

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITY BADJI MOKHTAR
ANNABA
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR
ANNABA



جامعة باجي مختار
عنابة

Faculté des Sciences de la Terre
Département de Géologie

Thèse

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat d'Etat

*VULNERABILITE DE LA NAPPE
ALLUVIALE DE TEBESSA-MORSOTT
FACE AUX POLLUANTS*

*Option
Hydrogéologie*

*Par
KACHI Slimane*

Directeur de thèse: **KHERICI Nacer**

Professeur, Université de Annaba

Devant le jury

Président: HAMAMI Mounir
Examineur : OUMEDOUR Rabah
Examineur : MANSOURI Rachid
Examineur : DERRADJI Fadel
Examineur : HANI Azzedine

Professeur, Université de Skikda
Professeur, Université de Guelma
M.de Conf. Université de Guelma
M.de Conf. Université de Annaba
M.de Conf. Université de Annaba

Octobre 2007

ملخص

نظرا لزيادة الطلب على الماء، النفاذ والتلوث المرتقب للمياه الصالحة للشرب في بعض مناطق البلاد، قد تولد عنه مشاكل عويصة في المستقبل، وخاصة في المناطق الشبه الجافة أين ندرة المياه قد أدت لنسيان جودتها.

هذا البحث تم إنجازه في منطقة شبه جافة وتخص الحوض المائي تبسة- مرسط (شمال شرق الجزائر)، حيث يعد المنبع الرئيسي للمياه الصالحة للشرب لحوالي 120000 ساكن. حاليا، يوجد الحوض مهددا من طرف عدة مصادر للتلوث، خاصة المياه القذرة حيث تطرح في الحوض بدون معالجة مسبقة، أو الأخذ بعين الاعتبار التلوث البيئي.

يتكون حوض تبسة- مرسط، من صخور كلسية على الأطراف ورسوبية في الوسط، متوزعة بشكل منتظم، مكونة بذلك خزان مائي ذو طبقات مائية متراكمة أين تجري المياه في مسار متدرج و في اتجاه جنوب شرق إلى شمال غرب وتتغذى بنسبة 1% من كمية الأمطار المتساقطة.

الحماية الفعالة لهذا الحوض، تتطلب معرفة دقيقة للمعطيات الجيولوجية، الهيدروكيميائية والهيدروجيولوجية ومدى تأثيرها على تحويل الملوث. كل هذا أدى بنا إلى معرفة دقيقة إلى مصدر المياه الجوفية للحوض و طريقة سريانها إلى جانب تركيبها الكيميائية، ودرجة تلوثها ومدى تأثير العوامل البشرية علميا.

حتى لا تصبح هذه الموارد المائية عائق أمام النمو الاقتصادي بالمنطقة، لابد من التسيير العقلاني ومنع الاستهلاك العشوائي. أما فيما يخص النوعية، فقد تم إنجاز فحص عام لتحديد أنواع الملوثات، مصدرها والمناطق ذات حساسية عالية للتلوث.

استعمال طريقة (دراستيك) مع تحسين في إنشاء خرائطها الرئيسية، معتمدا على مبدأ التقسيم، قد أتاح لرسم خرائط دقيقة للحوض المائي تمثل درجة إحساسه للتلوث. 39.5% من مساحة الحوض ذات حساسية عالية و متوسطة للتلوث وتخص المناطق العمرانية: تبسة- حمامات- بولحاف الأدير و مرسط ويستخرج منها أكثر من 70% من حاجيات تبسة من الماء الشرب، حيث تظهر فيها الان اعراض التلوث. إذا مهما تعددت النتائج المتحصل عليها، مسافة 100 م تفصل بين الآبار والحاجز الواقي القريب حتى نضمن الحماية القسوى للآبار من التلوث الخارجي.

التلوث الكيميائي والجرثومي في الحوض ناتج عن عوامل بشرية و جيولوجيا الحوض. المياه العميقة (الآبار) تظهر تلوث كيميائي أما المياه السطحية (الآبار) تظهر تلوث مزدوج.

أخيرا، هذه الدراسة تكون بمثابة قاعدة عمل للأخذ بعين الاعتبار الأضرار الناجمة عن استعمالنا السيء للبيئة على مواردنا المائية.

Résumé

Compte tenu de la tendance actuelle de l'accroissement de la demande en eau, l'épuisement prévisible et la pollution des ressources en eau douce de certaines régions du pays, risque s'il n'est pas correctement géré de poser un problème majeur à l'avenir (notamment dans les régions semi-aride) où le problème primordial de trouver de l'eau en quantité suffisante a eu tendance à se minimiser et même à faire oublier celui de la qualité.

Ce travail a été réalisé en zone semi-aride et concerne la nappe alluviale de Tebessa-Morsott (extrême Nord-Est Algérien). Elle constitue une source d'eau potable fiable pour près de 120 000 habitants. Actuellement, elle se trouve très menacée par de nombreux foyers de pollution en particulier, les rejets des eaux domestiques et des petites industries qui sont déversés dans la nappe sans traitement préalable et en dehors de toute mesure de protection de l'environnement et des ressources en eau.

Dans le bassin de Tebessa-Morsott, les formations de calcaires du Crétacé constituent les bordures et les formations meubles d'origine continentale siègent au centre et se répartissent uniformément dans la plaine et constituent un système aquifère à nappes empilées. Un écoulement compartimenté des eaux souterraines se fait suivant une direction Sud-Est/Nord-Ouest. L'infiltration ne laisse percoler que 1% des précipitations, donc l'alimentation indirecte à travers les bordures est la plus importante et qu'elle doit être la plus considérée.

L'établissement de la relation entre les données géophysiques et hydrodynamiques a conduit à l'évaluation théorique des paramètres hydrodynamiques (T, K et porosité), d'où leur meilleure connaissance au sein de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott.

Une protection efficace de la plaine, exige une bonne connaissance des données géologiques, hydrochimiques, climatiques et hydrogéologiques ainsi que leur contribution dans le transfert des polluants. Ce qui nous a amené à mieux comprendre l'origine des eaux souterraines, leur dynamique, leur chimisme, leur degré de potabilité et l'influence des activités anthropiques.

Pour éviter que cette ressource ne devienne un facteur limitant du développement de la région de Tebessa, une gestion appropriée des ressources disponibles, une planification des usages est nécessaire. Sur le plan qualitatif, un diagnostic général sur l'état de santé de la nappe doit être mené pour identifier les types de polluants, leur origine (naturelle ou anthropique) ainsi que les zones à haut risque de contamination.

L'application de la méthode DRASTIC avec une amélioration dans l'établissement des cartes thématiques, basé sur le principe de discrétisation a permis d'aboutir à une cartographie très détaillée du degré de vulnérabilité à la pollution de la nappe. Les zones vulnérabilités couvrent 39.5% et concerne les zones urbaines de Tebessa ville, Hamamet, Morsott et Boulhef-edyr. Dans ces zones est concentré un très grand nombre de forages d'où provient 70% de l'eau potable de Tebessa et montrent déjà des indices de pollution. Donc, quelque soit les résultats obtenu, une distance minimale de 100 m devra séparer les périmètres de protection rapprochée des forages d'A.E.P dans les zones vulnérables. Ceci, afin d'assurer une protection maximale de ces forages contre la pollution.

La pollution chimique ou bactériologique résulte essentiellement des activités humaines et de la géologie du bassin et elle plus remarquable au centre de la plaine. Les eaux profondes (forages) sont chimiquement polluées, alors que les eaux de surfaces (puits) présentent une pollution mixte.

Enfin, cette étude constitue une première base de travail dans un objectif de prendre en charge les actions anthropiques sur la qualité de nos ressources d'approvisionnement en eaux souterraines.

ABSTRACT

Taking into account the current tendency of the increase in the demand for water, foreseeable exhaustion and the pollution of the fresh water resources of certain areas of the country, risk if it is not correctly managed, to pose a major problem in the future (in particular in the areas semi-arid) where the main problem is to find water in sufficient quantity tended to be minimized and to even make forget the quality side

This work was achieved in semi-arid zone and relates to the alluvial aquifer of Tebessa-Morsott (the extreme Algerian North-East). It constitutes the main source of drinking water for nearly 120 000 inhabitants. Currently, it has been threatened by numerous pollution sources that have been increased due to lack of environmental protection measures for water resources, in particular wasted domestic and industry water which poured in the aquifer without any previous treatment

In the basin of Tebessa-Morsott, the Cretaceous limestone formations constitute the edges. The center is covered by the Quaternary clastic material of continental origin that is distributed uniformly in the plain and constitutes an aquifer system with piled up aquifer. A compartmentalized flow of ground waters is done according to a direction South-Est/Nord-West. The infiltration leaves percolate only 1% of precipitations.

An effective protection of the plain requires a good knowledge of the geology, hydrochemistry, climate and hydrogeology and their contribution in the transfer of the pollutants. That leads us to better understanding of the origin of ground waters, their flow, their chemistry, their degree of potability and the influence of the anthropic activities.

To prevent this resource to become a limiting factor of the development of the area of Tebessa, a suitable management of the resources available, a planning of the uses is necessary. On the qualitative level, a general diagnosis on the health of the aquifer must be carried out to identify the types of pollutants, their origin (natural or anthropic) as well as the high-risk zones of contamination.

The application of the DRASTIC method with an improvement in the establishment of the thematic maps that leads to a very detailed cartography of the degree of vulnerability pollution of the aquifer. The vulnerable zones cover 39.5% and located within the urban zones of Tebessa city, Hamamet, Morsott and Boulhef-Edyr. In these zones is concentrated a very great number of drillings that provide more than 70 % of the total drinking water needs and already show pollution index. What ever the results obtained, a minimal distance of 100 m should separate the closer perimeters of protection to drillings in the vulnerable zones.

Chemical and bacteriological pollution results from the anthropic actions and geology and occurs mainly in the center of the plain. Deep water (drillings) is chemically polluted, whereas the surface water (well) presents a mixed pollution.

Finally, this study constitutes a first base of work in the objective to deal with the human actions on the quality of our resources of water supply.

Remerciements

Au terme de mon travail, il m'est agréable de remercier toutes les personnes et organismes ou autres qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de cette thèse, en particulier :

Monsieur le Prof. KHERICI Nacer, de la faculté des Sciences de la Terre de l'Université d'Annaba, pour la confiance qu'il m'a témoigné en acceptant ma candidature en tant que doctorant malgré mon âge avancé. Il n'a jamais épargné un effort, à me faire profiter de son expérience, ces critiques constrictives et les remarques subtiles ont été pour moi un encouragement illimité.

