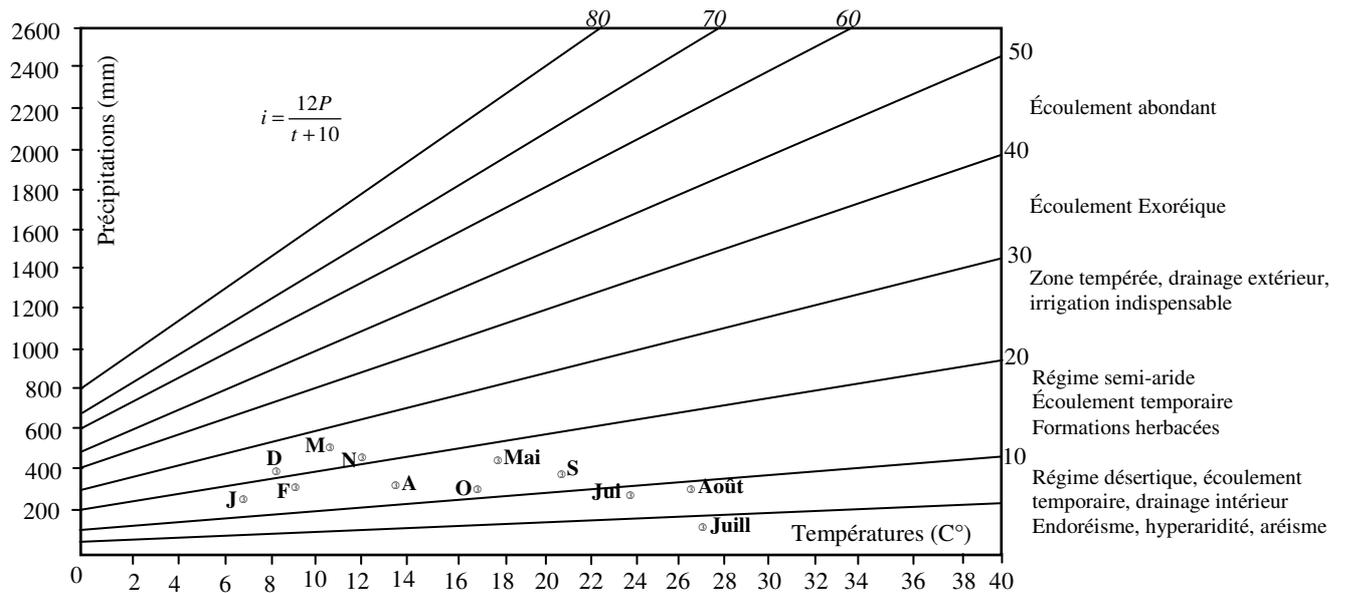


Fig. 26. Abaque de l'Indice d'aridité Mensuel de DE Martone 1923

II. 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.

II. 4. 1. Étude 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.

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

$$i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1.514}$$

$$I = \sum i \quad a = \left(\frac{1.6}{100} \right) I + 0.5$$

T : Température moyenne du mois considéré en °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.

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

$L = 300 + 25T + 0.05 T^3$ (facteur qui tient compte des échanges de chaleur).

P : Précipitation moyenne annuelle en mm, T : Température moyenne annuelle en °C.

Évapotranspiration 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. 8) 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	341.2	90.69
Turc	354.44	95.49

Tab. 8. ETR selon L. Turc et C.V. Thornthwaite

II. 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 piézométrique de la nappe aquifère.
- Le climat de la région.
- Le type de la couverture végétale.

Ricard. J (1974), dans son travail a calculé la RFU, en tenant compte du coefficient de rétention (CR). Cette dernière est égale à 26 mm.

II. 4. 3. Indice thermique mensuel

Cet indice est calculé à partir de la température moyenne mensuelle (t) du mois considéré.

$$i.=(t/s).1,5$$

II. 4. 4. Indice thermique annuel

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

$$I=\sum i$$

II. 4. 5. Répartition des précipitations

a. / Calcul du ruissellement

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

$$R= P^3/3(ETP)^2 \quad \text{Si } P < 600 \text{ mm, Avec :}$$

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

Périodes	Pr (m)	ETP (m)	R (m)	R (%)
72/2009	0.376	0.852	0.024	6.38
99/2009	0.402	0.891	0.026	6.46
72/73	0.634	0.877	0.126	19.87
96/97	0.207	0.807	0.004	1.93

Tab. 9. Résultats du ruissellement pour les différentes périodes.

b. / Calcul de l'infiltration

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

$$P = ETR+R+I$$

Alors:

$$I = P-R-ETR$$

Périodes	Infiltration (mm)	Infiltration (%)
72/2009	11	2.92
99/2009	14.1	3.49
72/73	179.5	28.28
96/97	00	00

Tab. 10. Résultats de l'infiltration pour les différentes périodes.

En examinant les résultats du Tableau 11 on distingue :

Période 72/2009

La lame d'eau précipitée d'environ 376.20 mm, plus de 90% est évapotranspirée (341.2mm), pour le volume infiltré aboutissant aux nappes souterraines, il est de 11 mm (2.92 %), qui varie fortement avec la nature des terrains. Le ruissellement est plus important que l'infiltration 24 mm (6.38%) qui est du à la présence des pentes dans le terrain traversé ainsi que la nature du terrain.

Périodes	Pr	ETR	% ETR	R	R %	I	I %
72/2009	376.20	341.2	90.69	24	6.38	11	2.92
992009	402.9	362 .6	89.99	26	6.46	14.1	3.49
72/73	634.7	329.2	51.86	126	19.87	179.5	28.28
96/97	207.4	207.4	100	00	00	00	00

Tab. 11. Récapitulatif des résultats d'ETR, R, I, pour les différentes périodes.

Période 99/2009

Sur un total précipité de 402.84 mm, (89.99%) d'eau est évapotranspirée (362.6), l'eau infiltrée est plus importante que celle ruisselée avec 14.1 mm (3.49 %) et 26 mm (6.46 %) respectivement et cela revient à la nature du terrain de la région.

Période pluvieuse 72/73

La lame d'eau précipitée est d'environ (634.7 mm), 51.86 % est évapotranspirée (329.2 mm), une grande quantité de cette eau ruisselle qui est de l'ordre de 126 mm (19.87 %) et le reste de 179.5 mm (28.28 %) 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 Tébéssa pour une période de 37 ans, 10 ans, année pluvieuse et année sèche, allant de l'année 72 jusqu'au 2009.

Mois	T ⁰ C	i	K	Pr	ETP	BH	RFU	ETR	Def	Exc
Sep	21,48	9,1	1,03	40,63	99,5	-58,9	0,0	40,6	58,9	0,0
Oct	17,17	6,5	0,97	34,79	64,4	-29,6	0,0	34,8	29,6	0,0
Nov	11,04	3,3	0,86	33,86	27,3	6,6	6,6	27,3	0,0	0,0
Dec	7,83	2,0	0,81	30,3	14,5	15,8	22,4	14,5	0,0	0,0
Jan	6,57	1,5	0,87	26,79	11,6	15,2	26,0	11,6	0,0	11,7
Fev	7,89	2,0	0,85	25,03	15,4	9,7	26,0	15,4	0,0	9,7
Mar	10,5	3,1	1,03	43,65	30,0	13,6	26,0	30,0	0,0	13,6
Avr	13,28	4,4	1,10	32,93	47,5	-14,6	11,4	47,5	0,0	0,0
Mai	18,52	7,3	1,21	38,68	91,2	-52,5	0,0	50,1	41,1	0,0
Jui	23,36	10,3	1,22	27,55	135,6	-108,1	0,0	27,6	108,1	0,0
Jul	26,17	12,3	1,24	12,49	166,7	-154,2	0,0	12,5	154,2	0,0
Aou	25,4	11,7	1,16	29,51	148,4	-118,9	0,0	29,5	118,9	0,0
Tot	15,8	73,4		376,2	852,1	-475,9		341,2	510,8	35,0

Tab. 12. Bilan hydrique global d'après la méthode de Thornthwaite/Station de Tébessa72/2009

- 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:

$$P = \sum ETR + \sum EX \quad A.N: P = 341.2 + 35 = 376.20$$

$$ETP = \sum ETR + \sum DA \quad A.N: ETP = 341.2 + 510.8 = 852.1$$

mois	T ⁰ C	i	K	Pr	ETP	BH	RFU	ETR	Def	Exc
S	21,77	9,3	1,03	46,6	98,1	-51,5	0,0	46,6	51,5	0,0
O	19,64	7,9	0,97	38,155	76,9	-38,8	0,0	38,2	38,8	0,0
N	11,6	3,6	0,86	38,691	26,8	11,9	11,9	26,8	0,0	0,0
D	8,18	2,1	0,81	45,045	13,6	31,5	26,0	13,6	0,0	17,4
J	7,15	1,7	0,87	34,327	11,5	22,9	26,0	11,5	0,0	22,9
F	8,62	2,3	0,85	14,864	15,6	-0,7	25,3	15,6	0,0	0,0
M	12,63	4,1	1,03	29,1	37,3	-8,2	17,1	37,3	0,0	0,0
A	14,47	5,0	1,10	34,818	50,7	-15,9	1,2	50,7	0,0	0,0
M	19,79	8,0	1,21	41,982	97,2	-55,3	0,0	43,2	54,0	0,0
J	24,08	10,8	1,22	29,109	138,9	-109,8	0,0	29,1	109,8	0,0
J	27,1	12,9	1,24	17,509	174,2	-156,7	0,0	17,5	156,7	0,0
A	25,9	12,1	1,16	32,645	150,3	-117,7	0,0	32,6	117,7	0,0
Total	16,7	79,8		402,9	891,0	-488,1		362,6	528,4	40,3

Tab. 13. Bilan hydrique d'après la méthode de Thornthwaite/ Station de Tébessa 99/2009.

Formules de vérification:

$$P = \sum ETR + \sum EX \quad P = 362.6 + 40.3 = 402.9$$

$$ETP = \sum ETR + \sum DA \quad ETP = 362.6 + 528.4 = 891.0$$

mois	T ⁰ C	i	K	Pr	ETP	BH	RFU	ETR	Def	Exc
S	19,8	8,0	1,03	28,2	91,9	-63,7	0,0	28,2	63,7	0,0
O	13,7	4,6	0,97	152,2	49,2	103,0	26,0	49,2	0,0	77,0
N	10,7	3,2	0,86	17,7	29,9	-12,2	13,8	29,9	0,0	0,0
D	5,7	1,2	0,81	30,8	10,7	20,1	26,0	10,7	0,0	7,9
J	4,4	0,8	0,87	14,9	7,7	7,2	26,0	7,7	0,0	7,2
F	4,8	0,9	0,85	39,3	8,6	30,7	26,0	8,6	0,0	30,7
M	5,6	1,2	1,03	172,3	13,3	159,0	26,0	13,3	0,0	159,0
A	10,5	3,1	1,10	60,8	37,1	23,7	26,0	37,1	0,0	23,7
M	19,9	8,1	1,21	25	108,7	-83,7	0,0	51,0	57,7	0,0
J	23,1	10,1	1,22	47,9	137,8	-89,9	0,0	47,9	89,9	0,0
J	26,9	12,8	1,24	8,4	176,9	-168,5	0,0	8,4	168,5	0,0
A	23,6	10,5	1,16	37,2	135,4	-98,2	0,0	37,2	98,2	0,0
Total	14,1	64,5		634,7	807,2	-172,5		329,2	478,0	305,5

Tab.14. Bilan hydrique d'après la méthode de Thornthwaite/ Station de Tébessa.
Année pluvieuse 72 /73.

Formules de vérification:

$$P = \sum ETR + \sum EX \quad P = 329.2 + 305.5 = 634.7$$

$$ETP = \sum ETR + \sum DA \quad ETP = 329.2 + 478.0 = 807.2$$

mois	T ⁰ C	i	K	Pr	ETP	BH	RFU	ETR	Def	Exc
S	20,5	8,5	1,03	12,4	89,1	-76,7	0,0	12,4	76,7	0,0
O	17	6,4	0,97	4,1	60,4	-56,3	0,0	4,1	56,3	0,0
N	11,8	3,7	0,86	1,2	28,2	-27,0	0,0	1,2	27,0	0,0
D	13,2	4,3	0,81	15	32,4	-17,4	0,0	15,0	17,4	0,0
J	7,1	1,7	0,87	31,6	11,7	19,9	19,9	11,7	0,0	0,0
F	8,2	2,1	0,85	7,1	14,8	-7,7	12,2	14,8	0,0	0,0
M	9,8	2,8	1,03	18,9	24,4	-5,5	6,7	24,4	0,0	0,0
A	15,5	5,5	1,10	46,8	58,3	-11,5	0,0	53,5	4,8	0,0
M	17,7	6,8	1,21	16,1	80,9	-64,8	0,0	16,1	64,8	0,0
J	24,6	11,2	1,22	10,3	145,2	-134,9	0,0	10,3	134,9	0,0
J	27,8	13,4	1,24	20,2	182,8	-162,6	0,0	20,2	162,6	0,0
A	25,7	11,9	1,16	23,7	149,1	-125,4	0,0	23,7	125,4	0,0
Total	16,6	78,3		207,4	877,2	-669,8		207,4	669,8	0,0

Tab.15. Bilan hydrique d'après la méthode de Thornthwaite/ Station de Tébessa.
Année sèche 96/97.

Formules de vérification:

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

$$ETP = \sum ETR + \sum DA \quad ETP = 207.4 + 669.8 = 877.2$$

II. 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 72-2009

- 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. 12).

La figure ci-dessous (Fig. 27) illustre les résultats du tableau (12) sur 37 ans (72/2009), sur le bilan de Thornthwaite, qui nous permet une lecture simple des différents éléments du bilan.

- Les hauteurs de précipitation atteignent leur maximum au mois de septembre (40.63 mm) où l'ETP atteint en janvier un minimum (11.6 mm).

- L'ETP atteint son maximum au mois de juillet (166.7 mm) où les précipitations atteignent (12.49 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).

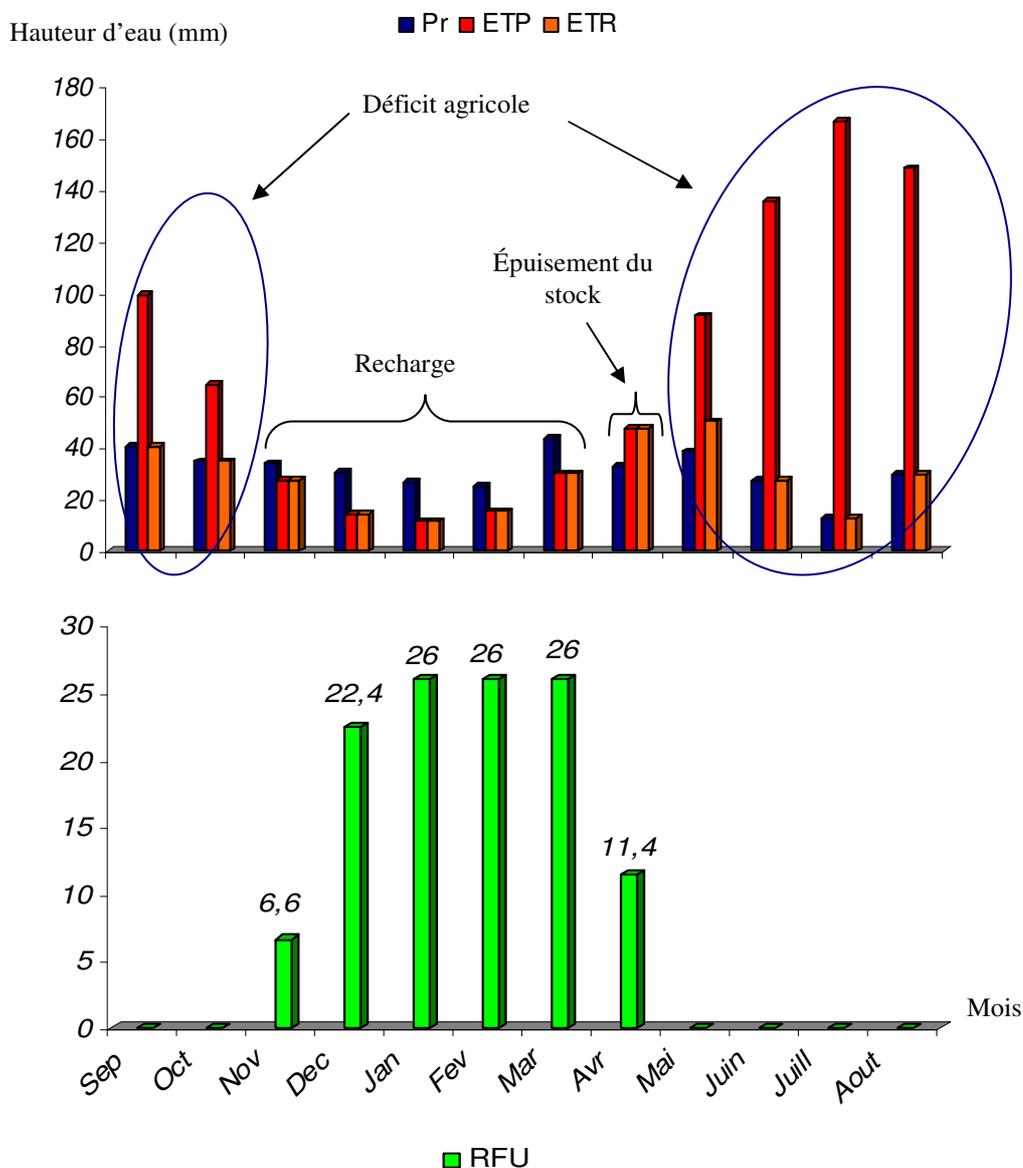


Fig. 27. Représentation graphique du bilan de Thornthwaite/ Station de Tébessa (1972/2009).

Bilan hydrique période allant de 99-2009:

Sur cette période qui s'étale de l'année 99 au 2009 (Tab. 13) 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. Pendant le mois de Novembre le stock se reconstitue atteignant un maximum au mois de

Janvier (26 mm) puis diminue en février 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 Décembre et un minimum en mois de Février (figure 28).

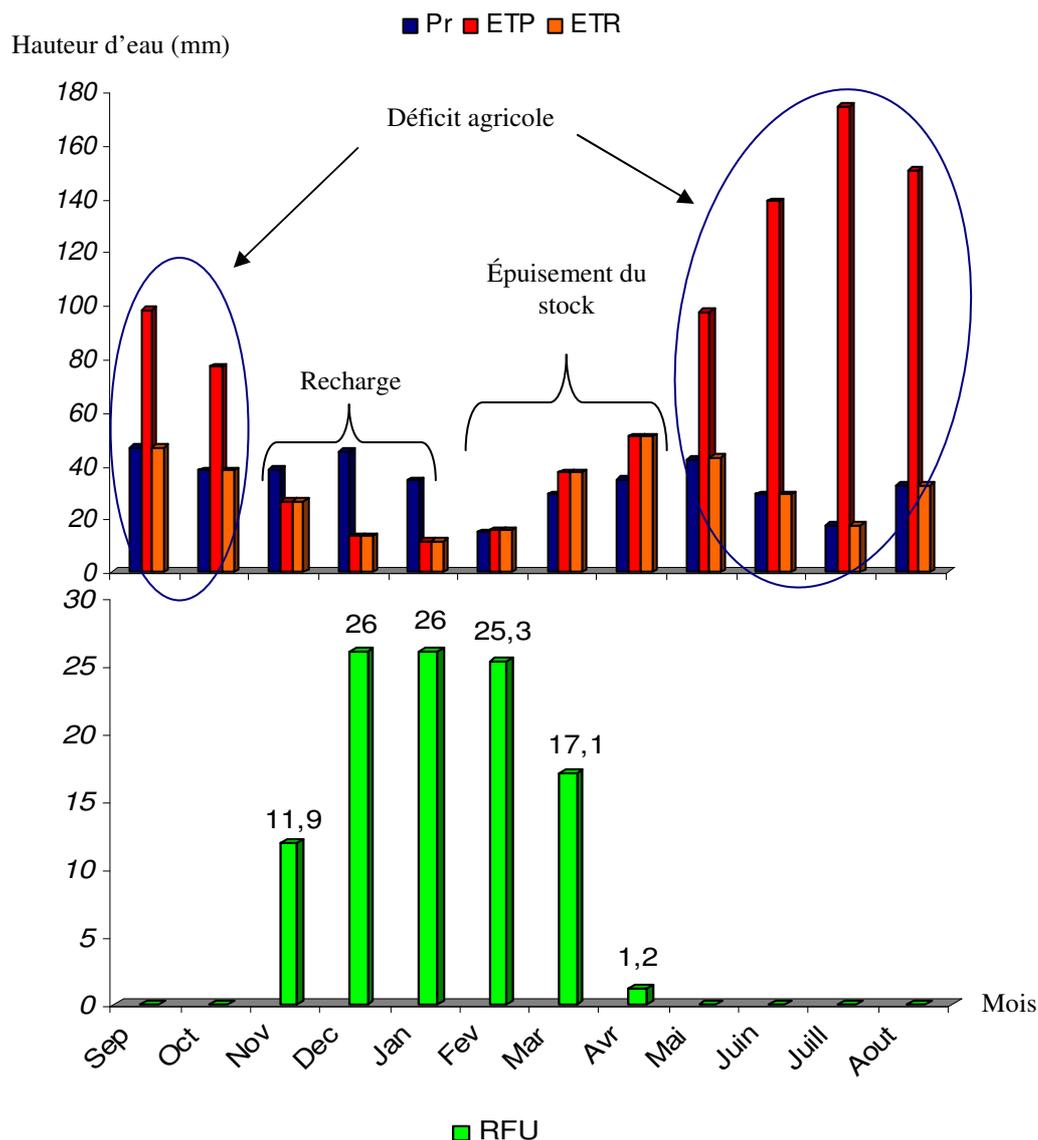


Fig. 28. Représentation graphique du bilan de Thornthwaite/ Station de Tébessa (1999 /2009).

Bilan hydrique année pluvieuse 72/73

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

Le bilan établie selon la méthode de Thornthwaite (tableau 14), montre un déficit agricole s'étalant du mois de mai jusqu'au mois de septembre, période pendant laquelle la RFU est épuisée.

Le mois d'octobre annonce une reconstitution du stock. La RFU atteint son maximum (26 mm) au cours de la période allant du mois de Décembre jusqu'au mois de Mars au-delà, elle diminue jusqu'à son épuisement total (Mai) (Figure 29).

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

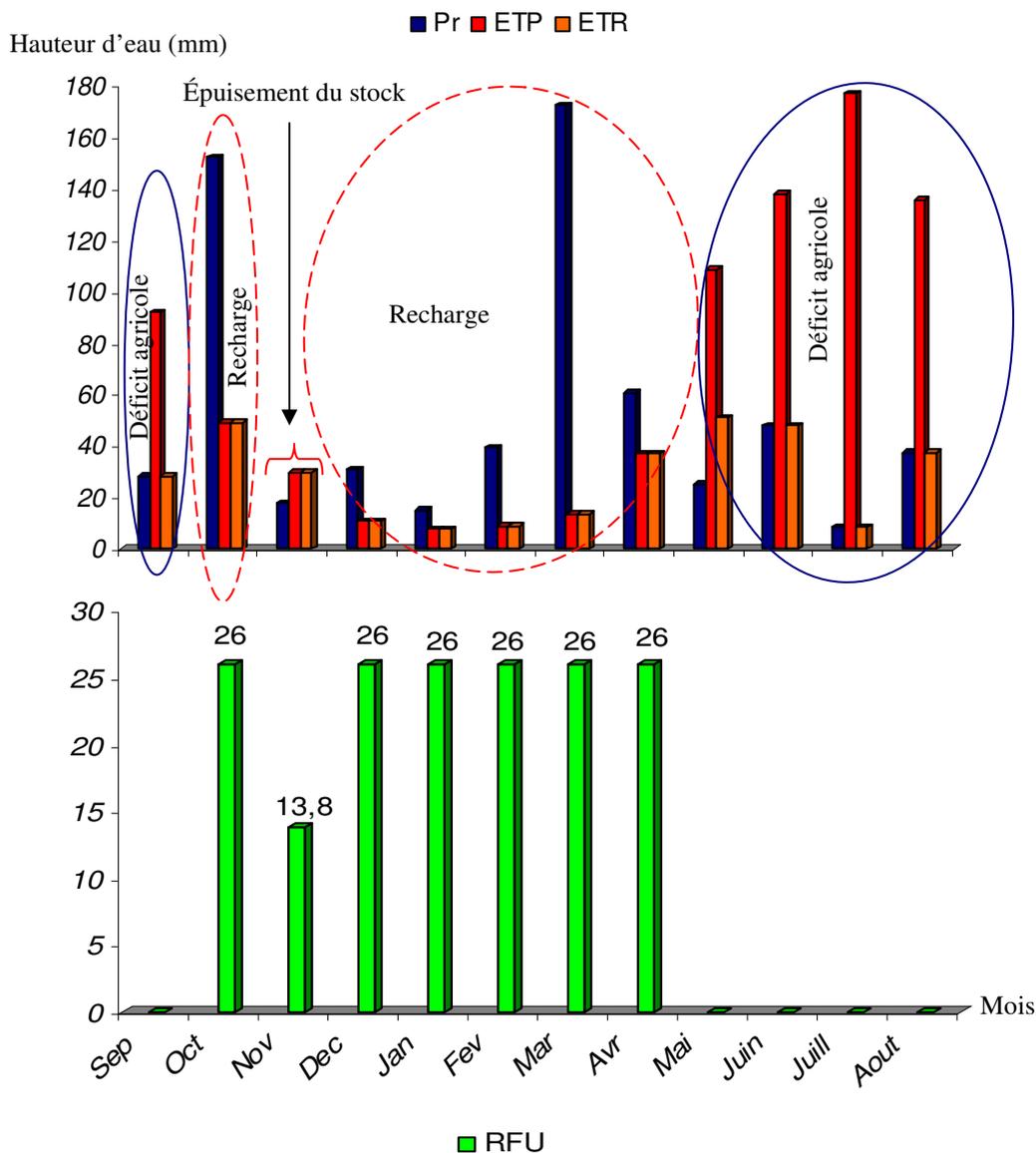


Fig. 29. Représentation graphique du bilan de Thornthwaite/ Station de Tébessa (1972 /73)

Bilan hydrique année sèche 96/97

Cette année est la plus sèche pendant une période de trente sept ans (72/2009). L'établissement du bilan hydrique de Thornthwaite (Tab 15) nous a aidé a montré que :

Le déficit agricole commence à partir d'avril et se poursuit jusqu'au mois de décembre période, pendant laquelle la RFU est épuisée.

La RFU est reconstituée pour quelques mois mais avec des quantités très minimes.

L'écoulement (excédent) est nul c'est une année déficitaire (Figure 30).

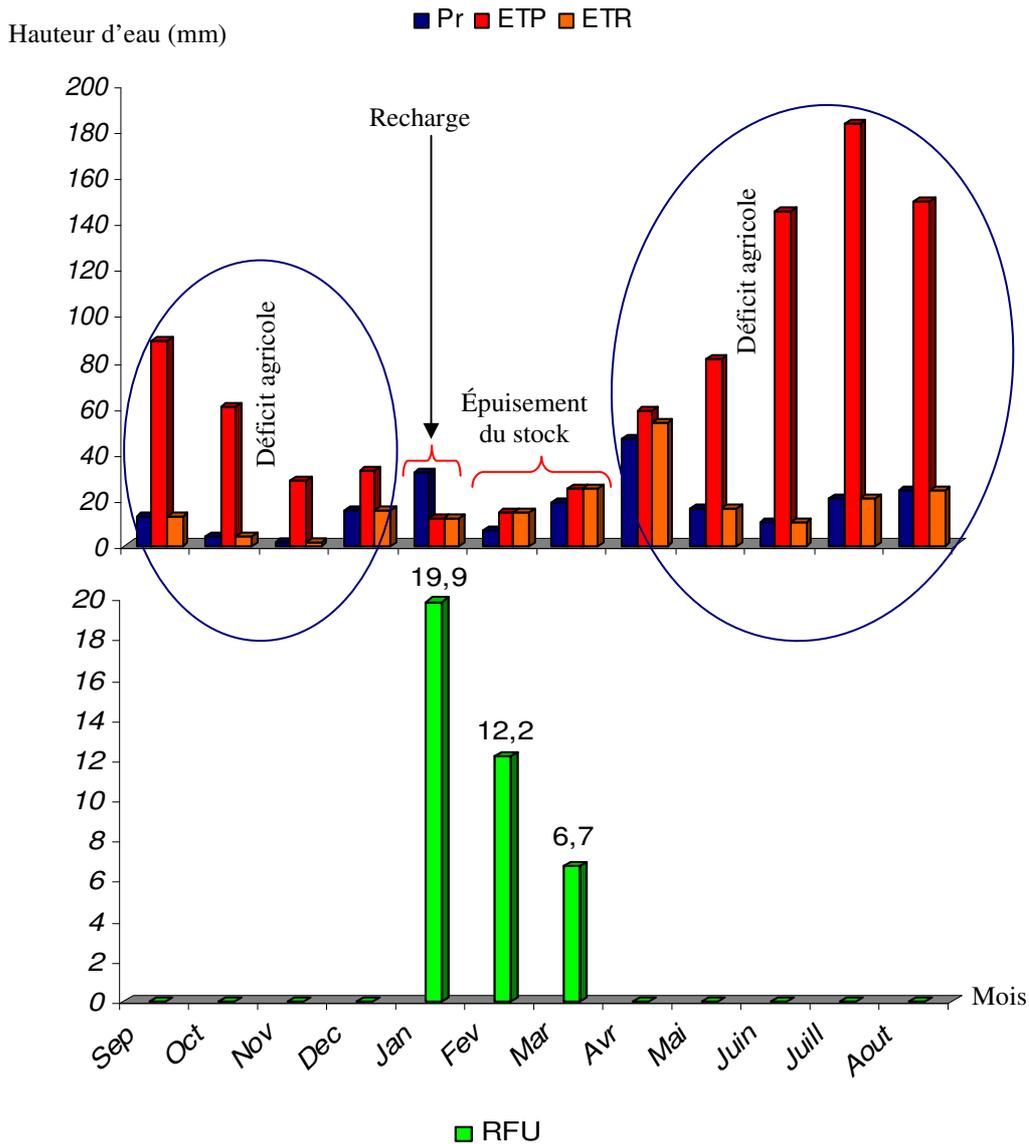


Fig. 30. Représentation graphique du bilan de Thornthwaite/ Station de Tébéssa (1996 /97)

II. 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 écoulee, qui varie de moins 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 31). (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 écoulee varie de 5 à 100 mm/an.

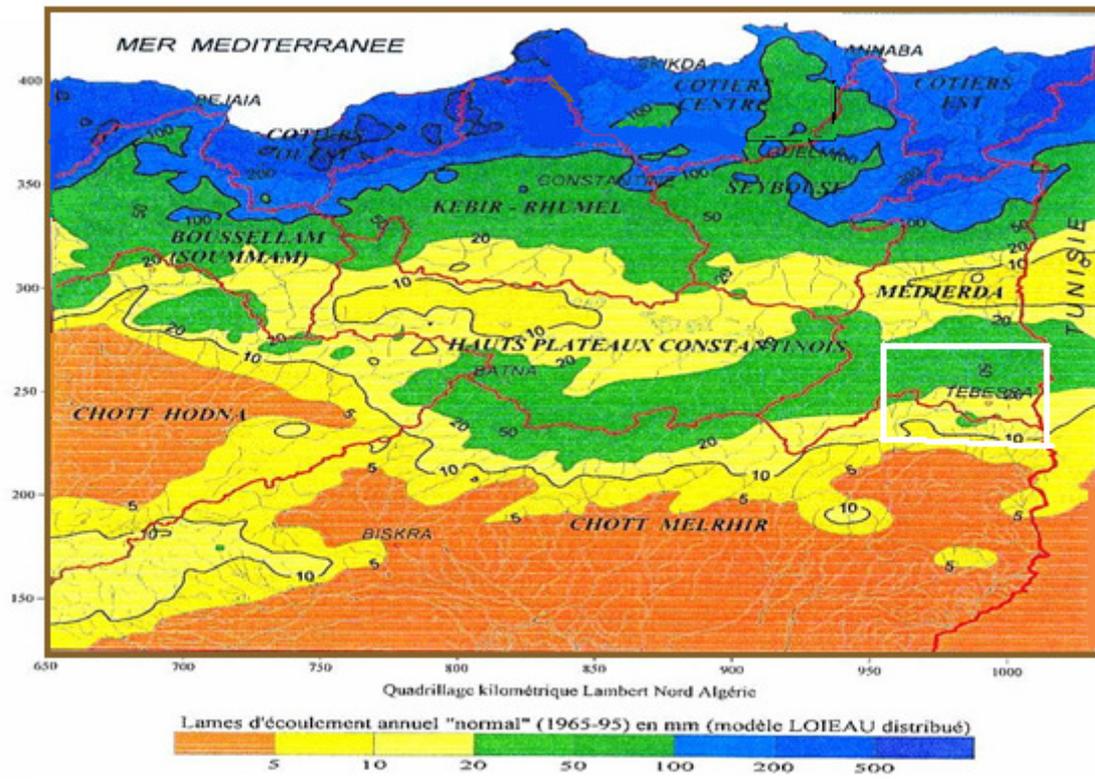


Fig. 31. Écoulement interannuel moyen dans la zone d'étude (1965-1995)

II.6. HYDROLOGIE :

II.6. 1. Hydrographie :

Le bassin versant de Tébessa - Bekkaria - Ain chabro est d'une superficie de 1200 km², Il fait partie du bassin de Medjerda et du sous bassin de Mellègue, il est drainé par les oueds Kebir Ain chabro et ksob.

À l'Est (région de Bekkaria) la confluence de oued Djebissa et oued Oglat el Rahrab constitue Oued Kebir, qui s'écoule d'Est en Ouest et traverse ainsi la totalité de la plaine.

L'oued Chabro qui prend le nom de oued Ksob après sa confluence avec oued Kouri, forme ainsi l'axe principal du réseau hydrographique. En rive droite il reçoit oued Kébir qui draine la plaine de Tébessa. (Figure 32).

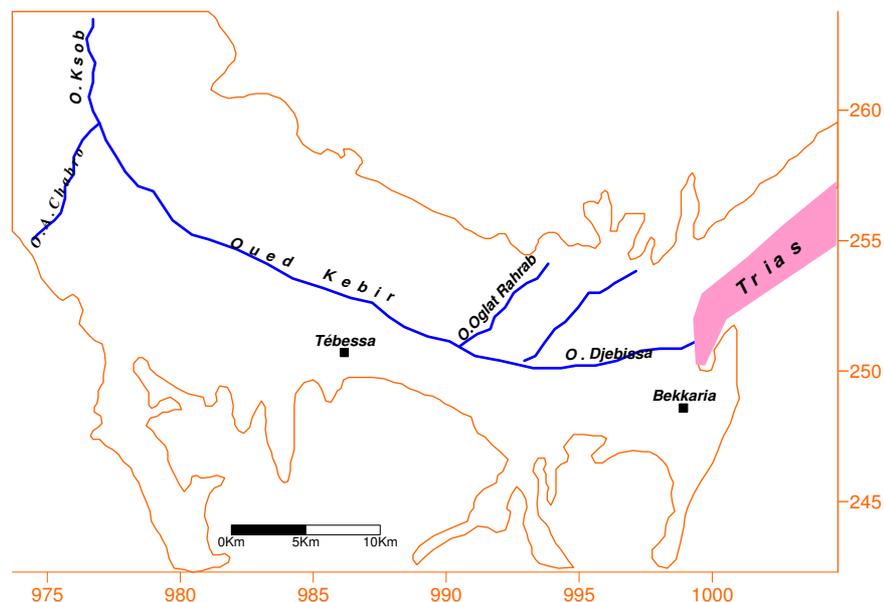


Fig-32. Carte des oueds de la plaine de Tébessa

II.6. 2. Écoulement de surface et régime hydrologique :

En se basant sur les données présentées dans le tableau 16, mesurées dans la station de jaugeage de oued Ksob avec les coordonnées X = 978.300 ; Y = 272.900 ; Z = 720m.

Nous avons réalisé la courbe des débits moyens mensuels sur une période de 05 années 2005-2009, (fig.33). L'interprétation de la courbe montre une certaine variation des débits d'un mois à l'autre. Nous constatons que les fortes valeurs sont enregistrées pendant la période des hautes eaux (0.0366 m³/s au mois de Novembre, 0.0308 m³/s au mois d'avril) et les faibles valeurs marquent la période des basses eaux avec 0.0164 m³/s au mois de juin, 0.009 m³/s au mois de juillet.

	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Moy
2005	0.002	0.004	0.156	0.043	0.029	0.020	0.002	0.002	0.001	0.026	0.001	0.023	0,026
2006	0.021	0.067	0.024	0.041	0.023	0.001	0.001	0.029	0.026	0.021	0.001	0.024	0,023
2007	0.041	0.001	0.001	0.019	0.001	0.001	0.059	0.058	0.002	0.034	0.021	0.051	0,024
2008	0.061	0.04	0.001	0.036	0.001	0.001	0.031	0.014	0.054	0.001	0.001	0.020	0,022
2009	0.001	0.001	0.001	0.001	0.053	0.002	0.031	0.051	0.069	0	0.021	0.009	0,020
Moy	0,025	0,0226	0,0366	0,028	0,0214	0,005	0,0248	0,0308	0,0304	0,0164	0,009	0,0254	

Tableau. 16. Estimation des débits instantanés en (m³/s) de l'oued Ksob pour la période (2005-2009).

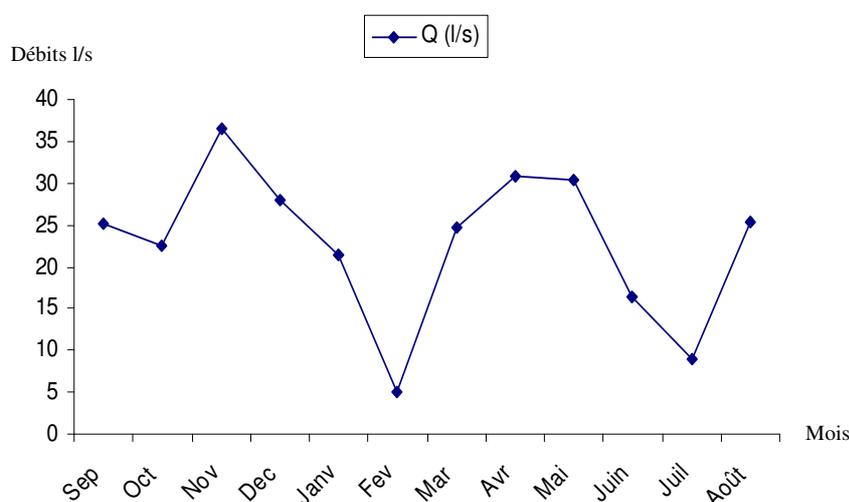


Fig-33. Évolution des débits instantanés en (l/s) de l'oued Ksob pour la période (2005-2009).

II.6. 2.1.Coefficient mensuel des débits (CMD) :

Le calcul de ce coefficient permet de distinguer les périodes des hautes et des basses

eaux tableau 17, il est calculé par la relation suivante : $CMD = \frac{Q_i}{Q}$ avec

Q_i : Débits des mois considérés,

Q : Débit moyen annuel.

	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
Qi	0,025	0,0226	0,0366	0,028	0,0214	0,005	0,0248	0,0308	0,0304	0,0164	0,009	0,0254
Q	0.023											
CMD	1,096	1,040	1,591	1,217	1,051	0,311	1,078	1,440	1,240	0,713	0,391	0,886
P	39,84	37,9	34,34	45,4	30,48	15,6	30,72	38,8	37,18	22,02	13,46	32,88

Tableau17. Coefficient mensuel des débits de l'oued Ksob pour la période (2005-2009)

D'après la figure 34 on remarque que la période des hautes eaux s'étale du mois de Septembre jusqu'au mois de Mai et celle des basses eaux commence au mois de Juin et se termine au mois d'Août.

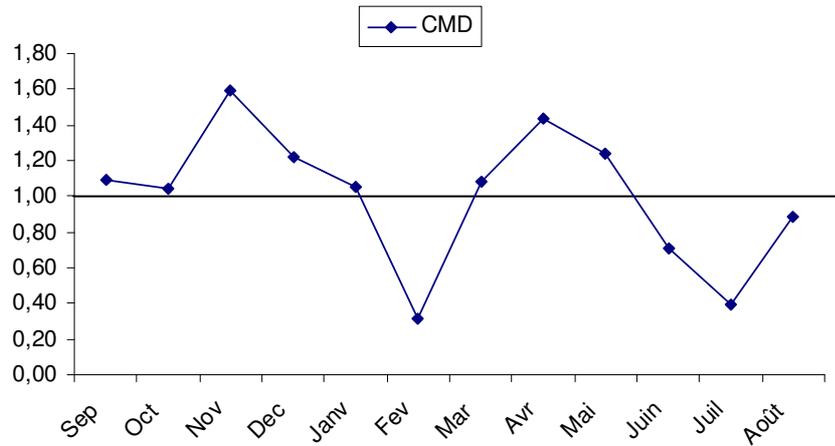


Fig-34. Évolution du coefficient mensuel des débits en (m^3/s) de l'oued Ksob pour la période (2005-2009).

On note que l'évolution des débits montre un certain parallélisme avec celle des précipitations (Figure 35).

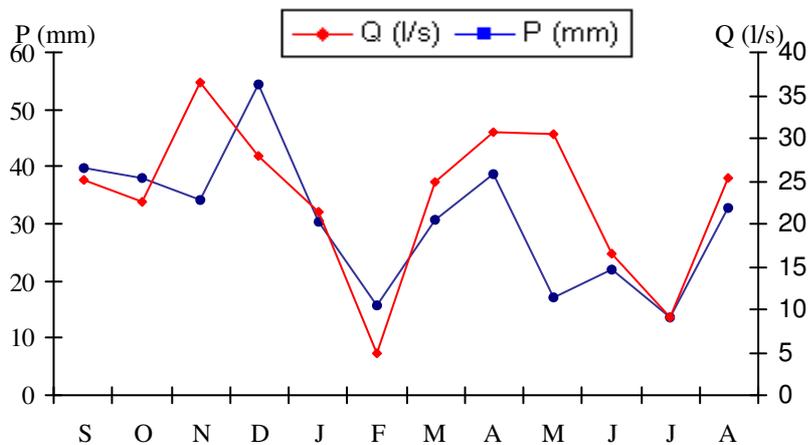


Fig-35. Évolution des débits mensuels de l'oued Ksob en fonction des précipitations pour la période (2005-2009).

II. 7. 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 37 ans (72/73 – 2008/2009), sont estimées à 376.20 mm. L'évapotranspiration réelle est estimée à 332.72 mm soit 89.64 % des précipitations. Le ruissellement ne 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 sept ans 72/2009 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 6 34, mm.

CHAPITRE III

GÉOMETRIE DE L'AQUIFERE

Dans les zones à géologie contrastée caractérisée par une variation de faciès, la détermination de l'extension des aquifères est souvent difficile. Pour atteindre cet objectif le recours à d'autres méthodes telles que la géophysique ou l'établissement de coupes hydrogéologiques est obligatoire.