Mes remerciements sont adressés à tous les membres de jury d'avoir accepté de me faire la critique de ce travail, en l'occurrence :

Monsieur le Prof. HAMAMI Mounir, de l'Université de Skikda, qui a bien voulu me faire l'honneur de présider le jury, je le remercie pour sa disponibilité et qu'il trouve ici toute ma gratitude.

Monsieur le Prof. OUMEDOUR Rabah, de l'Université de Guelma, d'avoir accepté de juger ce travail et de participer au jury, qu'il me soit ainsi permis de le remercier sincèrement.

Monsieur le Docteur MANSOURI Rachid, de l'Université de Guelma, d'avoir accepté d'examiner et juger ce travail, qu'il trouve ici mes sincères remerciements.

Monsieur le Docteur DERRADJI Fadel, de l'Université d'Annaba, d'avoir accepté d'être membre de jury et de juger cette thèse, je le remercie sincèrement.

Monsieur le Docteur HANI Azzedine, de l'Université d'Annaba, qui ma fait le plaisir de participer au jury et d'examiner ce travail, je le remercie pour sa disponibilité.

A ceux qui ont m'encouragé et m'aide à réaliser ce travail, en particulier :

M^{elle} le Prof. KACHI Djemaa, de l'Université de Picardie, France, pour avoir m'aider à publier mes articles.

Monsieur le Docteur DIB Djelal, du Centre Universitaire Cheikh Larbi-Tebessi, Tebessa pour la correction et la mise en forme de mon premier article.

Aux personnels du laboratoire d'E.P.D.M.I.A et d'hygiène de la wilaya de Tebessa en particulier, Messieurs MAATALLAH et ZAROUG Yacine de m'avoir accompagné sur terrain pour effectuer l'échantillonnage et les analyses au laboratoire.

A tout le personnel de la direction hydraulique de la wilaya de Tebessa, en particulier Messieurs MESSADI Hamid, MOSTEFAOUI Ali, KHOULIF Noureddine, YAHYAOUI El-Hadi et NOUADRIA Abdelhamid (D.S.A) pour la mise en ma disposition les documents disponibles.

A Tous les enseignants de la faculté des sciences de la Terre, département de géologie Université d'Annaba, en particulier ceux qui ont contribuent à ma première formation.

A tous les collègues du département de géologie, Centre Universitaire Cheikh Larbi-Tebessi, Tebessa, précisément à Messieurs GUEFAIFIA Omar et BOUFAA Kamel d'avoir m'aider à réaliser les compagnes piézométriques.

Mes sincères remerciements vont également à mes collègues du département de Génie Civil, Université de Guelma.

Enfin, j'exprime ma plus profonde reconnaissance à toute ma famille pour leur inestimable soutien durant ces années.

KACHI Slimane

A ceux que je ne pourrais jamais remercier assez :

*Mes parents
Mes frères et ma sœur
Ma femme
Mes enfants
.....Ce travail est pour vous.*

TABLE DES MATIERES

Introduction générale et objectif de l'étude.....	01
---	----

Chap.I Généralité et état de reconnaissance

1. Situation géographique.....	04
2. Réseau hydrographique.....	04
3. La couverture végétale.....	04
4. Aperçu géomorphologique.....	05
4.1- Les monts septentrionaux.....	05
4.2- Les monts méridionaux.....	05

Chap.II Aperçu géologique

1. Introduction.....	07
2. Description lithologique et stratigraphique.....	07
3. Tectonique.....	07
3.1- Les phases de l'orogénèse.....	08
3.1.1- La phase fini-lutétienne.....	08
3.1.2- La phase du Miocène inférieur.....	08
3.1.3- La phase du Tortonien.....	08
3.1.4- La phase du Pliocène inférieur.....	08
3.1.5- La phase du Pliocène supérieur.....	08
Conclusion.....	08

Chap.III Hydro-climatologie

1. Introduction.....	10
2. Etude des paramètres climatologiques :	10
2.1- Précipitations.....	10
2.1.1-Variations moyennes mensuelles inter-annuelles des précipitations.....	10
2.1.2-Variation inter-annuelle des précipitations.....	10
2.1.3- Coefficient pluviométrique.....	11
2.2- Température.....	12
2.2.1-Variation moyenne mensuelle inter-annuelle des températures.....	12
2.2.2-Variation inter-annuelle des températures.....	13
2.3- Le vent.....	13
3. Type de climat :	13
3.1- Calcul de l'indice d'aridité de DE MARTONE(1923).....	13
3.1.1- Indice d'aridité mensuel.....	15
3.2- Diagramme Ombrothermique.....	15
4. Bilan hydrique.....	15
4.1- Estimation des paramètres du bilan.....	16
4.1.1- L'évapotranspiration.....	16
4.1.1.1- Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP).....	16
4.1.1.2- Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR).....	17
4.1.2- Calcul de ruissellement (R).....	18
4.1.3- Calcul de l'infiltration (I).....	18
4.1.4- Estimation des réserves facilement utilisable (RFU).....	18
4.2- Etablissement du bilan hydrique.....	19
Conclusion.....	19

Chap.IV. Hydrogéologie

1. Introduction.....	20
2. Géométrie de l'aquifère.....	20
2.1-Prospection géophysique.....	20
2.2- Description lithologique et stratigraphique.....	20
2.3- Epaisseur du remplissage.....	24
2.4- Substratum.....	25
2.5- Echelle des résistivités.....	25
2.5.1- Remplissage du Quaternaire.....	25
2.5.2- Pliocène.....	26
2.5.3- Maestrichtien.....	27
2.5.4- Turonien.....	27
3. Hydrogéologie de la plaine.....	29
3.1- Introduction.....	29
3.2- Identification des différents niveau aquifères.....	29
3.2.1- Le milieu fissuré.....	29
3.2.2- Le milieu poreux.....	30
3.3- Caractéristiques hydrauliques du remplissage.....	30
3.4- Comportement hydrodynamique.....	30
3.4.1- Carte piézométrique.....	30
3.4.2- Conditions d'alimentation.....	31
3.4.3- Sens d'écoulement des eaux souterraines.....	32
3.4.4- Relation oued-nappe.....	32
3.4.5- Relation sources-nappe.....	35
3.5- les grands problèmes d'hydrogéologie.....	36
3.5.1- Structure.....	36
3.5.2- Hydrogéologie.....	36
3.5.2.1- La pluralité des différents niveaux aquifères.....	36
3.5.2.2- L'hétérogénéité de l'aquifère.....	36
3.5.2.3- Système aquifère à nappes empilées.....	36
3.5.2.4- Seuil hydraulique (artésianisme).....	36
3.5.2.5- Structure onduleuse du substratum.....	36
3.5.2.6- Hydrodynamique.....	37
3.5.2.7- Conditions d'alimentation.....	37
3.5.3- Les pertes.....	37
3.5.4- Exploitation.....	37
3.5.5- Pollution.....	37
3.6- Paramètres hydrodynamiques.....	38
3.6.1- La transmissivité.....	38
3.6.1.1- Carte de transmissivité.....	38
3.6.2- La perméabilité.....	39
3.6.2.1- Carte de perméabilité.....	39
3.7- Estimation des paramètres hydrodynamiques par sondages électriques.....	42
3.7.1- Modèle de transmissivité et perméabilité.....	42
3.7.1.1- La résistance transversale.....	42
3.7.1.2- La résistivité électriques des roches et l'effet des sels.....	43
3.7.1.3- Relation résistance transversale et transmissivité.....	44
3.7.1.4- Etablissement du modèle de transmissivité.....	46
3.7.2- La porosité.....	51
3.7.2.1- La loi d'Archie.....	51
3.7.2.2- Etablissement de la carte de la porosité totale.....	52
Conclusion.....	53

Chap.V. Hydrochimie

1. Introduction.....	55
2. Chimie des eaux souterraines de la plaine.....	55
2.1- Origine des eaux.....	55
2.2- Faciès chimique.....	55
2.2.1- Eaux des forages (profondes).....	55
2.2.1.1- Interprétation des données chimiques.....	55
2.2.1.2- Interprétation des données physiques.....	57
2.2.1.3- Relation faciès chimique et lithologie de l'aquifère.....	59
2.2.1.4- Norme de potabilité.....	59
2.2.2- Eaux des puits (faible profondeur).....	60
2.2.2.1- Les paramètres physiques.....	61
a) Campagne d'échantillonnage(avril, 1993).....	61
b) Campagne d'échantillonnage(mai, 1998).....	64
c) Campagne d'échantillonnage(mai, 2002).....	67
2.2.2.2- Les paramètres chimiques.....	70
1. Introduction.....	70
2. Faciès chimique (formule ionique).....	71
3. Norme de potabilité.....	72
4. Cartographie des éléments chimiques.....	75
4.1- Carte de Calcium.....	75
4.2- Carte de Sodium.....	76
4.3- Carte des Bicarbonates.....	76
4.4- Carte des Chlorures.....	76
4.5- Carte des Sulfates.....	76
4.6- Carte des Nitrates.....	76
Conclusion.....	80

Chap.VI. Evaluation de la pollution et de la vulnérabilité

1. Introduction.....	81
2. Pollutions.....	81
2.1- Définition.....	81
2.2- Normes de potabilités.....	81
2.2.1- Paramètres chimiques naturels.....	82
2.2.2- Paramètres concernant des substances indésirables.....	82
2.2.3- Paramètres concernant des substances toxiques.....	82
2.2.4- Paramètres biologiques.....	82
2.3- Classification de la pollution.....	82
2.3.1- En fonction de l'origine de la pollution.....	82
2.3.2- En fonction de la nature des polluants.....	83
2.3.3- En fonction de la répartition géographique.....	83
2.3.4- En fonction de la répartition dans le temps.....	83
2.4- Principaux sources de pollution dans la plaine.....	83
2.4.1- La pollution domestique.....	84
2.4.2- La pollution industrielle.....	84
2.4.3- La pollution agricole.....	85
2.4.4- La pollution géologique.....	85
2.5- Evaluation de la pollution.....	86
2.5.1- Introduction.....	86
2.5.2- Paramètres indésirables.....	86
2.5.2.1- Ammonium.....	86
2.5.2.2- Les nitrates.....	87
2.5.2.3- Fluor.....	88
2.5.2.4- Fer.....	90
2.5.2.5- Zinc et Plomb.....	90
2.5.3- Les paramètres physiques.....	91
2.5.3.1- La salinité.....	91
2.5.3.2- La température.....	94

2.5.3.3- Acidité.....	96
2.5.3.4- Dureté	96
2.5.4- Les paramètres microbiologiques.....	99
2.5.4.1- Introduction.....	99
2.5.4.2- Choix des sites de prélèvements	100
2.5.4.3- Interprétation des résultats.....	100
2.5.4.4- Corrélation entre les coliformes et les teneurs en nitrates	104
Conclusion.....	105
2.5.5- Les paramètres concernant les pesticides.....	105
2.5.6- Répartition des éléments chimiques selon la profondeur de l'eau.....	106
2.5.6.1- Les éléments majeurs.....	106
2.5.6.2- Les éléments indésirables.....	109
2.6- Mécanismes de transport des polluants.....	111
2.6.1- Introduction.....	111
2.6.2- Les principes de l'écoulement souterrain.....	111
2.6.3- Ecoulement souterrain sous l'influence d'un pompage.....	112
2.6.4- Les équations de l'écoulement souterrain en milieu poreux.....	112
2.6.5- Le transport du soluté en milieu poreux.....	113
2.6.5.1- Mécanismes régissant le transfert de masse.....	113
2.6.5.2- Les paramètres influençant la dispersion.....	114
2.6.6- Essais de traçage en eau souterraine.....	115
2.6.6.1- Introduction.....	115
2.6.6.2- Réalisation d'un essai de traceur en milieu poreux.....	115
2.6.6.3- Méthode au chlorure de sodium.....	116
1. Site d'El-Hamamet.....	116
1.1- Régime d'écoulement.....	116
1.2- Mode d'injection.....	116
1.3- Echantillonnage.....	116
1.4- Résultats des analyses du traceur.....	116
1.5- Interprétation.....	116
2. Site de Boulhef-edyr.....	121
2.1- Régime d'écoulement.....	121
2.2- Mode d'injection.....	121
2.3- Echantillonnage.....	121
2.4- Résultats et analyse du traceur.....	121
2.5- Interprétation.....	121
Conclusion.....	124
2.7- Défenses naturelles contre les polluants.....	124
2.7.1- Recouvrement argileux de la plaine.....	125
2.8- Evaluation de la vulnérabilité.....	126
2.8.1- Concept de vulnérabilité.....	126
2.8.2- Les méthodes de vulnérabilité.....	126
2.8.2.1- EPIK.....	127
2.8.2.2- RISK.....	127
2.8.2.3- GOD.....	128
2.8.2.4- DRASTIC.....	128
2.8.2.4.1- Principe de la méthode DRASTIC.....	128
2.8.2.4.2- Acquisition des données.....	130
2.8.2.4.3- Elaboration des cartes thématiques des sept paramètres.....	130
2.8.2.4.4- Carte de vulnérabilité.....	132
2.8.2.4.5- Carte de vulnérabilité relative aux pesticides.....	132
Conclusion.....	133

Chap.VII. Périmètre de protection des ouvrages de captage

1. Introduction.....	139
2. Objectif de la protection du champ captant.....	139
3. Détermination des périmètres de protection en milieu granulaire.....	140

3.1- Méthodologie.....	140
3.1.1- Approche cartographique.....	140
3.1.2- Approche empirique.....	140
3.1.2.1- Méthode de Rehse.....	140
3.1.2.2- Méthode géométrique.....	141
3.1.3- Approche graphique (méthode d'Albinet et al, 1972).....	141
3.1.4- Approche hydrodynamique.....	141
3.1.4.1- Méthodes volumiques.....	141
3.1.4.2- Méthodes analytiques.....	142
3.1.4.3- Méthode de Wyssling.....	143
3.1.4.4- Méthodes numériques.....	144
3.1.5- Approche mixte.....	145
3.1.5.1- Méthode 3A2E.....	145
3.2- Les périmètres de protection.....	146
3.2.1- Définition.....	146
3.2.1.1- Périmètre de protection immédiate.....	146
3.2.1.2- Périmètre de protection rapproché.....	147
3.2.1.3- Le périmètre de protection éloigné.....	147
3.2.2- Délimitation des périmètres de protection.....	148
3.2.2.1- Choix des méthodes.....	148
3.2.2.2- Périmètre de protection immédiat.....	148
3.2.2.3- Périmètre de protection rapproché.....	148
3.2.3.4- Périmètre de protection éloigné.....	149
Conclusion.....	154
 Conclusions générales et perspectives.....	 156
Bibliographie.....	160

Introduction générale et objectif de l'étude.

Le taux de ressources en eau naturelle par habitant, exprime la richesse ou la rareté relative de l'eau d'un pays. En Algérie le potentiel est de 500 m³/hab/an. Il est bien en dessous du seuil (1000 m³/hab/an) communément admis comme seuil critique indiquant l'apparition de pénuries et de crise latente d'eau.

Les ressources en eau naturelle par habitant à l'échelle du pays se situeraient autour de 720 m³/hab./an vers l'horizon 2020. A cette date 14 millions d'habitants, soit 35 % de la population totale du pays, disposeraient de moins de 500 m³/hab/an. Ces indicateurs montrent que la pénurie chronique d'eau est une donnée structurelle dont il faut tenir compte, à l'avenir, dans les politiques et les stratégies de gestion des ressources en eau.

Dans de nombreux pays en développement, le problème primordial de trouver de l'eau en quantité suffisante a eu tendance à se minimiser et même à faire oublier celui de la qualité.

Nous découvrons la valeur de l'eau, que ce n'est pas un bien inépuisable, et de plus c'est un bien fragile qui intègre toutes les agressions que nous faisons subir à notre environnement. En effet, celle-ci suit un cycle et elle est présente partout : dans l'atmosphère, sur terre et dans les océans. Nous devons donc, éviter de l'exploiter et plutôt la gérer et la protéger. De ce fait, nous devons revoir complètement notre façon d'utiliser certains produits comme les nitrates et les produits phytosanitaires et notre façon d'utiliser l'eau elle-même.

C'est pourquoi une stratégie globale de protection et de gestion des ressources en eau potable apparaît comme une des responsabilités primordiales des collectivités qui se doivent délivrer une eau conforme aux normes sanitaires. Bien que l'eau puisse être traitée par différentes filières avant d'être distribuée, il apparaît important de protéger au mieux les ressources (sources, puits, forages, etc.) de toute pollution extérieure.

Pour la nappe alluviale de Tebessa-Morsott, nous savons qu'elle est fortement sollicitée et alimente actuellement plusieurs centres urbains d'une population d'environ de 120000 habitants représentant 50% de la population de la Wilaya, avec un débit mobilisé d'environ de 500 l/s. A travers ces chiffres, nous pouvons dire que l'importance de la nappe n'est pas à démonter et constitue la base de la stratégie de développement économique et sociale de cette région.

Actuellement, elle se trouve très menacée par de nombreux foyers de pollution en particulier les rejets des eaux domestiques et des petites industries qui sont déversés dans la nappe (juste en aval des zones urbaines) sans traitement préalable et en dehors de toute mesure de protection de l'environnement et des ressources en eau. L'utilité de l'évaluation et de la prévision des risques potentiels découlant du milieu naturel est évident surtout lorsqu'on sait que la profondeur de l'eau ne dépasse pas quelques mètres au centre de la plaine.

Des fortes concentrations en nitrate variant de 48 à 96 mg/l ont été déjà observées dans la plaine depuis les premières analyses effectuées par la Direction de l'hydraulique en 1975/76. Récemment, des teneurs très élevées en certains éléments polluants en particulier en nitrate, fluor et ammonium sont enregistrées.

L'exploitation intensive, d'autant plus intensive en période sèche, a provoqué le tarissement de la source de Ain Chabro et récemment la source thermale d'El-Hamamet, créant un gradient hydraulique fort qui contribue à une large dispersion des polluants et le phénomène devient difficilement contrôlable ;

Dans le cadre du projet de développement agricole (F.N.R.D.A), plus de 60 forages dont la profondeur varie de 60 à 100 m ont été réalisés dans la plaine. Le sol est composé par des alluvions pauvres en matières organiques d'où une utilisation intensive des engrais pour maintenir la productivité du sol.

Devant cette situation qui évolue de jours en jours, il faut d'ores et déjà prendre toutes les mesures successibles de garantir une bonne qualité des eaux satisfaisant les besoins futurs. En absence de toute mesure de protection, l'approche préventive, par la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott est incontestable.

Ces préoccupations impliquent la réalisation d'un diagnostic générale sur l'état de santé de la nappe et les causes et voies de contamination. Ceci sous-entend que les principales sources et le mode de dispersion des polluants soient identifiés ainsi que les zones sensibles aux polluants de surfaces.

Diverses méthodes de vulnérabilités existent, dont la plus utilisées est la méthode DRASTIC. Elle est proposée par le sous-groupe PCSM (Point Count System Model) qui a été mise au point par Aller *et al.* (1985), dont l'objectif est d'évaluer les risques de pollution des eaux souterraines.

En effet, la protection efficace de cette ressource requiert la bonne connaissance de la géologie, hydro-climatologie, hydrogéologie et hydrochimie de la nappe.

Le premier chapitre est consacré au rassemblement des données concernant la zone d'étude. Il s'agit en l'occurrence de la situation géographique, du réseau hydrographique et des propriétés géomorphologiques.

Le deuxième chapitre traite de la géologie du bassin d'effondrement de Tebessa-Morsott qui détermine la structure et la dimension du milieu aquifère et vise aussi à une meilleure utilisation des connaissances géologiques dans la protection des ressources en eaux souterraines.

Le troisième chapitre est consacré à l'analyse des paramètres hydro-climatiques de la zone d'étude pour aboutir à l'établissement du bilan hydrique.

Le quatrième chapitre traite de l'hydrogéologie de la plaine. Pour se faire la géométrie de l'aquifère et la lithologie du remplissage alluvionnaire a été présenté. Ainsi que l'utilisation des données géophysiques pour l'évaluation de certains paramètres hydrogéologique en l'occurrence, la transmissivité, la perméabilité et la porosité totale. Aussi les grands problèmes d'hydrogéologie de la plaine ont été évoqués.

Dans le chapitre cinq sont présentées l'interprétation d'un ensemble de données hydrochimiques anciennes et d'autres mesurées récemment sur le terrain et au laboratoire.

L'évaluation de la pollution et de la vulnérabilité sont présentées ainsi que les méthodes de vulnérabilité dans le chapitre 6.

Le chapitre sept résume les différentes méthodes de délimitation des périmètres de protection des ouvrages de captages et leurs dimensions pour le cas de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott.

Enfin, des perspectives à ce travail seront évoquées en conclusion, en terme d'utilisation futur des données acquises, pour la modélisation ou dans un objectif d'aménagement du territoire en vu de protéger la nappe alluviale de Tebessa-Morsott.