III. 1. Introduction

La région d'étude contient plusieurs niveaux aquifères dont l'extension reste mal connue. Pour déterminer avec exactitude la disposition de ces aquifères ainsi que la nature lithologique des formations les contenant la compilation de plusieurs méthodes reste la meilleure approche. Pour mener notre travail nous avons essayé de réinterpréter les résultats acquis à partir des études géophysiques réalisées dans la région.

III. 1. 1. Apports de l'étude géophysique de 1970

Le bassin de Tébessa-Morsott a été couvert par une prospection électrique assez importante, à l'aide de deux cent quarante deux sondages électriques avec une ligne AB=6000 m, réalisés par la Compagnie Générale de Géophysique. Cette étude a été réalisée par CGG.

Les résultats obtenus montrent la succession de trois niveaux plus ou moins aquifères situés à différentes profondeurs. Ces niveaux restent plus ou moins protégés vis-à-vis de la pollution. Ainsi le niveau superficiel (P1), est situé à quelques mètres et reste exposé à la pollution, particulièrement celle issue à partir de mine de fer et formations gypsifères.

La détermination du risque de pollution rend la connaissance de la nature des formations à l'affleurement impérative, ceci se fera par l'interprétation des informations fournies par les sondages électriques et mécaniques implantés dans la partie étudiée

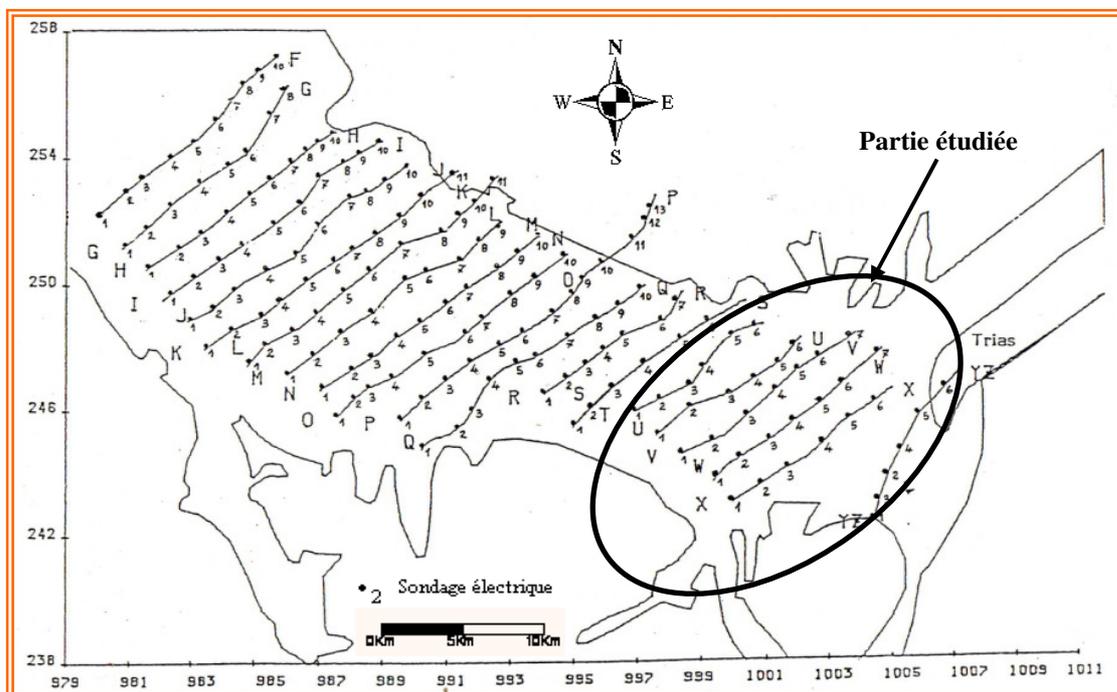


Fig. 36. Carte d'implantation des sondages électriques

Vingt profils électriques ont couvert la plaine de Tébessa (fig.36), seul six (6) profils ont touchés la zone étudiée, il s'agit des profils U, V, W, X et YZ. Les informations recueillies seront utilisés pour la confirmation de la nature des formations, ceci se fera à l'aide de la réalisation d'une corrélation entre les données géologiques et géophysiques.

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

On note une alternance des couches résistantes et des couches conductrices sur trois horizons P₁, P₂, et P₃ qui se suivent et se superposent d'une manière irrégulière. Chacun de ces horizons est caractérisé par ses résistivités et sa position. Par ailleurs nos travaux portent sur la pollution issue de la mine de fer, nous nous intéresserons uniquement au niveau superficiel P₁.

L'horizon P₁ : Á ce niveau, les résistivités varient entre 5 et 50 Ωm, 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. 37 et 38).

- 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).

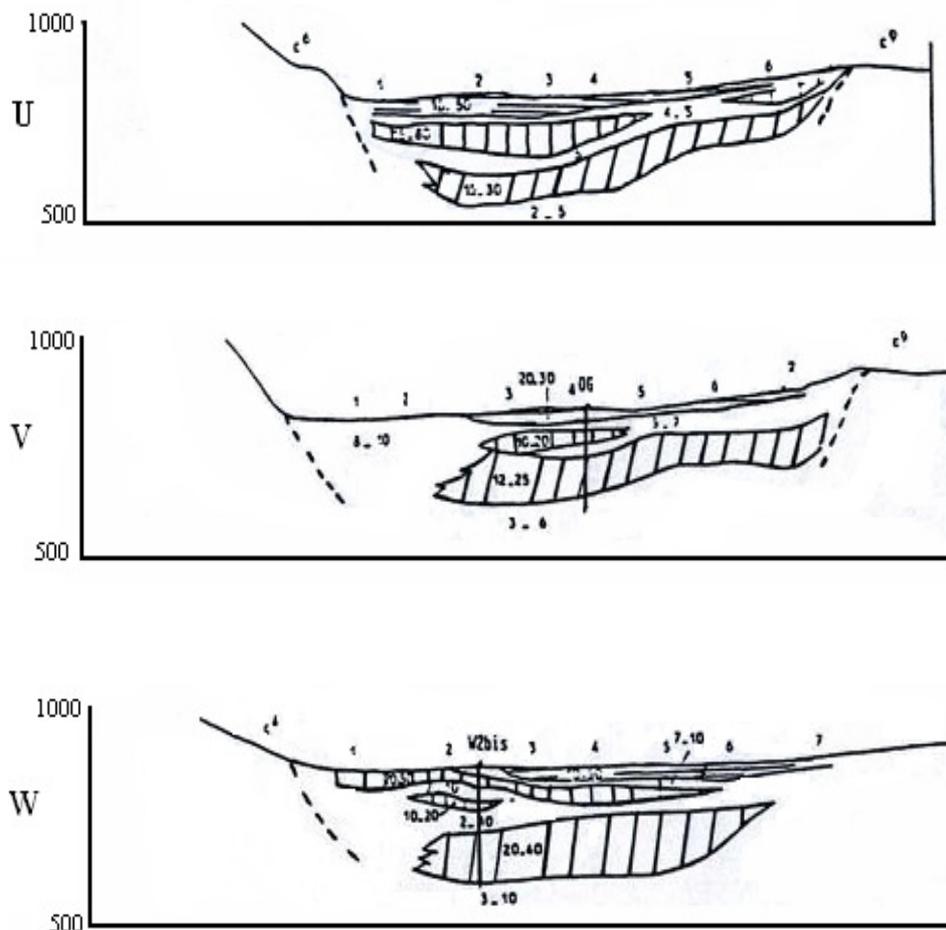


Fig. 37. Profils géo électriques/ Coupe de U à W

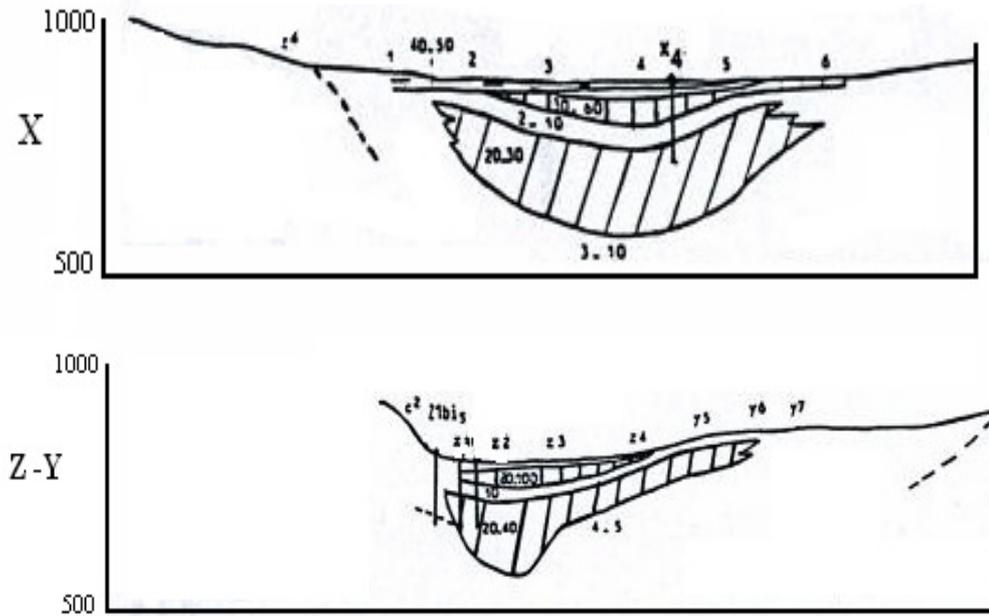
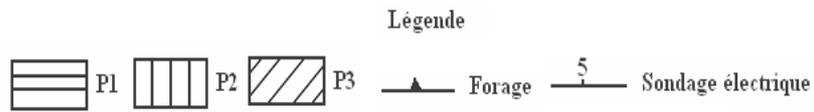


Fig. 38. Profils géo électriques/ Coupes X, YZ



In Djabri 1987

III. 2.1. Carte en Isopaches

La succession des valeurs de résistivités, nous a permis de déterminer l'épaisseur du niveau superficiel. Cette dernière est mesurée au niveau des sondages électriques. Ainsi (171) valeurs ont été déterminées. La figure 39, montre que les épaisseurs sont faibles et ne dépassent pas dix mètres (10), dans la région de Djebissa.

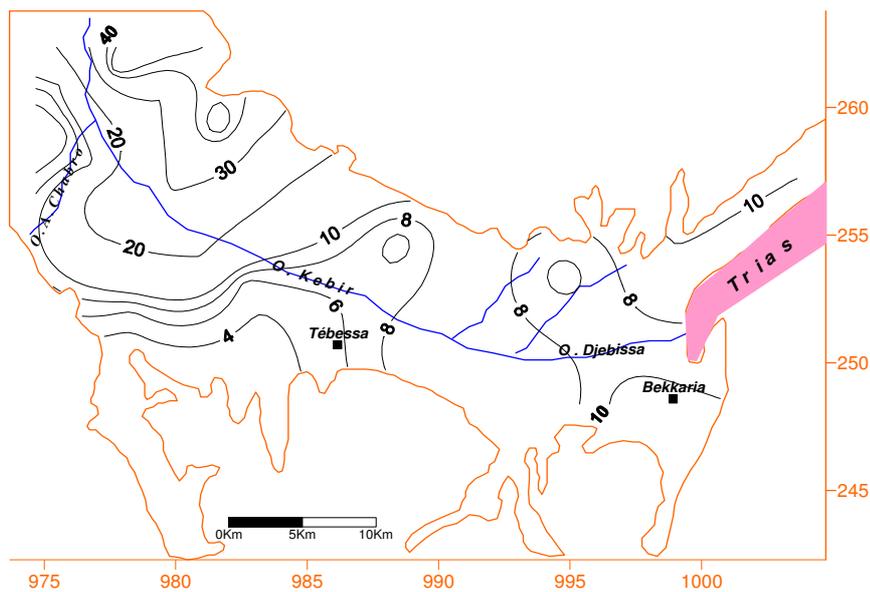


Fig.39. Carte en isopaches « P1 » (m)

III. 3. Détermination de la nature des roches

Pour connaître la lithologie, nous avons couplés deux paramètres, le facteur de formation et la porosité.

III. 3.1. Facteur de formation

Ce facteur est calculé en utilisant les cartes de résistivités et de conductivités électriques des eaux souterraines, à partir de toutes les données des sondages électriques, suivant la loi d'Archie (Astier, 1971).

La relation suivante a été utilisée pour calculer ce facteur dans les Quarante un sondages électriques disponibles (tableau 19).

$$F = \frac{R_o}{R_w} ; \text{ Avec } R_o : \text{ Résistivité électrique en } \Omega.m \text{ du réservoir aquifère,}$$

$$R_w : \text{ Résistivité électrique } \Omega.m \text{ de l'eau en fonction de NaCl.}$$

On calcul la valeur moyenne de F pour les quatre vingt un (81) sondages électriques.

$$F_M = \sum_{i=1}^N \frac{F_i}{N} ; \text{ Avec N : nombre total des sondages électriques.}$$

F_i : Facteur de formation pour chaque sondage électrique.

$$\text{D'où } F_M = \frac{535,25}{81} = 6,6$$

III. 3.2. La porosité

La porosité théorique totale est déterminée grâce à l'abaque d'Archie (Fig. 40) et aux valeurs du facteur de formation (F). Les résultats reportés au tableau 19 montrent quelques valeurs de porosité théorique totale forte, supérieure à 40 % qui ne se justifient pas en hydrogéologie (G.CASTANY, 1982).

Le tableau suivant établi par Astier en 1971, donne la nature des roches en utilisant le rapport des résistivités (F) des différentes formations, (Tableau 18).

	Roches meuble	R. consolidée à porosité d'interstices	R. consolidée à porosité fissurée
	Sable	Grès	Calcaire fissuré
Rapport des résistivités $F = \frac{R_o}{R_w}$	2,5	3,8	5,2
Tableau 18. Type de roche d'après le rapport de résistivités (ASTIER 1971)			

L'analyse des résultats obtenus tableau 18, fait apparaître trois types de roches :

- Roche meuble,
- Roche consolidée à porosité d'interstices,
- Roche consolidée à porosité de fissures.

N° du sondage	R_o	R_w	F	Porosité %	N° du sondage	R_o	R_w	F	Porosité %
1	30	2,5	12	16,5	46	9	10	0,9	> 40
2	115	3,3	34,8	6,5	47	10	3,3	3	> 40
3	11	25	0,4	> 40	48	20	3,3	6	27
4	26	5	5,2	29	49	30	3,3	9	19
5	8	10	0,8	> 40	50	50	3,3	15	15
6	10	10	1	> 40	51	80	3,3	24	9
7	6	6,6	0,9	> 40	52	55	5	11	15,5
8	14	5	2,8	> 40	53	56	5	11,2	16
9	14	3,3	4,2	38	54	22	20	11,1	> 40
10	10	6,6	1,5	> 40	55	84	5	16,8	12
11	45	10	4,5	34	56	63	5	12,6	15,5
12	50	5	10	18	57	45	6,6	6,8	25,5
13	75	10	7,5	21	58	40	6,6	6,06	2,7
14	95	10	9,5	10,8	59	50	6,6	7,5	21
15	70	6,6	10,6	18,9	60	32	10	3,2	> 40
16	35	5	7	23	61	33	10	3,3	> 40
17	85	3,3	25,7	8,5	62	30	10	3	> 40
18	10	3,3	3	> 40	63	5	10	0,5	> 40
19	72	6,6	10,9	16	64	50	20	2,5	> 40
20	250	10	25	8,6	65	9	5	1,8	> 40
21	50	10	5	28	66	7	5,5	1,2	> 40
22	18	20	0,9	> 40	67	32	7,1	4,5	32
23	15	10	1,5	> 40	68	48	5	9,6	18
24	5	3,3	1,5	> 40	69	21	5	4,2	33
25	22	5	4,4	35	70	75	5,5	13,6	15
26	15	20	0,75	> 40	71	27	50	0,54	> 40
27	9	5	1,8	> 40	72	5	10	0,5	> 40
28	75	5	15	15	73	6	20	0,3	> 40
29	50	6,6	7,5	21	74	16	4,3	3,7	36
30	50	10	10	18	75	83	4,3	19	11,5
31	34	10	3,4	> 40	76	45	20	2,25	> 40
32	17	20	0,85	> 40	77	26	4,5	5,7	27
33	34	5	6,8	20	78	11	4,5	2,4	> 40
34	37	3,3	11,2	16,5	79	25	20	1,25	> 40
35	64	5	12,8	15,5	80	13	20	0,65	> 40
36	50	5	10	18	81	11	20	0,5	> 40
37	60	3,3	18,1	11					
38	55	3,3	16,6	12					
39	19	5	3,8	> 40					
40	13	5	2,6	> 40					
41	10	5	2	> 40					
42	19	6,6	2,8	> 40					
43	9	6,6	1,3	> 40					
44	12	10	1,2	> 40					
45	10	10	1	> 40					

Tableau.19. Valeurs calculées du facteur de formation F et de la porosité

Les valeurs limites appliquées à l'ensemble des données nous permettent de faire la constatation suivante :

- 27 rapports sont inférieurs ou égaux à 2,5 (33 % des valeurs relatives aux sables).
- 10 rapports sont inférieurs ou égaux à 3,8 (12,4 % des valeurs relatives aux grès).
- 44 rapports sont supérieurs à 3,8 (54,3 % des valeurs relatives aux calcaires fissurés).

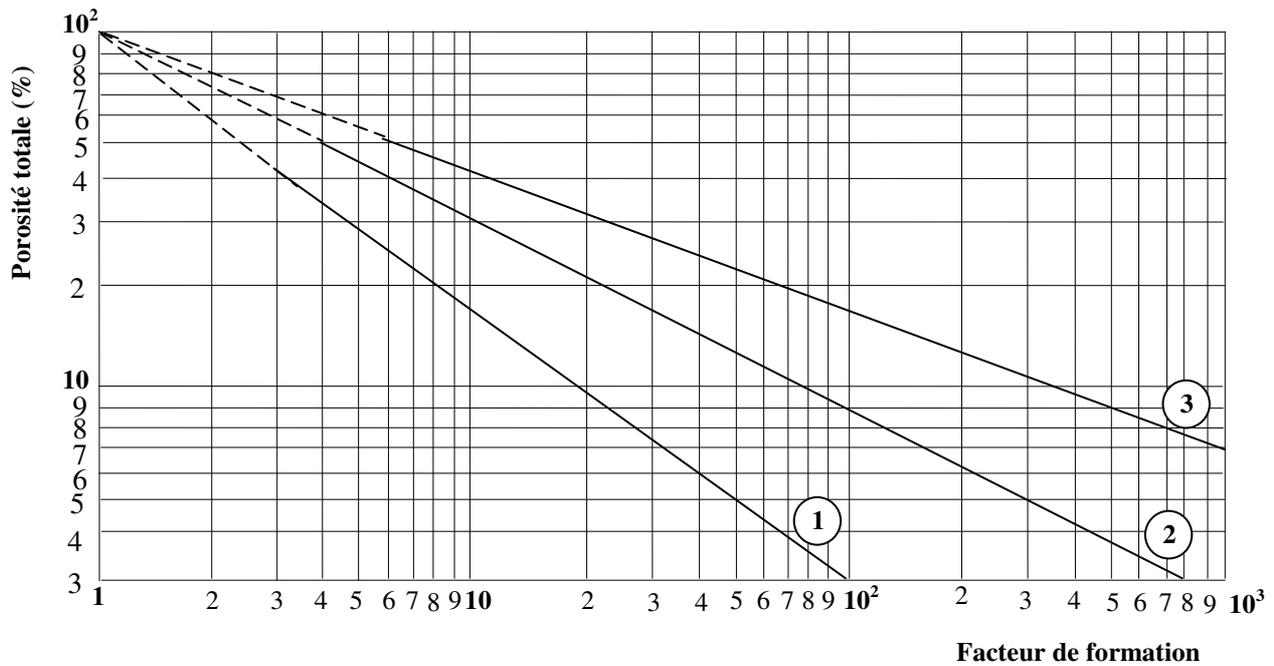


Fig.40. Abaque de (J.L.ASTIER, 1971) donnant la porosité totale d'une formation aquifère saturée non argileuse en fonction du facteur de formation F.

Les courbes de l'abaque, déterminent respectivement : 1 : Formation meuble, 2. Roche consolidée à porosité d'interstices et 3 : Roche consolidée à porosité de fissures.

N° du sondage	F	Nature lithologique de la roche	N° du sondage	F	Nature lithologique de la roche	N° du sondage	F	Nature lithologique de la roche
1	12	Calcaire fissuré	31	3,4	Grès	61	3,3	Grès
2	34,8	Calcaire fissuré	32	0,85	Sable	62	3	Grès
3	0,4	Sable	33	6,8	Calcaire fissuré	63	0,5	Sable
4	5,2	Calcaire fissuré	34	11,2	Calcaire fissuré	64	2,5	Sable
5	0,8	Sable	35	12,8	Calcaire fissuré	65	1,8	Sable
6	1	Sable	36	10	Calcaire fissuré	66	1,2	Sable
7	0,9	Sable	37	18,1	Calcaire fissuré	67	4,5	Calcaire fissuré
8	2,8	Grès	38	16,6	Calcaire fissuré	68	9,6	Calcaire fissuré
9	4,2	Calcaire fissuré	39	3,8	Grès	69	4,2	Calcaire fissuré
10	1,5	Sable	40	2,6	Grès	70	13,6	Calcaire fissuré
11	4,5	Calcaire fissuré	41	2	Grès	71	0,54	Sable
12	10	Calcaire fissuré	42	2,8	Grès	72	0,5	Sable
13	7,5	Calcaire fissuré	43	1,3	Sable	73	0,3	Sable
14	9,5	Calcaire fissuré	44	1,2	Sable	74	3,7	Grès
15	10,6	Calcaire fissuré	45	1	Sable	75	19	Calcaire fissuré
16	7	Calcaire fissuré	46	0,9	Sable	76	2,25	Sable
17	25,7	Calcaire fissuré	47	3	Grès	77	5,7	Calcaire fissuré
18	3	Grès	48	6	Calcaire fissuré	78	2,4	Sable
19	10,9	Calcaire fissuré	49	9	Calcaire fissuré	79	1,25	Sable
20	25	Calcaire fissuré	50	15	Calcaire fissuré	80	0,65	Sable
21	5	Calcaire fissuré	51	24	Calcaire fissuré	81	0,5	Sable
22	0,9	Sable	52	11	Calcaire fissuré			
23	1,5	Sable	53	11,2	Calcaire fissuré			
24	1,5	Sable	54	11,1	Sable			
25	4,4	Calcaire fissuré	55	16,8	Calcaire fissuré			
26	0,75	Sable	56	12,6	Calcaire fissuré			
27	1,8	Sable	57	6,8	Calcaire fissuré			
28	15	Calcaire fissuré	58	6,06	Calcaire fissuré			
29	7,5	Calcaire fissuré	59	7,5	Calcaire fissuré			
30	10	Calcaire fissuré	60	3,2	Grès			

Tableau.20. Nature lithologique des roches

III. 3.3. Lithologie des formations déterminées

En fonction de la position des sondages et de leurs lithologies, nous pouvons dégager les constatations suivantes :

- ✓ Les formations meubles occupent le centre de la plaine et s'étalent d'Ain Chabro à Bekkaria en passant par Tébessa.
- ✓ Vers le Sud Est de Bekkaria, à El khanga, affleurent les Grès tandis que sur les bordures Nord et sud de la plaine apparaissent des formations calcaires souvent fissurées influençant la recharge de la nappe.

III. 4. Mise en parallèle des profils géophysiques et des coupes lithologiques

En utilisant l'échelle des résistivités issue de l'étude géophysique, nous avons déterminé la lithologie des formations affleurant dans le secteur de Djebel Djebissa (Cf. tableau.21).

Point	Sondages Électriques	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

Tableau.21. Lithologie de la zone de Djebel Djebissa.

Cette succession nous a permis de tracer la carte de répartition de la lithologie du niveau P₁ dans le secteur de Djebel Djebissa (fig. 41)

Cette dernière est tracée à partir des sondages électriques selon les profils U, V, W, X, établis dans la région de Djebissa ; d'où on remarque respectivement en allant d'Est en Ouest l'affleurement des cailloutis calcaire près des bordures, des formations argilo-graveleuses en présence des conglomérats et des sables.

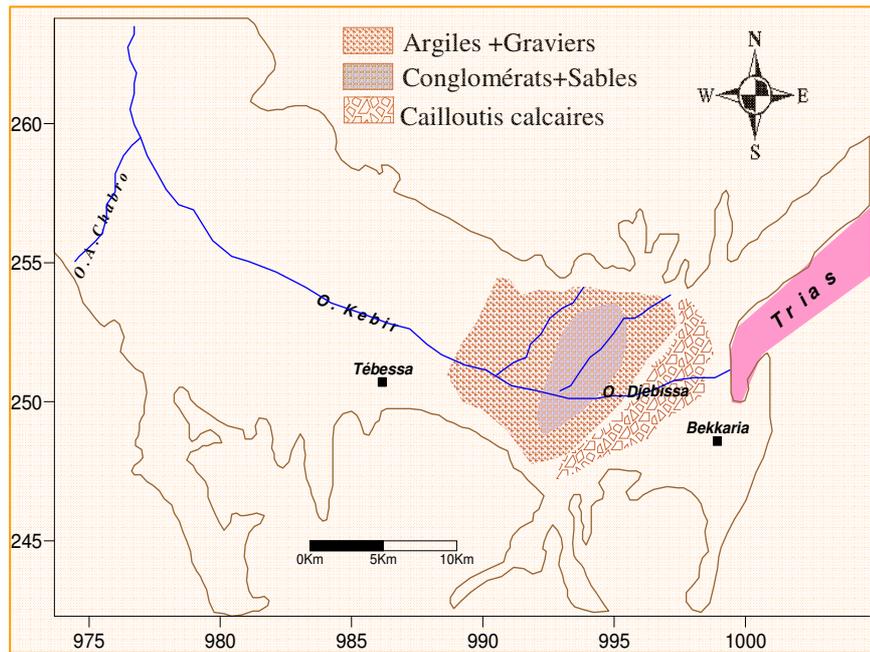


Fig. 41. Carte de répartition de la lithologie du niveau P1 Région de Dj. Djebissa

III. 4. Conclusion

D'après cette étude géophysique nous constatons l'existence de différentes formations aquifères : dans la zone d'étude affleurent les formations alluvionnaires (gravieres, 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 IV

CARACTÉRISTIQUES HYDROGÉOLOGIQUES

L'hydrogéologie constitue un outil de base pour la connaissance des éléments permettant la définition des caractéristiques d'une nappe. L'interprétation piézométrique nous permet la détermination du sens de l'écoulement des eaux et ainsi définir les relations existant 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 soit par des forges, cas des autres niveaux. Notre travail porte sur le niveau P1, capté par des puits et le P3 capté par des forages profonds. Notons, 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

Pour réaliser notre travail, nous disposons d'un historique piézométrique réalisé par différents auteurs. J Ricard a effectué des mesures en 1974, Larbi Djabri dont les travaux se sont déroulés entre 1985 et 1986, Louisa Bouchagoura a réalisé son travail en 2001.

Nos travaux ont débuté en 2005 et se sont poursuivies jusqu'en 2009, ce qui nous a permis de dresser 10 cartes piézométriques, cinq se rapportant à la période de hautes eaux et les cinq autres à la période de basses eaux. Le réseau de mesure utilisé est reporté sur la figure 42.

Les mesures sont réalisées à l'aide d'une sonde piézométrique de 100 m à double signalisation (sonore et lumineuse). La cartographie piézométrique a été réalisée par interpolation triangulaire, en utilisant le logiciel Surfer 8 (Golden software, 2002).

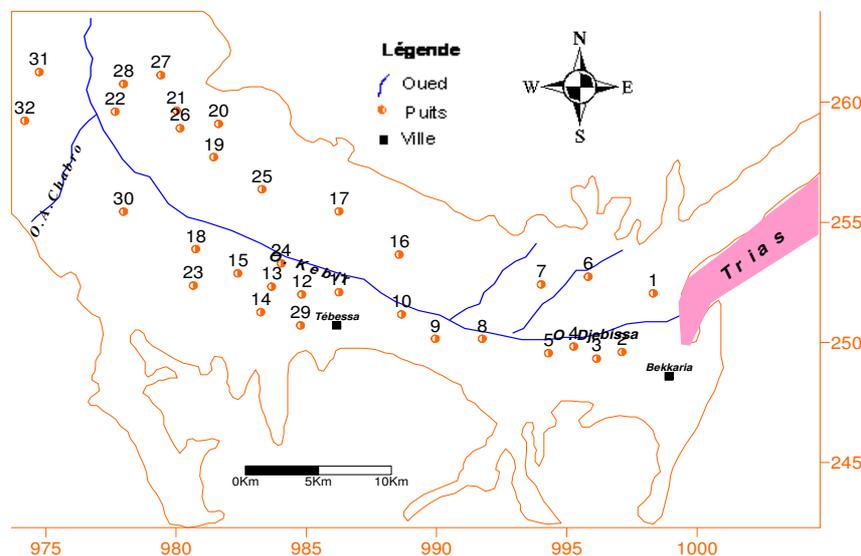


Fig.42. Carte d'inventaire des points d'eau

a) Cartes piézométriques (1974/1985)

En comparant les cartes réalisées entre ces deux périodes, on remarque une baisse très importante du niveau piézométrique. (Fig.43a, 43b, 43c, 43d). Cette dernière est nette dans les régions de Ain Chabro à l'Ouest et de Bekkaria à l'Est. Cette baisse serait provoquée par l'accroissement des pompages, en effet le nombre de forages est passé de cinq voir six ouvrages à plus de vingt forages.

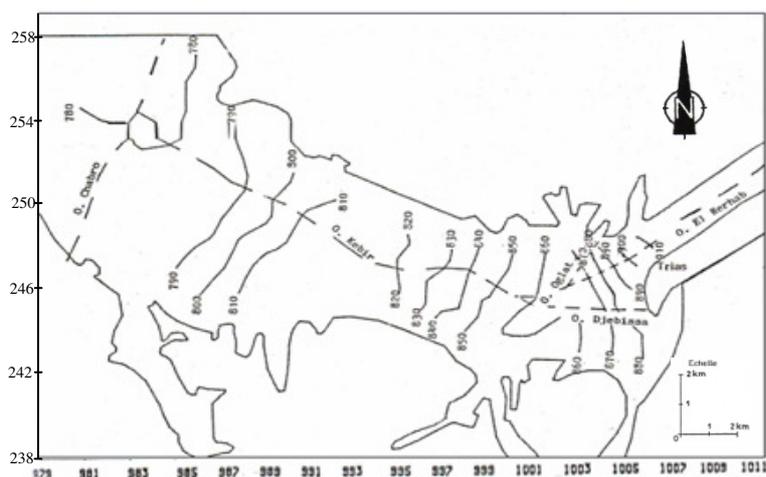


Fig.43a. Carte piézométrique de la période des hautes eaux (Ricard 1974)



Fig.43b. Carte piézométrique de la période des basses eaux (Ricard 1974)

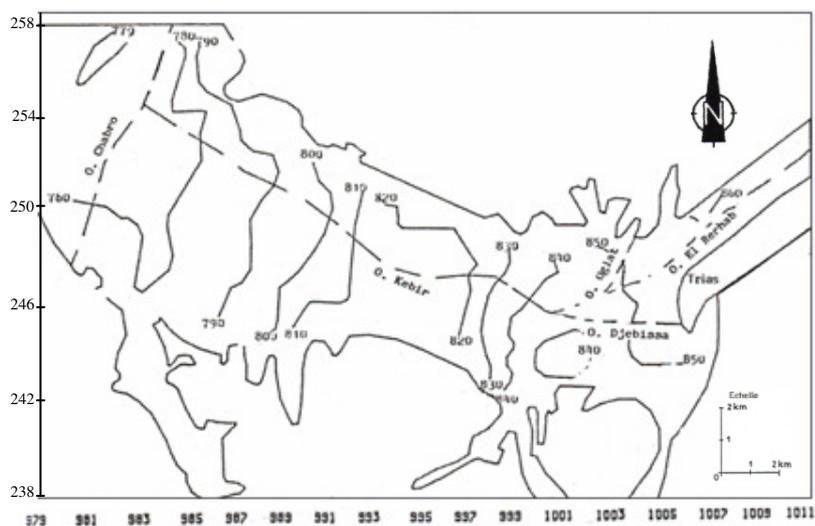


Fig.43c. Carte piézométrique de la période des hautes eaux (Djabri 1985)



Fig.43d. Carte piézométrique de la période des basses eaux (Djabri 1985)

b) État de la piézométrie en 2001

La carte établie par Bouchagoura au mois de Décembre 2001 (fig.44), montre une surface piézométrique régulière. Les écoulements se font selon deux directions :

- ✓ Une première Sud Est - Nord Ouest, (Bekkaria oued Chabro), Le gradient hydraulique n'est pas homogène, il est de l'ordre de 0,22 % à Bekkaria, par contre il est de 0,5 % sur les bordures de Tébéssa et il est de 0,25 % au centre de la plaine, ce qui implique une alimentation de la nappe.
- ✓ La deuxième Ouest –Est, caractérisant la zone de Hammamet à Oued Chabro. Dans cette partie le gradient hydraulique est de l'ordre de 0,4 %.

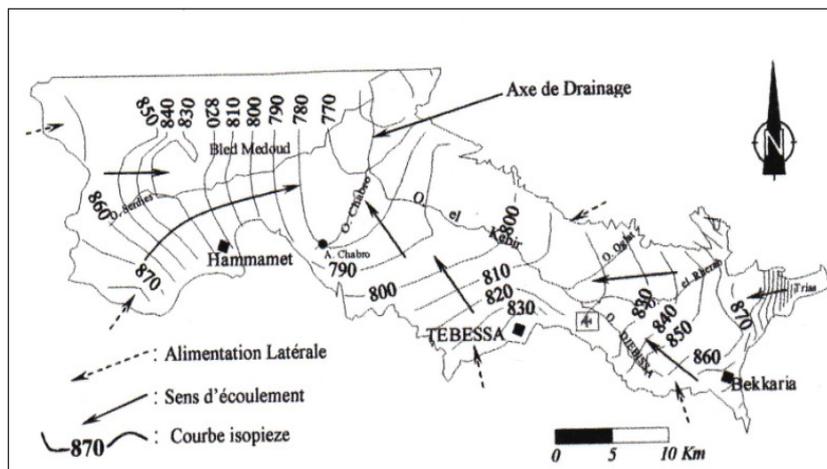


Fig.44. Carte piézométrique Décembre 2001(Bouchagoura)

a) État de la piézométrie (période des hautes eaux mars 2005)

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.45)

- À 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.

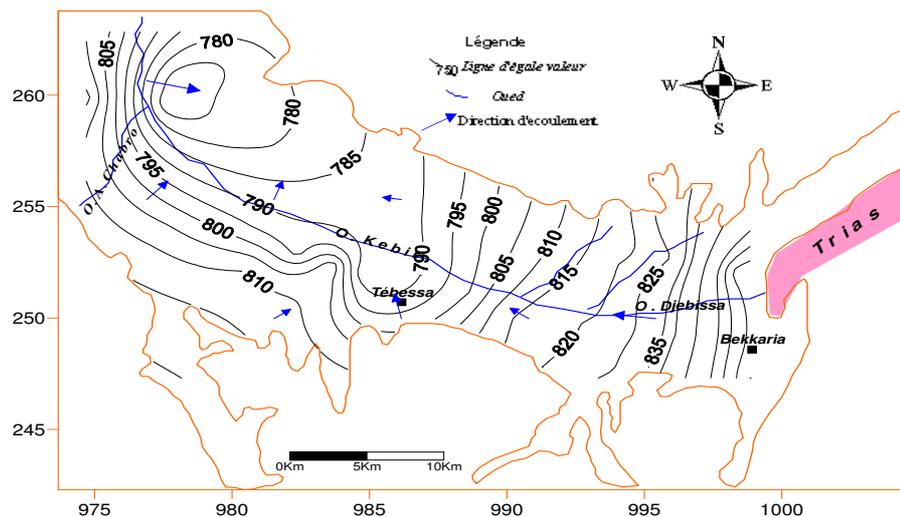


Fig.45. Carte piézométrique Mars 2005/ Plaine de Tébessa

b) État de la piézométrie (période des basses eaux juillet 2005)

L'examen de la carte piézométrique permet d'identifier trois zones pratiquement identiques à celles de la précédente carte. Dans l'ensemble, la surface piézométrique présente la même morphologie (fig.46), avec un écoulement générale dirigé du Sud-Est vers le Nord-Ouest, cependant, on note l'apparition d'une zone dépressive accentuée située au nord de Ain Chabro mettant en évidence une exploitation intensive de la nappe. Les gradients hydrauliques sont en général de même ordre.

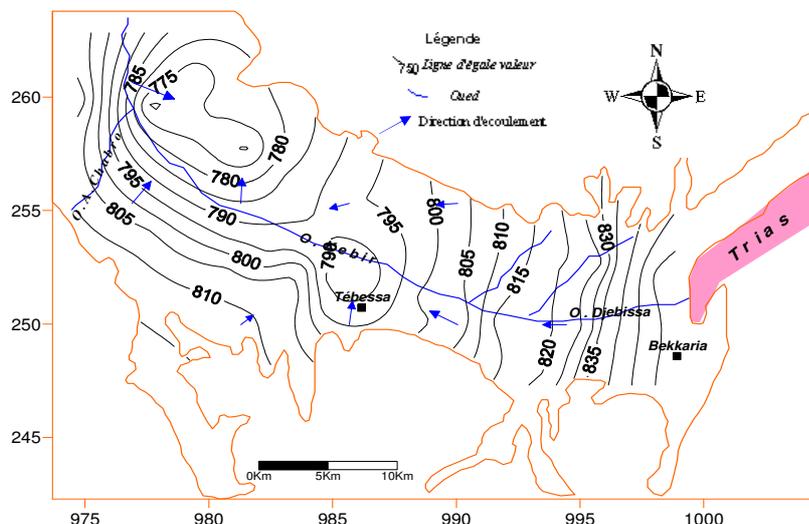


Fig.46. Carte piézométrique Juillet 2005/ Plaine de Tébessa

a) État de la piézométrie (période des hautes eaux mars 2006)

L'observation de la carte montre un écoulement souterrain de direction Sud-est vers le Nord-est (figure 47). L'oued Kebir joue le rôle d'axe de drainage des eaux de surface. À l'est, les courbes isopièzes sont en général régulières, indiquant un gradient hydraulique, de l'ordre de 0.05. Dans la zone centrale, les courbes se trouvent espacées suite à un gradient hydraulique faible, de l'ordre de 0.002. La région de Ain Chabro à l'ouest, présente une allure dépressive provoquée par les pompages.

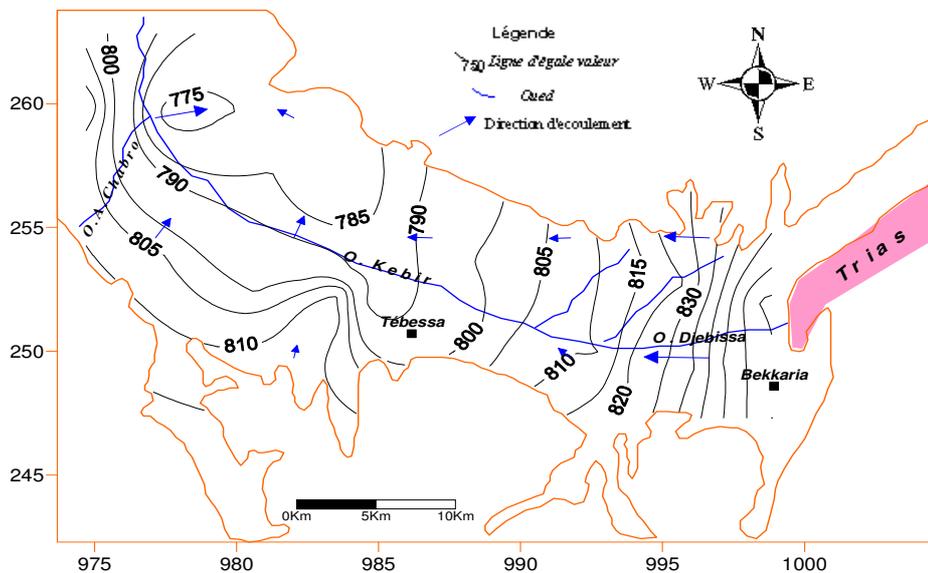


Fig.47. Carte piézométrique Mars 2006/ Plaine de Tébessa

b) État de la piézométrie (période des basses eaux juillet 2006)

La carte réalisée (fig.48), montre une morphologie identique à la précédente, cette allure est provoquée par la faible influence des facteurs externes, tel que la recharge sur le niveau de l'eau.

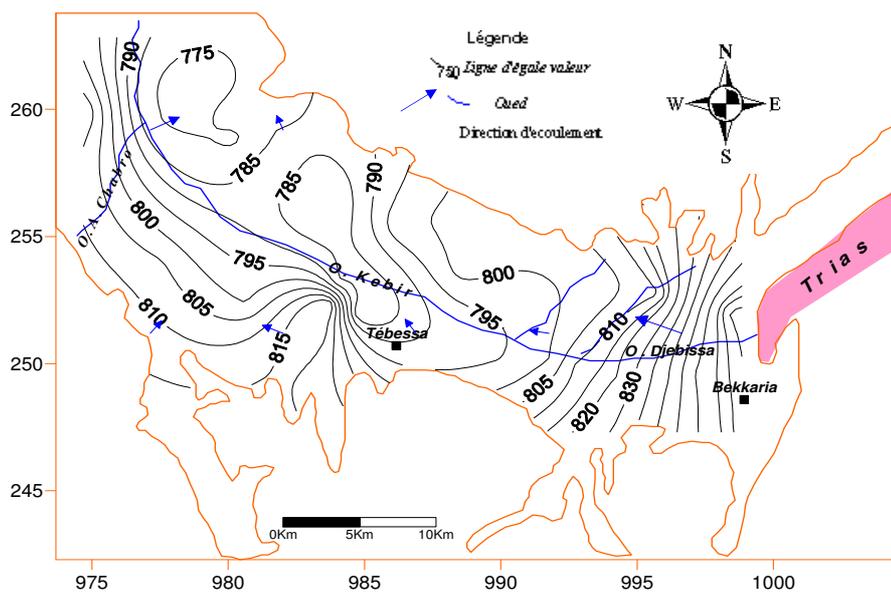


Fig. 48. Carte piézométrique Mars 2006/ Plaine de Tébessa

a) État de la piézométrie (période des hautes eaux mars 2007)

L'examen de la carte piézométrique (fig.49), ne révèle aucun changement que ce soit de la morphologie ou de l'allure des courbes piézométriques, traduisant ainsi le même régime d'écoulement (figure 49). L'écoulement, des eaux souterraines, présente une certaine convergence vers le centre de la plaine, coïncidant avec le tracé de l'oued principal.