Chap. I. Généralités et état de reconnaissance

1- Situation géographique (fig.1) :

Tebessa est une ville très ancienne, connue sous le nom de Thevest, durant l'époque romaine. Elle est située à l'extrémité de l'Est Algérien, faisant partie des frontières Algéro-Tunisienne, à environ 240 Km au Sud de Annaba, à 200 Km au Sud-Est de Constantine et à 90 Km au Nord de Bir-el Ater.

La plaine de Tebessa-Morsott fait partie du bassin versant de la Medjerda et du sous bassin d'oued Mellègue, dont l'altitude moyenne varie de 750 m au Nord et 900 m au Sud. Elle est allongée grossièrement Nord-West/Sud-Est et correspond à une vaste dépression fermée d'une superficie d'environ de 600 Km². Elle est délimitée au Nord par Dj. Zitouna, au Sud par Dj. Tazbent, à l'Ouest par Dj. Matloug et à l'Est par Dj. Djébissa et Bouramane.

Exceptionnellement, nous n'y retrouvons pas de chott comme dans la majorité des autres bassins. Seul, l'oued qui draine les eaux de la plaine, forme au Nord de Morsott de petites zones marécageuses.

Sa population estimée à 120 000 habitants se caractérise par son extrême jeunesse et son fort taux d'urbanisation. Tebessa est le chef lieu de la wilaya de Tebessa dont la population est estimée à près de 520 000 habitants. La wilaya de Tebessa couvre une superficie de 13 396 km². La majorité de la population est concentrée dans la ville de Tebessa reliée aux zones urbaines de Bekaria, Boulhef-Eddy, Hamamet, Bir D'heb, Ain Foda et Morsott.

Tebessa est une région à vocation agropastorale célèbre par la qualité de son mouton, la majesté de son cheval et la splendeur de ses tapis. Foyer artisanal, Tebessa est aussi un important centre commercial et agricole et possède beaucoup de ressources, minières de notoriété mondiale (fer et phosphates), et forestières. Les cultures céréales et maraîchères prédominent. Morsott au Nord, Hamamet à l'Ouest et Bekaria au Sud-Est représentent les trois centres agricoles les plus importants.

Tebessa, la ville natale de la grande figure Cheikh Larbi Télessi dont la mémoire est toujours honorée, préservée, restaurée et classée, n'échappe pas, loin s'en faut, à la modernité. Malgré l'ancrage de son glorieux passé, Tebessa s'est résolument tournée vers l'avenir.

2- Réseau hydrographique:

Les eaux de surfaces de la plaine de Tebessa–Morsott sont drainées par oued El-kébir qui prend le nom d'Oued Ksob, après sa confluence avec oued Chabro. La majorité de ces cours d'eaux sont caractérisés par un écoulement temporaire lié aux pluies irrégulières de la région (fig.1).

3- La couverture végétale:

La couverture végétale est considérée comme un facteur primordial pour la protection des sols contre l'érosion et la désertification. Dans la plaine de Tebessa-Morsott, elle est pratiquement inexistante ou détériorée. On note la présence d'un couvert végétal discontinu où se développe sur les sols calcaires, le pin avec le genévrier et localement le chêne qui constitue de très beaux forêts, malheureusement est localement exploité.

Sur la plaine, les alluvions ne permettent que des récoltes de céréales, par contre on note la présence de figuier de barbarie, par ailleurs une végétation de saison envahit les sols salés du centre de la plaine.

4- Aperçu géomorphologique (fig.2):

La plaine de Tebessa-Morsott correspond à un grand fossé d'effondrement qui s'élève à une altitude de 800 m, entourée de part et d'autre par deux grands ensembles de masses calcaires, séparées par des dépressions.

L'évolution morphologique dans cette région a conduit à un façonnement de reliefs typique pour un terrain sédimentaire, caractérisé par un contraste lithologique qui se matérialise par l'opposition des pentes très faibles au centre de la plaine (2%), et les pentes fortes aux niveaux des bordures (18%). Ces reliefs sont formés d'un ensemble de synclinaux et anticlinaux à faciès prédominants de calcaires et de marnes qui du point de vue stratigraphique datent du Crétacé, de l'Aptien jusqu'au Maestrichtien et paléogène avec la mise en place des formations triasiques.

4.1- Les monts septentrionaux:

Le passage des hautes plaines de Mellègue aux monts de Tebessa se manifeste par le resserrement des plaines et par l'agrégation 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.

4.2- Les monts méridionaux:

Au sud, le fossé de Ain Chabro tranche les monts de Nememcha, interrompant les formes des reliefs qui possédaient, auparavant une certaine symétrie.

Le relief devient de plus en plus complexe à l'Est de Dj.Doukkane, une barrière orientée de l'Ouest vers l'Est avant de s'incliner vers le Nord-Est où elle ferme la plaine de Tebessa. Cette barrière présente en petits massifs tels que Dj.Anouel, Dj.Azmor, Dj.Bouramane et Dj.Djebissa.

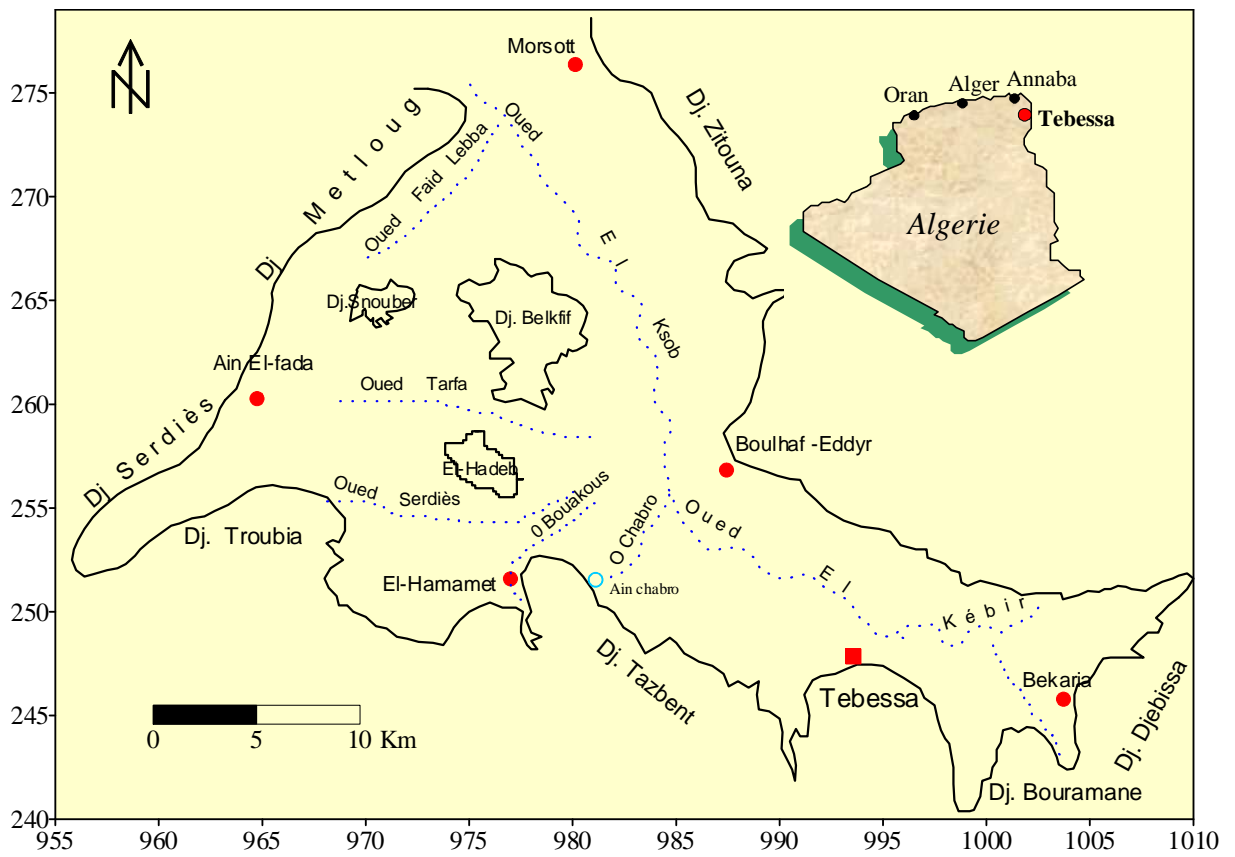


Fig.1. Situation géographique et réseau hydrographique de la plaine de Tebessa-Morsott.

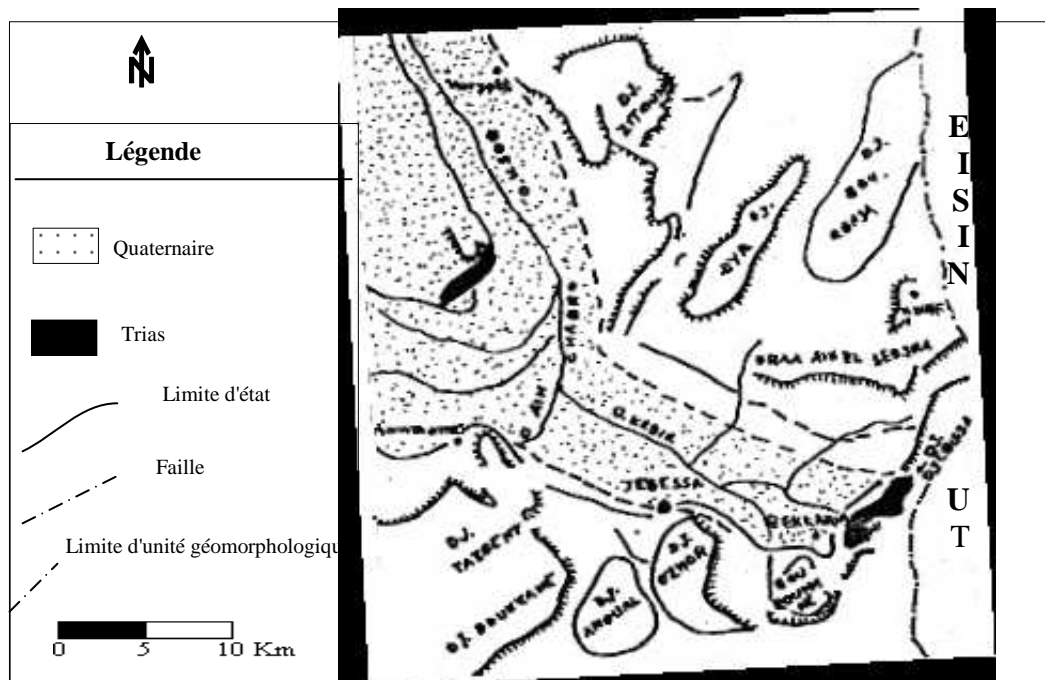


Fig.2. Croquis géomorphologique du bassin d'effondrement de Tebessa-Morsott (d'après F.Thomas, 1974)

Chap.II. Aperçu géologique

1- Introduction :

La géologie est un moyen d'investigation très utile en hydrogéologie car elle permet d'identifier les différents niveaux stratigraphiques susceptibles d'être aquifère et de suivre leur évolution dans l'espace de terrain d'étude.

Le bassin de Tebessa-Morsott résulte de l'effondrement des formations Crétacées et Eocènes avec, comblement progressif par des sédiments détritiques d'origine Mio-plio-quadernaire. Cette sédimentation s'est faite principalement depuis les bordures escarpées (calcaires, marno-calcaires, marnes et grès). Un grano-classement s'est produit depuis les bordures vers l'axe de la plaine. En bordures, on rencontre de gros cailloutis, des galets de calcaire, au centre les limons récents argileux très fins des oueds El-Kébir et Ksob.

Du point de vu hydrogéologique, on peut distinguer deux types de milieux:

- Un milieu à porosité d'interstice, composé par des sables, argiles et graviers constitue généralement les nappes d'eaux de faible profondeur et occupe le centre de la plaine;
- Un milieu fissuré concerne les formations carbonatées des bordures, constitue les nappes profondes.

2- Description lithologique et stratigraphique (fig.3):

La description lithologique des principaux faciès caractérisant la plaine de Tebessa-Morsott montre:

- Une formation triasique sous forme de diapir disloquant les formations sus-jacentes, affleurant en bordure du bassin et au niveau de la zone de Bekaria (Dj.Djebissa), Bir D'heb (Dj.Bekefif), Dj. Hameimet et au Nord de Morsott. Cette formation a une grande importance sur la salinité de la nappe.
- Une formation carbonatée représentée par d'importantes couches de calcaires fissurées et des marnes d'âge Crétacé. Cette formation est très nette au niveau des bordures de la plaine.
- Un important dépôt alluvionnaire d'âge Mio-plio-quadernaire (sables, argiles, limons et graviers) qui occupe la surface de toute la plaine et surtout au piedmont des reliefs accidentés en discordance avec les formations précédentes.

Enfin, une carte regroupant les principaux faciès géologique du bassin d'effondrement de Tebessa-Morsott a été produite à partir des cartes géologiques de Tebessa, Morsott et Meskiana.

3- Tectonique (fig.4):

La plaine de Tebessa-Morsott correspond à un bassin de sédimentation modérément subsident (W.M.Kowalski et al, 1997; G.Dubourdiou et G.Durozoy, 1950). C'est une fosse d'origine tectonique qui s'est formée au Tertiaire et au Quadernaire dans laquelle sont accumulées des formations détritiques, reposant sur un substratum marneux au centre de la plaine et sur les calcaires aux bordures.

Le fossé d'effondrement de Tebessa est la conséquence des mouvements tectoniques qui a subi cinq différentes phases d'origine Alpine étant responsables de la formation des grabens et des horsts, ainsi que des structures plissées (W.M.Kowalski et al, 1997).

3.1- Les phases de l'orogénèse :

3.1.1- La phase fini-lutétienne :

Avec une contrainte maximale N330°E, se manifestait par des plis de direction Atlasienne N50°-60°E, bien représentés sur les cartes géologiques de la Meskiana (D.Kuscer et al, 1985), de Morsott (J.L.Bles, J.J.Fleury, 1970) et d'El-Aouinet (S.Dozet et al, 1985), mais moins nets sur celle de Tebessa (G.Durozoy, 1956).

3.1.2- La phase du Miocène inférieur :

Responsable de la formation du bassin d'effondrement d'El-ma-Labiod et celui de Kasserine-Foussana en Tunisie.

3.1.3- La phase du Tortonien :

Responsable du premier épisode de l'effondrement du secteur d'El-Aouinet, Sidi-Yahya. Elle se manifeste sous forme de décrochement et de failles verticales. Il est responsable du diapirisme au Sud du Dj.Belekfif-Hamamet, et dans la zone de Boukhadra.

3.1.4- La phase du pliocène inférieur :

Avec une contrainte maximale N90°-135°E, anticlinal de Bled Tebaga, synclinal de Draa Snouber, anticlinal de Bir-Salem et repliement de l'anticlinal Fini-lutétien du Bouroumane.

3.1.5- La phase du pliocène supérieur :

C'est la plus active, durant laquelle des structures plissées, plus récentes que le fossé de Morsott, se sont produites. Il s'agit de l'anticlinal de Dj.Belekfif, le synclinal de Faïdh et Obiz et l'anticlinal d'oued Annaba. Ces plis orientés, N160°-170°E, ont une contrainte maximale de N80°E, dont la composante dextre est responsable de l'effondrement du fossé de Tebessa. Cette composante qui a provoqué le diapirisme au niveau de Dj.Djebissa, s'est effondrée dans le fossé de Tebessa.

Conclusion:

En faisant le point sur les principaux faciès géologiques, nous pouvons retenir deux milieux du point de vue hydrogéologique: le premier à porosité de fissure caractérisant les formations calcaires du Maestrichtien, Turonien et Eocène, le deuxième est de perméabilité d'interstice concerne les formations de la série Mio-plio-quadernaire.

Les différentes phases tectoniques ont donné une structure très faillée à la plaine et ont mis en évidence plusieurs fossés (El-Hamamet, Tebessa ville, Bekaria et Morsott) au sein même du grand fossé d'effondrement de Tebessa-Morsott, posant un problème de continuité ou de communication de la nappe alluviale pour un mouvement simple des eaux souterraines.

Enfin, la tectonique et la structure du bassin ainsi les formations du Crétacé aux bordures et du Mio-plio-quadernaire au centre ont fait que la plaine Tebessa-Morsott est considérée comme un des grands réservoirs en eaux souterraines dans la région.