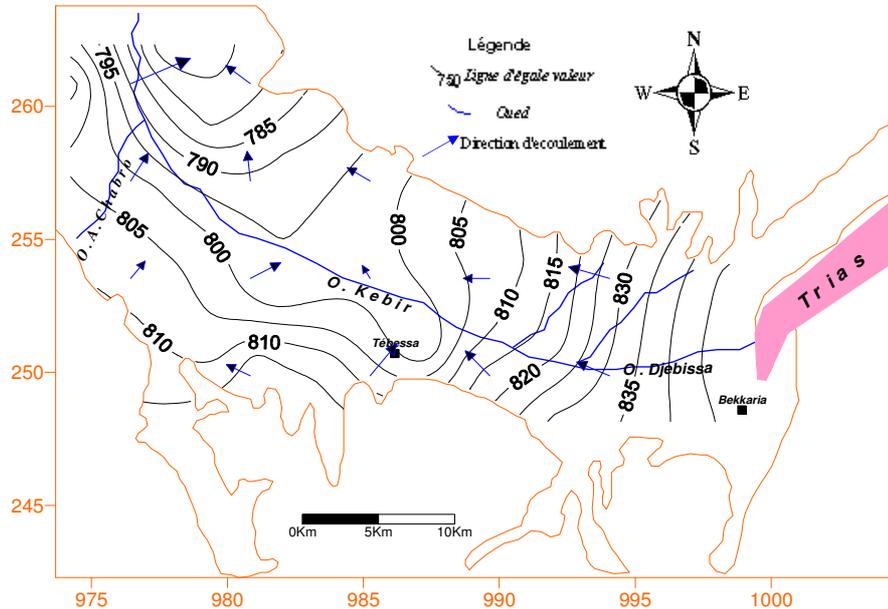


Fig. 49. Carte piézométrique Mars 2007/ Plaine de Tébessa

b) État de la piézométrie (période des basses eaux juillet 2007)

Les courbes piézométriques (fig.50), montrent une même morphologie que celle des cartes précédentes, traduisant un même écoulement. Par ailleurs on note une baisse du niveau piézométrique au centre de la plaine surtout pour les puits 16, 17, 25, 13, 14,15, et 11, due probablement à la surexploitation de la nappe, sachant que c'est une période des basses eaux.

À Ain Chabro, cette baisse est remarquée au niveau des puits 21, 22, 26, 27,28 et 30 montrant une dépression suite au pompage intensif effectués par les agriculteurs. (Figure 50).

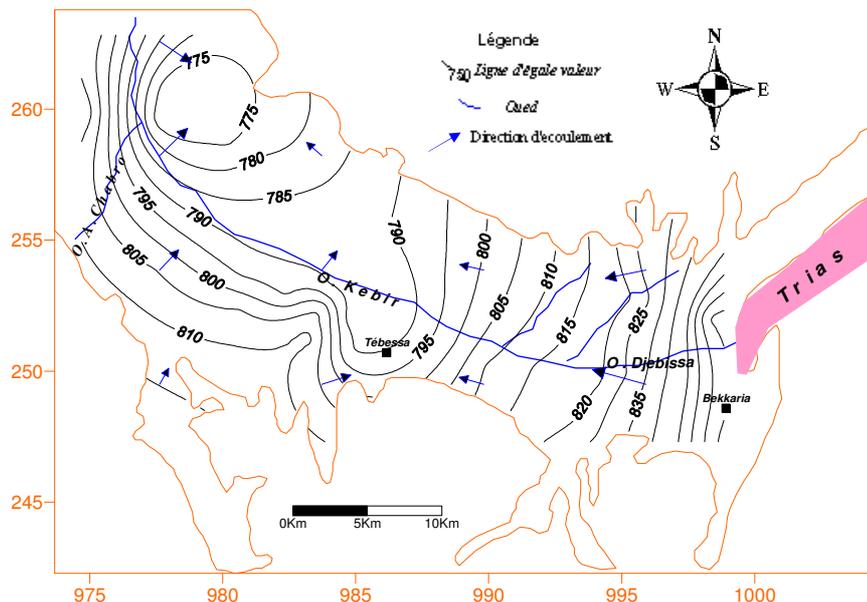


Fig.50. Carte piézométrique Juillet 2007/ Plaine de Tébessa

a) État de la piézométrie (période des hautes eaux mars 2008)

L'examen de cette carte conduit aux mêmes constatations que celles signalées dans les cartes précédentes pour la même période (hautes eaux). (fig.51).

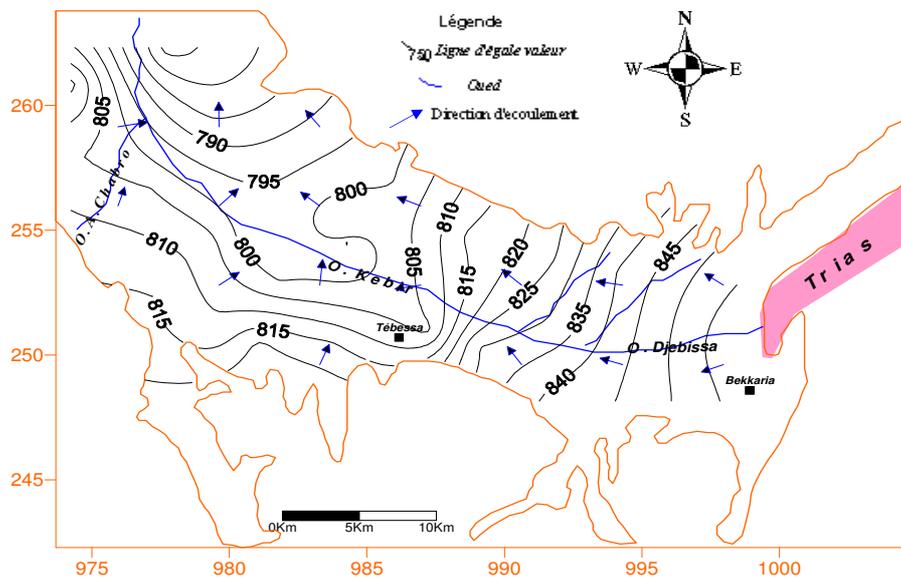


Fig.51. Carte piézométrique Mars 2008/ Plaine de Tébessa

b. / État de la piézométrie (période des basses eaux juillet 2008)

L'observation de la carte (fig.52), une variation des niveaux piézométriques au centre et au Nord de la plaine. Cette situation résulterait de la surexploitation de la nappe pour assurer l'irrigation.

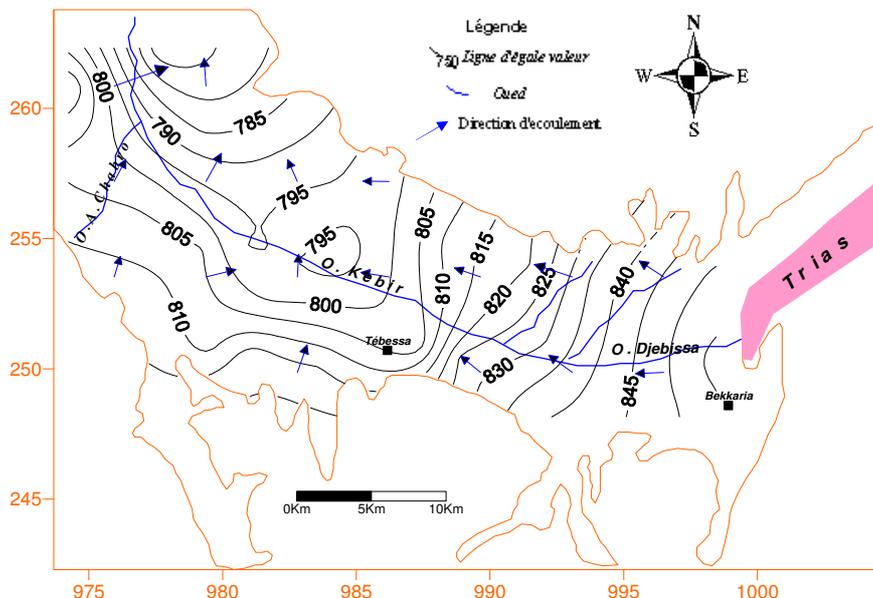


Fig.52. Carte piézométrique Juillet 2008/ Plaine de Tébessa

a) Carte piézométrique de la période des hautes eaux (mars 2009)

L'analyse de cette carte révèle la même morphologie que la carte piézométrique du mois de Mars 2007, cependant les fluctuations sont plus importantes au centre de la plaine

(région de Tébessa), matérialisée par une baisse du niveau piézométrique surtout pour les puits 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16,17. À Ain Chabro, on remarque une dépression localisée au niveau des puits 22 et 28. (fig.53). Ces changements sont probablement dues aux effets de pompage.

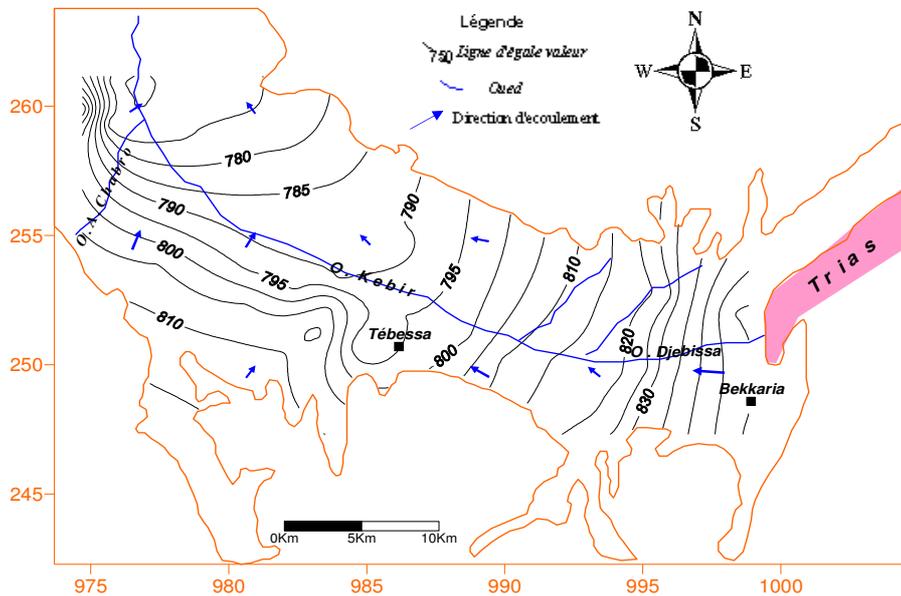


Fig.53. Carte piézométrique Mars 2009/ Plaine de Tébessa

a) Carte piézométrique de la période des basses eaux (juillet 2009)

La présente carte relative à la période des basses eaux (juillet 2009) (fig.54), comparée aux précédentes ne montre aucun changement.

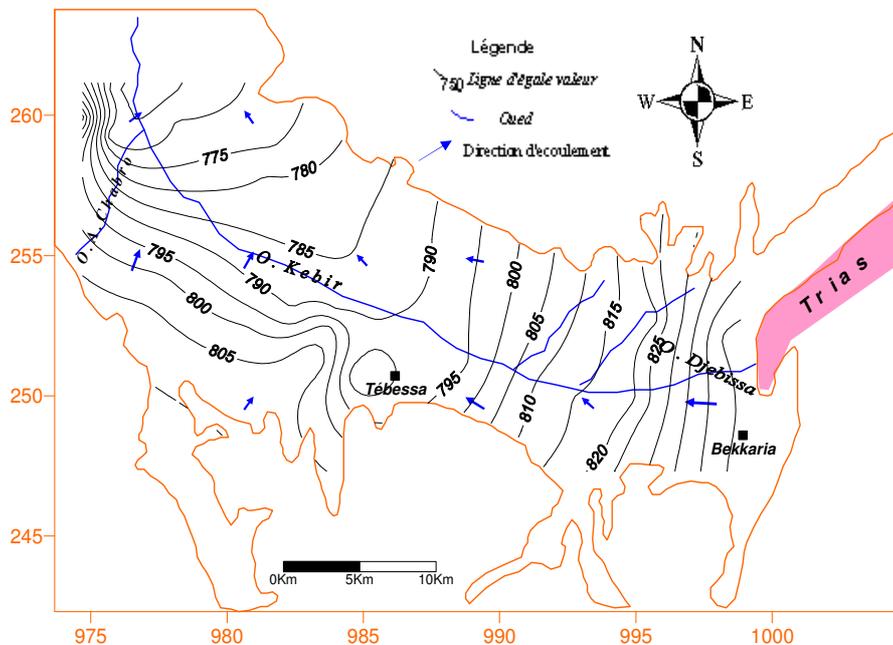


Fig. 54. Carte piézométrique Juillet 2009/ Plaine de Tébessa

IV. 2.1 Relation Oued -Nappe phréatique

L'interprétation des cartes piézométriques met en évidence une relation mixte entre l'oued et la nappe phréatique. A l'Est, c'est l'oued Djebissa qui alimente la nappe,

Au centre, l'oued Kebir dans sa partie amont, draine la nappe surtout pendant la période des hautes eaux, où la nappe se recharge entraînant une élévation du niveau piézométrique, par contre en aval c'est l'oued qui alimente la nappe.

À l'ouest, les oueds Chabro et Ksob, constituent des drains de la nappe.

IV. 2.2. Piézométrie de la région de Djebissa

L'oued Djebissa est situé en amont de la plaine, les écoulements de surface se font de cette montagne vers la plaine. Ce mont est situé à l'Est de Tébessa, au Sud de Bekkaria (Fig.55).

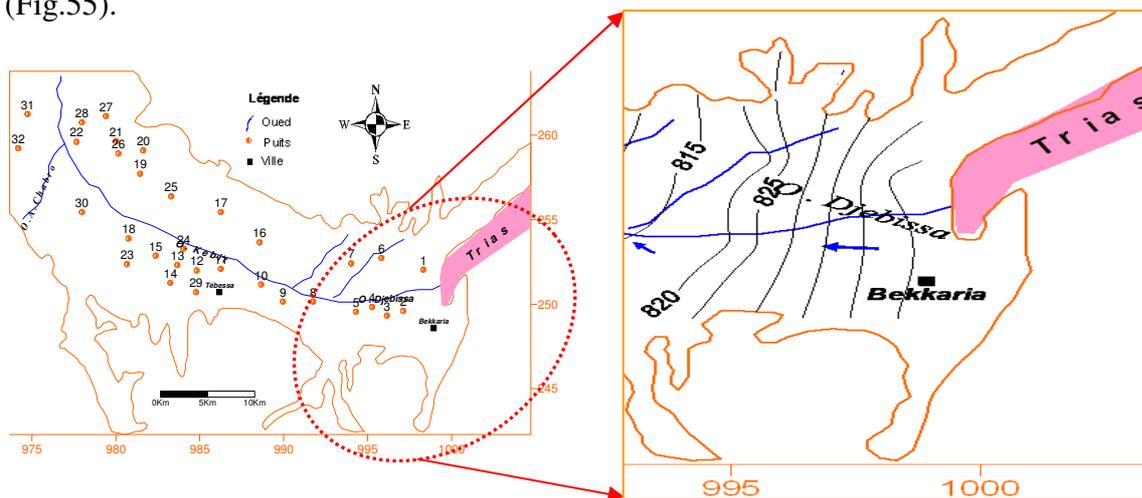


Fig.55. Piézométrie de la région de Djebissa

L'observation des précédentes cartes, montre que les eaux issues de Djebel Djebissa atteignent la nappe par l'Oued Djebissa. Les eaux traversant cette zone vont alimenter la nappe et influencent la composition chimique de ses eaux.

Les cartes réalisées montrent une variation de l'allure des courbes, elles sont espacées au pied de la montagne et elles se resserrent après quelques kilomètres. Cette situation se traduit par une variation du gradient hydraulique mettant en évidence un changement de la perméabilité. En effet cette dernière importante au contact plaine montagne devient faible par la suite.

La nappe dans cette région est alimentée par les bordures nord et sud, à l'Est c'est les formations triasiques de Djebel Djebissa.

IV. 2.3. Conclusion

Les cartes piézométriques réalisées montrent un écoulement dirigé de l'Est vers l'Ouest conformément à la topographie, en effet Bekkaria est située à 900m d'altitude par rapport contre Tébessa est 800 et Ain Chabro, se situe à moins de 800 m d'altitude.

Le drainage de la nappe s'effectue principalement par oued Kebir et ses affluents, il est compensé par une alimentation provenant des bordures calcaires situées dans la partie sud et nord de la région. À cette alimentation s'ajoute la recharge qui se fait à partir des précipitations.

L'examen de l'historique de la Piézométrie, montre une baisse du niveau piézométrique entre 1974 et 2009, il atteint cinq à six mètres à Ain Chabro, cinq mètres au centre de la plaine et de quinze à vingt mètres à l'Est vers Bekkaria.

IV. 3. Carte des conditions aux limites

La cartographie piézométrique a montré un écoulement général de direction Est-Ouest, une partie de ces eaux converge vers l'oued Kebir, qui joue le rôle d'axe de drainage de la nappe superficielle. Les formations calcaires situées sur les bordures sont fissurées assurant ainsi une recharge de la nappe.

L'étude géophysique combinée à l'interprétation piézométrique et à la géologie locale, nous permet de dire :

- * Que l'alimentation de la nappe se fait par les bordures nord et sud.
- * À l'Est la nappe est légèrement alimentée (trias), tandis qu'à l'ouest une alimentation partielle existe par l'intermédiaire des calcaires turoniens. (Figure 56).

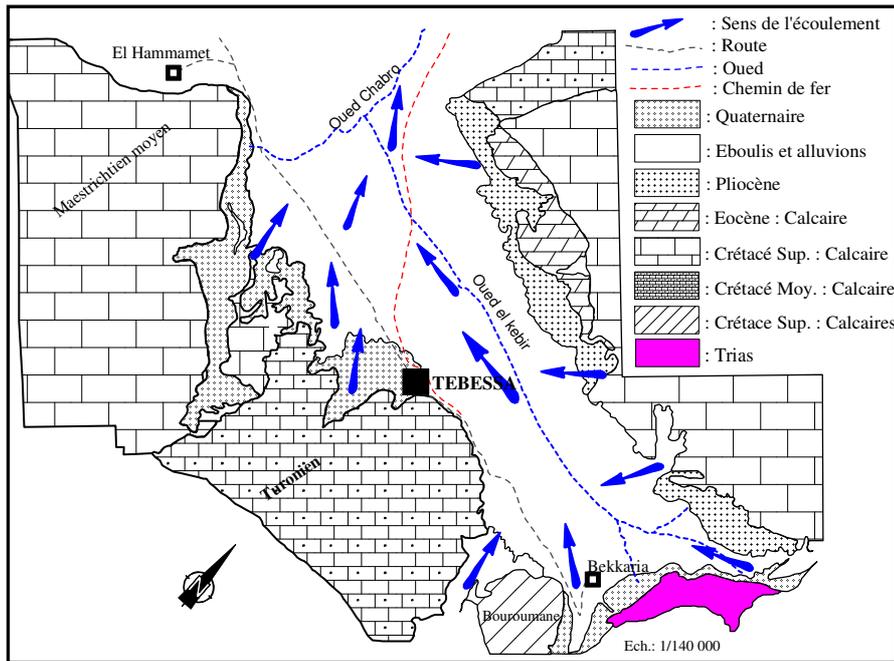


Fig. 56. Carte des conditions aux limites. (In Djabri 1987).

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

La nappe profonde étant sollicitée par un grand nombre de forages. Ces derniers captent différentes formations (fig.57), ainsi dans la région de Bekkaria, l'aquifère peut être constitué soit par des calcaires fissurés (Zi Bis), soit par des sables (A89), alluvions (W2bis). Il en est de même pour les autres zones (Tébessa et Ain Chabro).

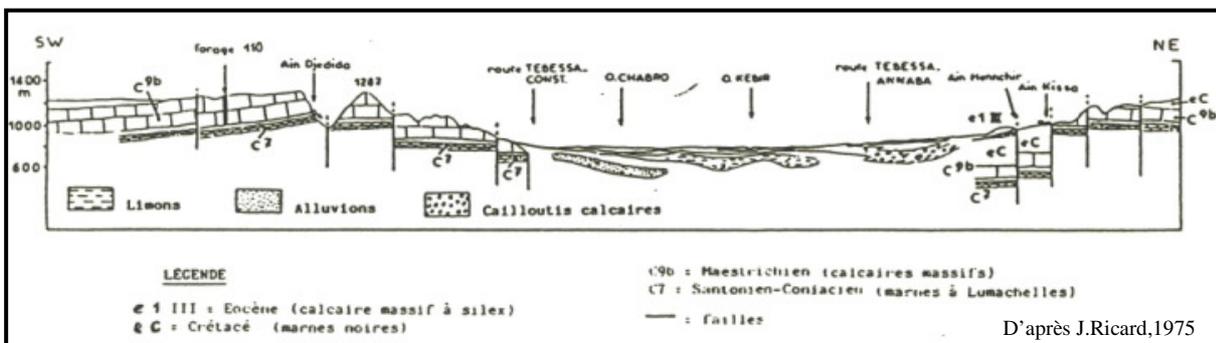
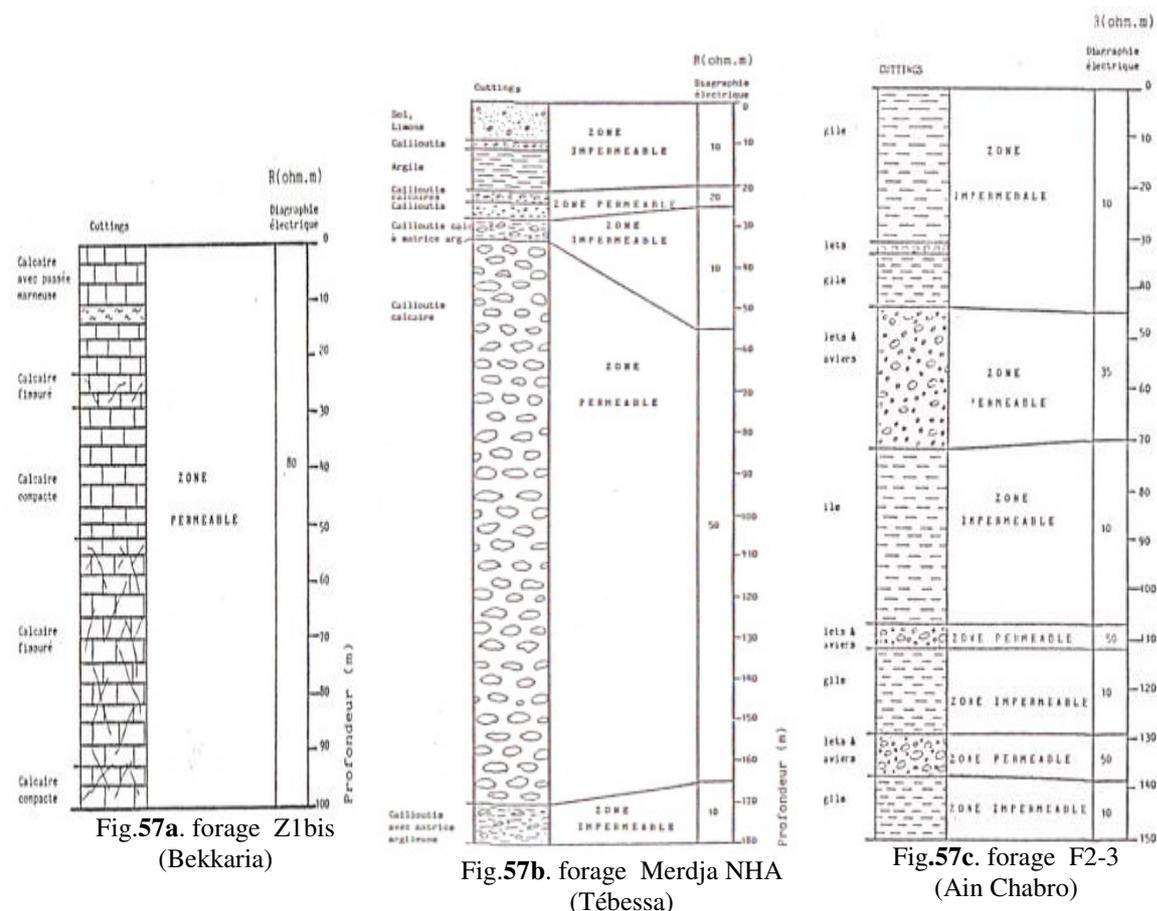


Fig.57 : Variations lithologiques des aquifères.



Cette variation lithologique va influencer les caractéristiques hydrodynamiques de la zone d'étude. La détermination de la Transmissivité et de la perméabilité, a été réalisée à partir des données issues des essais définitifs de pompage de forages (Fig. 58).

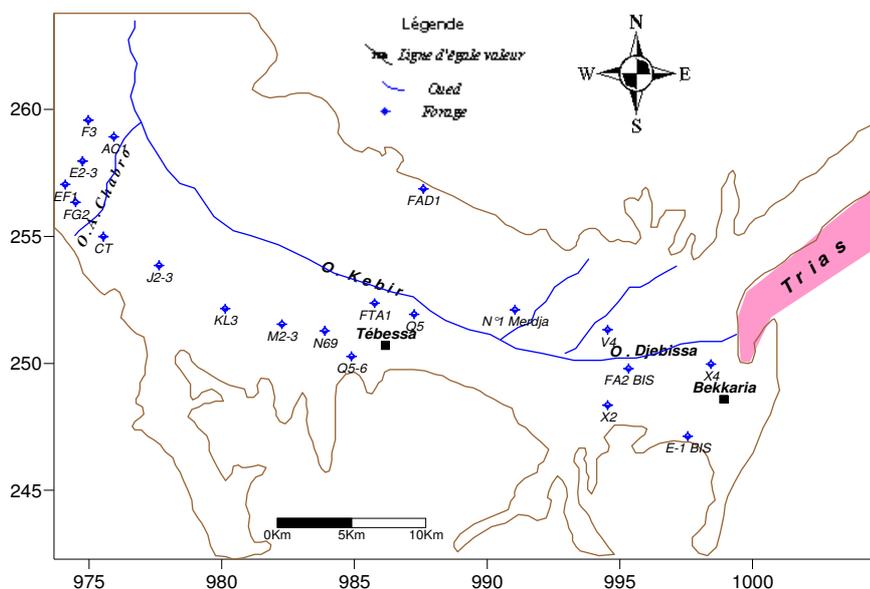


Fig.58. Carte d'inventaire des forages/ Plaine de Tébessa

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 :

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

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).

IV.4.1. Résultats des pompages d'essai

Pour connaître les caractéristiques hydrodynamiques nous avons utilisé les forages suivants :

Forage W2BIS : Il est situé à cinq kilomètres de Bekkaria, près de la route nationale reliant Tébéssa à Bekkaria. Il est utilisé pour l'irrigation (I.N.R.H).

Coupe géologique

De 0 à 2,5m	- Sol
2,5 à 5,5m	- Gravier calcaire et dolomitique
5,50 à 70m	- Argile détritique avec présence d'éléments de gravier ou de galets calcaires dolomitiques
70 à 160m	- Argile
160 à 175m	- Gravier et galet
175 à 300m	- Argile détritique avec présence de quelques éléments de graviers
300 à 305m	- Galets calcaires.

Interprétation des courbes de pompage

On observe un premier segment répondant au modèle de Jacob, cependant on note un changement de pente (deuxième partie du graphique) qui laisse apparaître une limite étanche (lentille argileuse).

L'essai définitif a duré vingt cinq heures avec un débit de trente litre par seconde.

N.B. : Un piézomètre est placé à vingt cinq mètres du puits ce qui nous permet de calculer S. Calcul des paramètres hydrodynamiques T, K, S.

Descente : (fig.59) :

$$T_D = \frac{0,183Q}{\Delta S} = \frac{0,183 \times 0,03}{2,5} = 2 \times 10^{-3} m^2 / s$$

$$K = \frac{T}{e} = \frac{2 \times 10^{-3}}{10} = 2 \times 10^{-4} m / s$$

$$S = \frac{2,25 \times T \times t}{ro^2} \quad \text{Avec } ro : \text{ Rayon d'influence des puits}$$

T : transmissivité

T : temps de pompage= 5400s

$$S = \frac{2,25 \times 2 \times 10^{-3} \times 5400}{625}$$

$$S = 3,8 \times 10^{-2}$$

Remontée : (fig.60) :

$$T_R = \frac{0,183Q}{\Delta S} = \frac{0,183 \times 0,03}{1,5}$$

On calcule une transmissivité moyenne

$$T_M = \frac{(2+3) \times 10^{-3}}{2} = 2,5 \times 10^{-3} m^2 / s$$

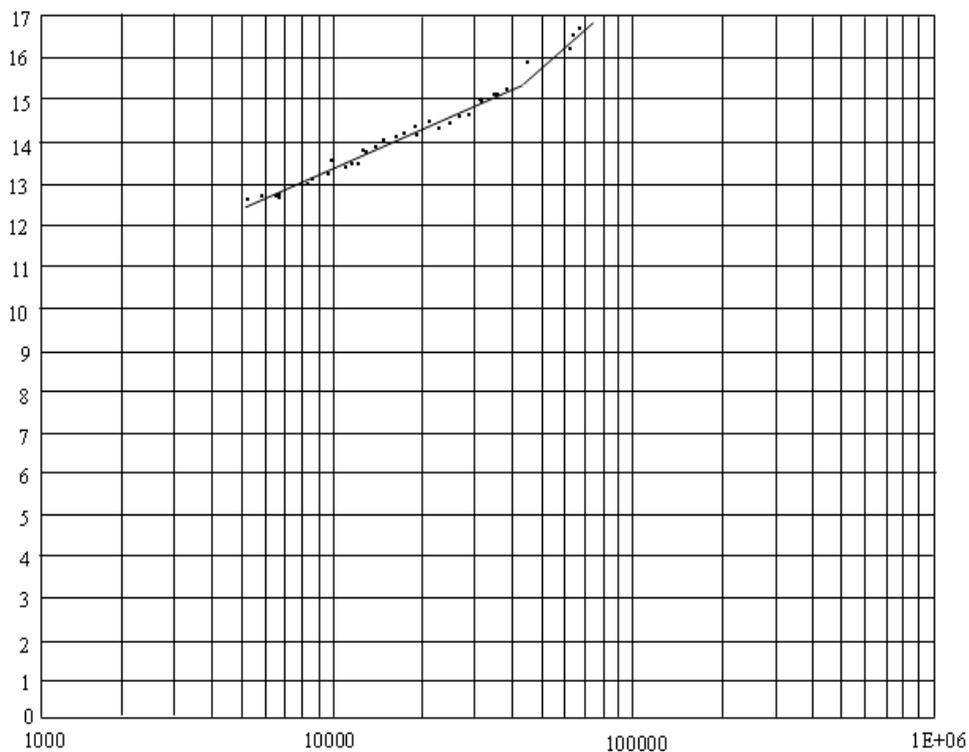


Fig.59. Courbe d'essai par pompage (Descente)

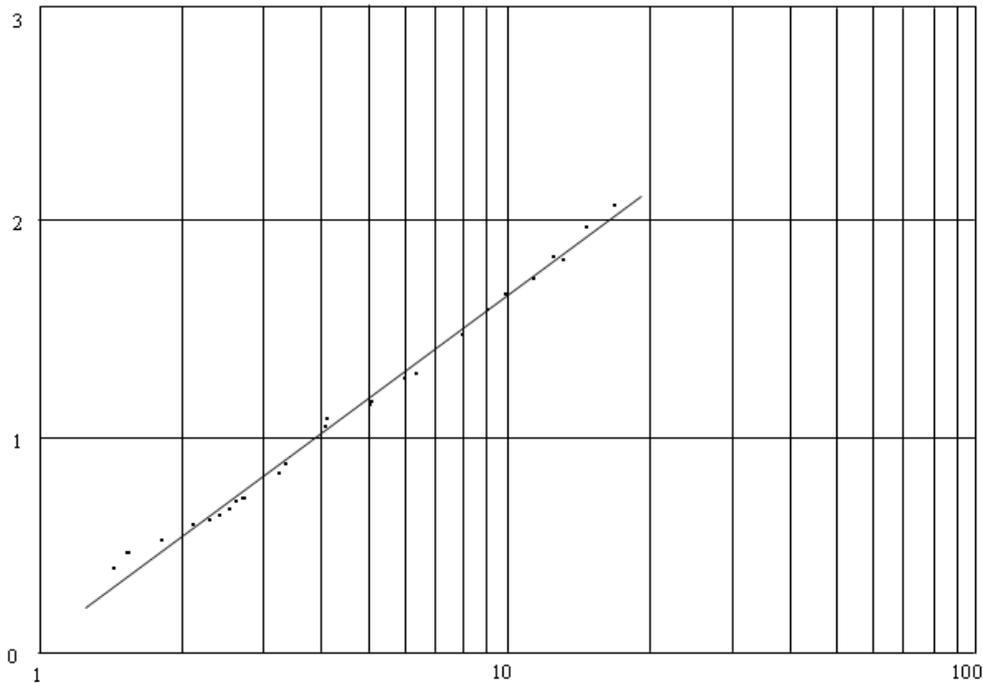


Fig.60. Courbe d'essai par pompage (Remontée)

Forage M2BIS : situé sur la plaine d'El Merdja (Tébessa), à deux kilomètres au nord du centre ville et à dix mètres du forage M2.

Il sert à remplacer le forage M2 colmaté et à renforcer l'AEP de la ville de Tébessa (I.N.R.H.).

Coupe géologique (I.N.R.H.)

- De 0 à 2m - Sol argileux brun,
- 2 à 5m - Argile brune (40%) et verte
- 5 à 11m - Argile brune (40%) et Galets (60%)
- 11 à 18m - Argile jaune plastique avec présence de graviers
- 18 à 24m - Argile jaune et galets calcaires (60%)
- 24 à 33m - Argile brune avec graviers et sable grossier (30%)
- 33 à 120m - Argile sableuse avec gravier (20 à 30 %).

Interprétation de la courbe de pompage (Fig.61)

La droite peut être partagée en deux, car on note un changement de pente. Sur la première partie on applique le modèle de Jacob, tandis que sur la deuxième on apparition d'une limite étanche.

L'essai définitif a duré trente cinq heures avec un débit de quinze litres par seconde.

Calcul de T et K :

$$T = \frac{0,183Q}{\Delta S} = \frac{0,183 \times 0,015}{4} = 6 \times 10^{-4} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$K = \frac{T}{e} = \frac{6 \times 10^{-4}}{40} = 1,5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

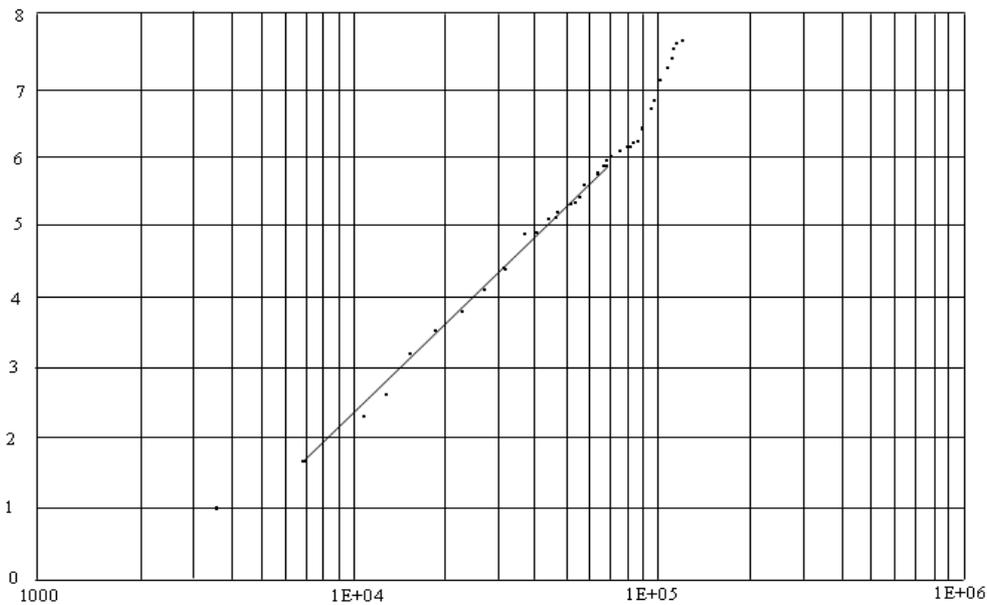


Fig.61. Courbe d'essai par pompage

Forage J 2-3 : Situé à cinq kilomètres au nord-Est de Ain Chabro, à cent mètres de la route nationale reliant Tébessa à Ain chabro. Il est utilisé pour l'A.E.P. (I.N.R.H.).

Coupe géologique (I.N.R.H.) :

- De 0 à 20m - Cailloutis calcaire
- 20 à 30m - Argile
- 40à 44m - Cailloutis calcaire
- 44à 55m - Argile
- 55à 65m - Cailloutis calcaire
- 65à 85m - Argile
- 33à 120m - Cailloutis calcaire
- 85 à170m - Argile
- 185 à 203m - Cailloutis calcaire
- 203 à 210m - Argile
- 210 à 250m - Cailloutis calcaire.

Interprétation de la courbe de pompage (Fig.62)

On utilise le modèle de Jacob pour le calcul de T. L'essai définitif a duré quatorze heures avec un débit de quarante litres par seconde.

Calcul de T et K :

$$T = \frac{0,183Q}{\Delta S} = \frac{0,183 \times 0,04}{4} = 1,8 \times 10^{-3} m^2 / s$$

$$K = \frac{T}{e} = \frac{6 \times 10^{-3}}{85} = 2 \times 10^{-5} m / s$$

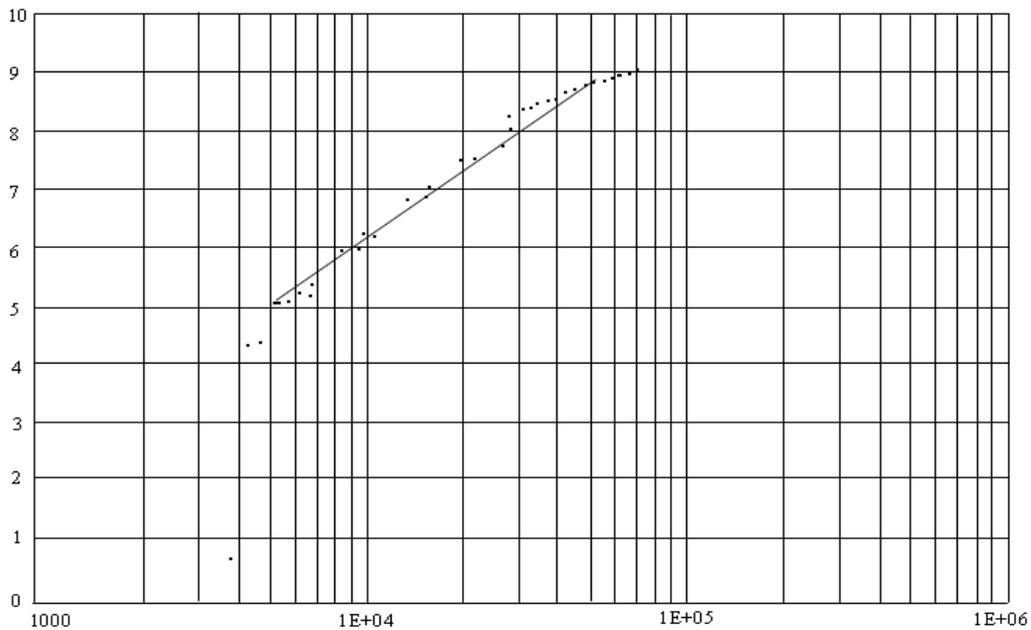


Fig.62. Courbe d'essai par pompage

Forage Q5 :

Situé à deux kilomètres au Nord-Est du centre ville de Tébessa, près de la station de pompage de la Merdja. Il est destiné à remplacer les anciens forages et à augmenter les capacités en A.E.P. de la ville de Tébessa. (I.N.R.H.).

Coupe géologique (I.N.R.H.) :

- De 0 à 5m - Argile,
- 5 à 47m - Argile avec gravier,
- 47 à 62m - Gros gravier,
- 62 à 64m - Argile avec gravier,
- 64 à 70m - Gros gravier,
- 70 à 107m - Argile avec gravier,
- 107 à 111m - Gravier avec peu d'argile,
- 111 à 160m - Argile.

Interprétation des courbes de pompage :

On ne possède pas beaucoup de points, néanmoins on peut dire qu'on a une droite donc on utilise le modèle de Jacob. L'essai définitif a duré soixante heures avec un débit de douze litres par seconde.

Calcul de T et K :

Descente : (fig.63)

$$T_D = \frac{0,183Q}{\Delta S} = \frac{0,183 \times 0,012}{9,2} = 2,3 \times 10^{-4} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$K = \frac{T}{e} = \frac{2,3 \times 10^{-4}}{15} = 1,6 \times 10^{-5} \text{ m} / \text{s}$$

Remontée: (fig.64)

$$T_R = \frac{0,183Q}{\Delta S} = \frac{0,183 \times 0,012}{2,3} = 8 \times 10^{-4} \text{ m}^2 / \text{s}$$

La T_R est supérieure à la T_D on prendra donc une valeur moyenne.

$$T_M = \frac{(8 + 3) \times 10^{-4}}{2} = 5,5 \times 10^{-4} \text{ m}^2 / \text{s}$$

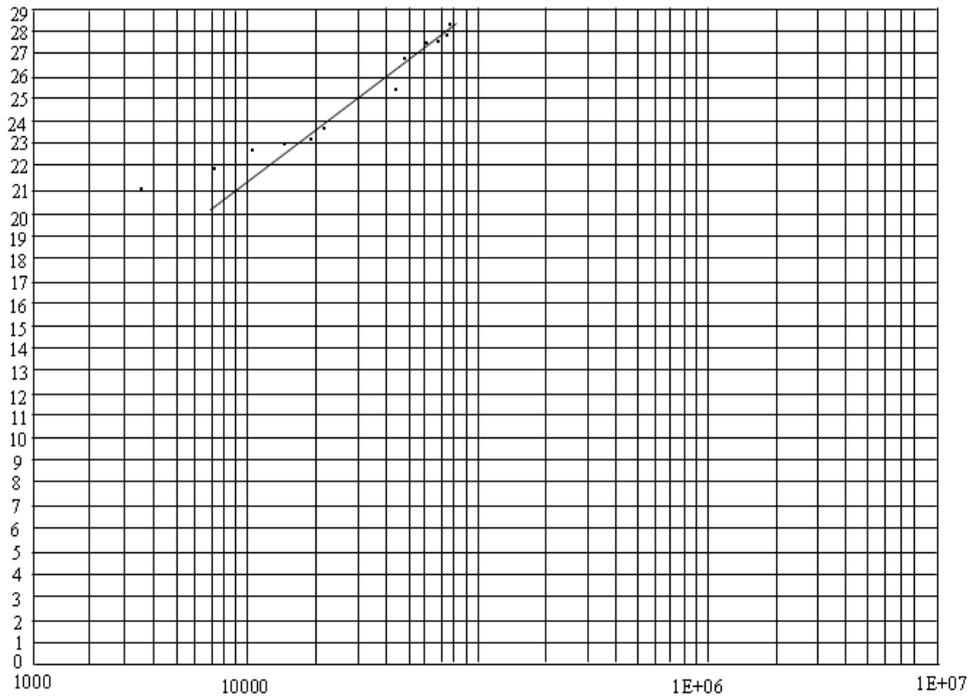


Fig.63. Courbe d'essai par pompage (Descente)

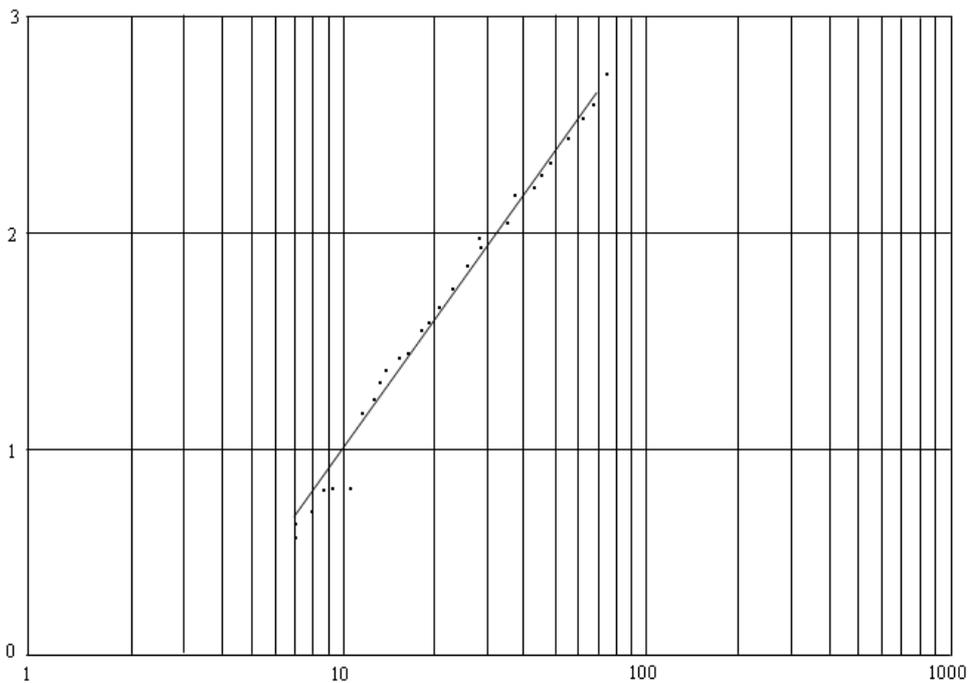


Fig.64. Courbe d'essai par pompage (Remontée)

ForageV4 :

Situé à cinq kilomètres du forage W2 bis, à cinquante mètres de la voie ferrée reliant El Kouif à Tébessa. C'est un forage artésien servant à l'A.E.P. et à l'irrigation (I.N.R.H.).