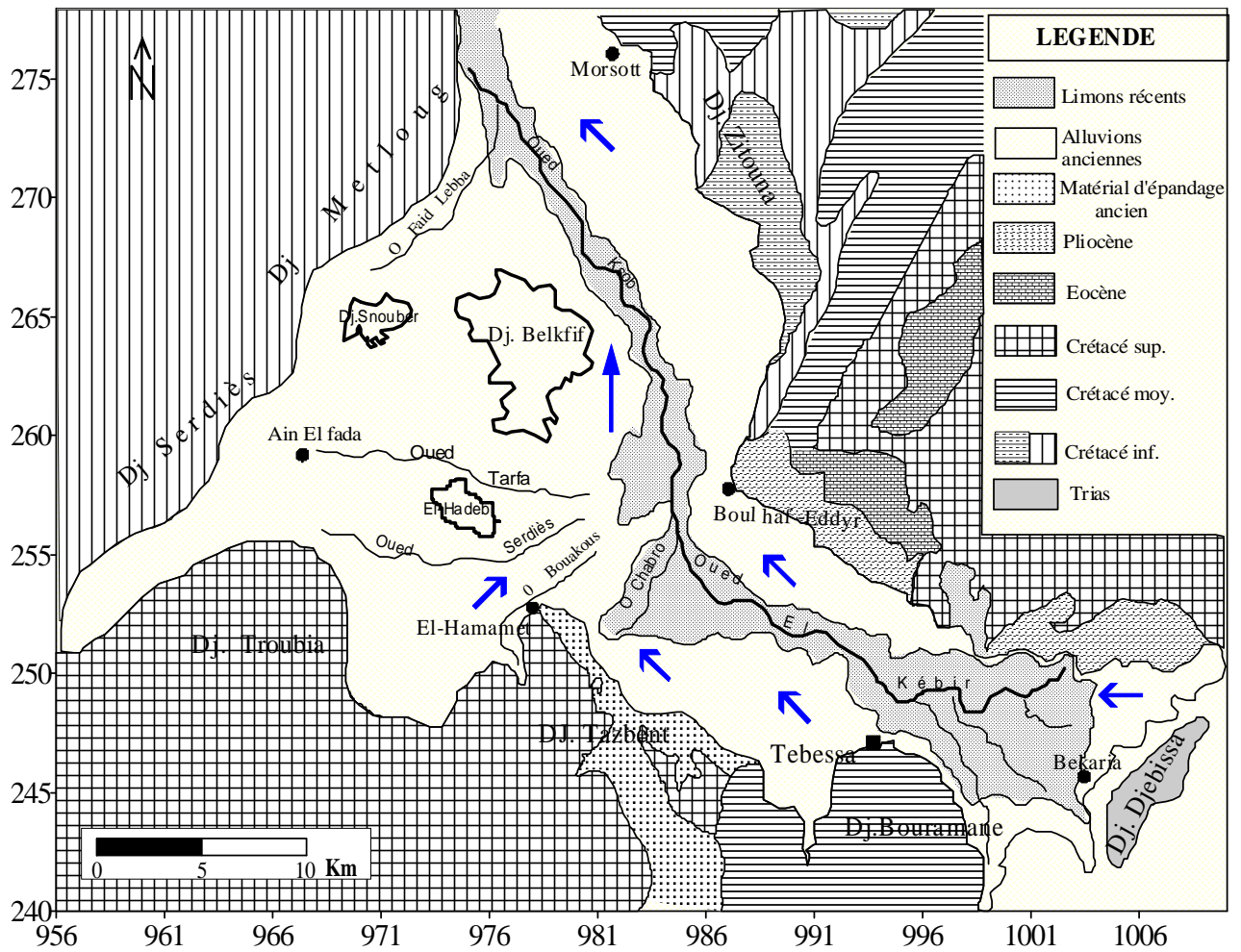


Fig.3. Cadre géologique du bassin d'effondrement de Tebessa-Morsott

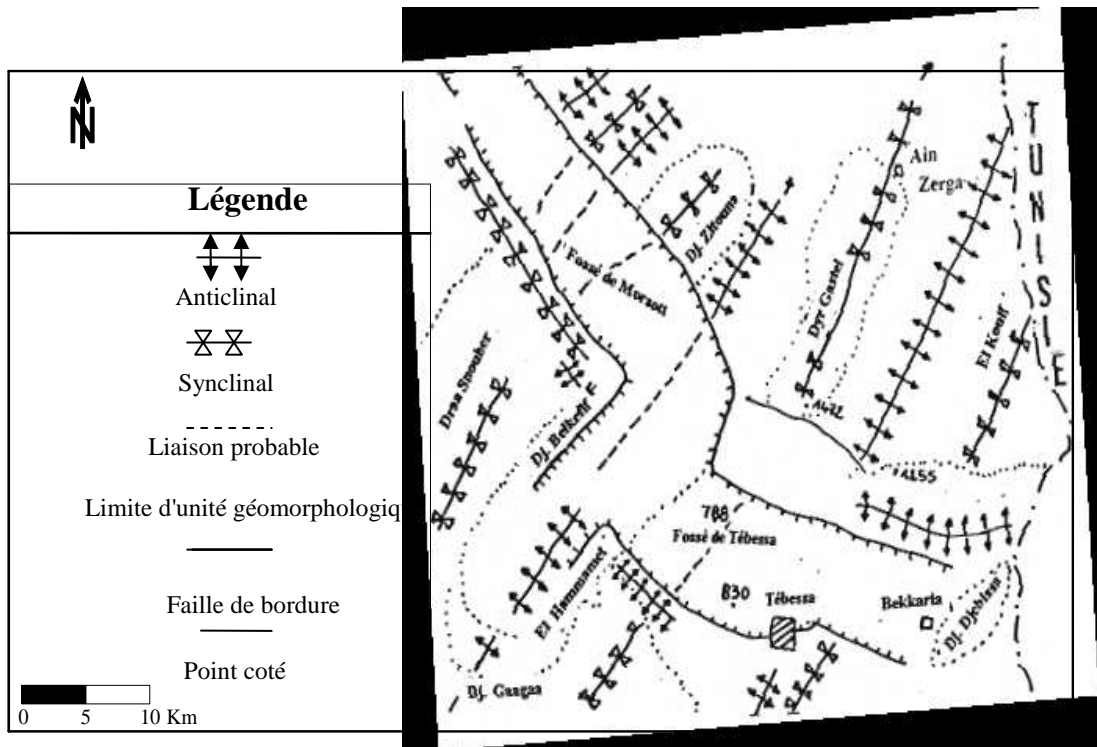


Fig.4. Esquisse tectonique du fossé d'effondrement de Tebessa-Morsott (W.M.Kowalski et al.1997)

Chap.III. Hydro-climatologie

1- Introduction:

L'Algérie du fait de sa situation géographique se caractérise par trois type de climat distinct répartie de la manière suivante: climat méditerranéen au Nord, semi-aride au centre (hauts plateaux) et aride (le grand Sahara).

La plaine de Tebessa-Morsott fait partie du second type. Dans ce qui suit, nous allons présenter les caractéristiques hydroclimatiques du bassin qui jouent un rôle important dans la connaissance de ses ressources en eaux souterraines, de surfaces et les processus d'alimentation. Leurs variations influent directement sur le potentiel hydrique et la qualité chimiques des eaux. Elle est dotée de trois stations pluviométriques de contrôle localisées à El-Hamamet, Tebessa ville et Bekaria. Mais seule de Tebessa présente des données d'observation sans lacune.

L'étude repose sur l'interprétation des données des paramètres climatiques mesurés au niveau de la station météorologique de Tebessa (aéroport) durant une période bien définie (1972-2001).

2- Etude des paramètres climatologiques :

2.1- Précipitations :

L'étude pluviométrique présente un intérêt considérable en hydroclimatologie car elle nous permet d'évaluer la lame d'eau tombée sur l'ensemble du bassin versant et son influence sur l'alimentation et le changement de comportement hydrodynamique des nappes aquifères.

2.1.1- Variations moyennes mensuelles inter-annuelles des précipitations (fig.5):

La courbe de variation des précipitations moyennes mensuelles sur une période de 29 ans allant de 1972 à 2001 montre que:

- Le mois le plus arrosé est le mois de mars avec une précipitation moyenne mensuelle de 42.56 mm.
- Le mois le moins arrosé est le mois de juillet avec une précipitation moyenne mensuelle de 11.46 mm.
- La hauteur moyenne mensuelle est de 362.81 mm.

2.1.2- Variation inter-annuelle des précipitations (fig.6):

L'analyse de la courbe de variation inter-annuelle des précipitations sur une période de 29 ans (1972 à 2001) montre une grande différence entre l'année la plus arrosée (1972/1973) avec 625 mm et l'année la plus sèche (1996/1997) avec 207mm. La précipitation moyenne annuelle est de l'ordre de 362.81mm.

Fig.5 : Variation moyenne mensuelle inter-annuelle des précipitations à la station de Tebessa (1972/2001)

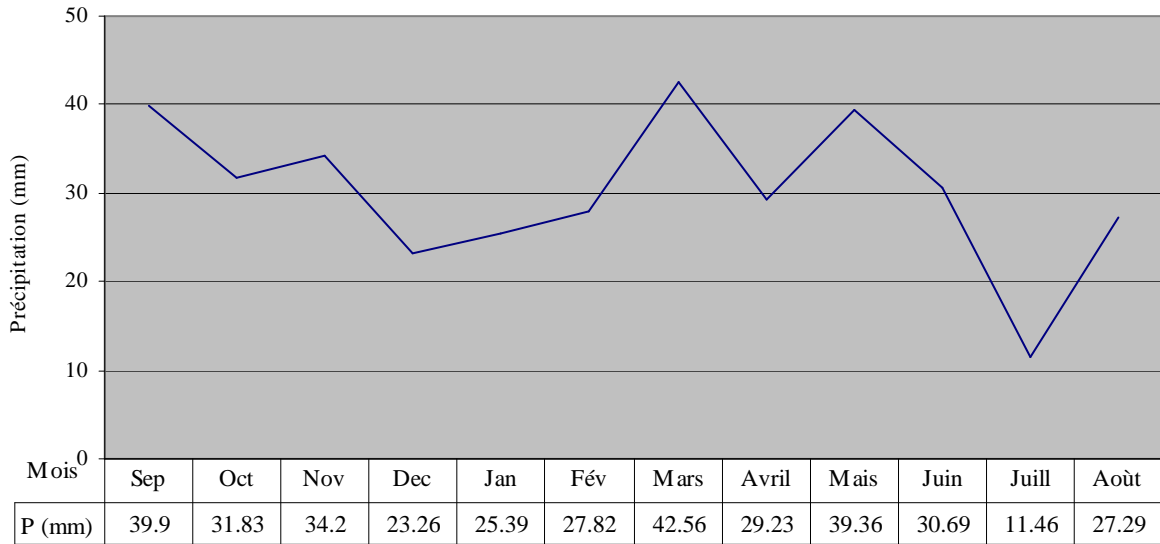
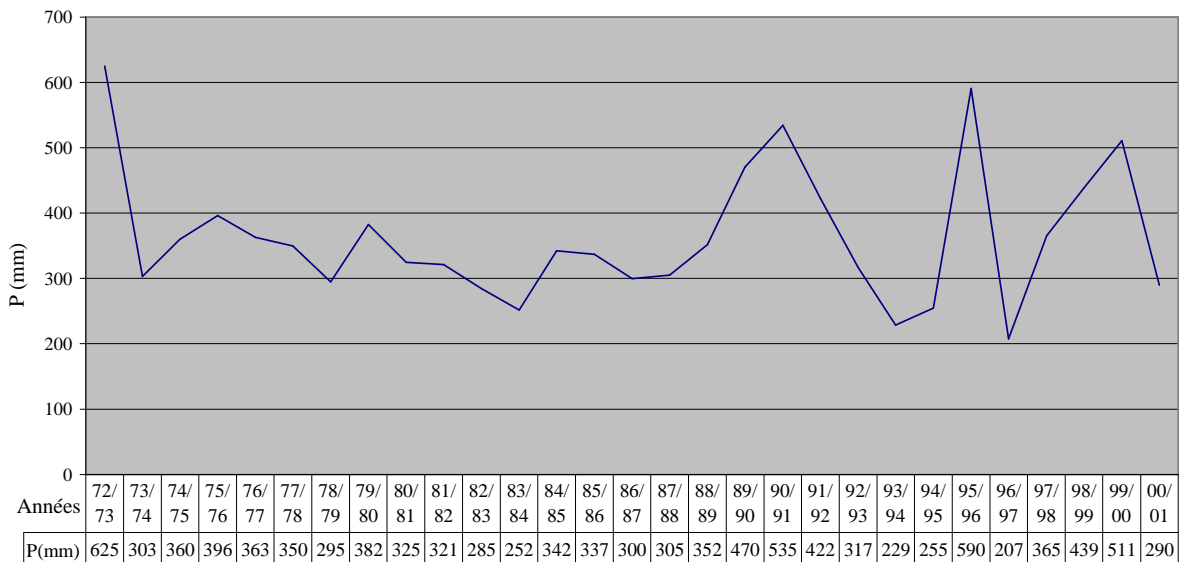


Fig.6. Variation inter-annuelle des précipitations à la station de Tebessa (1972/2001)



2.1.3- Coefficient pluviométrique (fig.7) :

Le coefficient pluviométrique joue un rôle important dans la détermination des années excédentaires et déficitaires. Il est défini comme le rapport de la pluviométrie d'une année donnée à la pluviométrie moyenne de la période considérée:

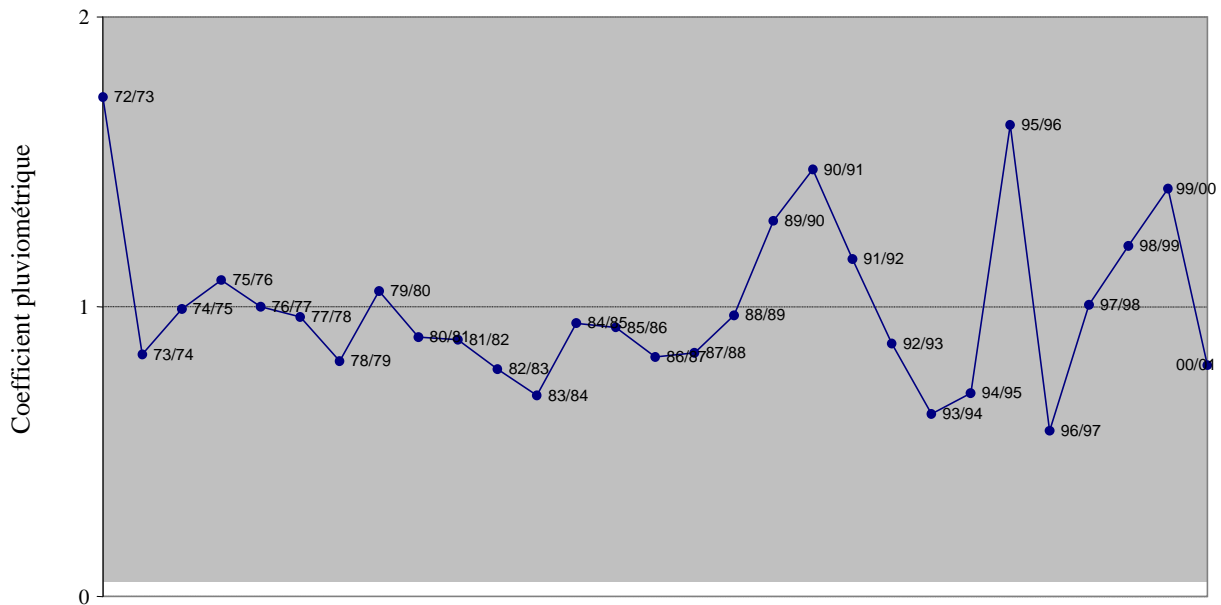
$$H = P_a/P_m.$$

H : coefficient pluviométrique, P_a : pluviométrie de l'année considérée, P_m : pluviométrie moyenne.

Si $H > 1$: l'année est excédentaire,
 $H < 1$: l'année est déficitaire.

D'après ce paramètre, on constate que pour une période d'observation de 29 ans, on compte uniquement 9 années excédentaires dont la majorité sont enregistrées à partir de l'année 1989/90.

Fig.7. Variation du coefficient pluviométrique à la station de Tebessa (1972/2001)



2.2- Température :

La température est un élément très important du climat et joue un rôle déterminant pour le bilan hydrique.

2.2.1- Variation moyenne mensuelle inter-annuelle des températures (fig.8):

La courbe représentative des variations de températures moyennes mensuelles inter-annuelles, sur une période de 29 ans (19972/2001) montre que:

- Le mois le plus froid est le mois de janvier avec une température moyenne mensuelle de (6.52° C) ;
- Le mois le plus chaud est le mois de juillet avec une température moyenne mensuelle de (25.71° C) ;
- La moyenne mensuelle est de 15.57° C.

2.2.2- Variation inter-annuelle des températures (fig.9):

L'analyse de la courbe de variations inter-annuelles des températures montre que :

- L'année la plus froide est l'année de 1974/1975 avec une température moyenne annuelle de (13.14° C) ;
- L'année la plus chaude est l'année de 2000/2001 avec une température moyenne annuelle de (19.08 °C) ;
- La moyenne annuelle thermique est de 15.57° C.

2.3- Le vent :

Les vents sont caractérisés par leurs directions, leurs vitesses et leurs intensités:

- Les vents de directions West/Nord-West sont responsables de la pluviométrie ;
- Les vents de directions Sud-Nord ou le siroco engendrent une forte évapotranspiration et une sécheresse abaissant l'humidité.

3. Type de climat :

3.1- Calcul de l'indice d'aridité de DE MARTONE (1923):

L'indice d'aridité permet d'identifier le type de climat dominant, il dépend essentiellement de la précipitation moyenne annuelle et de la température moyenne annuelle. Il est calculé d'après la relation suivante:

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

où

I : indice d'aridité

P : précipitation moyenne annuelle en mm.

T : température moyenne annuelle en °C

L'application numérique:

$$P = 362.81 \text{ mm}$$

$$T = 15.57 \text{ °C}$$

$$I = 14.18$$

Suivant les valeurs de l'indice d'aridité, DE MARTONE a établie la classification suivante:

- I = 5: climat hyperaride
- 5 < I < 7,5 : climat désertique
- 7,5 < I < 10 : climat steppique
- 10 < I < 20 : climat semi-aride
- 20 < I < 30 : climat tempéré

On peut déduire facilement que le climat dominant dans la plaine de Tebessa-Morsott est de type semi-aride.

Fig.8. Variation moyenne mensuelle inter-annuelle des températures à la station de Tebessa (1972/2001)

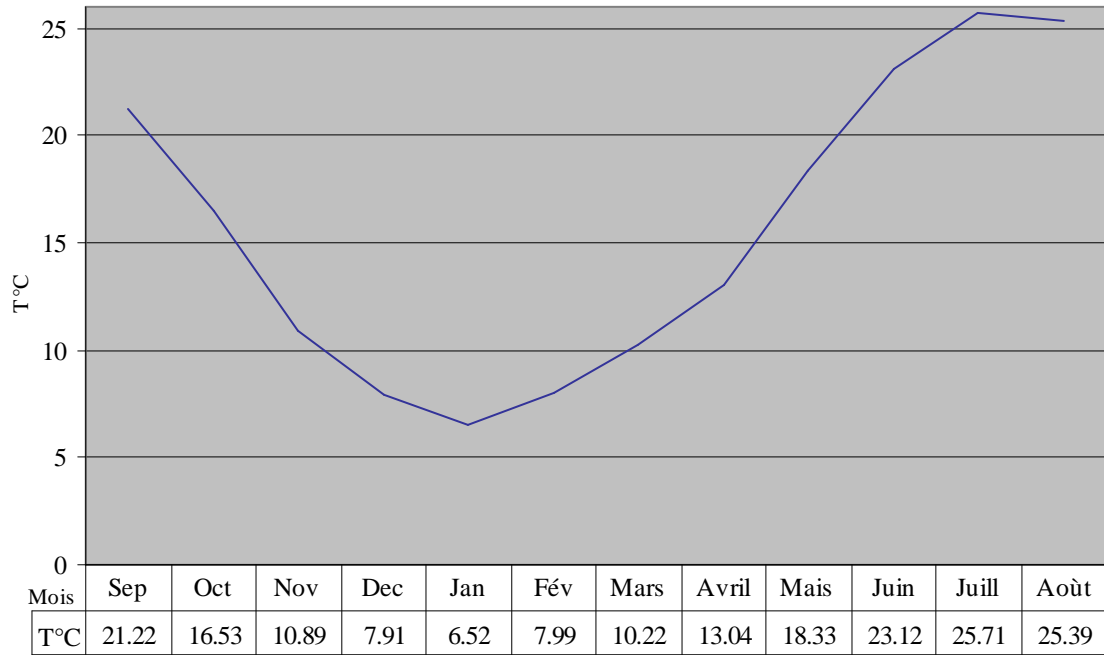
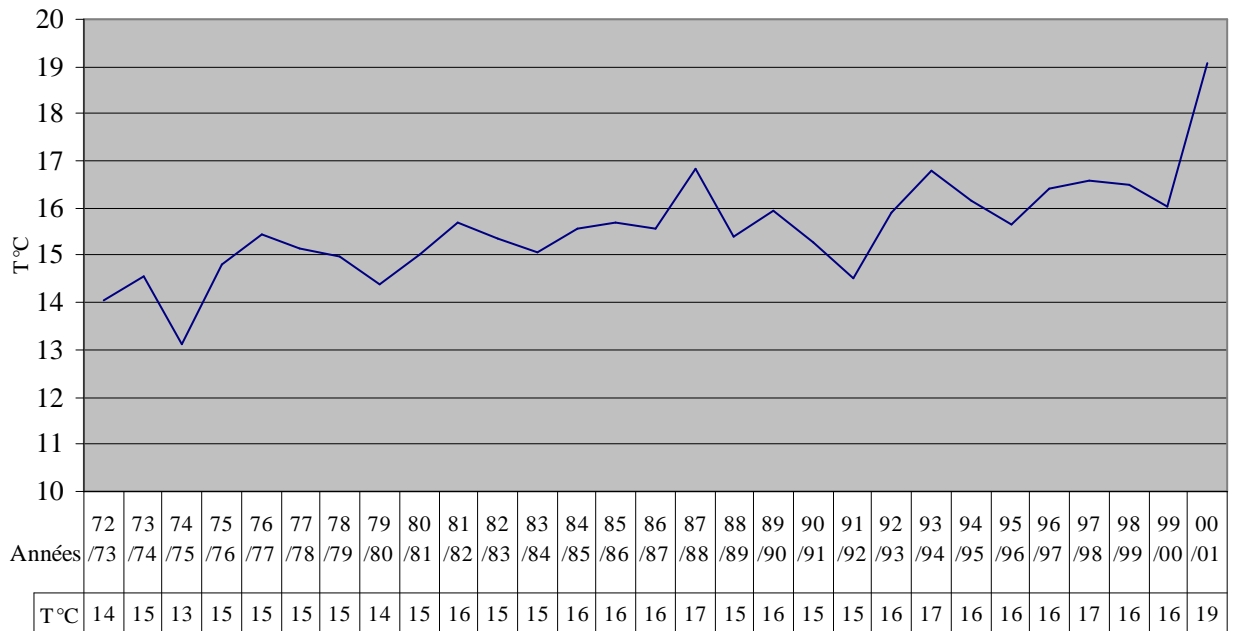


Fig.9. Variation inter-annuelle des températures à la station de Tebessa (1972/2001)



3.1.1- Indice d'aridité mensuel (Tab.1):

L'indice d'aridité mensuel est défini par la relation suivante:

$$I = \frac{12.P}{T + 10} \quad \text{où}$$

I : indice d'aridité mensuel

P : précipitation moyenne mensuelle en mm

T : température moyenne mensuelle en °C

Cette équation définit l'évolution des conditions climatiques au cours de l'année d'observation. Les résultats sont représentés dans le Tableau 1.

Tab.1. Indice d'aridité mensuel

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Fév.	Mar	Avri	Mai.	Juin.	Juill	Août
P (mm)	39.9	31.83	34.2	23.26	25.39	27.82	22.56	29.23	39.36	30.69	11.46	27.29
T°C	21.22	16.53	10.89	7.91	6.52	7.99	10.22	13.04	18.33	23.12	25.71	25.39
Indice	15.33	14.39	19.64	15.65	18.44	18.55	13.38	15.22	16.67	11.11	3.85	9.25

Le mois de Juillet présente un climat hyperaride, les mois de juin et août jouissent d'un climat steppique alors que le climat semi-aride marque le reste des mois.

3.2- Diagramme Ombrothermique (fig.10):

La superposition de la courbe de précipitation et de température mensuelle dans un même graphe conduit à l'établissement d'un diagramme appelé Ombrothermique.

Le diagramme relatif à la station de Tebessa met en évidence deux périodes bien distinctes:

- Une période humide quand la courbe des températures passe au-dessous de la courbe des précipitations et débute du mois d'octobre jusqu'à la fin du mois d'avril. Durant cette période, la pluviométrie connaît deux épisodes pluvieux: aux mois de novembre et février,

- Une période sèche quand la courbe des températures passe au-dessus de la courbe des précipitations et débute à partir du mois de mai jusqu'à la fin du mois de septembre. Durant cette période, la plaine de Tebessa reçoit des précipitations orageuses parfois considérables (136.6 mm en août, 1989/90).