Coupe géologique (I.N.R.H.) :

De 0 à 4m	- Argile brune
4 à 6m	- Argile et gravier,
6 à 9m	- couche argileuse,
9 à 14m	- Argile plastique,
14 à 15m	- Argile et gravier,
15 à 17m	- Marne plastique,
17 à 30m	- Gravier avec intercalations argileuses,
30 à 39m	- Argile.
39 à 43m	- Sable moyen,
43 à 45m	- Argile,
45 à 47m	- Gravier (Gros et moyen),
47 à 60m	- Gravier et argile,
60 à 62m	- Sable argileux,
62 à 75m	- Argile avec gravier,
75 à 78m	- Gros gravier,
78 à 83m	Gravier et argile,
83 à 85m	Gravier,
85 à 90m	Argile avec gravier

Interprétation des courbes de pompage :

Les points sont alignés et forment ainsi une droite, ce qui nous permet d'appliquer le modèle de Jacob. L'essai définitif a duré soixante heures avec un débit de quinze litres par seconde.

Calcul de T et K :

Descente : (fig.65)

$$T_D = \frac{0,183Q}{\Delta S} = \frac{0,183 \times 0,0015}{7} = 3,9 \times 10^{-4} m^2 / s$$

$$K = \frac{T}{e} = \frac{3,9 \times 10^{-4}}{15} = 2,6 \times 10^{-5} m / s$$

Remontée: (fig.66)

$$T_R = \frac{0,183Q}{\Delta S} = \frac{0,183 \times 0,015}{6} = 4 \times 10^{-4} \text{ m}^2 / \text{s}$$

On retrouve pratiquement la même valeur de la transmissivité lors de la descente et de la remontée. On calcule une transmissivité moyenne :

$$T_M = \frac{(4 + 3,9) \times 10^{-4}}{2} = 3,9 \times 10^{-4} \text{ m}^2 / \text{s}$$

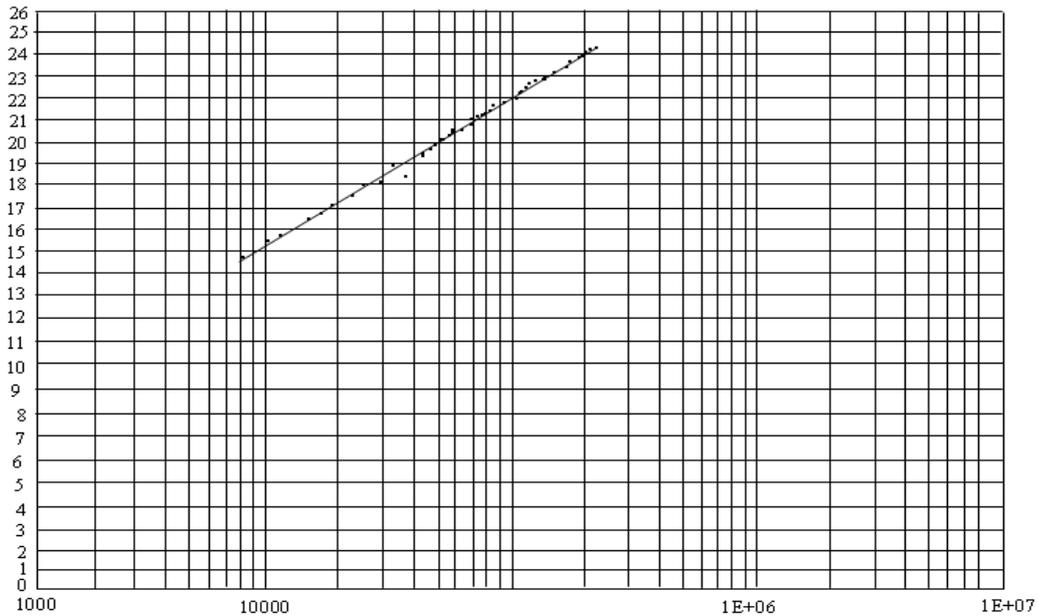


Fig.65. Courbe d'essai par pompage (Descente)

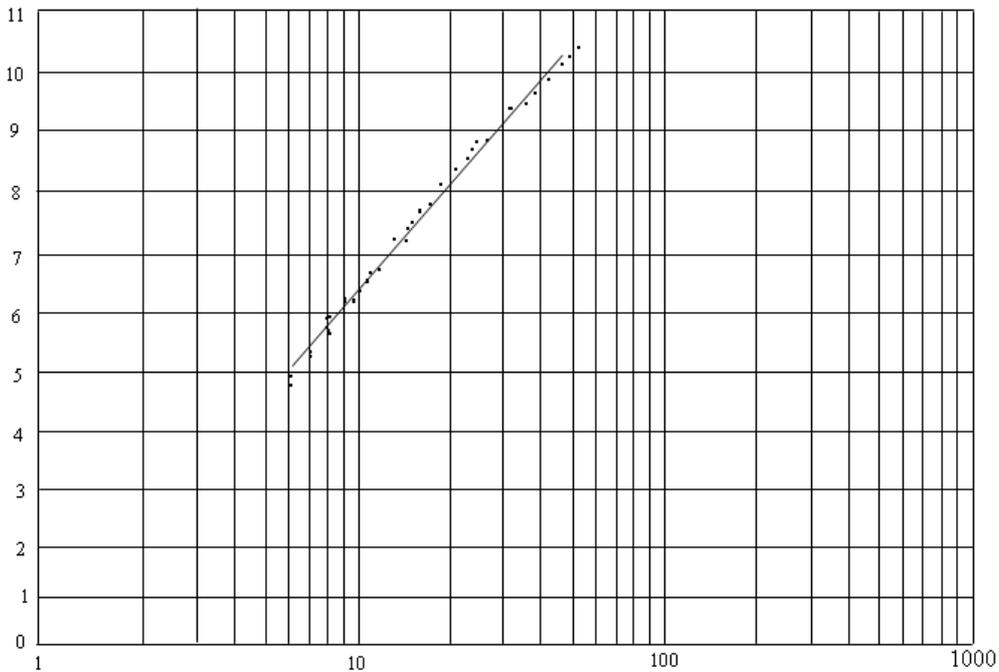


Fig.66. Courbe d'essai par pompage (Remontée)

IV.4.2. Cartographie des paramètres hydrodynamiques

a) Carte de transmissivité (Fig.67)

Elle présente une morphologie variable due à l'hétérogénéité de la nappe aquifère. Cette variation révèle trois secteurs :

À l'ouest secteur de Ain chabro ; la transmissivité est importante elle atteint $3,8.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, ceci est due à la présence de gros graviers (cailloutis de calcaire qui caractérise l'aquifère).

Au secteur de Tébessa, la transmissivité connaît une diminution remarquable. Au centre de la plaine les valeurs sont faibles, de l'ordre de $0,6.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ résultant des formations argileuses et marneuses. Sur les bordures méridionales calcaires, les valeurs deviennent plus importantes atteignant $3.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

Secteur de Bekkaria : la transmissivité devient sensiblement élevée pour atteindre des valeurs de $1,4.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, cette augmentation est due à la présence des formations sableuses.

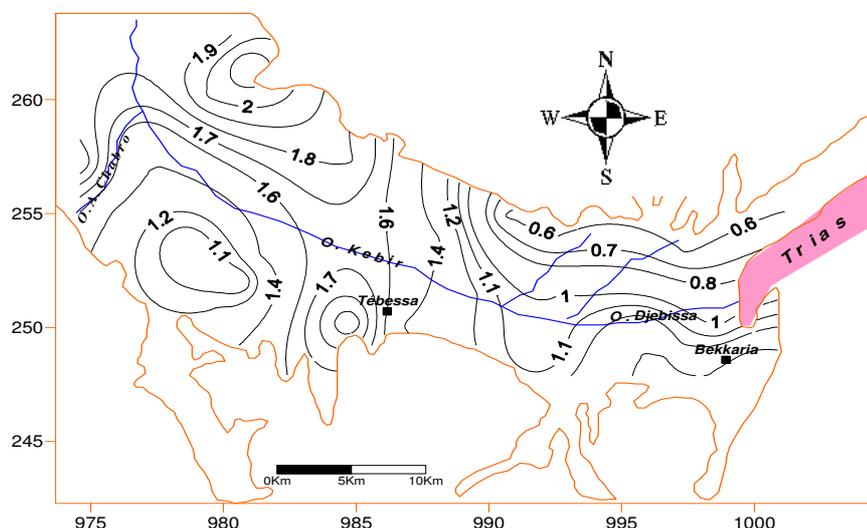


Fig.67. Carte des Transmissivités * 10^{-3}

b) Carte de perméabilité : (Fig.68)

- ✓ Secteur de Ain Chabro : Caractérisé par des valeurs élevées, pouvant atteindre 4.10^{-5} m/s .
- ✓ Secteur de Tébessa : Les valeurs deviennent faibles au centre de la plaine à cause de la présence des formations imperméables (argile et marne), elles sont de l'ordre de 6.10^{-6} m/s .
- ✓ La bordure méridionale est caractérisée par des valeurs élevées dues à l'influence des calcaires de bordure alimentant la nappe latéralement. Les valeurs peuvent atteindre 3.10^{-5} m/s , cette variation est due à l'hétérogénéité de la géologie au niveau de ce secteur.
- ✓ Secteur de Bekkaria : Les valeurs sont relativement importantes dans cette zone, elles oscillent entre 6.10^{-6} et $1.4.10^{-5} \text{ m/s}$.

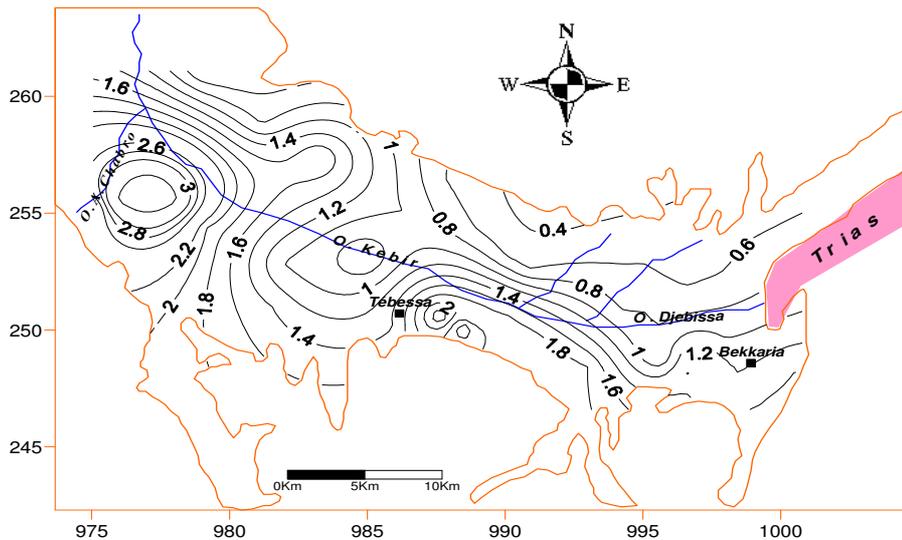


Fig.68. Carte des perméabilités * 10^{-5}

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 ont été démontrés.

Par ailleurs les changements de faciès 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 forages disponibles ont permis le classement des zones selon leurs caractéristiques hydrodynamiques. Ce classement mettra la zone d'Ain Chabro en premier lieu, en suite Bekkaria et à la fin la zone de Tébessa.

CHAPITRE V

QUALITÉ DES EAUX

La qualité des eaux reste un facteur déterminant pour l'utilisation de 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 origines des eaux et les divers modes d'analyse utilisés et la précision de chaque méthode.

Les analyses chimiques en éléments majeurs, et en métaux lourds ont été effectuées au Laboratoire des sciences de la terre université Annaba, au laboratoire du centre d'étude et de recherche appliquées au développement FERPHOS, HYDROSID, DRA, au laboratoire de l'université de Lille1 et au laboratoire de l'université de Franche comté de Besançon en France. Les échantillons sont préalablement filtrés et conservés à une température de 4°C.

Les méthodes utilisées sont : le dosage par spectrométrie d'absorption atomique pour les éléments (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , et Sr^{2+} Fe (total), Mn^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} , et Pb), le dosage titrimétrique pour l'élément (HCO_3^-), et les dosages colorimétriques pour les éléments (Cl^- , SO_4^{2-}). (Annexe).

Les paramètres physiques tels que le pH, et la conductivité électrique, qui peuvent subir des transformations une fois les eaux coupées de leur milieu initial d'interaction, ont été mesurés in situ. Les mêmes conditions de mesures ont été respectées pour toutes les campagnes (même appareillage et même protocole de mesure).

V. 1. Introduction:

Dans une zone caractérisée par une hétérogénéité des formations à l'affleurement (Cf. chapitre géologie), la caractérisation de la qualité des eaux, exige une couverture importante de la zone d'étude. Ainsi pour réaliser notre travail, nous avons effectué des prélèvements en allant de Djebel Djebissa jusqu'à Ain Chabro, soit une longueur d'environ trente kilomètres (30 km) et une largeur dépassant huit kilomètres (08 km), ce qui donne une superficie de 240 km², ceci nous permet de cerner les entrées et les sorties du système. Ce volet constitue la première partie de notre travail, la seconde partie sera un zoom, sur l'impact de la mine d'El Khanguet sur la qualité des eaux et du sol, à l'aval du dépôt des terrils miniers.

V. 2. Caractérisation des eaux de la région :

V. 2. 1. Caractéristiques des eaux des puits :

V. 2. 2. Prélèvements :

Les prélèvements ont été réalisés au cours des campagnes d'échantillonnage (Tableau. 22), correspondant aux périodes des hautes et des basses eaux, sur une trentaine de puits domestiques (fig. 69) dont la profondeur moyenne est inférieure à 50 m. Pour une bonne interprétation, nous avons divisé la zone d'étude en trois sous zones : Djebissa, Tébessa et Ain Chabro.

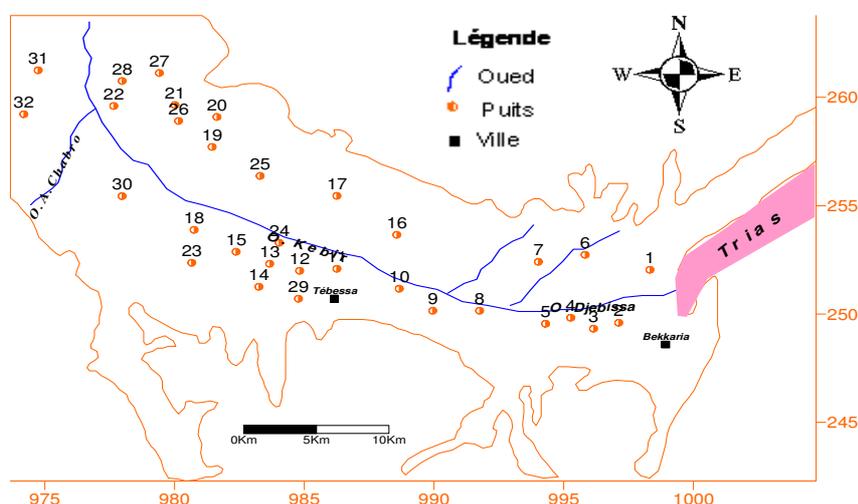


Fig. 69. Carte de la répartition des échantillons dans la zone d'étude

Compagne	1	2	3	4	5	6	7	8	Total
Mois de prélèvement	Mars 2008	Aout 2008	Novembre 2008	Janvier 2009	Mai 2009	Aout 2009	Septembre 2009	Novembre 2009	
Echantillons prélevés et Analysés	30	30	25	30	25	30	25	25	220

Tableau.22. Compagnes d'échantillonnage dans la zone d'étude

V. 2. 3. Variations des paramètres dosés

V. 2. 3. 1. Les paramètres physiques :

L'interprétation se fera conformément à la direction de l'écoulement c'est-à-dire de l'Est vers l'Ouest donc de Djebissa à Ain Chabro en passant par Tébessa, qui correspond au centre.

Potentiel hydrogène PH

Le PH de l'eau conditionne l'équilibre physico-chimique, il indique dans quelle mesure un liquide est acide ou basique (alcalin). Les mesures du pH montrent que tous les puits présentent un pH variant entre 7.3 et 7.9, ce dernier est neutre pour les deux périodes de mesure (hautes et basses eaux). La figure 70, illustre cette variation sur l'ensemble de la plaine.

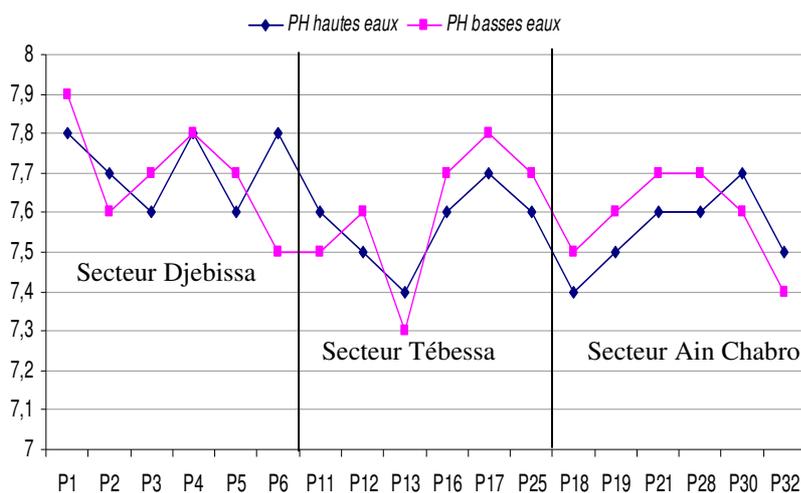


Fig. 70. Évolution du PH dans les eaux des puits

La conductivité électrique CE (fig.71)

Les valeurs de la conductivité électrique mesurées, permettent les appréciations suivantes :

- ✓ dans le secteur de Djebissa, au nord de Bekkaria, les valeurs sont élevées dépassant $8000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, surtout pendant la période des basses eaux, elles sont dues aux contaminations par les évaporitiques de Djebel Djebissa.
- ✓ Une deuxième zone intermédiaire dans la région de la Merdja au centre de la plaine où les valeurs de la conductivité oscillent entre 400 et $1500 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.
- ✓ À l'ouest dans la région de Ain Chabro on rencontre les valeurs minimales de la conductivité entre 300 et $800 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Cette interprétation, met en évidence un gradient décroissant des conductivités.

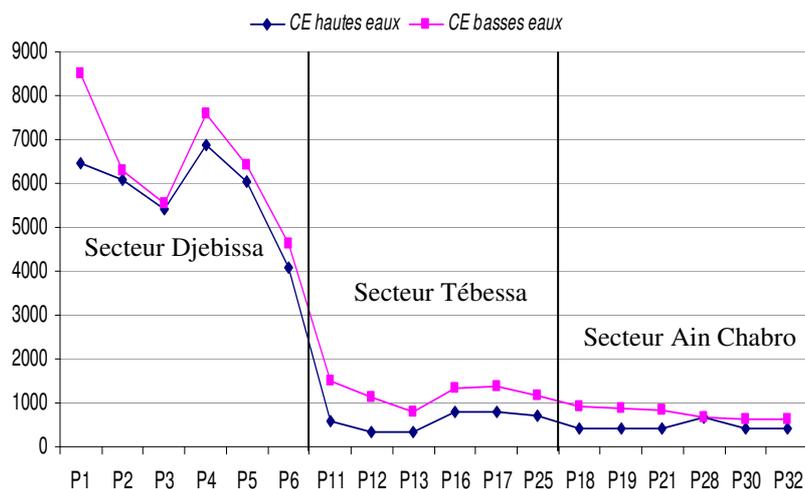


Fig. 71. Évolution de la conductivité électrique dans les eaux des puits

V. 2.3.2 : Les éléments chimiques majeurs

Le calcium (Ca²⁺) :

L'ion Ca²⁺, peut provenir soit de la dissolution des formations carbonatées soit la dissolution des formations gypseuses soit des deux en même temps. .

Dans la région la concentration moyenne en calcium atteint 250 mg/l. Le graphe réalisé (fig.72), montre une variation hétérogène, des concentrations.

Ainsi seuls quelques puits indiquent de fortes concentrations, c'est le cas de P1 (350 mg/l) et P6 (380 mg/l) à Djebissa, au niveau de la plaine de la Merdja le P13 (250 mg/l) et Ain Chabro les puits P18 (300 mg/l) et P32 (320 mg/l), montrent de fortes teneurs en calcium. Cet état est généré par la position de ces puits par rapport à l'affleurement des formations calcaires (Cf. carte des conditions aux limites).

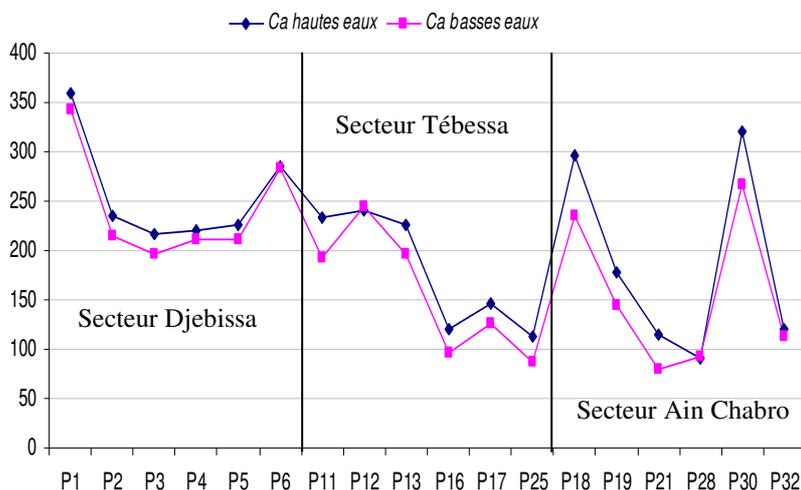


Fig. 72. Évolution du calcium dans les eaux des puits

Le magnésium Mg²⁺ (fig.73)

Dans la nature le magnésium accompagne souvent le calcium. Entre les deux périodes considérées, on remarque une variation de la concentration moyenne, elle baisse de 120 mg/l, en période des hautes eaux à 100 mg/l, en période de des basses eaux (100 mg/l).

Les fortes concentrations en magnésium, sont dues à la dilution des calcaires dolomitiques des bordures.

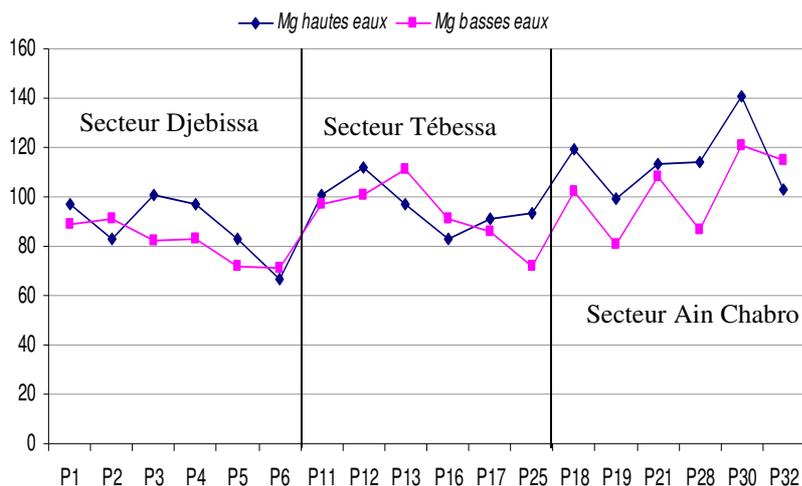


Fig. 73. Évolution du magnésium dans les eaux des puits

Les plus fortes teneurs se localisent à Ain Chabro où l'alimentation en eau se fait par les bordures calcaires de Hammamet.

Le Sodium Na^+ (fig.74)

La concentration en sodium varie entre 40 et 400 mg/l. Les plus fortes concentrations se localisent dans la zone Est (région de Bekkaria), au centre de la plaine région de Tébessa, les concentrations avoisinent 100 mg/l, par contre à Ain Chabro, à l'Ouest les teneurs sont de l'ordre de 150 mg/l.

La baisse observée entre Bekkaria et Tébessa, est probablement engendrée par les échanges de bases, en effet les eaux arrivant de Bekkaria, riches en sodium au contact du sol libèrent le Na^+ et récupèrent le calcium contenu dans le sol. Au niveau de Bekkaria, affleurent les évaporites riches en calcium, ce qui facilite l'échange de bases.

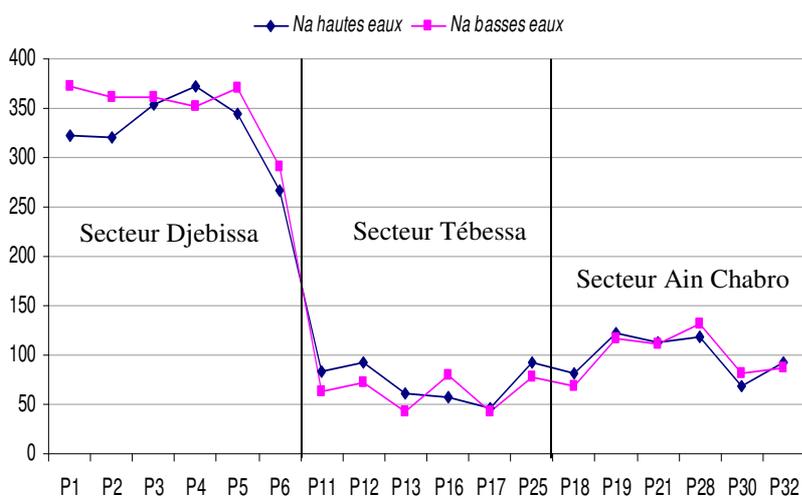


Fig. 74. Évolution du sodium dans les eaux des puits

Les chlorures Cl⁻ (fig.75)

De Bekkaria à Tébessa, on remarque une baisse des concentrations, ces dernières, passent de 1200 mg/l à 400mg/l. Cette tendance est présente au cours des deux périodes d'observation. Cette évolution indique que Djebel Djebissa est une source potentielle des chlorures. À Ain Chabro, les concentrations sont identiques à celles observées à Tébessa. Dans cette zone la qualité des eaux est influencée par les calcaires de bordures.

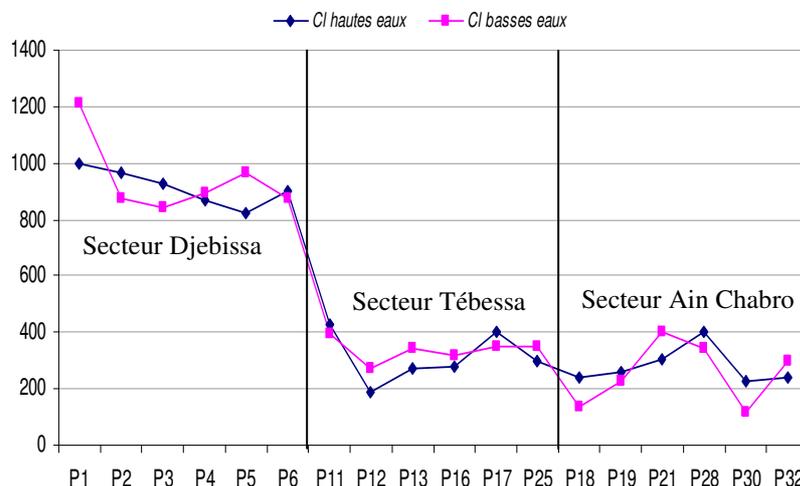
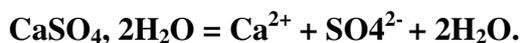


Fig. 75. Évolution des chlorures dans les eaux des puits

Les Sulfates SO₄²⁻ (fig.76)

La présence des sulfates dans l'eau est liée à la dissolution du gypse par lessivage des dépôts évaporitiques issus de Djebel Djebissa, au nord de Bekkaria selon la relation :



Les plus fortes valeurs sont enregistrées pendant la période des basses eaux, au secteur de Djebissa avec une moyenne de 900 mg/l, suite au phénomène d'évaporation. Ces concentrations diminuent en allant vers le centre de la plaine. À Ain Chabro, les concentrations sont de l'ordre de 200 mg/l et peuvent atteindre des teneurs inférieures (100mg/l).

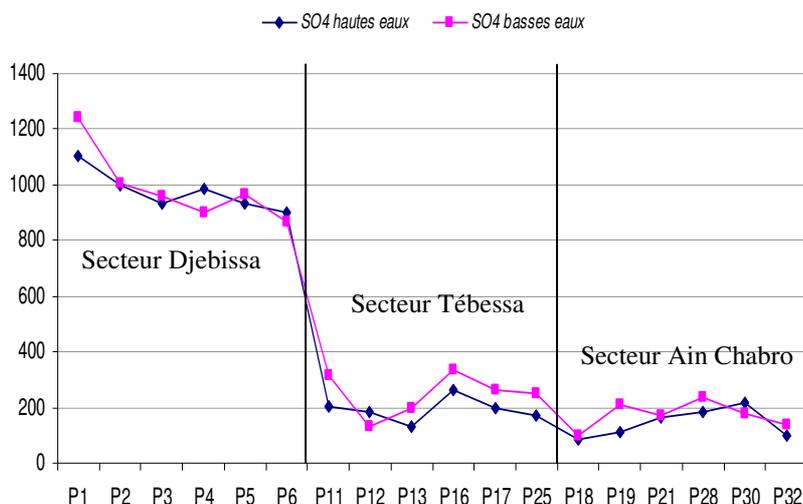


Fig. 76. Évolution des sulfates dans les eaux des puits

Les Bicarbonates HCO_3^- (fig.77)

La présence des bicarbonates dans l'eau est due à la dissolution des formations carbonatées qui bordent la nappe, selon la réaction suivante :



Les fortes teneurs sont enregistrées au niveau de Ain Chabro, elles sont de l'ordre de 630 mg/l (en période de hautes eaux), ceci signifie que les bordures latérales par effet de dilution enrichissent les eaux en bicarbonates.

À Bekkaria, les concentrations avoisinent 300 mg/, cet apport provient des formations calcaire de Djebel Bouroumane. À Tébessa, au centre de la plaine, les concentrations atteignent 450 mg/l provenant probablement de l'alimentation par les bordures Sud.

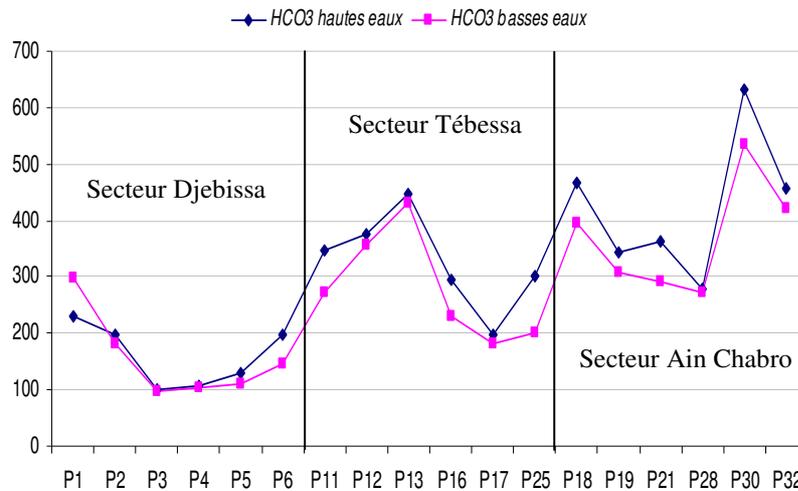


Fig. 77. Évolution des bicarbonates dans les eaux des puits

V.3. Apport de l'outil Statistique

V. 3.1. Analyse multidimensionnelle

V. 3. 1.1. L'analyse en composantes principales (ACP)

L'ACP est une méthode d'analyse statistique multidimensionnelle. Il s'agit d'une méthode factorielle et linéaire qui traite des caractères numériques jouant tous le même rôle (BOUROUCHE & SAPORTA, 1983). Chaque échantillon d'eau d'une campagne de prélèvement constitue une unité statistique, les différents paramètres soumis à l'analyse constituent les variables qui caractérisent ces unités statistiques.

Pour réaliser cette étude nous avons utilisé comme variables les teneurs en éléments majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-), ainsi que la conductivité électrique(CE) et le rapport Sr/Ca, en utilisant le logiciel SPAD V55. Cette analyse à été réalisée donc sur un tableau de données de huit variables avec une moyenne de 30 individus prélevés sur huit campagnes d'échantillonnage (Tableau.24), repartis sur toute la plaine.

Selon le nombre des individus, le coefficient de corrélation acceptable est de 0.31. Mangin, 1979).

A/ Période des hautes eaux:

L'examen du tableau 23 relatif à la matrice de corrélation, montre deux types de corrélations.

	Ca ⁺⁺ mg/l	Mg ⁺⁺ mg/l	Na+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	0,43	1						
Na+K mg/l	0,56	0,06	1					
Cl ⁻ mg/l	0,43	0,09	0,91	1				
SO ₄ ⁻ mg/l	0,86	0,49	0,73	0,85	1			
HCO ₃ mg/l	0,79	0,69	0,31	-0,35	-0,46	1		
Sr/Ca ‰	0,37	0,18	0,47	0,79	0,64	-0,06	1	
CE µS/cm	0,16	-0,07	0,73	0,92	0,94	-0,19	0,71	1

Tableau.23. Coefficient de corrélation entre les variables initiales.

- La première directe c'est le cas des couples suivants (Cf. Tableau suivant):

N°	Couple	Valeur de r	N°	Couple	Valeur de r
1	Ca ²⁺ - Mg ²⁺	0,43	11	HCO ₃ ⁻ - Na ⁺ +K ⁺	0,31
2	Ca ²⁺ - Na ⁺ +K ⁺	0,56	12	Sr/Ca - Na ⁺ +K ⁺	0,47
3	Ca ²⁺ - Cl ⁻	0,43	13	CE - Na ⁺ +K ⁺	0,73
4	Ca ²⁺ - SO ₄ ²⁻	0,86	14	SO ₄ ²⁻ - Cl ⁻	0,85
5	Ca ²⁺ - HCO ₃ ⁻	0,79	15	Sr/Ca - Cl ⁻	0,79
6	Ca ²⁺ - Sr/Ca	0,37	16	CE - Cl ⁻	0,92
7	SO ₄ ²⁻ - Mg ²⁺	0,49	17	Sr/Ca - SO ₄ ²⁻	0,64
8	HCO ₃ ⁻ - Mg ²⁺	0,69	18	CE - SO ₄ ²⁻	0,94
9	Cl ⁻ - Na ⁺ +K ⁺	0,91	19	Sr/Ca - CE	0,71
10	SO ₄ ²⁻ - Na ⁺ +K ⁺	0,73			

Tableau.24. Coefficient de corrélation entre les variables initiales

- La deuxième inverse c'est le cas des couples suivants : Cl⁻ -HCO₃⁻, r = -0.35,
SO₄²⁻ -HCO₃⁻, r = -0.46

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.

Axes	Valeurs propres	Pourcentage de variance	Pourcentage cumulé
F1	3,63	39,81	39,81
F2	2,45	21,16	60,97
F3	1,29	11,31	68,47
F4	1,11	09,11	76,58
F5	0,81	06,25	82,83

Tableau.25. Valeurs propres et pourcentages des axes principaux.

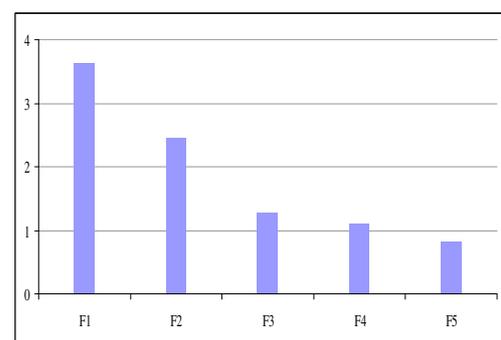


Fig.78. Histogramme des valeurs propres

Le premier axe principal a une valeur propre égale à 3,63, il explique 39,81 % de la variation totale, la seconde composante égale à 2,45 explique 21,16 % de la variance totale (tab.25, fig.78) Les pourcentages de variation sont assez élevés pour les deux premiers axes

avec un cumule de 60,97 %. Nous allons donc nous limiter à ces deux axes pour nos interprétations.

Analyse du cercle ACP (fig.79)

Les deux axes F1-F2, formant le cercle (fig.79), représentent 60,97% de la variance et expriment donc l'essentiel de l'information fournie. Ainsi dans l'espace des variables (Fig.80), l'axe d'inertie principal F1 exprime 39,81% de l'information et il est défini positivement par la conductivité électrique et par les variables Cl^- , SO_4^{2-} , $\text{Na}^+ + \text{K}$, Ca^{2+} , Mg^{2+} , et du rapport Sr/Ca et représente donc un axe de minéralisation.

L'axe d'inertie F2 exprime 21,16% de la variance. il est déterminé par les bicarbonates.

On remarque que les éléments situés dans la partie positive du premier quadrant pourraient avoir la même origine. Ils seraient issus des formations salifères présentes dans la région. Les bicarbonates se démarquent des autres éléments, ce qui montre une origine différente. La projection des variables sur le plan factoriel F1-F2 montre que l'axe F1 oppose les eaux minéralisées aux eaux faiblement chargées, cet axe est légèrement caractérisé par les bicarbonates, proches de la neutralité.

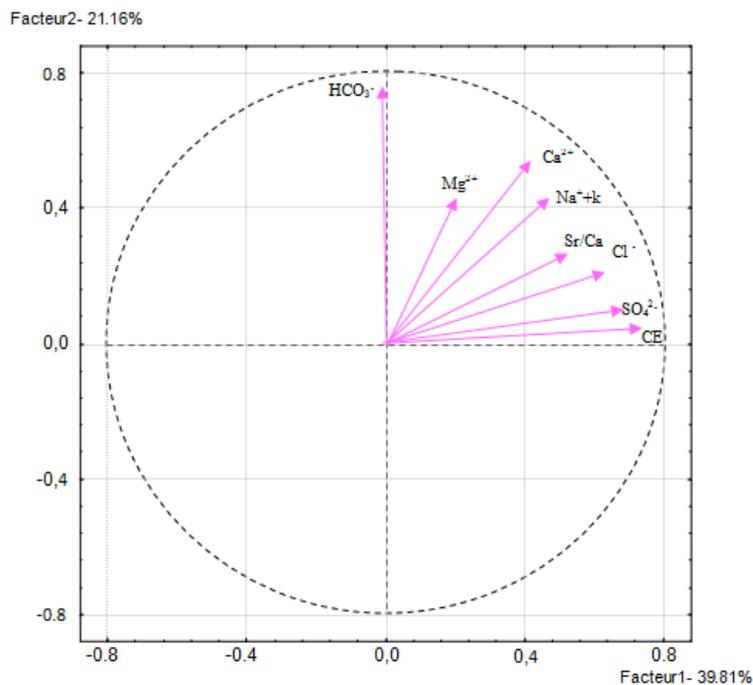


Fig.79. Cercle de corrélation des variables dans le plan formé par l'axe 1 et l'axe 2.

Analyse de l'espace des individus (fig.80)

La projection des individus sur le plan F1-F2 a montré l'existence de trois groupes :

- ✓ Le premier groupe marqué par une compétition entre les cations, c'est-à-dire un échange entre les alcalins et les alcalino-terreux.
- ✓ Le deuxième groupe montre l'influence des chlorures et des sulfates sur la conductivité. Cette dernière serait due à la sommation de ces deux éléments (anions).
- ✓ Les bicarbonates forment quant à eux seuls un troisième groupe.

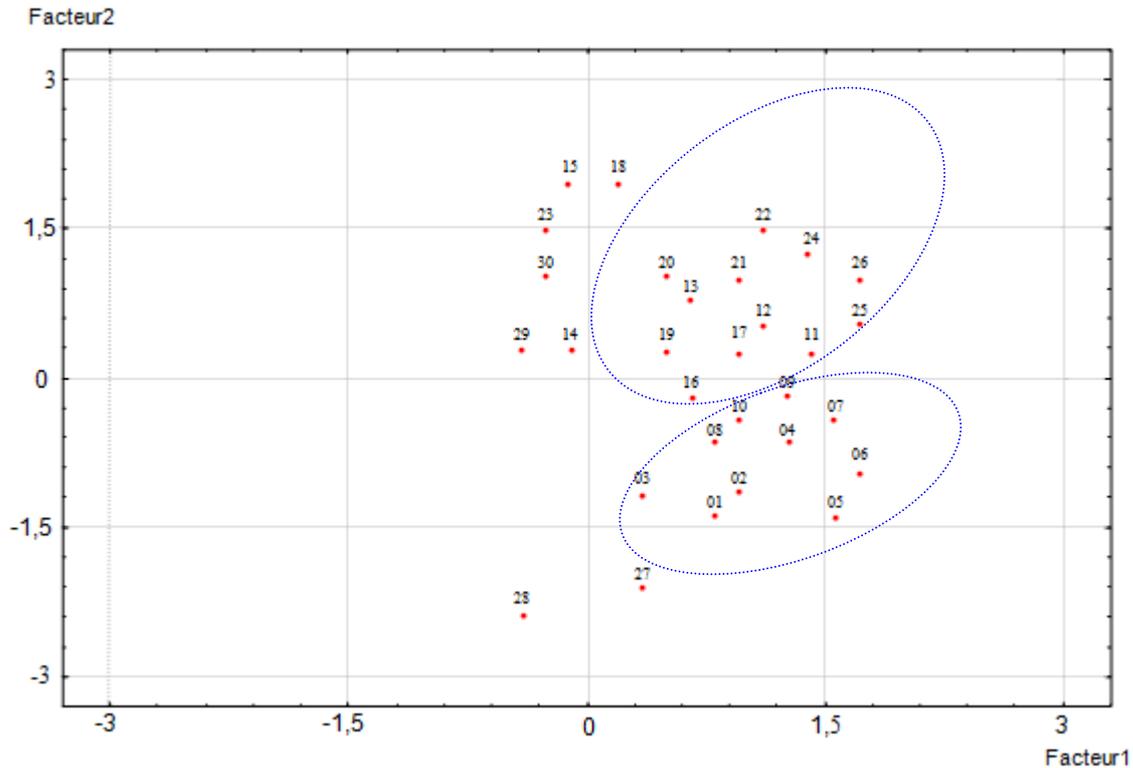


Fig. 80. Projection des individus sur le plan formé par les deux premiers axes

La figure 80 A, montre l'emplacement des puits sur un fond géologique. Nous pouvons ainsi confirmer l'existence de trois groupes, le premier caractérisé par les puits P1 à P10, ces ouvrages sont enrichis par les eaux du Djebel Djebissa par le biais des cours d'eau (O. Djebissa, O. Rerhab.),

Le deuxième groupe concerne les puits P11 à P25, situés dans la ville de Tébessa, et au Nord, dans cette zone l'hétérogénéité des formations à l'affleurement serait à l'origine des faciès chimiques observés.

Le troisième groupe se rapporte aux puits P26 à P32, cette zone se caractérise par l'affleurement de la nappe, cet affleurement est du à l'effet de substratum. La qualité des eaux dans cette zone demeure directement influencée par les formations calcaires.

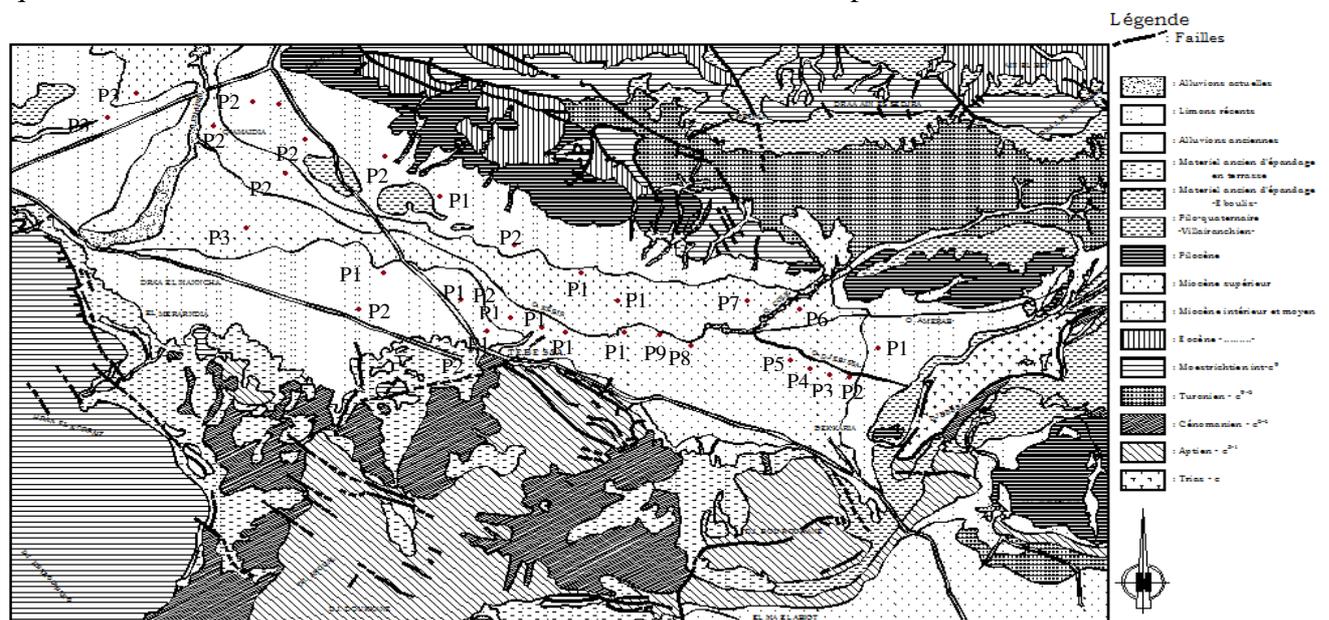


Fig.80A. Position des ouvrages analysés et cadre géologique

Pour cette période, comme pour la précédente, avons utilisé une moyenne de 30 échantillons étalés sur huit compagnes d'analyse. Le coefficient de corrélation critique est de 0,34.

B/ Période des basses eaux:

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.

	Ca ⁺⁺ mg/l	Mg ⁺⁺ mg/l	Na+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	0,61	1						
Na+K mg/l	0,36	0,19	1					
Cl ⁻ mg/l	0,51	0,46	0,89	1				
SO ₄ ⁻ mg/l	0,72	0,37	0,63	0,88	1			
HCO ₃ mg/l	0,69	0,58	0,34	0,13	-0,12	1		
Sr/Ca ‰	0,35	0,08	0,39	0,81	0,76	0,003	1	
CE µS/cm	0,24	0,06	0,73	0,86	0,88	0,001	0,67	1

Tableau.26. Coefficient de corrélation entre les variables initiales.

Nous remarquons que la corrélation inverse est absente. Ceci est peut être dû à l'évaporation, cette dernière peut freiner la dissolution des bicarbonates.

N°	Couple	Valeur de r	N°	Couple	Valeur de r
1	Ca ²⁺ - Mg ²⁺	0, 61	11	HCO ₃ ⁻ - Na ⁺ +K ⁺	0, 34
2	Ca ²⁺ - Na ⁺ +K ⁺	0, 36	12	Sr/Ca - Na ⁺ +K ⁺	0, 39
3	Ca ²⁺ - Cl ⁻	0, 51	13	CE- Na ⁺ +K ⁺	0,73
4	Ca ²⁺ - SO ₄ ²⁻	0, 72	14	SO ₄ ²⁻ - Cl ⁻	0,88
5	Ca ²⁺ - HCO ₃ ⁻	0, 79	15	Sr/Ca - Cl ⁻	0, 81
6	Ca ²⁺ - Sr/Ca	0, 35	16	CE - Cl ⁻	0, 86
7	SO ₄ ²⁻ - Mg ²⁺	0, 37	17	Sr/Ca - SO ₄ ²⁻	0, 76
8	HCO ₃ ⁻ - Mg ²⁺	0, 58	18	CE - SO ₄ ²⁻	0, 88
9	Cl ⁻ - Na ⁺ +K ⁺	0,89	19	Sr/Ca - CE	0,67
10	SO ₄ ²⁻ - Na ⁺ +K ⁺	0, 89			

Tableau.27. Coefficient de corrélation entre les variables initiales

La valeur propre pour le premier axe principal est égale à 3,98 il explique 43,36 % de la variation totale, la seconde composante égale à 2,84 explique 22,34 % de la variance totale. (tab.28, fig.81).Nous allons donc nous limiter comme pour la période humide à ces deux axes pour nos interprétations.

Axes	Valeurs propres	Pourcentage de variance	Pourcentage cumulé
F1	3,98	43,36	43,36
F2	2,84	22,34	65,7
F3	1,98	10,50	76,20
F4	1,34	07,72	83,92
F5	0,83	04,11	88,03

Tableau. 28. Valeurs propres et pourcentages des axes principaux,

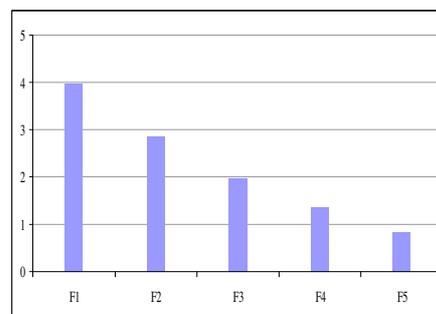


Fig.81. Histogramme des valeurs propres

Analyse du cercle ACP (fig.82) :

On remarque que le pôle minéralisation est constitué par les actions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+ et les anions Cl^- et SO_4^{2-}). Cependant, comparé au cercle de la figure (79), la compétition entre les alcalins et les alcalino-terreux, n'est pas présente, car le Ca^{2+} et le Mg^{2+} , se démarquent des autres éléments. La salinité des eaux serait engendrée par Na^+ , Cl^- et SO_4^{2-} .

Ce changement serait lié au climat. En effet au cours de cette période le manque de précipitations, freine la dilution et augmente l'évaporation, ce qui implique une augmentation des concentrations. Par contre au cours de la période pluvieuse, l'échange de base permettrait l'accroissement des concentrations du sodium, expliquant ainsi les teneurs remarquées en période de basses eaux. Les bicarbonates, caractérisent toujours l'axe 2.

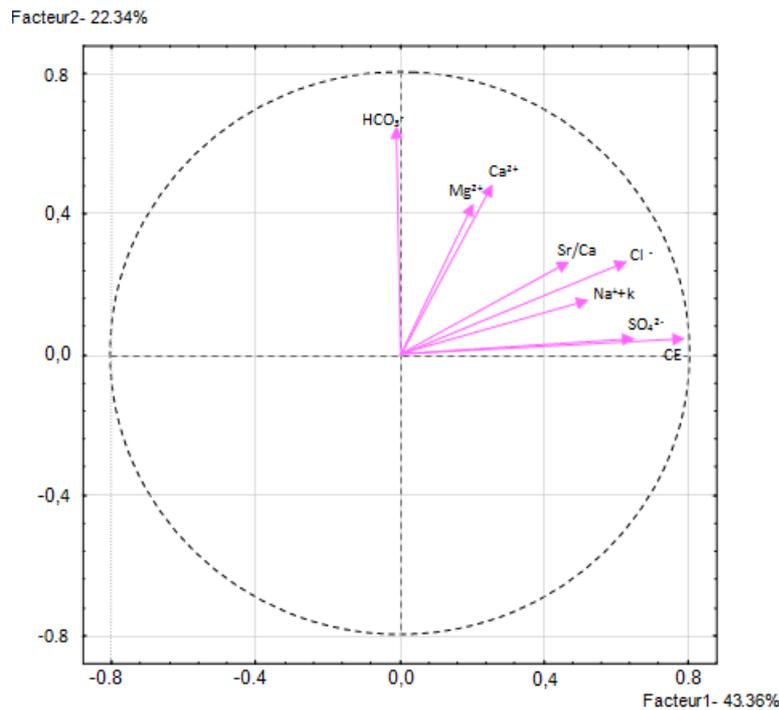


Fig. 82. Cercle de corrélation des variables dans le plan formé par l'axe 1 et l'axe 2.

Analyse de l'espace des individus (fig.83)

On remarque trois familles d'eau en compétition, la première concerne les échantillons riches en Ca^{2+} et Mg^{2+} , la seconde famille caractérise le reste des éléments excepté les bicarbonates qui forment la troisième famille (Fig. 83A).

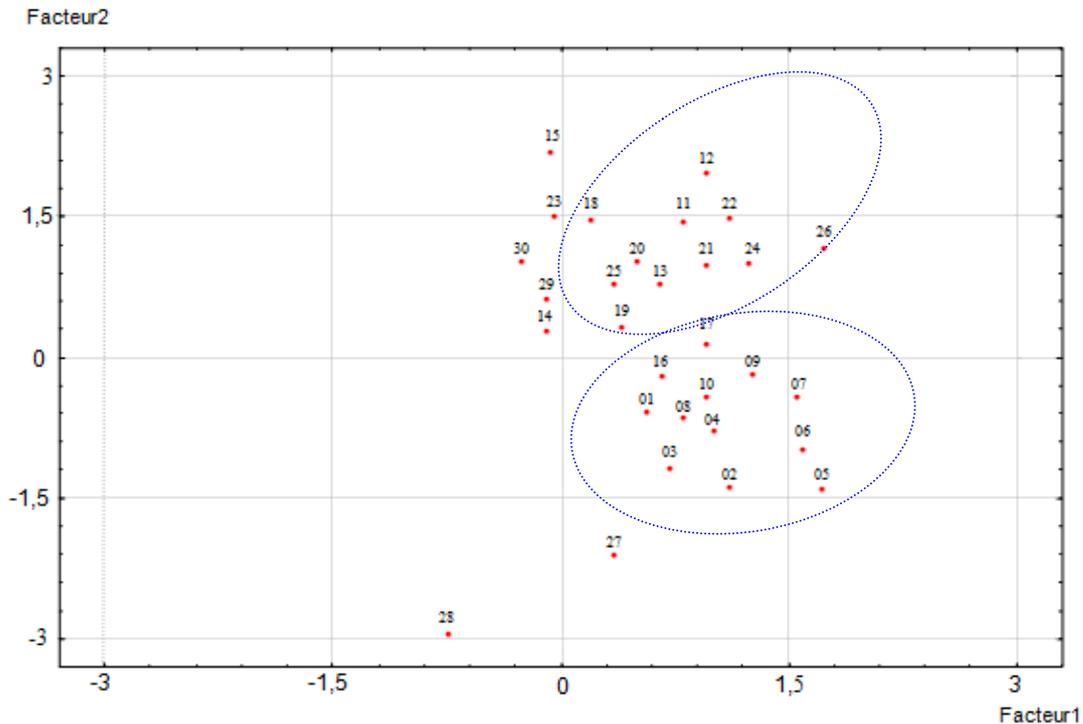


Fig.83. Projection des individus sur le plan formé par les deux premiers

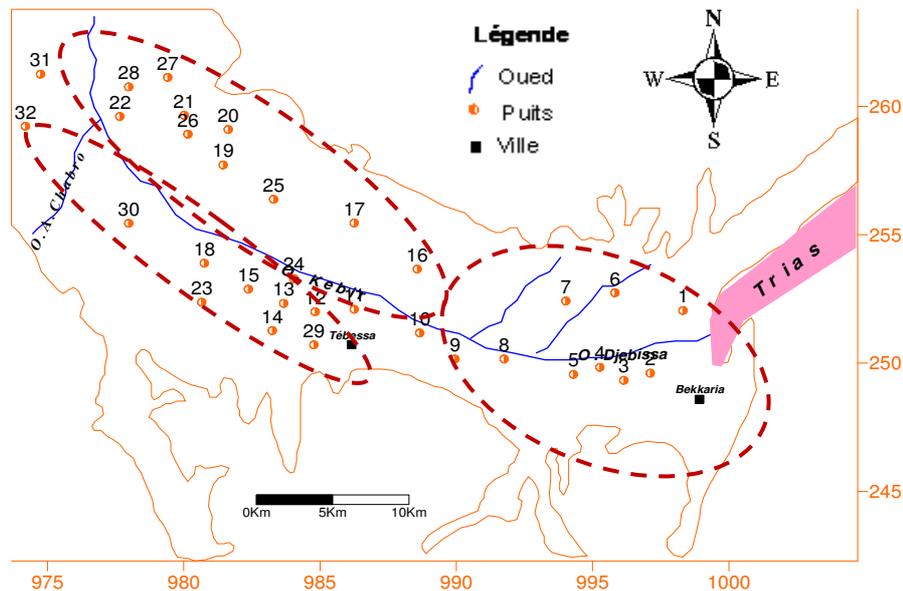


Fig. 83 A. Carte montrant l'emplacement des familles de minéralisation

L'observation de la figure précédente met en évidence trois groupes de familles :

- ✓ Le premier concerne les puits P1 à P9, ces puits sont influencés par les formations de Djebel Djebissa, les eaux sont acheminées par les différents Oueds.
- ✓ Le second groupe constitué des puits P10 à P25, leur composition est influencée par les formations du centre de la plaine et par l'effet de substratum.
- ✓ Le groupe trois contient le reste des puits, c'est-à-dire de P26 à P32, dans cette zone les formations calcaires influencent directement la qualité des eaux.

V.3. 2. Conclusion

Le précédent travail a montré une variation saisonnière de la qualité des eaux. Ceci est confirmé par la compétition entre les alcalins et les alcalino-terreux dans l'acquisition de la salinité. Cette compétition est franche en période pluvieuse par contre elle est absente en période sèche.

V.4. Faciès caractéristiques des eaux

Les diagrammes ($\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ - $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$) fig, 84A, 84B et ($\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ - SO_4^{2-}) fig, 84C, 84E permettent de déterminer le faciès chimiques.

L'interprétation de ces diagrammes montre l'existence des quatre faciès suivants : bicarbonaté calcique, sulfaté calcique, chloruré calcique, chloruré sodique.

Le premier caractérise la région de Ain Chabro et montre l'influence des calcaires sur la qualité des eaux, surtout pendant la période des hautes eaux, où le nombre de point est plus important caractérisant ainsi un phénomène de dissolution des bicarbonates. Le second est généré par les formations évaporitiques. Les deux derniers, mettent en évidence l'influence des chlorures sur la qualité des eaux.

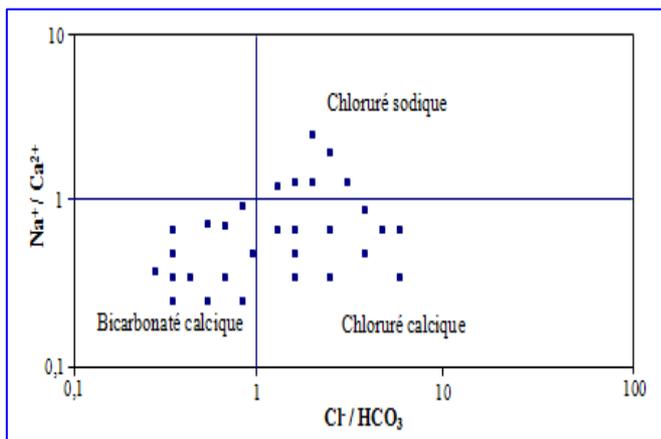


Fig.84 A. Évolution et distribution du faciès chimique Période des hautes eaux

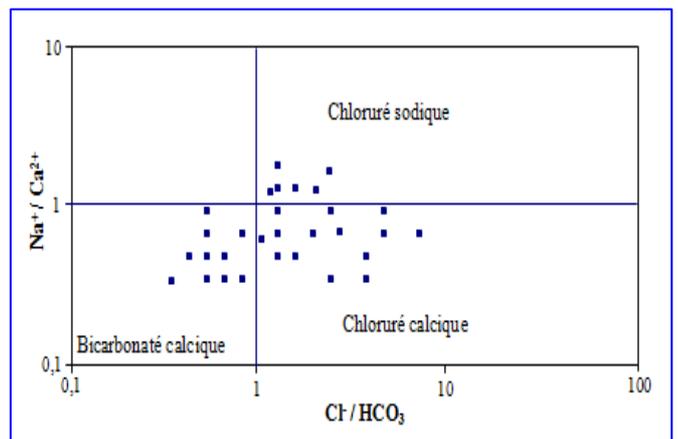


Fig.84 B. Évolution et distribution du faciès chimique Période des basses eaux

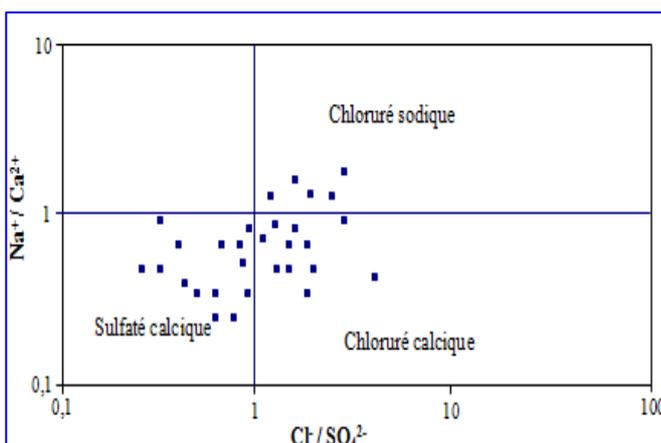


Fig.84 C. Évolution et distribution du faciès chimique Période des hautes eaux

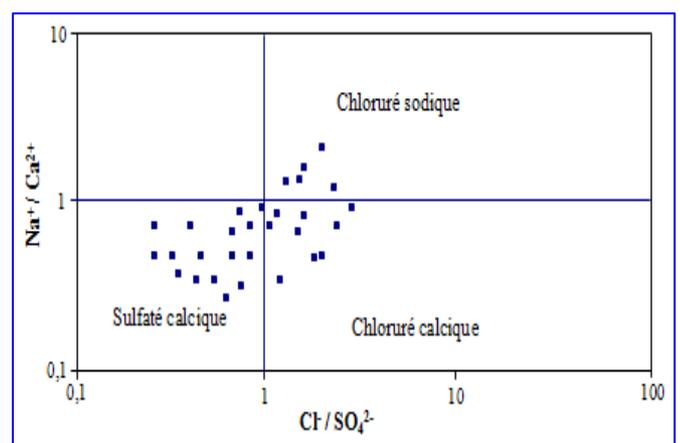


Fig.84 D. Évolution et distribution du faciès chimique Période des basses eaux

Le tableau suivant récapitule les variations saisonnières des faciès déterminés graphiquement.

Faciès	bicarbonaté calcique		sulfaté calcique		chloruré calcique		chloruré Sodique		Observation
Période	H.E	B.E	H.E	B.E	H.E	B.E	H.E	B.E	
Nombre d'échantillons	12	10	14	16	21	19	11	11	On remarque un appauvrissement du faciès bicarbonaté calcique, celui s'accompagne d'un enrichissement en sulfaté calcique et chloruré calcique. Le faciès chloruré calcique reste identique pour les deux périodes.

Tableau.29. Variations saisonnières des faciès

V. 4.1. Variations des anions ; (HCO_3^- , SO_4^{2-} et Cl^-) et la conductivité : (fig.77 E)

a- Graphique SO_4^{2-} Conductivité :

On remarque que la conductivité et les sulfates évoluent ensemble, selon une droite, ceci montre le lien entre la conductivité et les sulfates, vers la fin du graphique on remarque une certaine stabilité, cette dernière serait due aux sulfates qui sont arrivées à saturation.

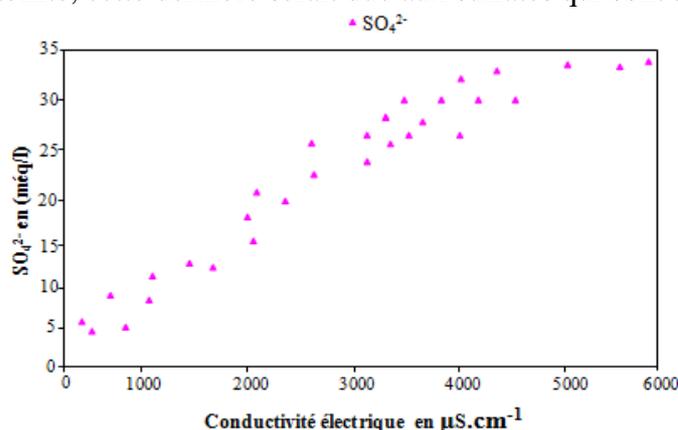


Fig.85 A. Évolution des sulfates en fonction de la conductivité électrique

b- Graphique Cl^- Conductivité

L'observation du graphe montre deux paliers, un premier caractérisant par une stabilité des chlorures, la seconde partie débutant à partir de 10 mg/l, annonçant une augmentation simultanée des deux paramètres. Contrairement aux sulfates, qui interviennent dans la salinité des eaux dès les premières valeurs, les chlorures influencent la conductivité à partir d'une valeur seuil.

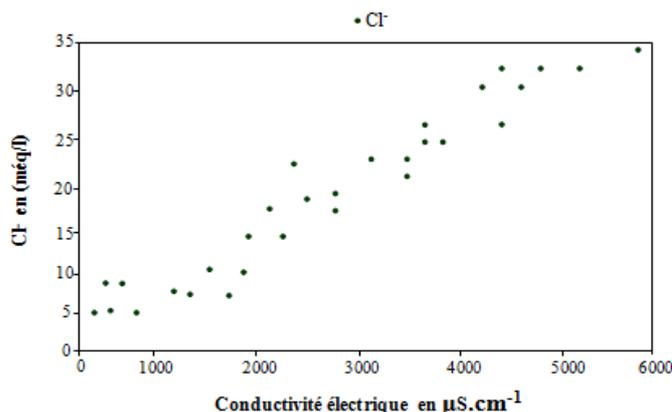


Fig.85 B. Évolution des chlorures en fonction de la conductivité électrique

c- Graphique HCO_3^- Conductivité :

On ne retrouve pas un lien franc entre les deux paramètres, on remarque que la conductivité croit même quand les bicarbonates décroissent.

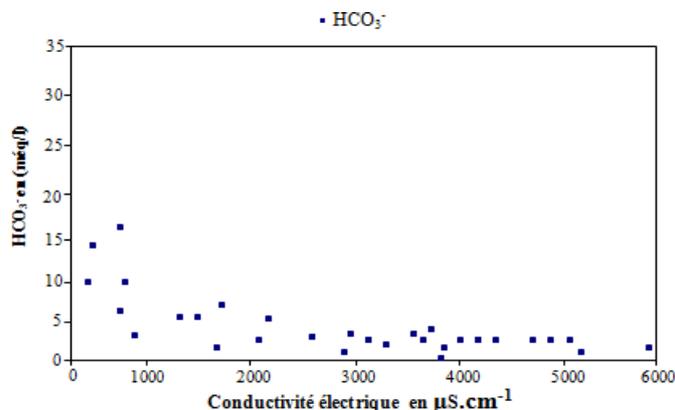


Fig.85 C. Évolution des bicarbonates en fonction de la conductivité électrique

V. 4.2. Les éléments Cl^- - SO_4^{2-} :

Les sulfates et les chlorures sont deux ions provenant de formations différentes, le SO_4^{2-} provient du gypse et le Cl^- provient de l’halite et probablement d’une pollution anthropique.

Ces deux éléments étant présents dans la région, nous avons recherché la domination de l’un par rapport à l’autre.

L’observation du graphique (86), montre deux familles, une première caractérisant les eaux riches en chlorures, englobant les puits P 11 à P 30, ces ouvrages sont éloignés des formations gypsifères.

La deuxième famille, elle-même pouvant être scindée en deux familles, la première caractérisant les puits P 1 à P10, ces ouvrages sont situés en aval des formations gypsifères de Djebissa. La seconde famille caractérisant les puits P16, 18, 20,22, 24, 26 et 27, ces ouvrages présentent un faciès secondairement sulfatés. Expliquant la domination des sulfates.

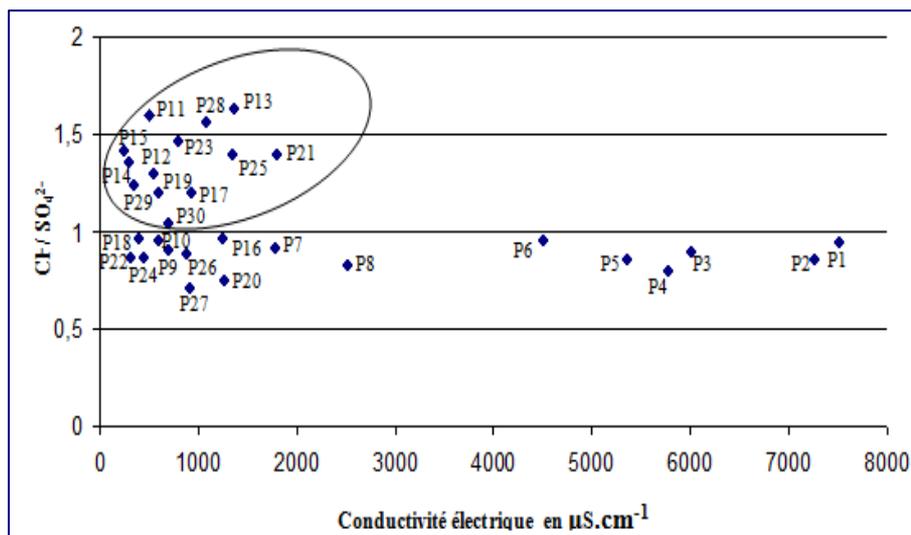


Fig.86. Évolution du rapport $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ en fonction de la conductivité électrique

V. 5. 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. 1. 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 accélérant les changements de la qualité des eaux, Nous étudions l'influence de chaque paramètre sur la qualité des eaux.

V. 5. 1. 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. 2. Les bases de la thermodynamique

Les éléments dominants ont été déterminés selon divers critères; activités ioniques, constantes d'équilibre, indices de saturation, utilisant le logiciel 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 $I < 10^{-2,3}$

$$\log \gamma_i = - A Z_i^2 \sqrt{I}, \text{ Où :}$$

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:

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

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 $I < 0,5$:

$$\log \gamma_i = -A Z_i^2 [\sqrt{I} / (1 + B a_0 \sqrt{I}) - bI], \text{ Où : } b \text{ est une constante,}$$

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

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

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) (tab30).

Constituant	Activité ionique AI (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 30. Valeurs limites de l'activité (moles/l).

La faiblesse des valeurs d'activité ionique, en moyenne de l'ordre de 10^{-4} 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. 3. Étude de l'acquisition de la minéralisation

Les eaux météoriques commencent à acquérir leur minéralisation dès les premières pluies, où elles se chargent en une faible concentration d'éléments chimiques, une fois interceptées par le sol, une partie des eaux de précipitation ruisselle à la surface et l'autre s'infiltre dans le sous sol pour atteindre la nappe, les eaux de ruissellement vont s'écouler vers les oueds où elles subiront une évaporation sous l'effet de la température, ce qui produit une précipitation des éléments chimiques sous forme de minéraux.

Les eaux qui s'infiltrent dans les formations géologiques :

- ✓ Calcaires de bordures, seront chargés en ions Ca^{2+} , HCO_3^- , par la dissolution, Les puits qui se trouvent à proximité des bordures attestent de cette minéralisation et se caractérisent par un faciès bicarbonaté calcique.
- ✓ Riches en gypses et en sels, ce qui leur permet d'acquérir des concentrations importantes en Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} , SO_4^{2-} .

Les activités anthropiques peuvent provoquer des variations des concentrations des ions.

V. 5. 1. 3.1. 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):

$$\text{SI} = \log (\text{IAP}/\text{Ksp})$$

L'indice de saturation atteint la valeur zéro quant 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.

L'irrigation par des eaux salées provoque la salinisation des sols et augmente ainsi la minéralisation.

V. 5. 1. 3. 2. 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.

Dans le but de comparer les résultats et de voir l'évolution de cet indice dans la zone d'étude, nous avons pris des valeurs établies en 2002 par Bouchagoura. (Tableau 31) et celles établies en 2009.

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.

V. 5. 1. 3. 3. Évolution des valeurs des SI dans les eaux de la région

Les minéraux carbonatés présentent des degrés de saturation différents (Fig87, 88). En effet, celui de la dolomite varie de 0,63 à 1,76 en 2009 et de 1,29 à 2,06 en 2002. Toutes les analyses présentent une sursaturation vis-à-vis de la dolomite, ceci entraîne une précipitation avec formation de bicarbonates de magnésium.

La calcite varie de 0,51 à 1.48 pour la période 2009 et de 0,64 à 1,19 en 2002 ; toutes les valeurs sont positives, pour les deux périodes, ceci est du a une précipitation de la calcite, d'où un enrichissement possible des eaux en bicarbonate de calcium. La répartition spatiale de cet indice pour les minéraux carbonatés, montre une augmentation des concentrations, des bordures Sud-ouest vers le Nord-Est dans le sens de l'écoulement.

Les minéraux évaporitiques montrent des degrés de saturation plus faibles que les minéraux carbonatés (figure 87, 88). Le gypse enregistre des indices qui varient de -2,01 à -0,37 en 2009 et de -1,52 à 0,19 en 2002. 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-} , sauf pour le cas de deux puits où les valeurs sont positives.

L'anhydrite dont l'indice varie de -1,63 à -0,34 en 2009 et de -1,74 à -0,03 en 2002, présente des valeurs négatives pour toutes les analyses, ce qui indique une sous saturation augmentant ainsi la minéralisation des eaux.

Les concentrations les plus importantes ont été enregistrées dans les régions Est de Djebissa où affleurent les dépôts évaporitiques.

L'étude comparative de l'indice de saturation des différents minéraux dans l'eau pour les périodes 2002 et 2009 indique que seuls les minéraux carbonatés ont tendance à atteindre l'équilibre, en particulier pendant la période des hautes eaux. Par contre, les minéraux évaporitiques sont toujours à l'état de sous-saturation, malgré les fortes concentrations qu'ils acquièrent.

N° du puits	X	Y	SI Anhydrite	SI calcite	SI dolomite	SI gypse	SI Anhydrite	SI calcite	SI dolomite	SI gypse	
P1	1 003,30	245,55	-1,27	0,71	1,61	-1,05	-1,63	0,51	0,63	-2,01	
P2	996,45	247,70	-1,15	0,88	2,01	-0,92	-1,34	0,61	0,57	-1,97	
P3	971,75	249,30	-1,59	0,7	1,47	-1,37	-1,26	0,87	0,42	-1,87	
P4	998,70	253,65	-1,08	1,18	2,4	-0,85	-0,96	0,34	0,38	-1,85	
P5	985,00	257,50	-1,74	0,64	1,29	-1,52	-1,63	0,61	0,67	-0,87	
P6	976,60	255,20	-1,55	0,4	1,03	-1,34	-1,06	0,24	0,97	-1,11	
P7	987,90	250,55	-1,39	0,77	1,66	-1,17	-0,97	0,16	1,09	-1,24	
P8	995,60	247,80	-1,17	0,91	1,78	-0,95	-1,39	0,89	1,11	-0,98	
P9	992,30	248,40	-1,42	0,66	1,52	-1,21	-1,21	0,96	1,20	-0,86	
P10	989,95	254,50	-1,3	0,7	1,56	-1,08	-1,41	1,02	1,34	-1,13	
P11	989,80	251,30	-1,72	1,25	2,62	-1,5	-0,92	1,23	1,51	-1,21	
P12	975,80	254,90	-0,6	1,42	2,71	-0,38	-1,14	1,54	1,61	-0,88	
P13	975,10	255,65	-0,44	1,66	2,26	-0,23	-0,84	1,16	1,24	-0,41	
P14	986,00	257,35	-0,72	0,86	1,55	-0,5	-0,71	1,63	1,44	-0,26	
P15	990,55	252,10	-0,1	1,89	3,05	0,12	-0,34	1,48	1,76	-0,37	
P16	989,85	251,90	-0,71	0,82	1,32	-0,49	-0,52	0,97	1,94	-0,61	
P17	992,60	248,45	-0,03	1,19	2,06	0,19	-0,98	0,86	1,83	-0,81	
P18	985,70	255,80	-0,54	0,05	0,05	-0,32	-0,93	1,94	1,67	-0,31	
P19	985,10	255,85	-1,51	0,43	0,92	-1,29	-1,01	0,84	1,45	-0,57	
P20	985,30	255,10	-1,05	1,1	1,95	-0,83	-1,21	0,45	1,02	-0,67	
P21	985,35	255,40	-1,04	1,06	1,78	-0,82	-1,04	0,35	1,11	-0,92	
P22	985,40	257,80	-0,95	1,15	1,98	-0,73	-0,69	0,57	1,08	-0,81	
P23	990,55	251,30	-0,89	0,8	1,21	-0,67	-0,99	1,82	1,71	-0,34	
P24	986,55	250,70	-0,87	0,75	1,06	-0,65	-0,87	1,09	0,97	-0,38	
P25	986,15	251,20	-0,94	0,55	0,82	-0,72	-1,13	0,91	1,82	-0,51	
P26	987,70	250,40	-1	0,88	1,42	-0,77	-0,78	0,54	0,93	-0,49	
P27	986,10	251,70	-0,82	0,23	0,05	-0,6	-1,24	0,34	1,02	-0,61	
P28	996,6	247,68	-0,28	1,39	2,29	-0,06	-1,04	0,26	0,84	-0,23	
P29	990,82	247,65	-1,11	1,12	1,99	-0,9	-1,00	0,51	0,76	-0,67	
P30	993,92	247,9	-1,3	0,75	1,35	-1,08	-0,78	1,89	1,72	-0,35	
Tableau.31. Indice de saturation calculé 2002							Indice de saturation calculé 2009				

L'observation du tableau précédent montre des indices de saturation inférieurs à l'unité pour Anhydrite et le gypse, ce qui indique une dilution par contre la calcite et la dolomite montre un indice de saturation positif mettant en évidence une précipitation. Les figures 87 et 88, donnent un aperçu sur l'évolution des indices de saturation au cours des deux périodes considérées.

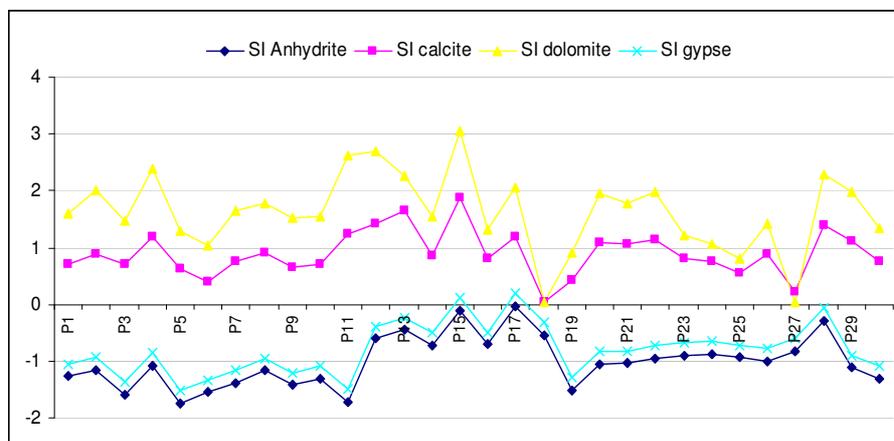


Fig.87. Évolution des indices de saturation dans les eaux de la région. (Bouchagoura, 2002)

On remarque que les puits P15, P17, P18 et P28, ont un SI, proches de zéro, par contre les autres points d'eau ont des SI, éloignés de zéro.

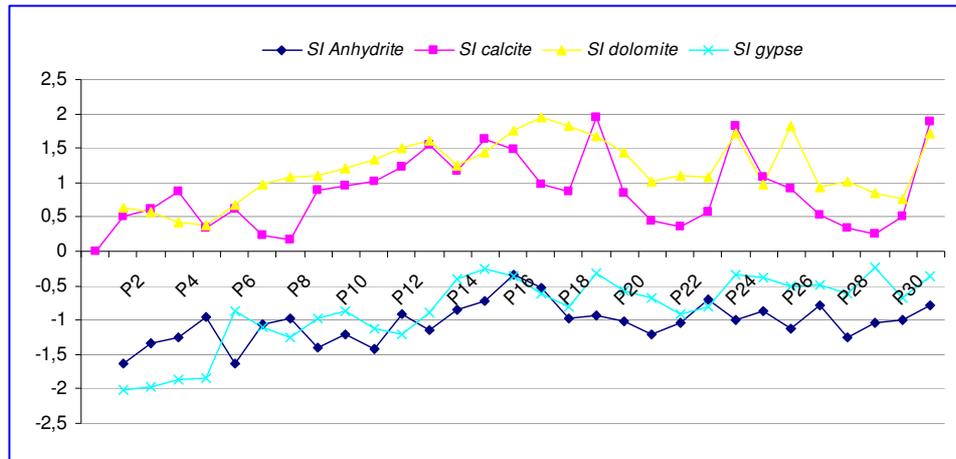


Fig.88. Évolution des indices de saturation dans les eaux de la région.

On ne retrouve pas la même répartition. Au cours de cette période seuls P1 et P8, sont des SI, proches de zéro.

V. 5. 2. Paramètres influençant la composition chimique des eaux

V. 5. 2.1. 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. 2.2. 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. 5.2.3. Le titre natronique

Nous avons remarqué, que les sulfates et les chlorures influencent la conductivité, par ailleurs le calcium, le magnésium ou le sodium accompagne l'un des deux anions. Pour éviter toutes ambiguïtés, quand à l'influence de chaque élément, nous avons calculé l'indice natronique, ce dernier est donné par la relation suivante : $\Sigma mNa + \Sigma m K > \Sigma mCl$.

Eau Natronique :

Si $\Sigma mNa + \Sigma m K > \Sigma mCl$: l'eau contient des cations alcalins combinés aux carbonates ou aux sulfates en plus des chlorures.

Eau Anatronique :

Si $\Sigma mNa + \Sigma m K < \Sigma mCl$: les chlorures sont associés à des cations de Ca et Mg.

Type\ Secteur	Puits Bekkaria	Puits Tébessa	Puits Ain Chabro
Eau anatronique	P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8,	P11, P12, P13, P16, P17, P26	P18, P19, P21, P25, P28
Eau natronique	/	P9, P10, P14, P15, P29	P22, P23, P24, P26, P27

Tableau.32. Répartition de l'indice natronique dans la région d'étude

L'observation des résultats confirme la compétition entre les éléments, mise en évidence par l'ACP.

L'indice natronique : Ce dernier est donné par la formule suivante :

$$IN (\text{indice natronique}) = mNa + mk - mcl,$$

La figure 89, révèle l'existence de trois groupes répartis sur la totalité de la plaine.

- ✓ Un premier, englobant les puits localisés à Tébessa et à l'Ouest au secteur d'Ain Chabro, caractérisant des eaux natronique, ces dernières contiennent des cations alcalins combinés aux carbonates.
- ✓ Un deuxième groupe, formé par des puits occupant la partie Est de djebel e Djebissa et le reste de la plaine. Ces eaux sont anatronique, les chlorures sont associés à des cations de Ca et Mg.
- ✓ Le troisième groupe, montre que l'eau est captée sur une limite natronique c'est une eau dite d'échange de base.

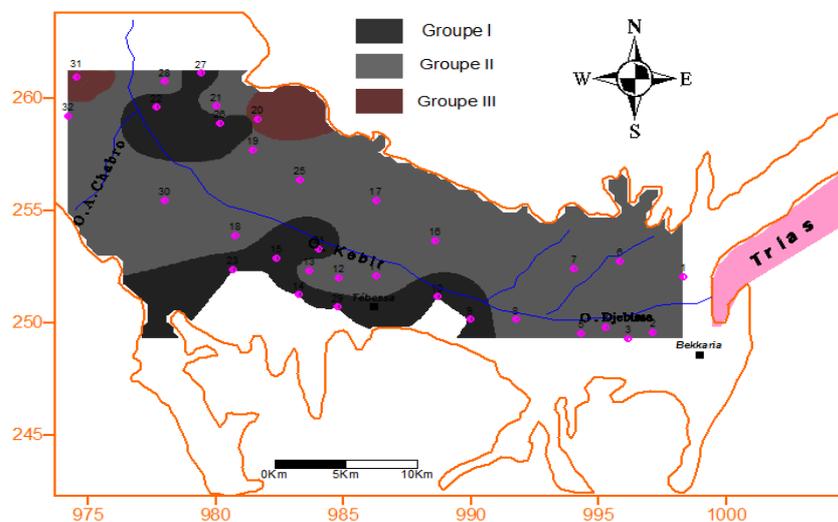


Fig.89. Carte des indices natroniques

L'étude menée a montré que les formations évaporitiques influencent le chimisme des eaux. Pour étayer nos hypothèses, nous nous sommes intéressés à la variation du strontium, élément indicateur de l'origine évaporitiques de la salinité. En s'inspirant du travail réalisé par Bakalowicz (in Hsissou, 1997), basé sur les valeurs seuils du rapport Str^{2+}/Ca^{2+} , nous avons appliqué ces valeurs aux résultats obtenus dans l'étude de la région.

V. 6. Caractéristiques 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 ($Sr SO_4$); minéral associé au gypse, il forme ainsi un bon marqueur de la présence des évaporites.

L'examen des valeurs obtenues montre que le rapport Sr/Ca varie entre 0,8‰ et 28‰, Nous avons pu dégager trois groupes:

- a- Groupe A ($Sr/Ca < 2‰$): Comprend 3 échantillons, soit 9,4%,
- b- Groupe B ($2‰ < Sr/Ca < 3‰$): Comprend 4 échantillons, soit 12,5 %,
- c- Groupe C ($Sr/Ca > 3‰$): comprend 25 échantillons, soit 78,1%

On note que 78,1 % des échantillons présentent un rapport $Sr^{2+}/Ca^{2+} > 3‰$ mettant en évidence l'influence des formations évaporitiques sur la qualité des eaux souterraines (Fig. 90).

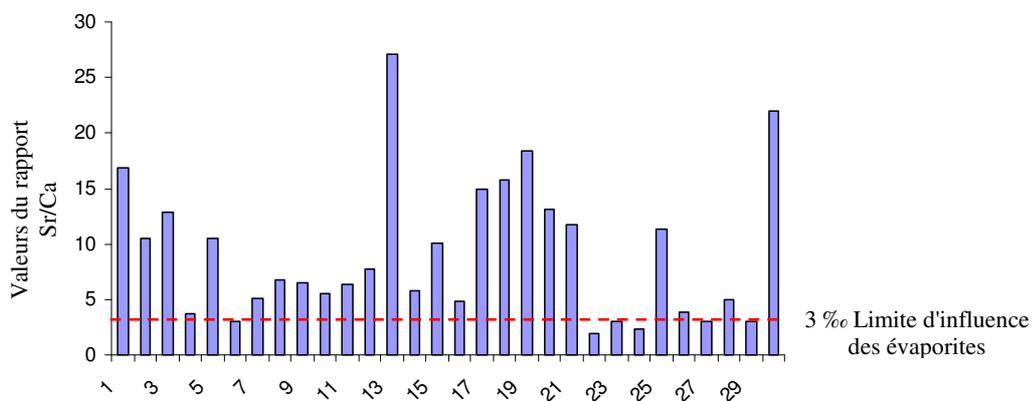
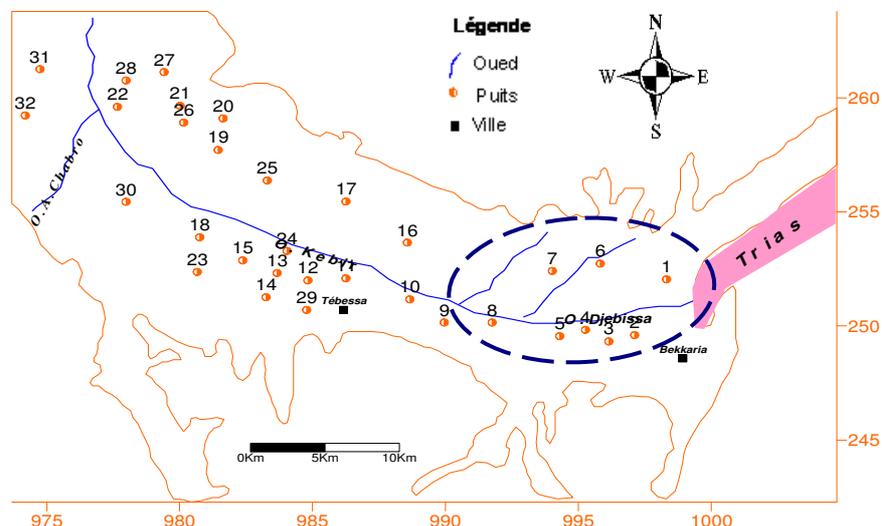


Fig. 90. Variations du rapport Sr^{2+}/Ca^{2+} dans la zone d'étude

V. 6. 1. Impact des formations gypsifères de Djebel Djebissa sur la salinité des eaux

Au niveau du djebel Djebissa, affleure le Trias Gypsifère, la cartographie piézométrique, a montré que l'écoulement, se fait de ce Djebel vers la plaine, Ce qui laisse supposer une relation entre la géologie et la salinité, Pour mettre en évidence cette relation, nous avons utilisé deux puits témoins, le premier situé à quelques mètres du Trias par contre le second est assez éloigné, Les résultats obtenus sont matérialisés par les figures 91 et 92 et permettent de tirer les renseignements suivants :



Fig, 91. Position des puits analysés par rapport à Djebel Djebissa

V. 6. 2. Évolution du rapport Sr^{2+}/Ca^{2+}

Les graphes du rapport Sr^{2+}/Ca^{2+} des puits 1 et 8 (fig.92), montrent des valeurs très élevées, supérieures à 3‰, montrant une influence des formations évaporitiques, ce qui laisse supposer que le djebel Djebissa (diapir), influence directement la salinité des eaux,

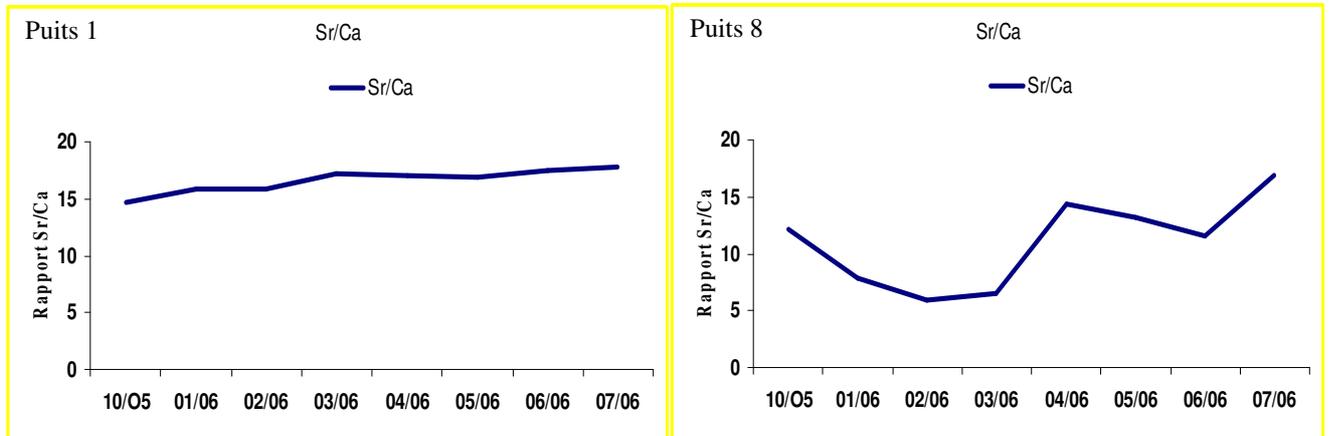


Fig.92 : Variations du rapport Sr^{2+}/Ca^{2+} au niveau des puits extrêmes (P1 & P 8) 2006

Les résultats des rapports Sr^{2+}/Ca^{2+} , donnent deux principales indications ; la première montrant une influence quasi étroite des formations évaporitiques sur la minéralisation et concerne la nappe du système Bekkaria –Tébessa. Dans cette partie, les formations triasiques sont situées à l’amont du système et l’alimentent directement.

Pour ce qui est des autres régions, on note l’absence de cette relation directe ; les eaux avant d’atteindre la nappe passent par des formations de différentes natures, ces dernières influencent la composition chimique des eaux, expliquant ainsi les hétérogénéités de leur qualité.

V. 6. 3. Confirmation de l’influence des évaporites par la lixiviation

Apport de la lixiviation :

La chimie du strontium est similaire à celle du calcium, Le strontium est un élément assez commun remplaçant le calcium ou le potassium dans les minéraux des roches ignées.

Le carbonate (strontianite $SrCO_3$) et le sulfate (célestite $SrSO_4$) sont commun dans les sédiments (HEM, 1985), La célestite accompagne généralement les formations évaporitiques et se dissous selon la relation suivante :



Dans un aquifère superficiel, les concentrations du strontium sont principalement gouvernées par la réaction des minéraux carbonatés et sulfatés, la concentration du strontium dans l’eau des aquifères étudiés varie entre 0,38 et 9,60 mg/l.

Cette variation des concentrations s’explique par la présence de plusieurs faciès géologiques dont les roches évaporitiques qui peuvent être en contact permanent avec les eaux des nappes, pour mettre, en évidence la contribution du Strontium sur la minéralisation des roches nous sommes intéressé à la dissolution des évaporites.

Protocole réalisé :

Nous avons prélevé des sédiments appartenant aux trois zones ciblées, ces derniers ont été déposés dans de l'eau, nous avons effectué cinq lixiviations, se répartissant comme suit : 34 heures, 48 heures, 7 jours, 30 jours et 90 jours, les analyses ont été réalisées à Besançon, les résultats obtenus sont condensés dans le tableau suivant :

Site de prélèvement	Temps de lixiviation	Ca ²⁺	Sr ²⁺	Sr ²⁺ /Ca ²⁺	Site de prélèvement	Temps de lixiviation	Ca ²⁺	Sr ²⁺	Sr ²⁺ /Ca ²⁺
Djebissa 4	24 h	9,6	0,04	4,16	Djebissa 4	30 jours	16,4	0,08	4,8
Djebissa 9	24 h	8,4	0,02	2,3	Djebissa 9	30 jours	24,2	0,06	2,4
Djebissa 8	24 h	22,4	0,52	23,2	Djebissa 8	30 jours	33	1,26	38,2
Djebissa 4	48 h	11,4	0,04	3,5	Djebissa 4	90 jours	13,2	0,1	7,5
Djebissa 9	48 h	10	0,01	1	Djebissa 9	90 jours	13,4	0,06	4,4
Djebissa 8	48 h	20,4	0,49	25	Djebissa 8	90 jours	36,6	1,6	43,7
Djebissa 4	7 jours	14	0,05	3,5					
Djebissa 9	7 jours	11,4	0,04	3,5					
Djebissa 8	7 jours	20,8	0,65	31					

Tableau .33. Variations temporelles du rapport Sr²⁺/Ca²⁺, dans les lixiviations réalisées.

L'observation du tableau montre des variations du rapport Sr²⁺/Ca²⁺.

En effet les analyses réalisées sur les lixiviats obtenus après 24h et 90 jours de réaction, se caractérisent par un accroissement de la valeur du rapport, ce dernier dépasse parfois la valeur seuil de 3 ‰, mettant ainsi en évidence, l'apport en sel par dissolution des formations évaporitiques,

V. 6. 4. Variations spatio-temporelle des rapports Sr²⁺/Ca²⁺ :

Nous allons, étudier les variations des rapports au niveau de trois zones de prélèvements, ce qui nous permettra de voir l'influence de la dissolution au niveau de chaque site.

- **Djebel Djebissa** : trois échantillons ont été prélevés, dans cette zone, nous prenons, en considération l'échantillon Djebissa 4, car le plus proche de la plaine, L'observation du graphe figure 93, montre une tendance à l'accroissement de la valeur du rapport à partir du 7^{ème} jour de dépôt dans l'eau, Ceci démontre, que la dissolution est continue et par conséquent, il y a sous saturation vis-à-vis des minéraux gypsifères.

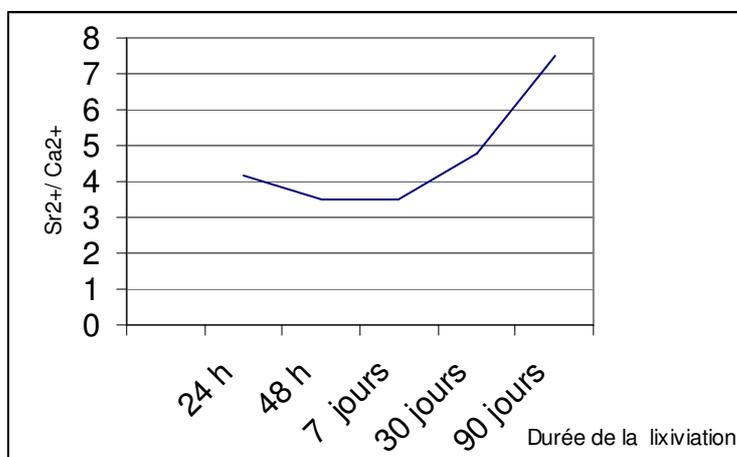


Fig.93. Variation du rapport Sr²⁺/Ca²⁺, dans les Lixiviats de Djebissa

V. 6. 5. Conclusion

Cette étude a porté sur la qualité des eaux d'une région caractérisée par une hétérogénéité des formations à l'affleurement. Les faciès chimiques déterminés diffèrent dans l'espace, c'est-à-dire en allant de Bekkaria à Ain Chabro, ils varient dans le temps, c'est-à-dire entre les deux périodes considérées (hautes et basses eaux).

L'étude des ACP montre que :

Les chlorures, les sulfates, le sodium présentent des concentrations importantes, ce qui explique la salinité des eaux.

Les différentes méthodes développées corroborent vont dans le même sens que l'analyse en composantes principales. Ainsi la méthode des rapports indique une salinité due soit aux chlorures soit aux sulfates soit aux deux.

Le calcul de l'indice natronique classe les eaux selon l'importance des chlorures, des alcalins ou des alcalino-terreux.

Cette situation s'explique également par le lessivage des sels pendant la période des hautes eaux et à l'évaporation se produisant durant la période de basses eaux. Nous remarquons que les bicarbonates influencent la composition chimique des eaux des puits situés sur les bordures où affleurent les formations calcaires.

Le calcul de l'indice de saturation, nous a permis de traiter l'aspect spéciation, nous remarquons que les valeurs obtenues, indiquent soit une sur saturation vis-à-vis de la dolomite et de la calcite et une sous saturation de l'anhydrite et du gypse. Ces variations constituent un accélérateur du processus de salinité des eaux.

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

La lixiviation réalisée montre la contribution importante des formations évaporitiques dans l'acquisition de la salinité.

CHAPITRE VI

IMPACT DE LA MINE

L'exploitation de la mine de Khanguet El mouahed au nord de la ville de Bekkaria s'est arrêtée en 1964, cependant aucune réhabilitation n'a été réalisée pour assurer une protection de l'environnement. Les terrils sont toujours déposés en amont de l'Oued Kebir, ce qui expose les eaux et le sol à d'éventuelles contaminations.

VI.1. Impact des terrils issus de la mine sur la qualité des eaux

VI.1. 1. Introduction

La région d'étude renferme des gisements de fer, qui ont été exploités jusqu'en 1964. Avant son acheminement vers Annaba, le minerai était déposé à même le sol. Les dépôts de terrils, étaient donc en contact avec le sol et les eaux surface. Ceci, permettait des échanges entre les polluants et l'environnement (sol et eaux). Le présent travail, vous permet de dresser un constat de cette pollution. Le schéma suivant montre les mécanismes de pollution au niveau de cette région. (Fig.94).

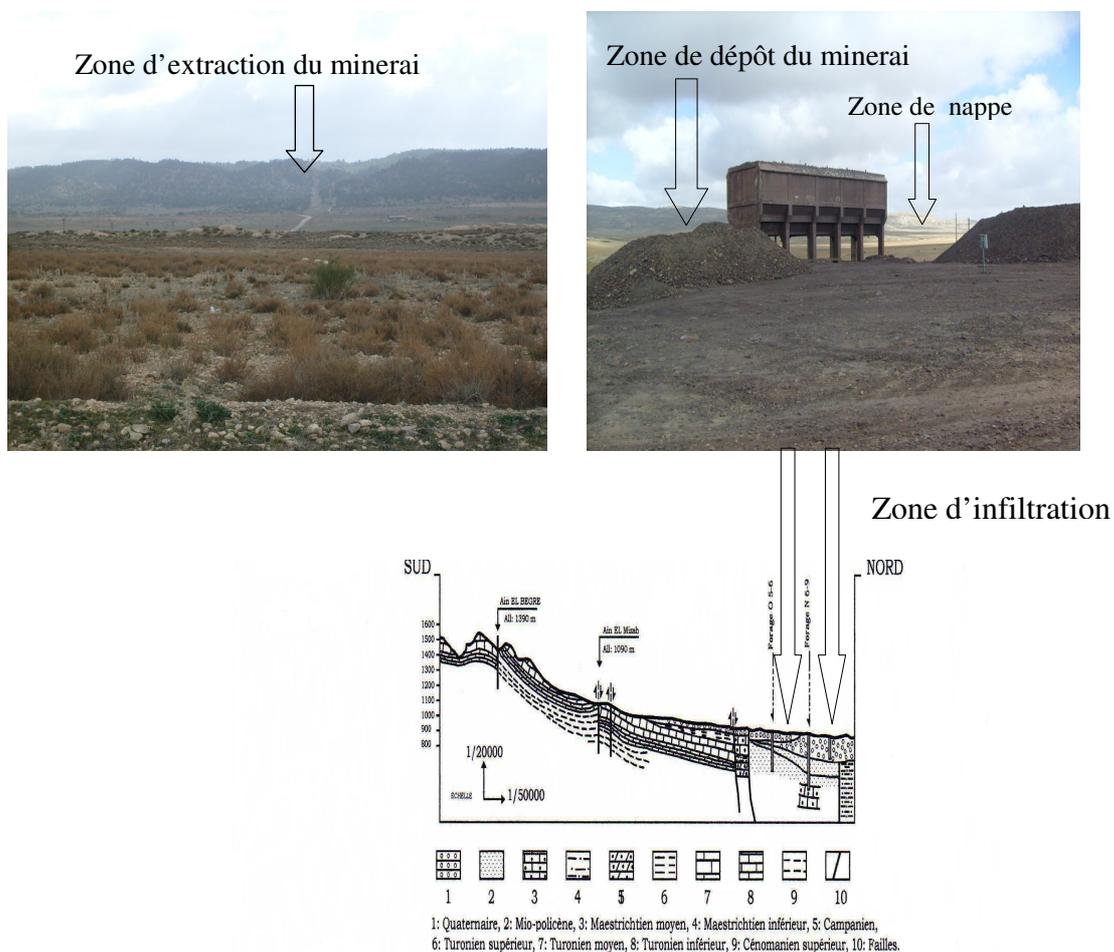


Fig.94. Zone de dépôt des terrils (pollution).

L'observation du schéma précédent montre que le minerai en provenance de la mine va atteindre la nappe via l'Oued, soit par le biais du vent soit par le ruissellement suite aux précipitations. Ce qui augmente aussi la pollution est la méconnaissance de l'extension de l'impact de la mine et par conséquent le degré de pollution sur le sol et sur l'eau. Ce qui nous a conduits à nous intéresser aux deux paramètres.

Dans la réalité les mines sont généralement abandonnées sans réhabilitation après l'arrêt de l'exploitation, ce qui entraîne un prolongement du processus de pollution, de ce fait la qualité des eaux se trouve menacée même après l'arrêt de l'exploitation.

Ce qui continu à entrainer un changement dans la qualité des eaux au contact avec les sites miniers. Certains éléments qui sont présents dans les réseaux cristallins des minéraux et sont généralement difficilement libérés sont mis en solution et dispersés dans l'environnement.

De nombreuses observations ont signalé que les dépôts des terrils et déchets miniers dans le voisinage de la mine constituent aussi une source importante de contamination, et qui est facilement mobilisable (Moran et Wentz, 1974 ; Bowell et Bruce, 1995 ; Gäbler, 1997 ; Prieto, 1998 ; Hudson-Edwards *et al.* 1999 ; Younger, 2000 ; Dold et Fontbote, 2001 ; Banks *et al.*, 2002 ; Carlsson *et al.*, 2002 ; Alvarez *et al.*, 2003).

Toutefois, il existe aussi des facteurs environnementaux extrinsèques de contrôle de la pollution tels que le climat, les précipitations, la température de l'air, les conditions hydrogéologiques (Paktunc, 1999).

VI.1. 1. 1. Mise en évidence de l'impact

Pour mettre en évidence cet impact, nous avons prélevé des échantillons d'eau et de sol dans la zone de dépôts des terrils (fig.95). Nous avons adopté la démarche suivante :

- ✓ 04 points (eau de surface) se rapportant aux deux oueds; Djebissa et oued el Kebir. Le premier point est situé en contre bas de l'Oued Djebissa par contre le dernier point est situé après le dépôt de terrils, ce qui nous permet de déterminer l'impact de la mine sur la qualité des eaux. Ce choix est réalisé en symbiose avec les écoulements d'eau, ces derniers se font d'Est en Ouest.
- ✓ 04 points pour l'analyse de sol, ces points sont prélevés à différentes profondeurs (0,5m), (1m) et (1,5m).

Les analyses effectuées, ont porté sur quelques éléments traces tel que le Fer, le manganèse, le cuivre, le zinc, le plomb et le strontium.

Les analyses ont été faites au département de géologie d'Annaba, aux universités de Lille, de Besançon et d'Avignon (France).

Notons que les analyses réalisées se rapportent à différentes périodes. Le tableau suivant récapitule les périodes d'analyses et les paramètres dosés.

Compagne	Période	ETM analysés	Nombre d'échantillons Eau	Nombre d'échantillons Sol
1	Mars 2008	Fe, Mn, Cu, Pb, Zn.	10	15
2	Aout 2008	Fe, Mn, Cu, Pb, Zn.	10	15
3	Novembre 2008	Fe, Mn, Cu, Pb, Zn.	10	15
4	Janvier 2009	Fe, Mn, Cu, Pb, Zn.	10	15
5	Mai 2009	Fe, Mn, Cu, Pb, Zn.	10	15
6	Aout 2009	Fe, Mn, Cu, Pb, Zn.	10	15
7	Septembre 2009	Fe, Mn, Cu, Pb, Zn.	10	15
8	Novembre 2009	Fe, Mn, Cu, Pb, Zn.	10	15
			80	120
Tableau.34. Compagnes d'échantillonnage dans la zone d'étude				

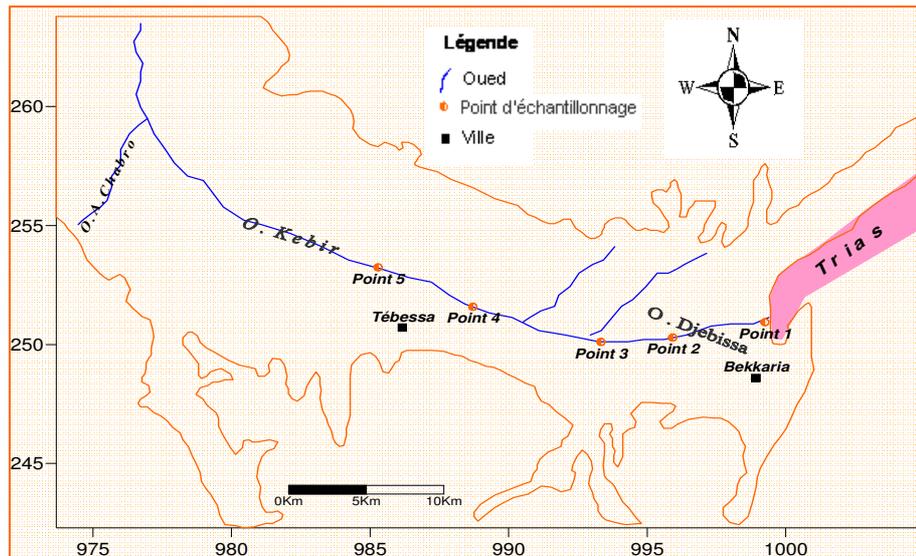


Fig. 95. Répartition des points de prélèvement des eaux de surface et du sol

V.7. 2. Le sol et les eaux de surface

Nous nous sommes intéressés aux variations des métaux lourds, successivement au niveau du sol et de l'eau. Les analyses de sol, se rapportent successivement à la période pluvieuse et à la période sèche.

VI.1. 2. 1. Variation du chimisme au niveau du point 1

Ce point est situé au pied des formations gypsifères. Ce qui implique une arrivée des eaux issues de Djebel Djebissa. Ce point est assez éloigné de la zone de dépôt du minéral.

Eau :

Le graphe réalisé montre que les eaux analysées sont riches en fer et en manganèse. Les concentrations déterminées sont supérieures aux normes admises.

Cette évolution est identique pour toutes les périodes d'analyses (08). Par contre le zinc et le plomb présentent des concentrations n'excédant pas 0.6 mg/l. Notons que les concentrations en cuivre sont très faibles de l'ordre de 0.1 mg/l, (fig.96).

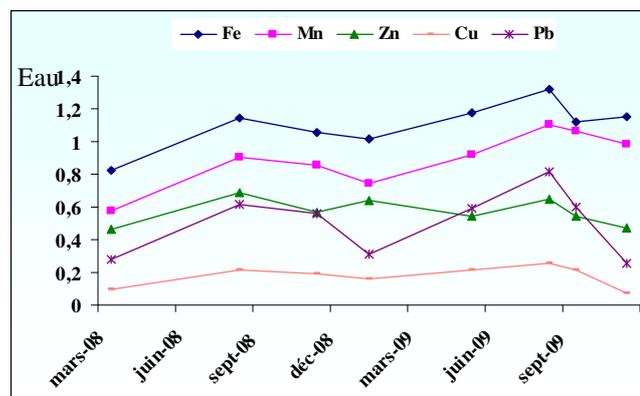


Fig.96. Évolution des métaux lourds au point 1 (Eau)

Sol :

Nous avons réalisé des analyses en période de hautes eaux et d'autre en période de basses eaux, ce qui nous permet de faire des comparaisons.

Période pluvieuse :

Nous remarquons que les concentrations sont faibles dans leur globalité. Les plus importantes se situent dans le premier niveau (0.50cm) au-delà, on note une baisse particulièrement pour le fer, le manganèse et le plomb. Nous remarquons que le zinc et le cuivre restent stables. Ceci nous permet de dire que les trois éléments restent piégés au niveau des premiers centimètres (fig.96 A).

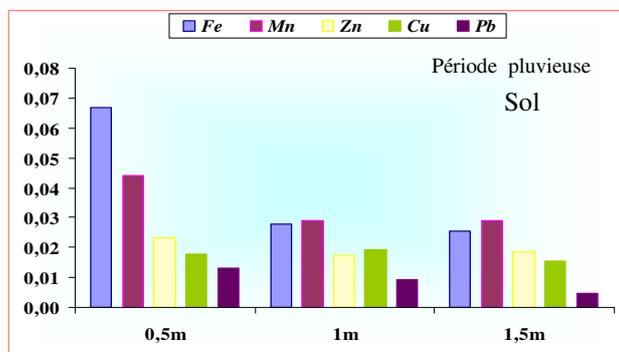


Fig.96 A. Évolution des métaux lourds au point 1 (Sol)

Période sèche :

Au cours de cette période, les concentrations sont importantes, souvent supérieures aux normes. Elles sont trois fois plus importantes pour le fer, on passe de 0.08 à 0.24 mg/l.

L'évolution reste analogue à la première, c'est-à-dire les plus fortes concentrations se situent au premier niveau (0.50cm). Cet accroissement en période sèche montre que les plus fortes concentrations en fer, en manganèse et en zinc, sont contenues dans les premières profondeurs (0.25 m).

En période de hautes eaux les concentrations en fer et en manganèse, sont faibles. Cette variation saisonnière montre un piégeage des métaux. En période de hautes eaux il y est remobilisation des métaux dans l'eau, ce qui explique les faibles concentrations observées (fig.96 B).

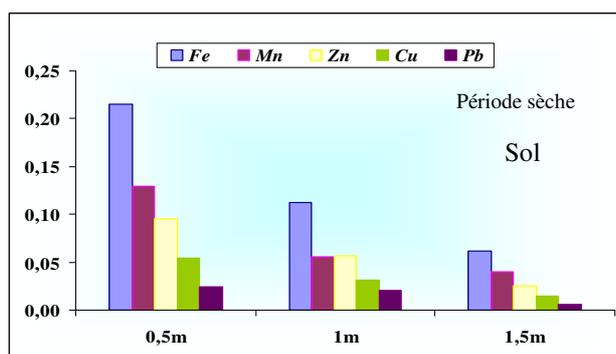


Fig. 96 B. Évolution des métaux lourds au point 1 (Sol)

VI.1. 2. 2. Variations du chimisme au niveau du point 2

Ce point est situé aux alentours du Djebel Djebissa à quelques centaines de mètres dans le prolongement du premier (fig. 95).

Eau :

On remarque que les concentrations en fer et en manganèse oscillent entre 0.6 et 1.2 mg/l. Les plus fortes concentrations se rapportent au mois de septembre 2006 et 2009.

D'une manière générale il y a une baisse des concentrations. Cette dernière est probablement due à l'éloignement de la source de pollution. Les précipitations tombées au cours du mois de septembre peuvent remobiliser les métaux (fig.97).

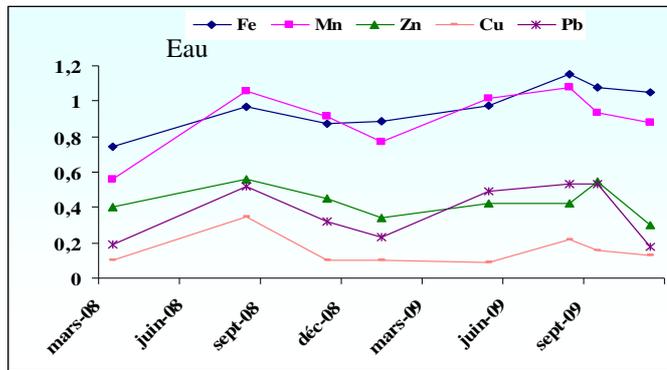


Fig.97. Évolution des métaux lourds au point 2 (Eau)

Sol :

Période pluvieuse :

On retrouve une situation presque analogue à celle observé au niveau du point 1, c'est à dire que les concentrations sont importantes au niveau des premiers centimètres, ensuite on assiste à une baisse de l'ordre de 50% pour le fer et le manganèse. Le reste des éléments (zinc, cuivre et plomb), montrent une baisse significative à partir d'un (01) mètre de profondeur (fig.97 A).

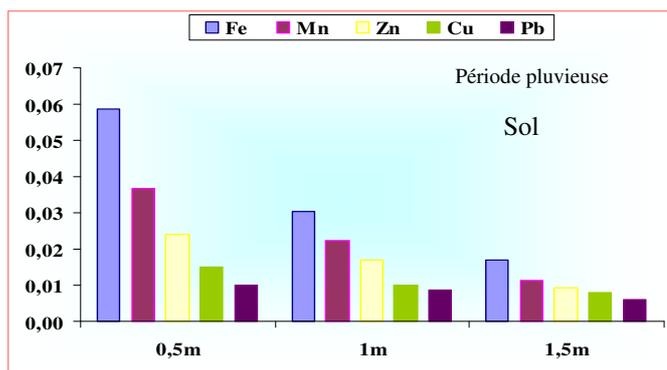


Fig. 97 A. Évolution des métaux lourds au point 2 (Sol)

Période sèche :

Les concentrations déterminées sont plus importantes. Le fer et le manganèse sont très présent dans le premier niveau (0.5cm), par contre le cuivre le zinc et le plomb ont des concentrations presque identique à celles déterminées au cours de la période pluvieuse. Ceci indique que ces éléments ont été entraînés par les écoulements qui se produisent au cours des précipitations (fig.97B).

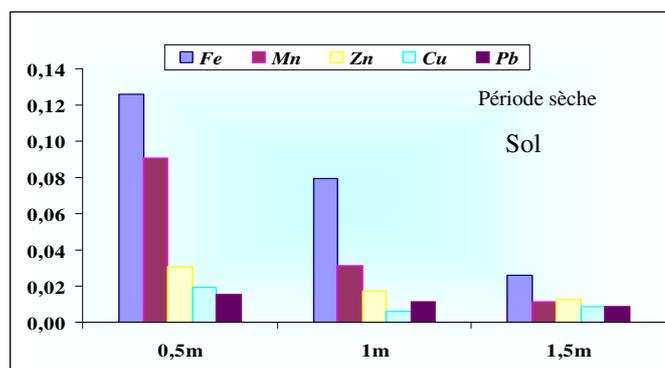


Fig. 97 B. Évolution des métaux lourds au point 2 (Sol)

VI.1. 2. 3. Variations du chimisme au niveau du point 3

Ce point est situé dans le prolongement du précédent et à proximité des terrils de la mine. (fig.98).

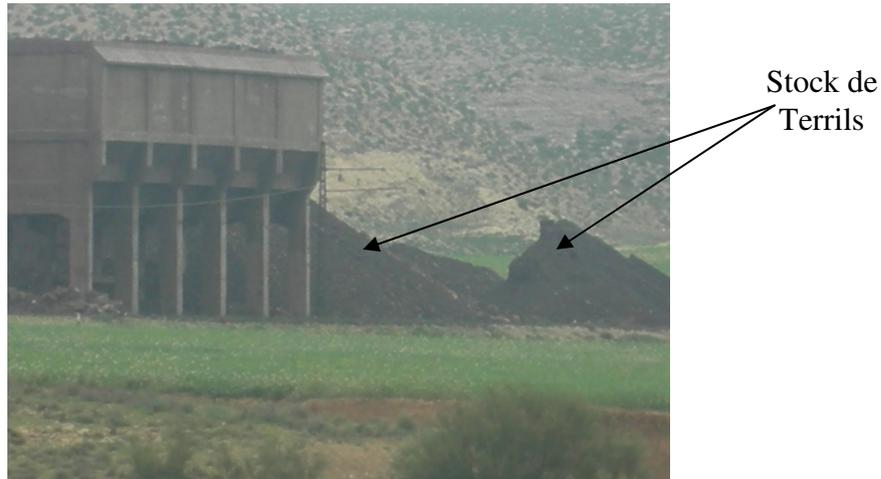


Fig. 98. Stock de terrils de la mine de fer

Eau :

L'observation du graphe, montre que le fer et le manganèse restent importants, leurs concentrations restent stables atteignant 1.4mg/l, par contre les autres éléments (zinc, cuivre et plomb), montrent des concentrations oscillant entre 0 et 0.4mg/l. Dans cette zone de pente les écoulements favoriseraient le déplacement des polluants. (fig.99).

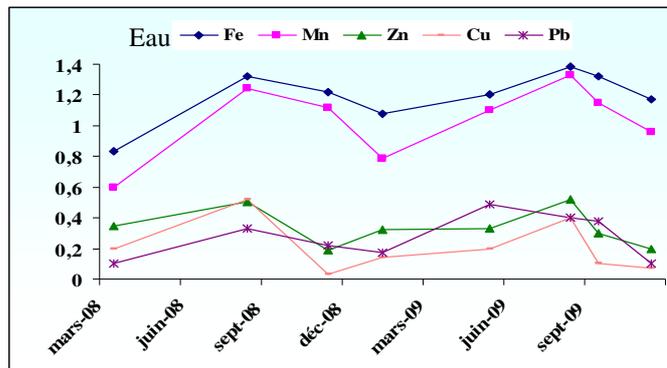


Fig.99. Évolution des métaux lourds au point 3 (Eau)

Sol :

Période pluvieuse :

Au cours de cette période les concentrations déterminées sont maximales particulièrement au niveau (0.5 cm) (fig.99 A).

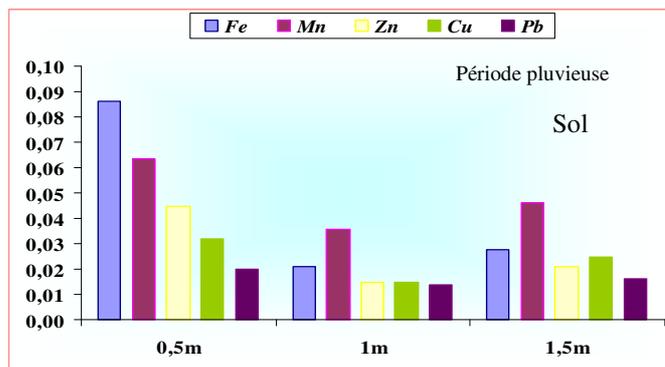


Fig. 99 A. Évolution des métaux lourds au point 3 (Sol)

Période sèche :

Les concentrations déterminées au cours de cette période sont importantes. Trois fois plus élevées que celles que celles caractérisant la période pluvieuse. Elles atteignent respectivement 0.3 mg/l pour le fer, 0.15 pour le manganèse. Pour le reste elle est de l'ordre de 0.07 contre 0.03 mg/l. Cette répartition est globalement due au fait qu'on ce point est situé en avant de la zone de pollution. Ceci met en évidence une contamination directe par les terrils (fig.99.B).

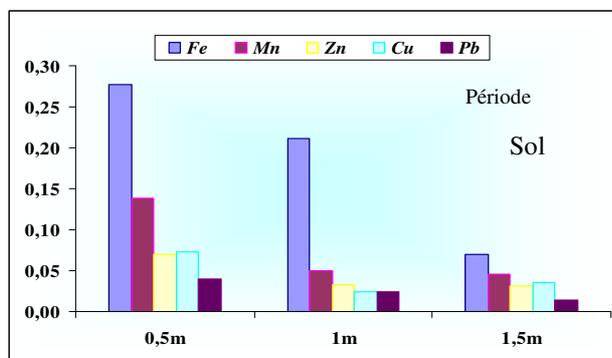


Fig. 99 B. Évolution des métaux lourds au point 3 (Sol)

VI.1. 2. 4. Variations du chimisme au niveau du point 4

Ce point est très éloigné de la zone de pollution, il est situé à l'entrée de la ville de Tébessa.

Eau :

On remarque une baisse très significative des concentrations en fer et en manganèse. Ces dernières qui avoisinaient 1.4mg/l, ne dépassent plus 0.8mg/l. Pour les autres éléments les concentrations varient entre 0.1 et 0.3mg/l, elles sont identiques à celles du point 2, (fig. 100).

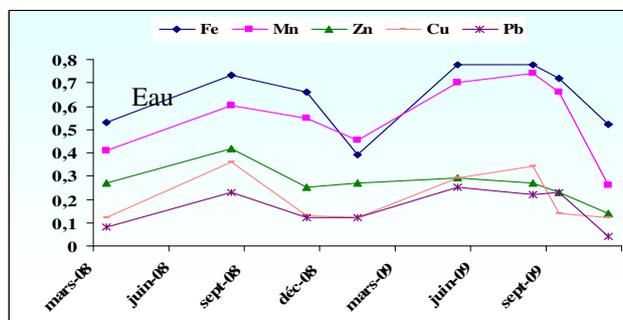


Fig.100. Évolution des métaux lourds au point 4 (Eau)

Sol :

Période pluvieuse

Les concentrations déterminées sont très faibles de l'ordre de 0.05 mg/l au maximum, ceci est valable uniquement pour le fer et à 50 centimètres de la surface du sol. Les autres éléments ont des teneurs qui n'excèdent pas 0.01 mg/l et ceci pour toutes les profondeurs, (fig. 100A)

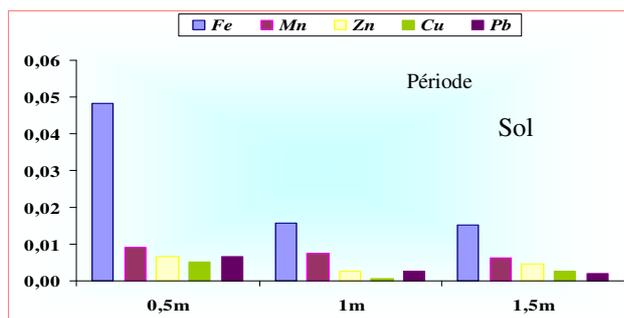


Fig.100 A. Évolution des métaux lourds au point 4 (Sol)

Période sèche

Au niveau de ce point les concentrations sont faibles, elles n'atteignent pas 0.05mg/l. Contrairement à la période pluvieuse les concentrations diminuent avec la profondeur ainsi à un (01) mètre de profondeur, les teneurs avoisinent 0.02 mg/l, cette diminution continue à 0.015 mg/l à 1.5 mètre de profondeur. Cette interprétation montre un piégeage des métaux au niveau des premières profondeurs, (fig. 100B)

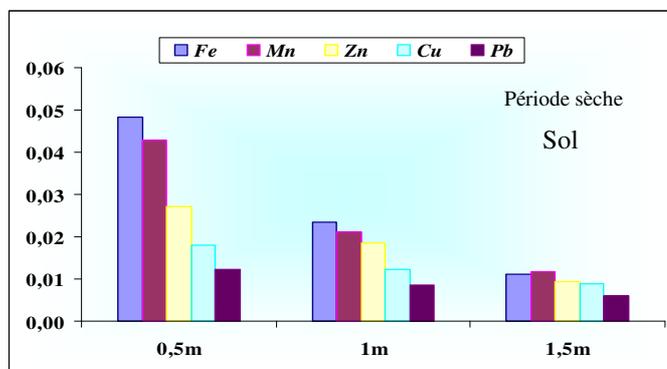


Fig. 100 B. Évolution des métaux lourds au point 4 (Sol)

Cette première interprétation a montré que le comportement des polluants n'était pas identique au niveau de l'eau et au niveau du sol. Elle a également montré que le ruissellement, généré par les précipitations était responsable des variations saisonnières observées.

VI.2. Approche statistique par l'analyse en composantes principales

L'analyse graphique a montré l'évolution des métaux lourds l'un indépendamment de l'autre. Par le biais de méthode statistique particulièrement l'ACP, nous allons déterminer les liens pouvant exister entre ces éléments.

VI.2. 1. Analyse en composante principale globale (eau)

L'analyse en composantes principales (ACP), a été réalisée sur un tableau de données de cinq (05) variables et une moyenne de 80 individus.

VI.2. 1.1. Matrice de corrélation

L'examen du tableau 35 relatif à la matrice de corrélation, montre une corrélation significative entre les éléments deux à deux. Le coefficient de corrélation atteint des valeurs proches de l'unité particulièrement dans le cas du fer avec le manganèse ($r=0.90$) et du manganèse avec le plomb ($r=0.89$).

	Fe ³⁺ (mg/l)	Mn ²⁺ (mg/l)	Pb (mg/l)	Zn ²⁺ (mg/l)	Cu ²⁺ (mg/l)
Fe ³⁺ mg/l	1,00				
Mn ²⁺ mg/l	0,90	1,00			
Pb mg/l	0,87	0,89	1,00		
Zn ²⁺ mg/l	0,67	0,69	0,72	1,00	
Cu ²⁺ mg/l	0,81	0,73	0,71	0,68	1,00

Tableau.35.Coefficient de corrélation entre les variables initiales

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.

Axes	Valeurs propres	Pourcentage de variance	Pourcentage cumulé
F1	3,79	76,21	76,21
F2	0,81	16,13	92,34
F3	0,41	5,16	97,5
F4	0,19	1,96	99,46
F5	0,09	0,54	100,00

Tableau.36. Valeurs propres et pourcentages des axes principaux.

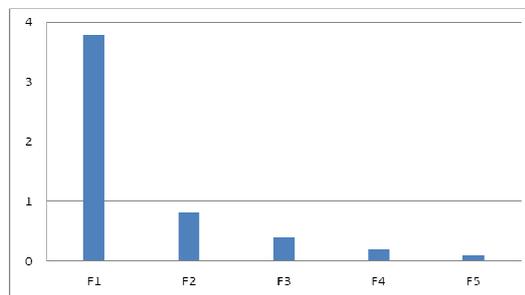


Fig.101. Histogramme des valeurs propres

Le premier axe principal à une valeur propre égale à 3,79 il explique 72,21 % de la variation totale, la seconde composante égale à 0,81 explique 16,13 % de la variance totale. (tab.36, fig.101) Les pourcentages de variation sont assez élevés pour les deux premiers axes avec un cumule de 92,34 %. Nous allons donc nous limiter à ces deux axes pour nos interprétations.

VI.2. 1.2. Analyse du cercle ACP (fig.102)

Le cercle formé par les axes F1F2 (92.34 % de l'information totale), montre selon l'axe F1, une opposition entre les eaux polluées et les eaux non polluées. Selon l'axe F2, on note que le cuivre se démarque des autres éléments et devient indicateur de pollution.

En effet la partie positive de F2, montre une pollution des eaux par le Manganèse, le Fer, le plomb et le zinc, tandis que la partie négative de l'axe caractérise les eaux polluées par le cuivre. Ceci semble indiquer que cet élément à une origine qui diffère de celle des autres éléments, donc ne provient pas de la mine ou bien sa mise en solution est longue.

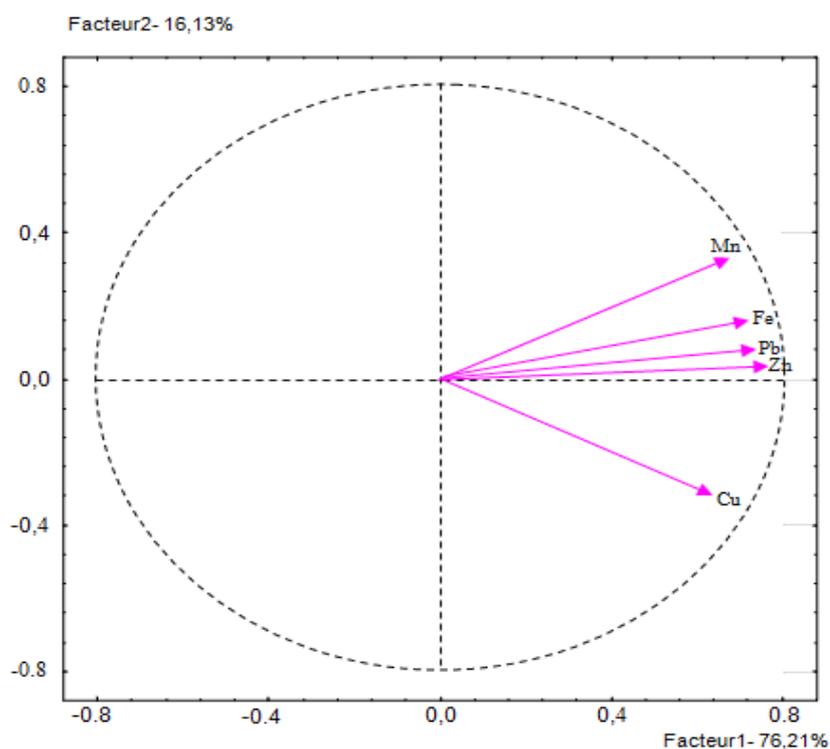


Fig. 102. Cercle de corrélation des variables dans le plan formé par l'axe 1 et l'axe 2.

VI.2.1. 3. Analyse de l'espace des individus (fig.103)

La projection des individus sur le plan F1-F2 a révélé une disposition en trois familles. Selon l'axe F1, on remarque une opposition entre les eaux polluées par les métaux lourds (partie positive de l'axe) et les eaux faiblement polluées par les ETM (partie négative de l'axe).

L'observation de l'axe F2 montre l'opposition entre les eaux polluées par Fe, Mn, Pb, et Zn, et les eaux montrant de fortes concentrations en Cu. Cette répartition laisse supposer que les ETM de la seconde famille et le Cu, n'ont pas la même origine.

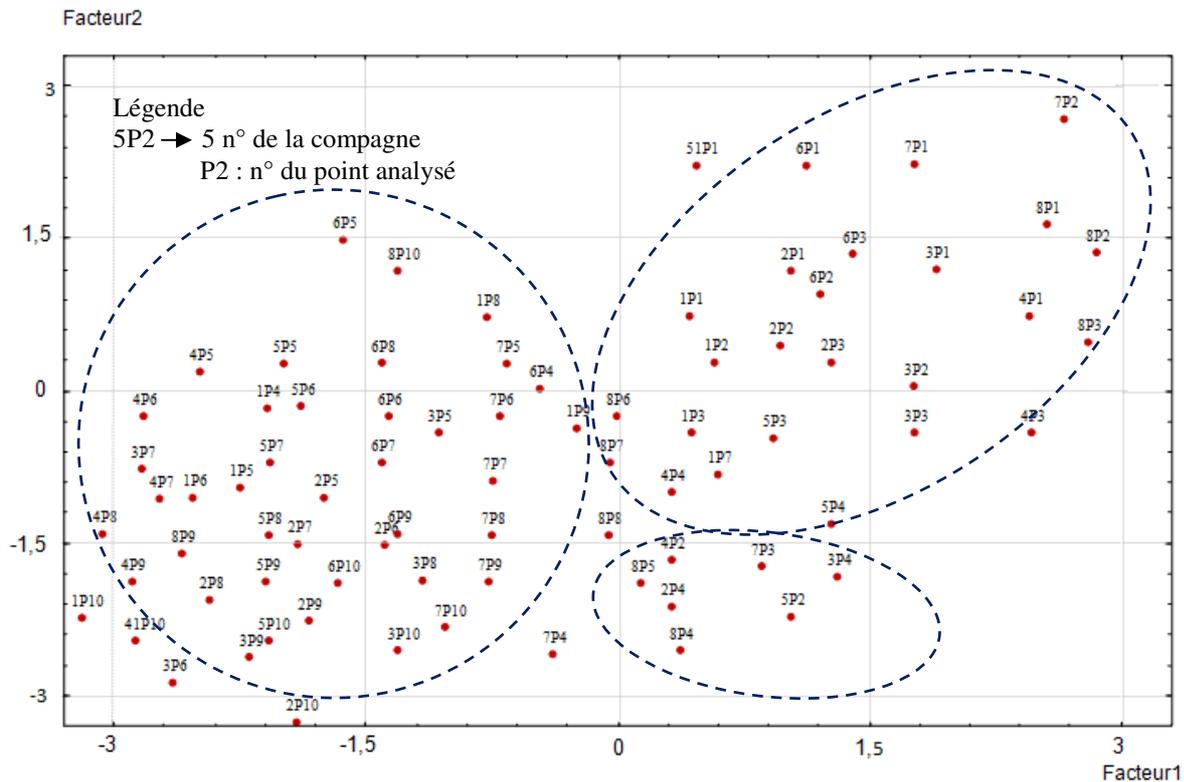


Fig. 103. Projection des individus sur le plan formé par les deux premiers axes

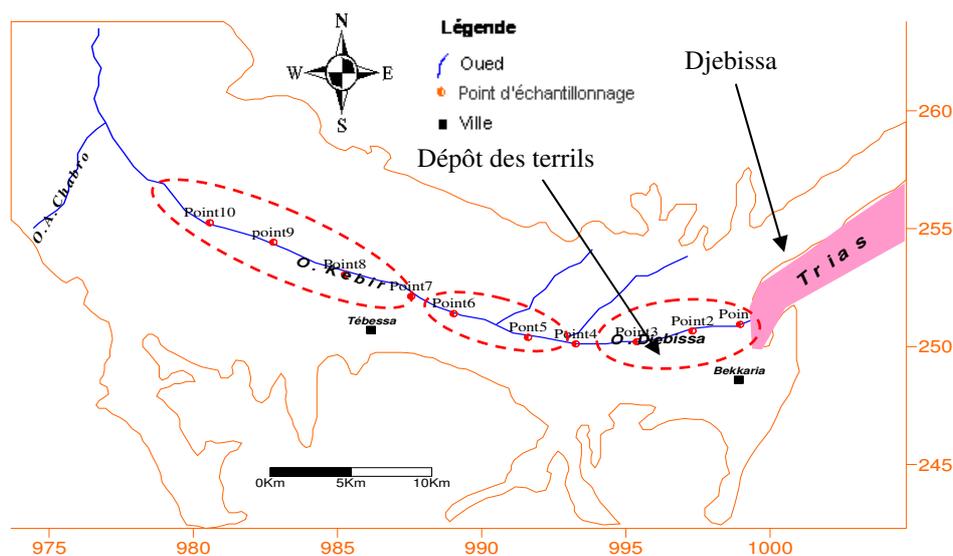


Fig. 103.A. Localisation des échantillons par rapport au stock des terrils

VI.2.2. Analyse en composante principale globale (Sol)

Dans cette étude nous avons utilisé les données d'analyse du sol pour cinq (05) variables et une moyenne de 120 individus.

VI.2.2.1. Matrice de corrélation

Nos remarquons que toutes les variables corrélient bien entre elles. (Tableau 37).

	Fe ³⁺ (mg/l)	Mn ²⁺ (mg/l)	Pb (mg/l)	Zn ²⁺ (mg/l)	Cu ²⁺ (mg/l)
Fe ³⁺ mg/l	1,00				
Mn ²⁺ mg/l	0,92	1,00			
Pb mg/l	0,87	0,85	1,00		
Zn ²⁺ mg/l	0,72	0,83	0,89	1,00	
Cu ²⁺ mg/l	0,85	0,86	0,81	0,87	1,00

Tableau.37.Coefficient de corrélation entre les variables initiales

b – Valeurs propres :

Le tableau 38, donne les valeurs propres et le pourcentage de variance. Les deux premiers facteurs fournissent une inertie expliquée de 95,25 % qui semble assez élevée, ce qui nous pousse à nous limiter à ces deux axes pour nos interprétations.

Axes	Valeurs propres	Pourcentage de variance	Pourcentage cumulé
F1	4,5152	90,30	90,30
F2	0,2474	4,95	95,25
F3	0,1315	2,63	97,88
F4	0,0850	1,70	99,58
F5	0,0210	0,42	100,00

Tableau.38. Valeurs propres et pourcentages des axes principaux.

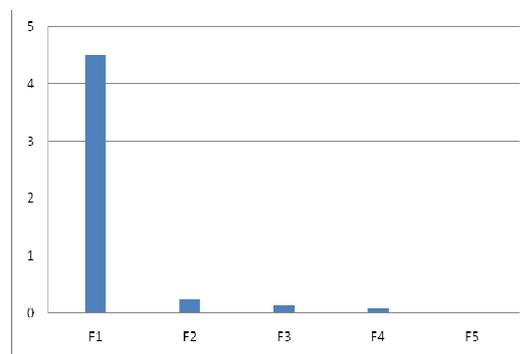


Fig.104. Histogramme des valeurs propres

VI.2.2.2. Analyse du cercle ACP (fig.105)

Le cercle formé par les axes F1F2 (95.25 % de l'information), montre que l'axe F1 (90.30%), est définie par la présence des ETM dans sa partie positive, par contre la partie négative, indique un sol pauvre en ETM.

Selon l'axe F2 (4.95 %), nous remarquons que la partie positive caractérise les ETM (Pb, Fe et Mn). Nous notons que Zn et Cu, sont proches de zéro et n'influence pas beaucoup le sol. Ces deux éléments peuvent avoir une origine différente.

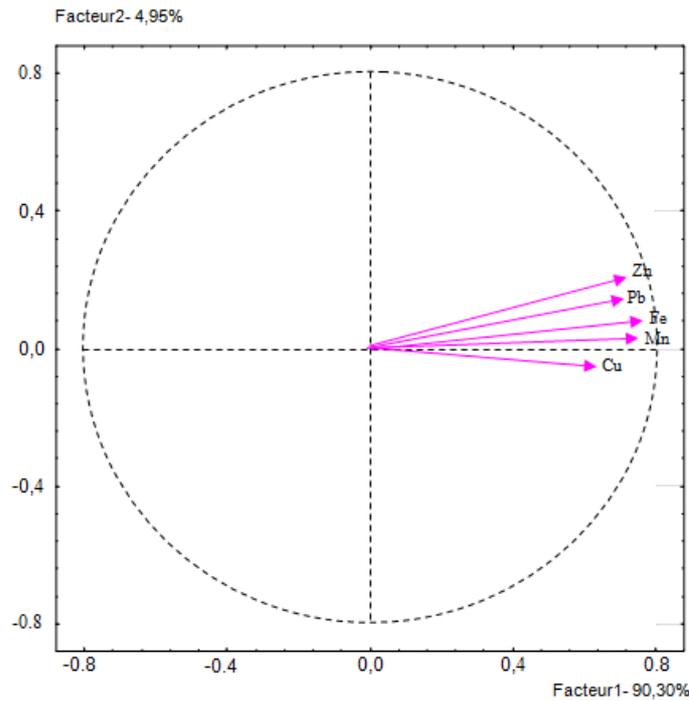


Fig. 105. Cercle de corrélation des variables dans le plan formé par l'axe 1 et l'axe 2.

VI.2. 2.3. Analyse de l'espace des individus (fig.106)

Dans l'espace des unités statistiques (Figure 106), ces deux axes F1-F2 définissent un nuage de points montrant ainsi trois différentes familles. A partir de ce nuage de points se dessinent deux évolutions.

- ✓ La première évolution tend vers la partie positive des deux axes, où on remarque une opposition entre les échantillons pollués par les métaux lourds, prélevés des premières couches du sol, avec les quelques échantillons caractérisés par dominance de l'élément cuivre.

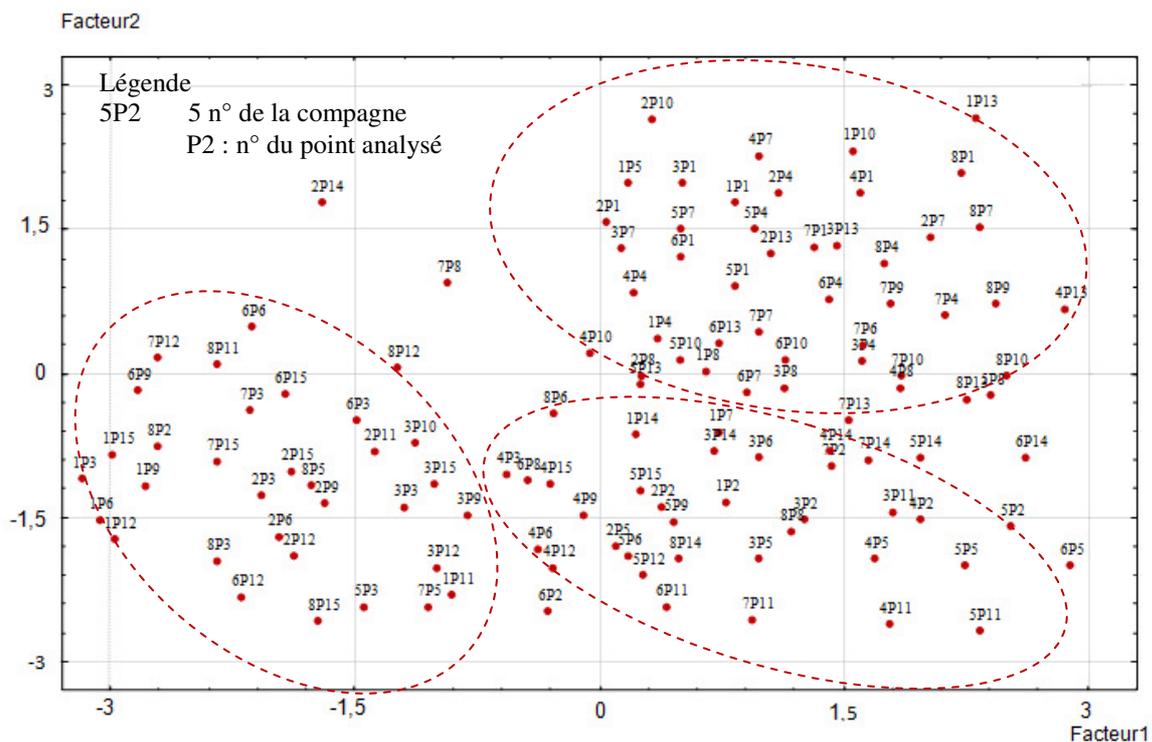


Fig. 106. Projection des individus sur le plan formé par les deux premiers axes

- ✓ La deuxième évolution tend vers la partie négative de l'axe F2, montrant ainsi une opposition entre les échantillons du sol faiblement pollués, prélevés des profondeurs de 1m et 1,5m avec les échantillons proches de la surface du sol fortement minéralisés par les métaux lourds.

Cette étude statistique montre l'impact de la mine sur la qualité des eaux. Elle montre également que les métaux lourds n'ont pas le même comportement dans l'eau. Nous allons donner un aperçu sur la spéciation de ces éléments.

VI.2.3. Paramètres Favorisant la pénétration des ETM

VI.2.3.1. Une constitution propice du sol

La reconstitution réalisée à partir des données de sondage et des données géophysique a montré que le sol était constitué de graviers et de galets, indiquant ainsi une bonne perméabilité.

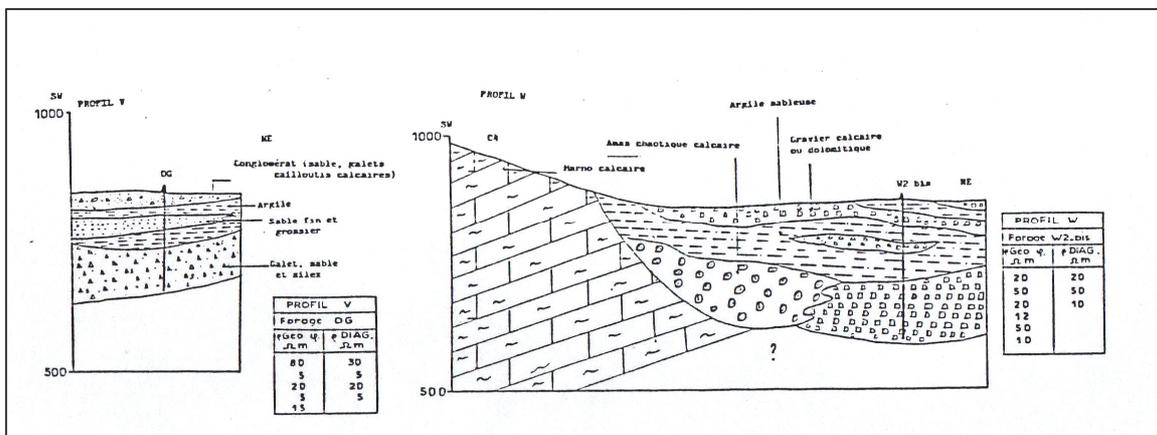


Fig.107. Coupe montrant la succession des formations dans la zone d'étude

L'observation de la figure 107, montre une succession de formations à perméabilité variable, cependant les couches proches de la surface du sol, sont en général constituées de cailloutis ou de sable argileux, ce qui permet au polluant de pénétrer dans le sol.

La carte de la nature des sols réalisée au droit de la zone de dépôt (fig.108), indique également une succession de formations à perméabilité contrastée, ce qui laisse supposer l'existence de zone préférentielle d'infiltration.

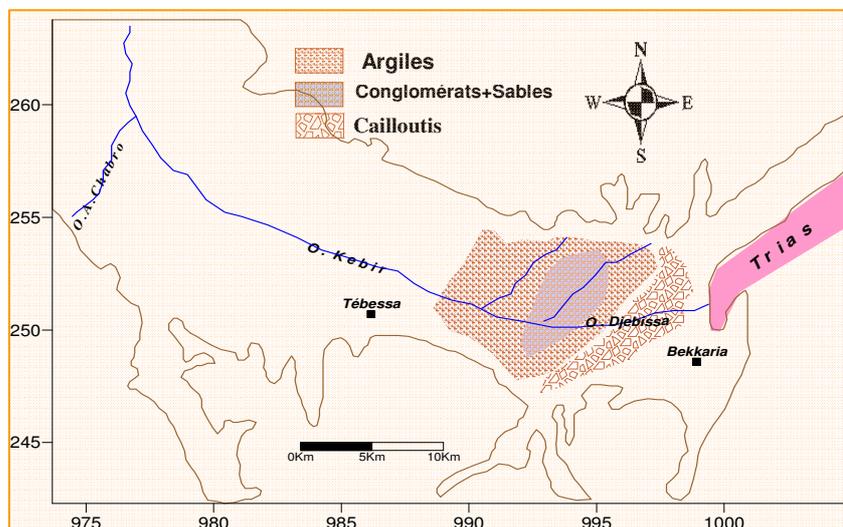


Fig.108. Carte de répartition de la lithologie du niveau P1 Région de Dj. Djebissa

Nos moyens ne nous ont pas permis d'aller plus en profondeur, ce qui a limité notre recherche car on n'a pas déterminé la profondeur des zones polluées.

VI.2. 4. Spéciation, localisation et mobilité des principaux micro-polluants métalliques

Fer : Dans des conditions aérobies, Fe^{2+} est libéré et il s'oxyde en Fe^{3+} et précipite sous forme d'oxydes insolubles. Dans le sol, le fer présente une grande affinité pour les complexes organiques mobiles et les chélates. Ces composés interviennent dans la migration du fer dans les horizons du sol. Le fer est assez mobile dans les sols acides et ennoyés régulièrement (sous forme réduite Fe^{2+}).

Manganèse : La plus grande partie du manganèse du sol se trouve sous forme d'oxydes en équilibre avec les ions Mn^{2+} adsorbés sur le complexe argilo-humique ou présents, à des concentrations de 10^{-6} à 10^{-4} M dans la solution du sol. La mobilité du manganèse est très dépendante du pH mais aussi des conditions redox du milieu :

- ✓ Á pH inférieur à 6,5 : les formes les moins oxydées dominent, ce sont elles qui libèrent le plus facilement Mn^{2+} , forme sous laquelle s'effectue préférentiellement le transfert de manganèse.
- ✓ Au delà de pH 7 : la prédominance des oxydes tri et tétravalents, extrêmement peu solubles limite considérablement la mobilité de cet ETM.

Contrairement à beaucoup d'autres ETM, l'aptitude du manganèse à la complexation par des substances organiques est peu marquée, de sorte que l'essentiel des transferts s'effectue sous forme d'ions Mn^{2+} libres.

Plomb : L'argile et surtout la matière organique représentent les phases d'adsorption dominantes du plomb.

Á pH acide ou neutre, les ions Pb^{2+} et $Pb(OH)^+$ prédominent dans la solution du sol ; quand le pH augmente, ces formes sont remplacées par $Pb(OH)_2$, $Pb(OH)^{3-}$ et $Pb(OH)_4^{2-}$. La concentration du plomb dans la solution du sol est extrêmement faible, comprise entre 10^{-8} et 10^{-9} M. Le plomb est l'un des ETM les moins mobiles du sol. Ainsi, entre pH 5 et 9, et à concentration molaire identique, le plomb est 100 fois moins mobile que le cadmium.

Zinc : La forme la plus courante et la plus mobile du zinc dans les sols est Zn^{2+} qui est facilement adsorbé sur les composants minéraux (argiles, hydroxydes de fer et d'aluminium) et organiques, ce qui conduit à une accumulation dans les horizons superficiels. Le zinc est considéré comme facilement soluble par rapport aux autres ETM dans les sols, il est très mobile et disponible dans les sols légers et acides.

Cuivre : Dans le sol, le cuivre est bien réparti et se fixe préférentiellement sur la matière organique (25 à 50 %), les oxydes de fer, de manganèse et les argiles. La répartition cuivre entre ces différentes fractions est fonction du pH, de la quantité et de la composition de la matière organique d'une part, et des colloïdes minéraux d'autre part. Le cuivre migre peu, sauf dans des conditions de mauvais drainage ou en milieu très acide.

VI.2. 5. Conclusion :

L'étude de l'impact de la mine sur la qualité des eaux et du sol permet de dire que :

- ✓ Les eaux de surface montrent des fortes concentrations en métaux lourds au premier point de prélèvement situé à proximité de la mine, ceci confirme le lessivage de ces métaux en période des hautes eaux et le phénomène d'évaporation en période des basses eaux.
- ✓ Pour le sol, les fortes teneurs se limitent dans les premières profondeurs à cause du phénomène du piégeage.
- ✓ Le deuxième point de prélèvement, montre une baisse de concentration par rapport au précédent dans l'eau et le sol.
- ✓ Une augmentation des teneurs réapparaît au point trois à cause des dépôts de terrils.
- ✓ Le point quatre situé à l'entrée de la ville de Tébessa montre des faibles concentrations à cause de l'éloignement de la mine. Ceci confirme le fait que ces teneurs en métaux lourds diminuent d'un point à l'autre d'Est en Ouest, dans le sens de l'écoulement, et cela en s'éloignant de la mine.
- ✓ Pour les eaux souterraines on remarque que les cinq points prélevés, montrent des faibles teneurs en métaux lourds, confirmant ainsi le piégeage de ces métaux dans les premières couches du sol. La conductivité électrique par contre reste élevée dans les eaux des puits confirmant le lessivage des formations évaporitiques. Le rapport Sr/Ca dépassent toujours les 3‰ dans tous les points étudiés.

CHAPITRE VII

MODÈLE

VII. Réseaux de neurones artificiels

VII.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.

VII.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. 109).

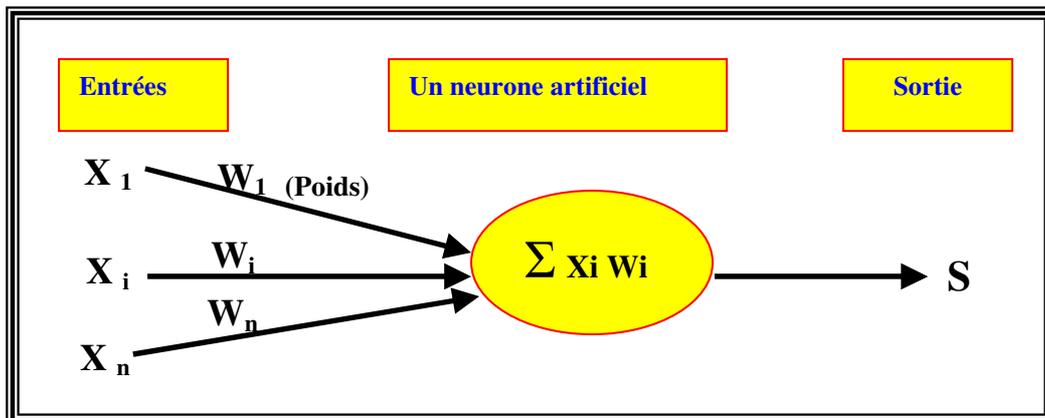


Fig.109. Schéma d'un neurone artificiel

Le fonctionnement d'un neurone artificiel s'inspire du fonctionnement schématisé du neurone humain (Fig. 110).

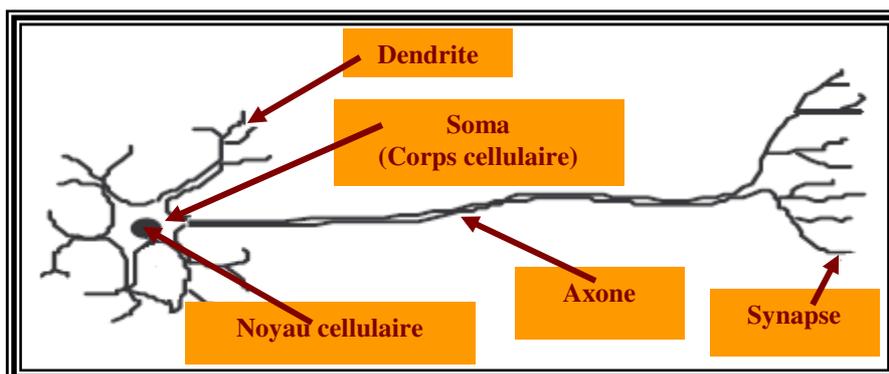


Fig. 110. Schéma d'un neurone biologique

Le tableau suivant résume l'analogie entre les neurones biologiques et artificiels (Tab 39).

Neurone biologique	Neurone artificiel
Soma	Neurone
Dendrite	Entrée (Input)
Axone	Sortie (Output)
Synapse	Poids
Tab.39. 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.

À 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.

Un PMC peut contenir autant de couches cachées que l'on désire mais il a été montré que quel qu'en soit le nombre, il existe un MLP équivalent avec une seule couche cachée. Ainsi, on se limitera dans cette étude à l'utilisation de MLP comportant une seule couche cachée.

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 :

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

S_j : somme des poids entre les entrées du $j^{\text{ème}}$ neurone de la couche cachée

X_i : valeur de sortie du $i^{\text{ème}}$ 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 :

$$f(S_j) = \frac{1}{1 + e^{-S_j}}, f(S_j) \text{ est pratiquement linéaire entre 0 et 1.}$$

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

$$\bar{X} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}},$$

Avec :

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

VII. 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.

VII. 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.

Le réseau de neurones utilisé dans notre étude est un réseau à trois couches : une couche d'entrée qui recevra les données source que l'on veut utiliser pour l'analyse, une seule couche cachée constituée par l'ensemble de neurones des sorties de la couche d'entrée et une couche de sortie qui donne le résultat obtenu après compilation par le réseau des données entrant dans la première couche.

La fonction de transfert appliquée est de type sigmoïde. Le réseau de neurones utilisé est l'algorithme de rétropropagation de l'erreur qui correspond au Perceptron multicouche (Rumelhart et *al.*, 1986).

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

L'application de ce modèle a été effectuée sur les paramètres de la qualité des eaux souterraines analysés sur deux années (2008-2009 /2009-2010) au laboratoire du centre des études et de recherches appliquées au développement de Ferphos, 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 créer le modèle du RNA en utilisant le logiciel STATISTICA neural network version 4.0.

La base de données a été divisée en trois phases : La phase d'apprentissage, la phase de test et la phase de validation. L'apprentissage est la propriété la plus intéressante du modèle des réseaux de neurones.

Pour apprendre, le réseau doit connaître la réponse qu'il aurait dû donner ; c'est la phase du développement d'un réseau de neurones durant laquelle le comportement du réseau est modifié jusqu'à l'obtention du comportement désiré.

L'intérêt du test est d'arrêter l'apprentissage (la minimisation) au bon moment. Une fois le réseau calculé, il faut procéder à des tests pour vérifier que le réseau réagit bien comme on le souhaite ; c'est la validation.

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

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \hat{X}_i)^2}{N}} \quad R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \hat{X}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

Où X_i est la valeur mesurée de l'élément, \hat{X}_i est la valeur calculée de l'élément par le modèle, \bar{X} est la moyenne de l'élément mesurée et N le nombre de données de l'ensemble de calage.

R^2 montre la variation de la valeur de l'élément calculé ou estimé 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.

VII. 4. Création du modèle

Dans ce travail, un réseau de Perceptron multicouche a été choisi comme modèle du système.

À l'entrée du réseau nous avons utilisé les paramètres suivants: La concentration en ion de : calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}), sodium (Na^+), potassium (K^+), chlorure (Cl^-), sulfate (SO_4^{2-}), bicarbonate (HCO_3^-), fer (Fe), zinc (Zn), cuivre (Cu), plomb (Pb), et du rapport strontium sur calcium (Sr^{2+}/Ca^{2+}) ainsi que des paramètres physiques à savoir:

Potentiel hydrogène (pH), température (T), Salinité (Sal), conductivité (CE) et potentiel redox (Eh).

En conséquence, la sortie du réseau sera divisée en trois parties ; la première c'est la conductivité électrique (CE), la seconde sont les sulfates et la troisième c'est le fer (Fe).

La structure du modèle RNA peut être représentée par la forme suivante :

$$\{CE\} = ANN [Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, K^+, Cl^-, SO_4^{2-}, HCO_3^-, Fe, Mn, Zn, Cu, Pb, Sr^{2+}/Ca^{2+}, pH, T, Salin].....(1).$$

$$\{SO_4^{2-}\} = ANN [Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, K^+, Cl^-, HCO_3^-, Fe, Mn, Zn, Cu, Pb, Sr^{2+}/Ca^{2+}, pH, T, Salin, CE].....(2).$$

$$\{Fe\} = ANN [Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, K^+, Cl^-, SO_4^{2-}, HCO_3^-, Mn, Zn, Cu, Pb, Sr^{2+}/Ca^{2+}, pH, T, Salin, CE].....(3).$$

Un schéma de ce réseau est donné sur la figure 111. 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.

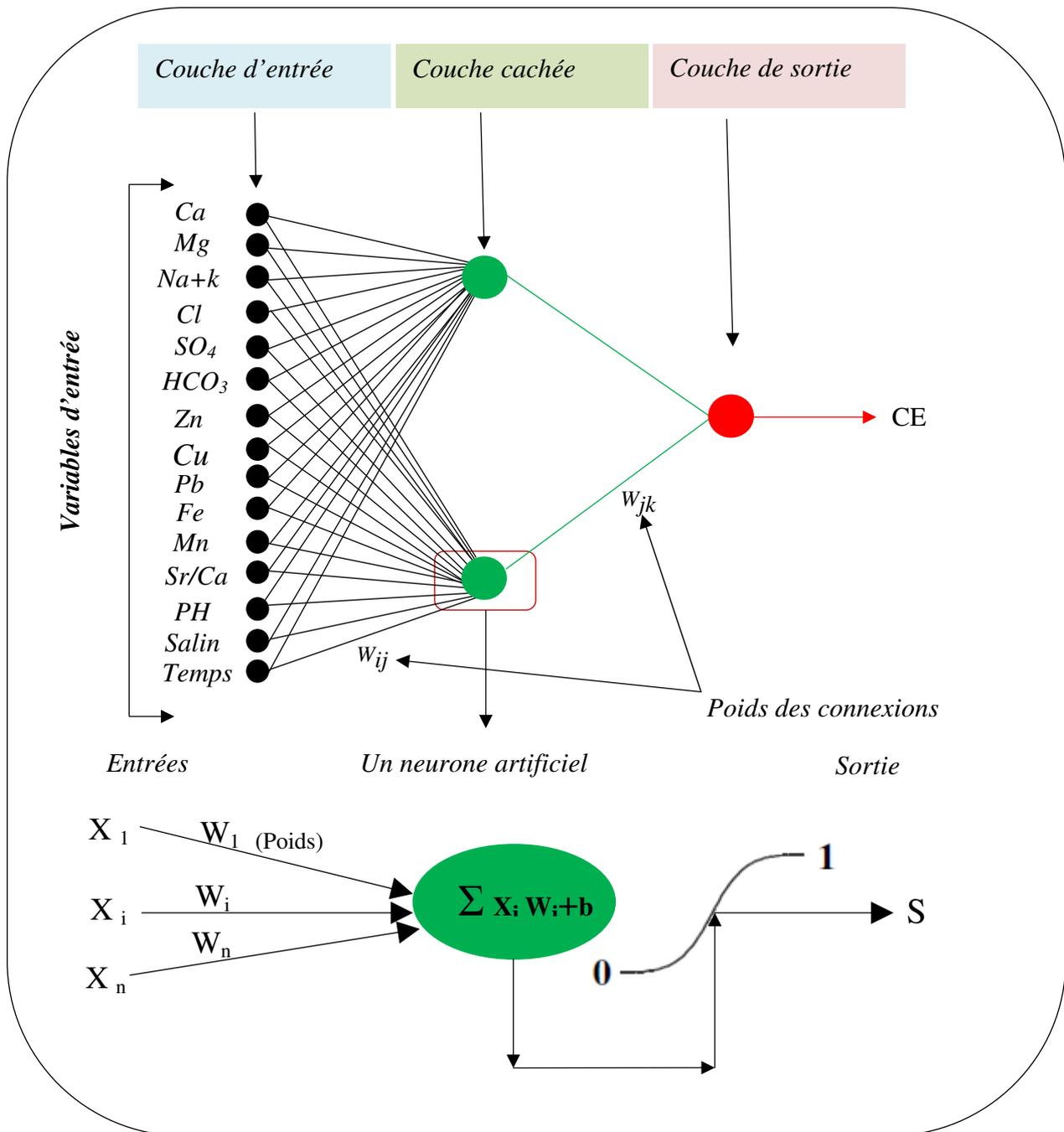


Fig. 111. Illustration du réseau à 3 couches (MLP)

Un poids numérique est associé à chacun de raccordements d'entre-nœud. Le poids de W_{ij} représente la force des raccordements des nœuds entre l'entrée et la couche cachée tandis que W_{jk} représente la force des raccordements des nœuds entre la couche cachée et de sortie.

Chaque nœud caché (j) reçoit des signaux de chaque nœud d'entrée (i) qui porte des valeurs standard (X_i) d'une variable d'entrée.

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

Le signal entrant net reçu par un nœud 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 nœud (TH_j).

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

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

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

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

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

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

Les signaux nets d'un nœud de sortie (Net_k) sont transformés en utilisant une fonction de type sigmoïde à un résultat standard ou de mesure (\overline{OK}) 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 112 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).

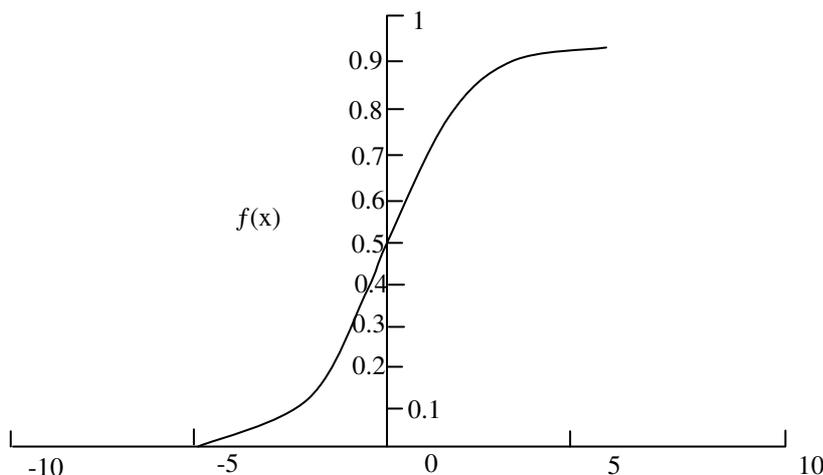


Fig. 112. Fonction de transfert sigmoïde

VII. 5. Calibrage et vérification du modèle:

La vérification a été employée pendant l'arrêt des critères de détermination du nombre optimal de nœuds de la couche caché (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, Breerton et Walsh, 997).

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 choisis pour la formation, 25% pour la vérification et les 25% restant pour examiner la validité de la prévision de réseau.

VII. 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).

VII. 5. 1. 1. Résultats et discussion :

1^{er} Cas :

{CE} = ANN [Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, Fe, Mn, Zn, Cu, Pb, Sr²⁺/Ca²⁺, pH, T, Salin.].....(1)

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 5 nœuds cachés (figure 113).

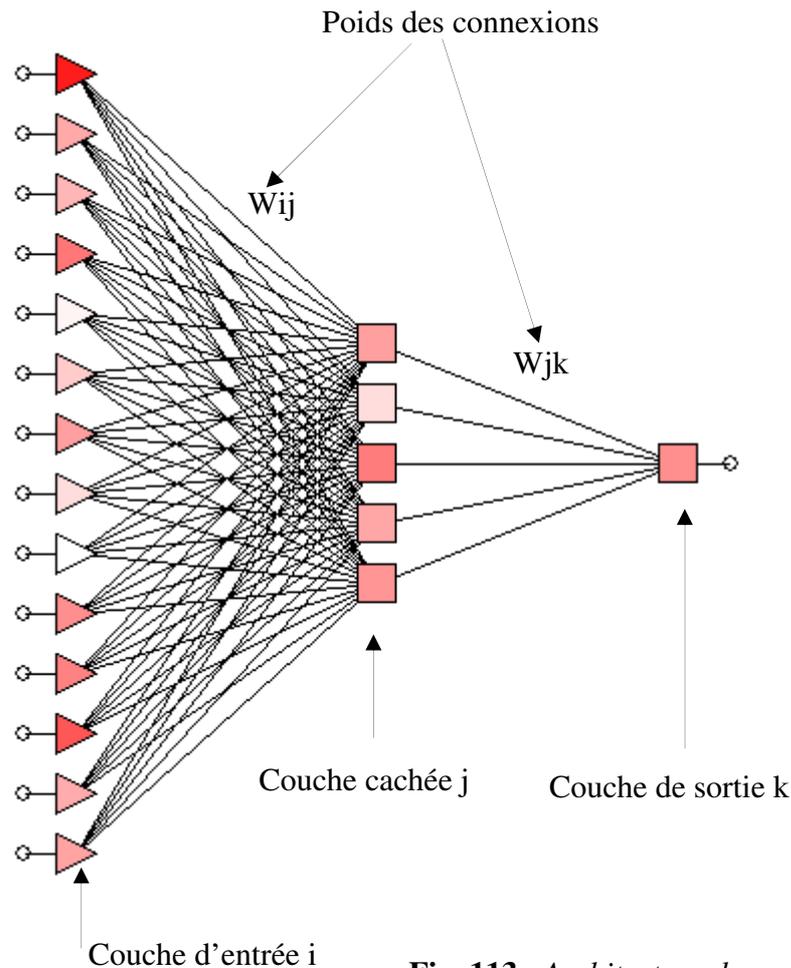


Fig. 113. Architecture du modèle RNA

L'erreur minimale est de 0.302391 comparé aux autres types de réseaux RNA (tableau 40).

Type de réseau	Erreur (RMS)
GRNN	3.725591
RBF	3.094382
Linear	2. 349289
MLP (4 couches)	1.206874
MLP (3 couches)	0.302391

Tab. 40. L'erreur RMS dans différents réseaux de neurone

Le modèle a une excellente performance dans la vérification avec un rapport de régression de 0.078831 et un coefficient de corrélation supérieur à 99% pour l'apprentissage, la vérification et la validation (tableau 41); il montre un excellent accord entre la conductivité observée et simulée (Fig. 114).

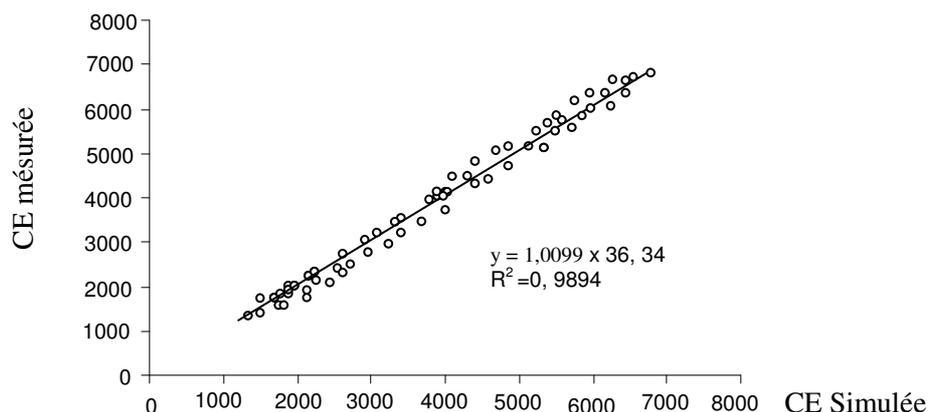


Fig. 114. Corrélation entre la conductivité simulée et mesurée

	Tr. CE	Ve.CE	Te.CE
Data Mean	3502.685	3616.926	3232.926
Data S.D	1180.274	1610.052	1227.369
Error Mean	-0.1893	47.95694	3.582452
Error S.D	55.5964	129.48	122.9898
Abs E. Mean	38.57048	85.59955	77.1316
S.D. Ratio	0.0471	0.0804198	0.1002061
Corrélation	0.99889	0.9972913	0.9958559

Tab. 41. Paramètres statistiques de régression

L'analyse de sensibilité du RNA des variables de qualité de l'eau en phases d'apprentissage et de vérification indique que 14 sur 15 éléments respectivement selon le degré de sensibilité à savoir :

La Salinité (Sal), les sulfates (SO_4^{2-}), les chlorure (Cl^-), sodium (Na^+)+ potassium (K^+), rapport strontium-calcium (Sr^{2+}/Ca^{2+}), calcium (Ca^{2+}), potentiel hydrogène (pH), fer (Fe), magnésium (Mg^{2+}), Manganèse (Mn), cuivre (Cu), plomb (Pb), température (T), et bicarbonate (HCO_3^-), sont les facteurs les plus importants influençant la conductivité électrique dans les eaux de surface et souterraines (Tableau 42).

	Sal	SO ₄	Cl	Na+K	Sr/Ca	Ca	pH	Fe	Mg	Mn	Cu	Pb	Temp	HCO ₃
Rank	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Ratio	19,28	5,54	3,74	3,38	3,05	2,91	2,75	2,36	2,35	2,30	2,22	1,67	1,65	1,62

Tab. 42. Classement des variables par analyse de sensibilité

2^{ème} cas :

{SO₄²⁻} = ANN [Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Cl⁻, HCO₃⁻, Fe, Mn, Zn, Cu, Pb, Sr²⁺/Ca²⁺, pH, T, Salin, CE].....(2).

L'examen de plusieurs réseaux de neurones a donné un meilleur modèle MLP (3 couches) avec 4 nœuds cachés (Fig. 115), et une erreur minimale de 0.114274 (Tableau 43).

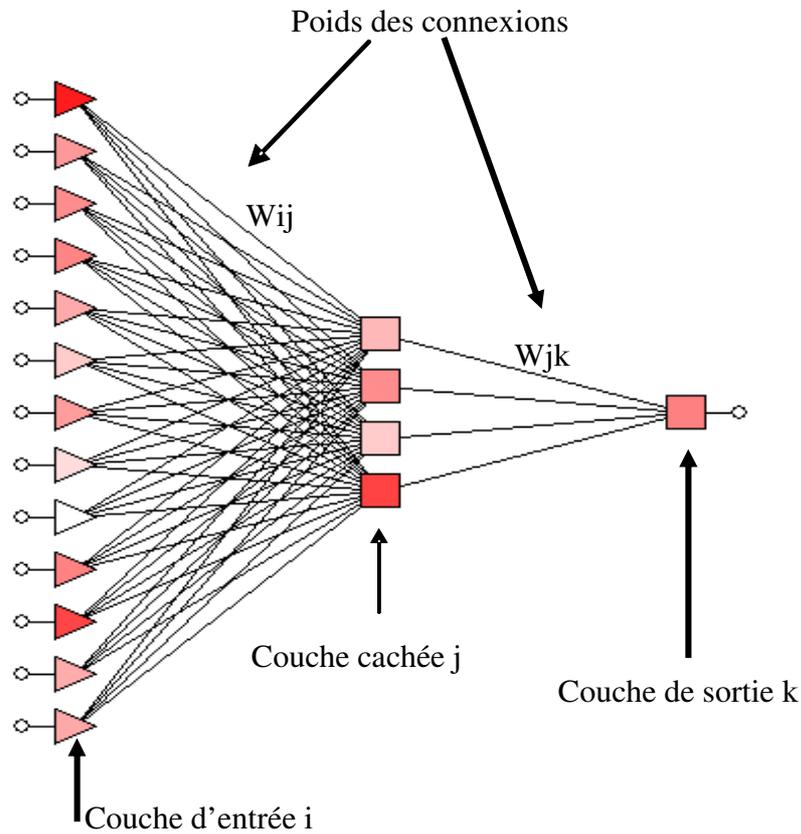


Fig. 115. Architecture du modèle RNA

Type de réseau	Erreur (RMS)
GRNN	1.62389
RBF	2.21358
Linear	2. 87125
MLP (3 couches)	0.114274

Tab. 43. L'erreur RMS dans différents réseaux de neurone

Dans ce cas le modèle présente un rapport de régression plus haut que 99% et un coefficient de corrélation de 0.136364 pour les trois phases d'apprentissage, de vérification et de validation avec une excellente performance (tableau 44).

La figure 116 montre l'accord entre les valeurs des sulfates observées et simulées.

	Tr. SO ₄	Ve. SO ₄	Te. SO ₄
Data Mean	574.4815	625.8148	595
Data S.D	174.2672	190.7913	247.7671
Error Mean	0.07781	-1.2592	-0.6686
Error S.D	8.010037	26.01707	24.11429
Abs E. Mean	5.722618	18.31058	16.66652
S.D. Ratio	0.04596	0.136364	0.09733
Corrélation	0.9989499	0.9930692	0.995763

Tab. 44. Paramètres statistiques de régression

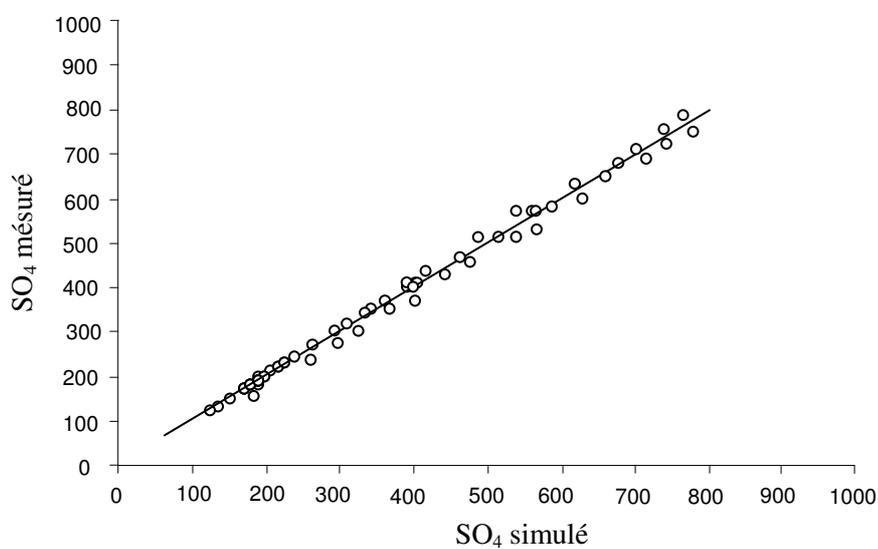


Fig. 116. Corrélation entre les sulfates simulés et

Après analyse de sensibilité du RNA des variables de qualité de l'eau en phases d'apprentissage et de vérification, on a pu déterminer les facteurs influençant les sulfates dans les eaux de surface et souterraines, (Tableau. 45).

	CE	Sal	Cl	Na+K	Sr/Ca	Ca	pH	Mg	Cu	Pb	Zn	Fe	Mn	HCO ₃
Rank	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Ratio	13,52	9,27	8,73	8,64	6,18	5,74	5,23	5,13	4,96	3,93	3,61	2,85	2,26	1,93

Tab. 45. Classement des variables par analyse de sensibilité

3^{ème} cas :

{Fe} = ANN [Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, Mn, Zn, Cu, Pb, Sr²⁺/Ca²⁺, pH, T, Salin, CE].....(3).

Après analyse et examen de plusieurs réseaux de neurones, le meilleur modèle trouvé est le MLP (4 couches) avec 4 nœuds cachés (Fig. 117). L'erreur minimale est de 0.08853 (Tableau. 46).

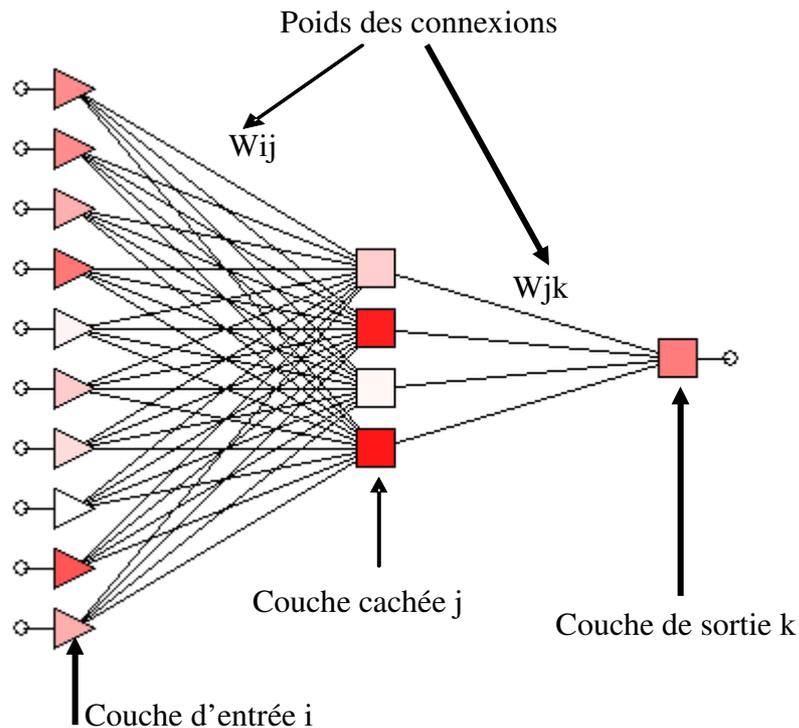


Fig. 117. Architecture du modèle

Type de réseau	Erreur (RMS)
GRNN	0.21018
RBF	0.70759
Linear	0.22067
MLP (3 couches)	0.08853
Tab. 46. L'erreur RMS dans différents réseaux de neurone	

Les phases d'apprentissage, de vérification et de validation présentent un coefficient de corrélation de 0.121672 et un rapport de régression supérieur à 99% avec une excellente performance de vérification. (Tableau 47).L'accord entre les valeurs simulés et observés du fer est bien visible sur la figure 118.

	Tr. Fe	Ve. Fe	Te. Fe
Data Mean	1.126296	1.124074	1.215556
Data S.D	0.6290973	0.7221989	0.6627004
Error Mean	-0.002343	0.02005	-0.009696
Error S.D	0.0812	0.08787	0.1457056
Abs E. Mean	0.04303	0.05472	0.09062
S.D. Ratio	0.1290763	0.1216717	0.2198665
Corrélation	0.991636	0.992583	0.9772151
Tab. 47. Paramètres statistiques de régression			

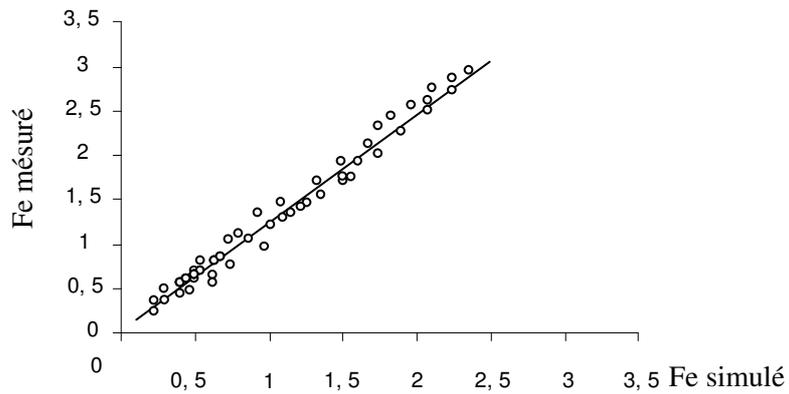


Fig. 118. Corrélation entre le fer simulé et

Les facteurs les plus importants influençant le fer dans les eaux de surface et souterraines sont classées dans le tableau 48 selon une analyse de sensibilité du RNA des variables de la qualité de l'eau en phases d'apprentissage et de vérification.

	Mn	Zn	Pb	SO ₄	CE	Sal	Cu	Ca	Mg	Na+k
Rank	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ratio	26,57	19,01	17,18	13,75	12,77	12,27	11,19	10,59	10,57	8,90

Tab. 48. Classement des variables par analyse de sensibilité

VII. 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.

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

Le présent travail, a été mené dans la région de Tébessa ; zone semi aride située à l'extrême Est algérien. Il s'est fixé pour objectif, l'étude d'impact des formations triasiques et de la mine abandonnée (khanguet El Mouahad), sur la qualité du sol et des eaux.

L'étude géologique du secteur, permet d'identifier les diverses formations qui constituent le terrain notamment, celles reconnues par leur perméabilité en grand, dont les calcaires Maestrichtiens, Turoniens et Éocènes qui bordent la plaine, du Nord comme du Sud.

Les formations alluvionnaires, composées de sédiments de la série plio-quaternaire et caractérisées par leur perméabilité en petit, se répandent à l'intérieur de la plaine. Elles sont d'un granoclassement de la bordure (où on rencontre de gros cailloutis voire des galets calcaires) vers le centre de la plaine (pays des limons récents, à faible perméabilité).

À Djebel Djebissa, et selon les notes qui s'y rapportent, c'est en grande partie des formations argilo-grésocalcaires à grés très abondant, d'âge triasique, en contact tectonique avec celles carbonatées essentiellement dolomitiques, de l'Aptien-Albien non différencié.

L'abondance de ce matériel évaporitique, témoigne d'une activité triasique intense et d'une importante ascension.

Les travaux de géophysique, dont la zone d'étude était sujette, ont permis de mettre en évidence des formations aquifères diverses ; où l'affleurement de matériel alluvionnaire du Quaternaire, d'une porosité d'interstice et d'une résistivité oscillant de 20 à 100 Ω .m, qui fait le remplissage du bassin.

Le premier niveau supposé se comporter comme aquifère, correspondant à la nappe phréatique, composé de matériel à porosité d'interstice se déposant avec quelques discontinuités et des épaisseurs variables.

Les valeurs de résistivité diminuent des bordures de la plaine (100 Ω .m) vers le centre (5 Ω .m), et varient donc en fonction de la nature et de la répartition du matériel de remplissage qu'on qualifie par conséquent d'hétérogènes.

Dans la région de Tébessa, et selon l'étude climatique, règne un climat semi-aride de type continental, caractérisé par un été chaud et un hiver froid, avec des valeurs de pluviométrie inférieures à 350 mm/an.

L'examen de l'historique des relevés des précipitations, sur 100ans, révèle la dominance des années sèches, ce qui peut avoir un effet négatif sur la recharge de la nappe et le soutien des réserves.

Le traitement des données piézométriques fait ressortir un écoulement dominant convergeant d'Est en Ouest, ainsi que la mise en évidence d'apports latéraux, issus des formations calcaires et des échanges hydrauliques, marqués par une relation mixte ; Oued Kebir-nappe.

L'examen de l'historique de la Piézométrie, montre une baisse du niveau piézométrique entre 1974 et 2009.

Par ailleurs, les changements de faciès que l'étude géophysique a révélé, démontrés également par (Mallem T.), provoquant la discontinuité des niveaux P₁, P₂ et P₃, d'où résulte un débordement de la nappe, du côté de Tébessa.

Selon les données de paramètres issues de forages, il nous était possible d'aboutir au classement des zones de Bekkaria, Tébessa et Ain Chabro, en fonction de leurs caractéristiques hydrodynamiques.

Du point de vue hydrochimique, et suite aux différents résultats obtenus, il paraît que les variables qui ont le plus d'impact sur la qualité des eaux de la région, sont de nature géologique.

De l'analyse en composantes principales, il apparaît que :

Les chlorures, les sulfates et le sodium sont présents en grandes concentrations, ce qui confère aux eaux des puits, notamment de l'Est de la plaine, une certaine salinité, et à un degré moindre, ceux du centre, caractère qu'on peut traduire par la conjugaison de deux phénomènes ; l'évapotranspiration, en périodes de basses eaux et le lessivage des sels, en hautes eaux.

Les bicarbonates ont également des teneurs importantes, montrant ainsi l'effet des apports, résultant de la dissolution des calcaires de bordures.

Le rapport Sr^{++}/Ca^{++} a donné d'importantes valeurs, confirmant l'impact des formations évaporitiques sur la qualité des eaux des puits et des cours d'eau.

Les écoulements se faisant des bordures au centre de la plaine et la dominance, en teneur, des bicarbonates dans le secteur de Chabro, confirment la théorie (de relation) d'alimentation de la nappe et des cours d'eau par les formations calcaires du Maestrichtien.

L'étude d'impact de la mine de Djebel Djebissa sur la qualité du sol et des eaux, montre une importante teneur en métaux lourds des eaux des Oueds. Il y'a eu donc piégeage de ces métaux par les sédiments (par le filtre naturel qu'est le sol).

Le Fer et le Manganèse sont en grandes proportions au niveau des terrils de la mine abandonnée, mais deviennent faibles au-delà, traduisant une pollution très localisée.

Les résultats obtenus à travers le modèle appliqué, 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.

*RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES*

Références bibliographiques

- Alvarez E., Fernandez Marcos, M.L., Vaamonde, C. et Fernandez-Sanjurjo, M.J., 2003.** Heavy metals in the dump of an abandoned mine in Galicia (NW Spain) and in the spontaneously occurring vegetation. *Science of The Total Environment*, 313(1-3): 185-197.
- Aoudjehane M., Bouzenoune A, Rouvier H. et Thibiéroz J. (1992):** Halocinèse et dispositifs d'extrusions du Trias dans l'Atlas saharien oriental (NE algérien). *Gèol. Médit.*, Marseille, XIX, 273-287.
- Banks, D., Holden W., Aguilar E., Mendez C. et Koller D., 2002a.** Contaminant source characterization of the San Jose Mine, Oruro, Bolivia. In: L. Younger Paul et N.S. Robins (Eds.), *Mine water hydrogeology and geochemistry*. Geological Society of London., London.
- Banks D., Holden W., Aguilar E., Mendez C., Koller D., Andia Z., Rodriguez J., Saether O.M., Torrico A., Veneros R. et Flores J., 2002b.** Contaminant source characterization of the San Jose Mine, Oruro, Bolivia. *Geological Society of London*, 198(1): 215-239.
- 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*.
- Bowell, R.J. et Bruce I., (1995).** Geochemistry of iron ochres and mine waters from Levant Mine, Cornwall. *Applied Geochemistry*, 10(2): 237-250.
- 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- validation selection of test and validation sets in multivariate calibration and neural networks as applied to spectroscopy. *Analy.* 122 (10), 1015-1022.
- Beghoul M. (1974):** Étude 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.

Carlsson E., Thunberg J., Ohlander B. et Holmstrom H., (2002). Sequential extraction of sulfide-rich tailings remediated by the application of till cover, Kristineberg mine, northern Sweden. Science of The Total Environment, 299(1-3): 207-226.

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.

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).

David L. (1956): Étude 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): Évolution 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. Éléments 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-Boucheougouf-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).

Dold B. et Fontbote L., (2001). Element cycling and secondary mineralogy in porphyry copper tailings as a function of climate, primary mineralogy, and mineral processing. *Journal of Geochemical Exploration*, 74(1-3): 3-55.

Douaoui A., 1993. Variabilité spatiale de quelques propriétés physico-chimiques des sols du moyen Chélif, incidences cartographique. Mém de Magist., INA Alger. PP 22 97

Durozoy G. (1956): Carte géologique de Tébessa. Feuille 206.

Dubourdiou G. (1956): Étude 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.

Gäbler H.E., (1997). Mobility of heavy metals as a function of pH of samples from an overbank sediment profile contaminated by mining activities. *Journal of Geochemical Exploration*, 58: 185-194.

Gaudin G., 1982. Mathématique et informatique, analyse en composantes principales. INA PG. 43P.

Ghrieb.L (2007). Impact des formations triasiques sur la qualité des eaux d'une nappe en zone semi aride cas de la plaine de Tébessa-Bekkaria extrême Nord-est Algérien. Mémoire de magister Université de Annaba.

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.

Hudson-Edwards K.A., Schell C. et Macklin M.G., (1999). Mineralogy and geochemistry of alluvium contaminated by metal mining in the Rio Tinto area, southwest Spain. *Applied Geochemistry*, 14(8): 1015-1030.

Hsissou Y. et al. (1995) : Caractérisation des eaux de l'aquifère turonien du bassin du Tadla (Maroc) par le rapport des concentrations molaires Sr^{2+}/Ca^{2+} . *Journal of Hydrology* 183. Pages 445-451.

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). Éléments d'hydrologie de surface. Tome 2 : Critique et analyse statistique des données hydrologiques. *Ecol. Nat. Sup. de Géol. Appli/ Inst. Nat. Polytech. De Lorraine*, 95 p.

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.

Mc Culloch, 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).

Moran R., E. et Wentz D.A., (1974). Trace element content of a stream affected by metal mine drainage, Bonanza, Colorado, *International symposium on water-rock interaction*, Prague, pp. 22.

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-Belalcène 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 périadiapiriques 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. (Bouname, 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.

Paktunc A.D., (1999). Characterization of Mine Wastes for Prediction of Acid Mine Drainage. In: A.J. M. (Ed.), Environmental Impacts of Mining Activities, Emphasis on Mitigation and Remedial Measures. Springer-Verlag, New York, pp. 19-38.

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.

Prieto G., (1998). Geochemistry of heavy metals derived from gold-bearing sulphide minerals in the Marmato District (Colombia). *Journal of Geochemical Exploration*, 64(1-3): 215-222.

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., Pertuisot 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 isotopique 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 Bouhlel 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-Visiteriv, 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, sparger-verlag New York inc. 56 P.

Younger P.L., (2000). Nature and practical implications of heterogeneities in the geochemistry of zinc-rich, alkaline mine waters in an underground F-Pb mine in the UK. Applied Geochemistry, 15(9): 1383-1397.

Zerdazi A. 1990 : Étude 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

Précipitations mensuelles enregistrées à la station de Tébessa (1906-2009)

	Sept	Oct	Nov	Déc	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août
1906	50,5	13	0	46,1	43,1	90,1	13,7	53,4	11	17	18	9
1907	63,9	16	34	3,2	8,3	6,2	52,5	29,4	0	7,7	22,5	20,5
1908	67	38	43	49	41	12	62,5	10,9	38,5	82,5	1	12
1909	18,5	27,5	11,57	7	40,1	47	17	25,5	24	20,5	2	2
1910	27	0	3,5	70,5	46	11	70,5	83,5	33,7	3	55,5	0
1911	98,5	23	80,4	10	18,5	2	27,5	35	16,5	36	0	5
1912	74,5	63,4	8,1	22,4	31,9	60,5	10	43,6	53,7	0	0	0
1913	0	41,9	7,5	17	40,1	25,8	6,7	3	25,5	23,7	0	1,9
1914	39,8	22	28,01	1,05	50,2	37,2	19,2	40,5	28	14,9	2	1,5
1915	16,8	34,2	13,2	51	30,9	55,4	30,7	34	25,3	15	3	2
1916	76,5	26	64,4	7,8	23,6	22	25,4	23	80,9	43,2	52,1	0,4
1917	19,7	22,8	59,7	22,8	9,3	14	60,2	15	62	16,4	20	8,5
1918	6,8	2,8	31,1	13,1	35,7	17,7	41,6	19,5	70,9	54,5	2,7	12,9
1919	21,5	31,3	31,2	12,7	9,8	42,2	30	24,1	24,6	20,7	12,2	10,8
1920	61,7	0	34	18,3	9,8	48,2	21,8	20	0	0	43,9	18,1
1921	41,9	47,1	35	59,2	50,6	51	50,2	4,8	23,7	13,8	3,8	30,3
1922	13,7	16,6	48,2	15,1	52,4	33	69,1	41,5	7,4	15	2,6	3,5
1923	0,7	0	4,4	3,9	25,8	16,4	57,2	0	44,3	63,8	3,2	0
1924	23,2	35,9	34	44,2	1,3	6,4	39,1	23,4	76,4	4,5	8,2	0
1925	22,6	36,6	19,3	22,2	44	37,8	11,3	51,1	40,9	23,4	25,3	10
1926	47,5	18,5	62,4	20,4	16,1	13,2	79,2	7,7	29,2	15,1	1,5	0,8
1927	98,8	22	20,7	56,6	92,9	9,2	12,6	16,1	10	0,3	16,5	34
1928	73,8	30,3	29,5	34,4	12,5	12,3	70,3	23,2	63,2	51,9	4,7	2,6
1929	53,2	5,4	36,2	13,2	26,7	43,6	31,3	32,4	12,7	52	16,2	0
1930	36,5	35,6	3,4	39,6	52,8	41,5	0	37,1	46,5	0	0	0
1931	9,3	25,5	58,6	61,4	24	51,6	69,1	14,9	73,8	0	0	0
1932	65,3	67,4	16,9	36,7	31,5	15,8	88,4	19	21,2	43,2	0	4,2
1933	3,4	14,3	43,4	14,2	46,6	14	21,3	50,5	24,3	23,3	0	0
1934	64,3	38,2	69,1	24,8	82,3	23	56,6	0	8,6	2,1	0	39,4
1935	20,1	32,7	6	27,2	4,2	14,8	11,1	46	28,7	50,4	22,1	33,3
1936	9,5	107,6	10,3	31,3	0	22,9	11,6	10,9	6,8	8,2	1,5	2,3
1937	27,1	5	2,5	7,7	20,6	22,2	5,6	41,2	12,4	0,3	1,1	8,4
1938	8,6	65,5	30,9	26,9	5,2	54,5	17	95,8	136,9	17,5	0	24,6
1939	70,3	5,1	24,8	1,8	62,8	3,9	56,1	0,1	7,6	15,2	2,3	8
1940	19,6	46,1	40,4	41,1	7,1	8	39,4	85,2	53	70,5	12	17,8
1941	57,1	61,7	49,3	20,5	31,5	27,4	9,9	7,2	21,3	1,3	15,9	
1942	44,1	0	16,4	78,8	11,9	19,4	33,2	15,7	2,9	8,4	0,5	13,8
1943	0	50,1	70,2	36,9	8,9	7	21,9	63,8	3,5	36,4	0	36,4
1944	60,4	9,2	21,1	41,5	10	16,8	5,1	27,2	11	13,2	11,4	47,2
1945	2,8	11,4	6,6	49,2	66	4	20,7	33,9	52,5	41,4	11	8
1946	3,2	15,4	11,9	27,1	2,9	17,7	2	57,6	15,3	15,2	15,6	9,5
1947	9,9	8,7	0	21,6	8,5	38,2	27,3	47,1	11,5	34,6	0	0
1948	2,2	24,6	49,5	42	38,6	8,8	46,2	43,7	59,6	5,1	6,2	0
1949	10,4	10,7	2	5,5	43,3	11,4	91,6	19,4	82,5	24,7	1,5	20
1950	57,9	57	33,1	1,9	10,6	18,5	6,7	5,2	24,7	13,7	19,8	1,7
1951	17	50	11	34	21	24	24	53	52	22	56	54
1952	61	22	24	15	43	2	63	14	78	42	56	31
1953	51	60	66	23	9	20	19	55	23	33	1	0
1954	11	21	25	11	14	22	30	72	33	21	9	21
1955	55	60	1	24	20	41	61	23	8	3	0	4
1956	45	26	17	22	44	1,6	28	70	44	40	3	14
1957	22	87	86	54	11	13	11	13	11	19	0	10
1958	26	44	93	35	0	28	10	27	57	38	11	110
1959	52	38	36	6	22	8	74	123	36	71	9	1
1960	13	31	17	23	38	2	35	18	1	61	16	27
1961	7	23	25	4	0	28	40	63	36			

1962	11,2	15,3	25,8	25	10,1	19,5	7,9	3,7	62	43,8	64,6	33,6
1963	62,2	4	25,5	38,5	76,5	24,7	8	32,1	35,6	4,7	26	60,9
1964	4,6	75,8	8	37,7	50	5	22,3	23,7	15	20	17,5	14
1965	40,6	4,5	27,5	67,3	6,2	10,5	31	57	53,1	40	2	2
1966	31,7	19	42,5	2,8	15,2	15,8	20,5	10,9	9	30,4		39,5
1967	69,5	8,5	24,4	21,5	21,2	36,2	44,5	23,5	68,2	99,3	0	4,4
1968	17,1	1,3	1,3	9,7	22,1	6,9	83,5	17	7,5	1,1	23,6	4,4
1969	112,7	151,1	0,2	43,4	13,9	0	7,9	84,3	23,1	20,4	23,3	2,8
1970	8,6	37,2	0	26	60,1	84,6	15	7,1	48,1	8,1	67,5	43
1971	38,1	40,7	5,9	9	70,1	21,8	27,9	99,3	25,8	56,5	19,1	14,9
1972	28,2	152,2	17,7	30,8	14,9	39,3	172,3	60,8	25	47,9	8,4	37,2
1973	36,9	99,3	11,2	34,9	46	42,7	171,1	31,3	44,7	65,5	5,3	36,4
1974	16,3	12,9	6	94,4	14	28,3	29,2	50,2	10,4	24,8	4,5	12,1
1975	27,1	37,9	18,5	14,2	23,4	67,8	33,6	21,6	66,6	0	24,5	23,7
1976	26,1	11	47,3	6,2	22,4	38,2	49,1	32,4	35,8	59	17,3	39,3
1977	26,1	23,1	134,5	10,3	14,7	6,6	45,1	40,4	38,2	9,1	15	19,4
1978	11,2	3,3	46,7	3,9	3,9	54,7	102,5	23	23,9	3,9	0	50,1
1979	5,4	26	20,4	3,6	10,3	44,6	40,3	89,4	22,7	27,7	0	11,7
1980	116,1	18,5	21,3	1,7	33,7	29,8	76,8	28,1	41	4,3	0,2	3,4
1981	65,8	3,7	24,1	47,5	13,4	18,8	24,1	11,7	35,8	72,4	3,6	4,1
1982	37,3	23	1,9	15,3	21,8	45,6	12,4	56,2	80,1	8,5	3,7	15,5
1983	12	58,5	50,3	24,7	2,8	16,3	18,1	5,7	30,4	42,7	0,7	31,5
1984	3,9	31,7	17,9	12,2	18,9	92,4	24	24,1	4,3	6,8	0,2	15,4
1985	27,2	26,2	19,1	51	25,7	11,3	54,5	26,4	65,2	27,2	2,4	6
1986	50,8	23,1	3,5	13,5	31,1	14,3	83,1	2,5	35,8	15,2	51	13,1
1987	24,4	28,7	44,7	20,7	10,2	27,4	62,6	13,2	25,1	4,2	33,7	5
1988	15,5	18,7	33,8	9,2	23,7	4,2	35,8	31,6	55,6	62,1	8,3	6,5
1989	21,1	20,6	35,1	35,4	18,3	17,4	14	16,3	8,4	57,3	8,7	99,3
1990	44,6	12	10,8	8,7	83	0,2	34,8	43,1	66,9	17,1	15,2	136,6
1991	53,3	22,4	99,8	64,9	30,3	12,8	54	43	67,8	14,4	6,4	65,6
1992	74,7	34,4	44,3	14,2	34	29,9	24,3	43,6	82	23,2	13,4	4,5
1993	51,2	28,4	61,6	48,4	9,3	27,9	21,4	2,6	31,1	12,8	20,1	1,8
1994	22,7	3,8	16,8	28,7	31	23,9	19,4	23,3	41	2,4	4,5	11
1995	7,2	66,8	0,6	6,8	24,7	3	32,2	22,1	7,4	37,9	1,7	44,1
1996	149,7	39,7	26,6	18,2	24,9	72,9	56,3	49,8	30,2	38,9	13,2	30
1997	12,4	4,1	1,2	15	31,6	7,1	18,9	46,8	16,1	10,3	20,2	23,7
1998	64	72,5	45,2	21,5	22,3	10,2	28,7	29,2	16,7	31	0	15,1
1999	78,6	36,2	55,1	14,5	56,4	11,7	45,6	15,4	30,9	16,9	18,9	33,7
2000	22,1	81,5	64,6	34,5	3,7	4,1	10	14,7	86,5	76,4	21,6	18,8
2001	51	18,3	17	13,7	27,1	15,8	15,1	2,7	49,3	2,4	7,6	1,4
2002	55	10,7	23,3	7,1	17	11,8	5,2	29	40,6	13,3	58	84,7
2003	36,5	38	76,4	30,3	100,4	38,9	18	97,8	29,2	9,5	2,8	12,1
2004	70,2	45,5	17,5	168,4	20,6	3,2	72,6	29,4	39,4	91,6	16,4	44
2005	19	26	117	66,9	29,2	34	24	20,4	1,2	31,5	1,4	46,6
2006	33,3	94,1	31,6	77,3	34,9	14,4	5,5	43,6	37,6	26,9	8,4	26
2007	49,7	15,4	9,3	28,7	5,2	11	61	59,1	13,8	38,8	30,2	54,4
2008	84,5	52	11,8	47,1	6,1	7	36,4	28	67,4	12,9	4,3	18,7
2009	12,7	2	2	7	77	11,6	26,7	42,9	65,9	0	23	18,7

Températures mensuelles enregistrées à la station de Tébessa (1972-2009)

	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août
1972	28,2	152,2	17,7	30,8	14,9	39,3	172,3	60,8	25	47,9	8,4	37,2
1973	36,9	99,3	11,2	34,9	46	42,7	171,1	31,3	44,7	65,5	5,3	36,4
1974	16,3	12,9	6	94,4	14	28,3	29,2	50,2	10,4	24,8	4,5	12,1
1975	27,1	37,9	18,5	14,2	23,4	67,8	33,6	21,6	66,6	0	24,5	23,7
1976	26,1	11	47,3	6,2	22,4	38,2	49,1	32,4	35,8	59	17,3	39,3
1977	26,1	23,1	134,5	10,3	14,7	6,6	45,1	40,4	38,2	9,1	15	19,4
1978	11,2	3,3	46,7	3,9	3,9	54,7	102,5	23	23,9	3,9	0	50,1
1979	5,4	26	20,4	3,6	10,3	44,6	40,3	89,4	22,7	27,7	0	11,7
1980	116,1	18,5	21,3	1,7	33,7	29,8	76,8	28,1	41	4,3	0,2	3,4
1981	65,8	3,7	24,1	47,5	13,4	18,8	24,1	11,7	35,8	72,4	3,6	4,1
1982	37,3	23	1,9	15,3	21,8	45,6	12,4	56,2	80,1	8,5	3,7	15,5
1983	12	58,5	50,3	24,7	2,8	16,3	18,1	5,7	30,4	42,7	0,7	31,5
1984	3,9	31,7	17,9	12,2	18,9	92,4	24	24,1	4,3	6,8	0,2	15,4
1985	27,2	26,2	19,1	51	25,7	11,3	54,5	26,4	65,2	27,2	2,4	6
1986	50,8	23,1	3,5	13,5	31,1	14,3	83,1	2,5	35,8	15,2	51	13,1
1987	24,4	28,7	44,7	20,7	10,2	27,4	62,6	13,2	25,1	4,2	33,7	5
1988	15,5	18,7	33,8	9,2	23,7	4,2	35,8	31,6	55,6	62,1	8,3	6,5
1989	21,1	20,6	35,1	35,4	18,3	17,4	14	16,3	8,4	57,3	8,7	99,3
1990	44,6	12	10,8	8,7	83	0,2	34,8	43,1	66,9	17,1	15,2	136,6
1991	53,3	22,4	99,8	64,9	30,3	12,8	54	43	67,8	14,4	6,4	65,6
1992	74,7	34,4	44,3	14,2	34	29,9	24,3	43,6	82	23,2	13,4	4,5
1993	51,2	28,4	61,6	48,4	9,3	27,9	21,4	2,6	31,1	12,8	20,1	1,8
1994	22,7	3,8	16,8	28,7	31	23,9	19,4	23,3	41	2,4	4,5	11
1995	7,2	66,8	0,6	6,8	24,7	3	32,2	22,1	7,4	37,9	1,7	44,1
1996	149,7	39,7	26,6	18,2	24,9	72,9	56,3	49,8	30,2	38,9	13,2	30
1997	12,4	4,1	1,2	15	31,6	7,1	18,9	46,8	16,1	10,3	20,2	23,7
1998	64	72,5	45,2	21,5	22,3	10,2	28,7	29,2	16,7	31	0	15,1
1999	78,6	36,2	55,1	14,5	56,4	11,7	45,6	15,4	30,9	16,9	18,9	33,7
2000	22,1	81,5	64,6	34,5	3,7	4,1	10	14,7	86,5	76,4	21,6	18,8
2001	51	18,3	17	13,7	27,1	15,8	15,1	2,7	49,3	2,4	7,6	1,4
2002	55	10,7	23,3	7,1	17	11,8	5,2	29	40,6	13,3	58	84,7
2003	36,5	38	76,4	30,3	100,4	38,9	18	97,8	29,2	9,5	2,8	12,1
2004	70,2	45,5	17,5	168,4	20,6	3,2	72,6	29,4	39,4	91,6	16,4	44
2005	19	26	117	66,9	29,2	34	24	20,4	1,2	31,5	1,4	46,6
2006	33,3	94,1	31,6	77,3	34,9	14,4	5,5	43,6	37,6	26,9	8,4	26
2007	49,7	15,4	9,3	28,7	5,2	11	61	59,1	13,8	38,8	30,2	54,4
2008	84,5	52	11,8	47,1	6,1	7	36,4	28	67,4	12,9	4,3	18,7
2009	12,7	2	2	7	77	11,6	26,7	42,9	65,9	0	23	18,7

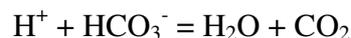
Analyses des éléments chimiques au niveau du laboratoire :

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:

$$C HCO_3 = 24,4 * VV$$

VV : 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 calorimétrique 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 :

Introduction

La spectrométrie atomique étudie les émissions ou absorptions de lumière par l'atome libre, c'est à dire lorsque celui-ci voit son énergie varier au cours d'un passage d'un de ses électrons d'une orbite électronique à une autre. Généralement seuls les électrons externes de l'atome sont concernés. Ce sera le cas si les énergies mises en jeu sont modérées.

Les principales techniques mettant en jeu la spectroscopie atomique utilisée en analyse chimique sont :

- L'émission d'arc ou d'étincelle (analyse qualitative préalable).
- L'émission de flamme et l'absorption atomique (analyse quantitative des éléments à faibles teneurs).

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.

Cependant en pratique, cette relation n'est pas toujours vérifiée. On n'obtient pas toujours une droite d'étalonnage. C'est le cas si la concentration devient trop élevée.

La gamme de dosage est le domaine dans lequel la courbe d'étalonnage est pratiquement une droite.

Il est limité, pour les faibles concentrations, par la limite de détection et pour les fortes concentrations par l'erreur sur la fidélité ; à une très forte variation de la concentration correspond une faible variation de l'absorbance.

La gamme de dosage est généralement donnée par le constructeur. Elle dépend de la raie de dosage utilisée.

Perturbations

Un certain nombre de phénomènes peuvent entacher d'erreurs les résultats obtenus. On leur a donné le nom général de perturbations (ou interférences ou interactions).

On peut les classer en perturbations spectrales, physiques, chimiques, d'absorption non spécifique :

- les perturbations spectrales ; une raie d'absorption d'un composant de la matrice coïncide avec la raie d'émission de résonance de la source.
- les perturbations physiques ; il s'agit essentiellement des phénomènes de viscosité et de tension superficielle. Une faible viscosité et une faible tension superficielle conduiront pour une même concentration à des valeurs de l'absorbance plus élevées.
- les perturbations chimiques ; les atomes présents dans la flamme n'absorbent que s'ils sont à l'état fondamental. S'ils sont excités ou ionisés ils n'absorberont pas. Par ailleurs s'ils forment avec les atomes et radicaux présents dans la flamme des oxydes, hydroxydes, des hydrures, ils ne contribueront pas à l'absorption.
- les perturbations d'absorption non spécifiques ; elles sont dues à la présence dans la flamme de molécules qui absorbent l'énergie de la lampe à cathode creuse. Cette absorption moléculaire s'ajoute à l'absorption atomique et donne une réponse par excès.

Appareillage

Le dispositif expérimental utilisé en absorption atomique se compose d'une source, la lampe à cathode creuse, d'un brûleur et un nébuliseur, d'un monochromateur et d'un détecteur relié à un amplificateur et un dispositif d'acquisition.

La lampe à cathode creuse

La lampe à cathode creuse est constituée par une enveloppe de verre scellée et pourvue d'une fenêtre en verre ou en quartz contenant une cathode creuse cylindrique et une anode. La cathode est constituée de l'élément que l'on veut doser. Un vide poussé est réalisé à l'intérieur de l'ampoule qui est ensuite remplie d'un gaz rare (argon ou néon) sous une pression de quelques mm de Hg.

Lorsqu'on applique une différence de potentiel de quelques centaines de volts entre les deux électrodes, une décharge s'établit. Le gaz rare est alors ionisé et ces ions bombardent alors la cathode, arrachant des atomes à celle-ci.

Ces atomes sont donc libres et sont excités par chocs ; il y a émission atomique de l'élément constituant la cathode creuse. La particularité du rayonnement ainsi émis est qu'il est constitué de raies très intenses et très fines.

Le nébuliseur

L'échantillon à analyser est en solution. Celle-ci est aspirée au moyen d'un capillaire par le nébuliseur. À l'orifice du nébuliseur, du fait de l'éjection d'un gaz à grande vitesse, il se crée une dépression (effet Venturi). La solution d'analyse est alors aspirée dans le capillaire et à la sortie, elle est pulvérisée en un aérosol constitué de fines gouttelettes.

Cet aérosol pénètre alors dans la chambre de nébulisation dont le rôle est de faire éclater les gouttelettes et d'éliminer les plus grosses. Ce brouillard homogène pénètre alors dans le brûleur.

La flamme - atomisation

L'aérosol pénètre dans le brûleur puis dans la flamme. Au bout d'un certain parcours au seuil de la flamme, le solvant de la gouttelette est éliminé, il reste les sels ou particules solides qui sont alors fondus, vaporisés puis atomisés.

La flamme air acétylène est la plus répandue et permet de réaliser le dosage de nombreux éléments. Sa température est de 2500°C environ.

La flamme N₂O/acétylène (protoxyde d'azote) est utilisée pour certains éléments qui forment des oxydes réfractaires particulièrement solides et ne sont pas atomisés par la flamme air/acétylène.

À la place d'une flamme, on peut également utiliser un four cylindrique en graphite pour atomiser l'échantillon.