4- Bilan hydrique :

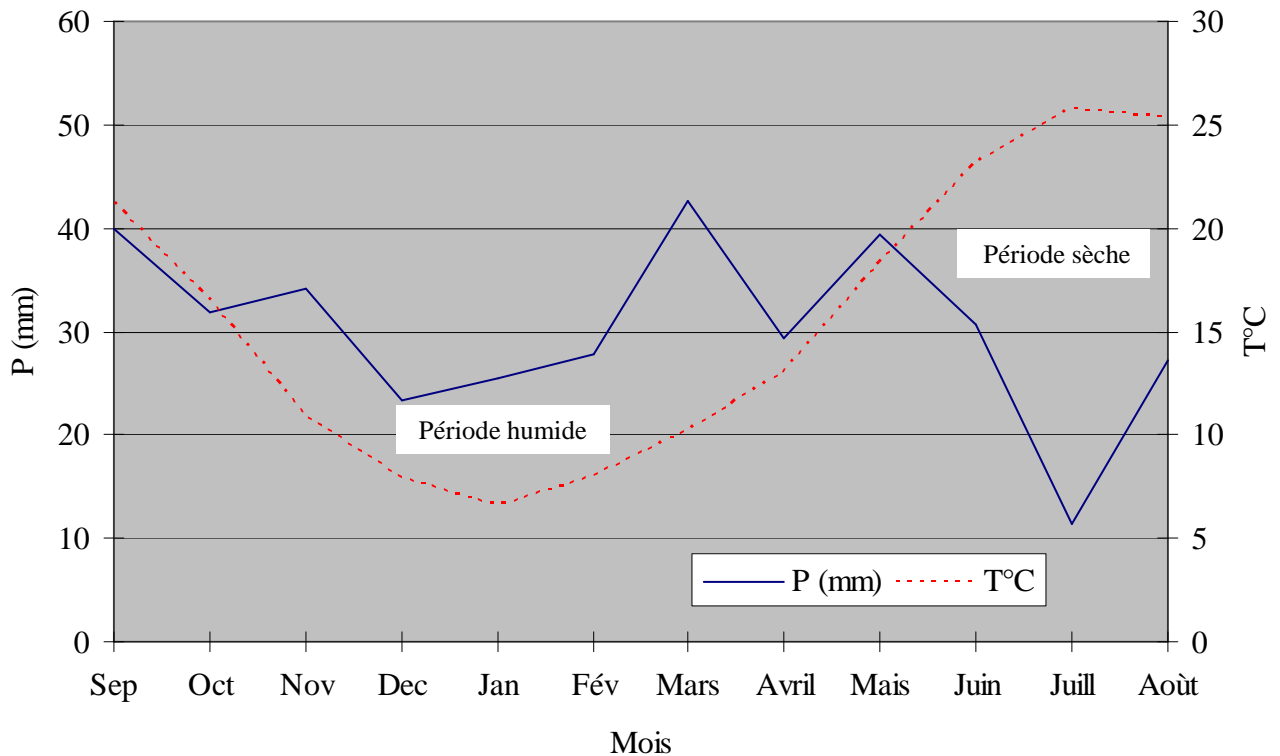
Le bilan hydrique exprime le processus qui suit une quantité d'eau arrivant au sol par précipitation ou neige avant de s'évaporer dans l'atmosphère.

L'établissement du bilan de la plaine de Tebesa-Morsott a pour but de comptabiliser les apports et les pertes en eau de surface.

L'expression générale du bilan est la suivante: $P = R + ETR + I$ où

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

Fig.10. Diagramme ombrothermique à la station de Tebessa (1972/2001)



4.1- Estimation des paramètres du bilan:

4.1.1- L'évapotranspiration :

L'évapotranspiration est un élément principal du bilan hydrique, il est défini par combinaison de deux phénomènes l'un physique (évaporation) et l'autre biologique (transpiration), ils désignent les pertes en eau par retour à l'atmosphère sous forme de vapeur d'eau. Il existe deux types d'évapotranspiration: potentielle (ETP) et réelle (ETR).

4.1.1.1- Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP) :

Ce paramètre climatique peut être mesuré directement sur le terrain par des appareils, ou estimer par des formules empiriques comme celle de Turc, Coutagne et Thornthwaite (Tab.2).

- **Formule de G.W.Thornthwaite:**

$$ETP = 16 \left(\frac{10T}{I} \right)^a \quad \text{où}$$

ETP : évapotranspiration potentielle en mm.

T : température moyenne mensuelle du mois considéré en C°.

I : indice thermique annuel, $I = \sum i$, avec i (indice thermique mensuel) = $(T/5)^{1,514}$

a : l'exposant climatique donné par la formule : $a = \left(\frac{1,6}{100} \right) I + 0,5$

Pour apporter des corrections aux valeurs de l'ETP, il faut les multiplier par un coefficient K qui dépend de l'attitude.

Tab. 2. Valeurs de l'évapotranspiration potentielle (méthode de Thornthwaite)

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Fev.	Mar.	Avr.	Mai	Jui.	Juill.	Août	Total
Tc°	21,22	16,53	10,89	7,91	6,52	7,99	10,22	13,04	18,33	23,12	25,71	25,39	15,57
i	8,92	6,11	3,25	2	1,49	2,03	2,95	4,27	7,15	10,16	11,93	11,71	71,98
I	71.98												
A	1..65												
K	1.03	0.97	0.86	0.85	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.83	1.16	
ETP mm	95,42	63,17	31,71	18,7	13,59	19,01	28,55	42,69	74,93	109,9	131	128,3	757,1
ETP_c mm	98,28	61,27	27,27	15,89	11,82	16,16	29,4	46,54	90,66	133	161,2	148,9	840,3

4.1.1.2- Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR) :

Les pertes d'eau d'un sol atteignent l'ETP si le stock d'eau de la réserve facilement utilisable (RFU) lui est supérieure ou égale, en cas d'insuffisance elles sont limitées à une quantité plus petite, cette limite est appelée l'évapotranspiration réelle (G. Castany).

L'estimation est faite à partir des formules de Turc et de Thornthwaite:

- **Formule de Turc :**

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

P : hauteur annuelle moyenne des précipitations

$$L = 300 + 25T + 0,005 T^3$$

T : température annuelle moyenne en C°.

Application : P = 362.81 mm

$$T = 15,57 \text{ C}^\circ$$

$$L = 708,12$$

$$ETR = 339,07 \text{ mm}$$

- **Formule de G.W.Thornthwaite:**

- Si $ETP > 0$: $\longrightarrow P > ETP \longrightarrow ETR = ETP$
- Si $P - ETP < 0$: $\longrightarrow P < ETP$

Ce dernier cas est subdivisé en deux cas:

$$\begin{aligned} P+RFU > ETP &\longrightarrow ETR = ETP \\ P+RFU < ETP &\longrightarrow ETR = P+RFU \end{aligned}$$

4.1.2- Calcul du ruissellement (R):

D'après Tixeront et Berkaloff, le ruissellement est estimé par la formule suivante:

$$R = \frac{P^3}{3(ETP)^2} \quad \text{où}$$

R : ruissellement (mm)

P : précipitation moyenne annuelle (mm)

ETP : évapotranspiration potentielle (mm)

Ce qui donne: **R** = 22.54 mm

L'inconvénient de cette formule, c'est qu'elle ne tient pas en considération les propriétés physiques du sol ou des formations traversées.

4-1-3- Calcul de l'infiltration (I) :

L'infiltration est calculée par la formule: **I = P - (ETR + R) ou I = EX - R**

L'application numérique: **I** = 3.97mm, ce qui correspond à environ 1% des précipitations.

4.1.4- Estimation des réserves facilement utilisable (RFU) :

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

- La nature, la lithologie et l'épaisseur de la couche parcourue par les racines ;
- La profondeur de niveau piézométrique de la nappe ;
- Le climat de la région ;
- Le type de la couverture végétale.

J. Ricard, 1979 a évalué la RFU pour la plaine de Tebessa en tenant compte de la nature de sol et du type de culture : $25 < RFU < 35$, soit une moyenne de 30 mm.

D'après la formule de Hailler: **RFU = 1 / 3 (Da. He. P)** où

RFU : réserve facilement utilisable en mm.

Da : densité apparente du sol (pour la plaine $Da = 1,4$)

He : humidité équivalente du sol ($He = 25 \%$)

P : profondeur de la couche de la terre parcourue par les racines en m. ($P = 0,225$ m)

L'application numérique: **RFU** = 26 mm

4.2- Etablissement du bilan hydrique (Tab.3):

Le bilan hydrique établi pour une période de 29 ans est déficitaire dans son ensemble à l'exception du mois de janvier; février et mars avec un excédent de 1.69, 11.66 et 13.16 mm.

Tab.3. Bilan hydrique à la station de Tebessa (1972/2001), méthode de Thornthwaite.

	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai.	Jui.	Juill.	Août.	Total
T c°	21,22	16,53	10,89	7,91	6,52	7,99	10,22	13,04	18,33	23,12	25,71	25,39	15,57
i	8,92	6,11	3,25	2,00	1,49	2,03	2,95	4,27	7,15	10,16	11,93	11,71	71,98
I	71,98												
a	1,65												
K	1,03	0,97	0,86	0,85	0,87	0,85	1,03	1,09	1,21	1,21	1,23	1,16	
P	39,90	31,83	34,02	23,26	25,39	27,82	42,56	29,23	39,36	30,69	11,46	27,29	362,81
ETP	95,42	63,17	31,71	18,70	13,59	19,01	28,55	42,69	74,93	109,94	131,01	128,33	757,05
ETPc	98,28	61,27	27,27	15,89	11,82	16,16	29,40	46,54	90,66	133,03	161,15	148,87	840,34
P-ETP	-58,38	-29,44	6,75	7,37	13,57	11,66	13,16	-17,31	-51,30	-102,34	-149,69	-121,58	
RFU	0	0	6,75	14,12	26	26	26	8,69	0	0	0	0	107,56
ETR	39,9	31,83	27,27	15,89	11,82	16,16	29,4	46,54	48,05	30,69	11,46	27,29	336,3
EX	0	0	0	0	1,69	11,66	13,16	0	0	0	0	0	26,51
DA	58,38	29,44	0	0	0	0	0	0	42,61	102,34	149,69	121,58	504,04

- Vérification :

$$P = \sum ETR + \sum EX = 336.3 + 26.51 = 362.81\text{mm}$$

$$ETP = \sum ETR + \sum DA = 336.3 + 504.04 = 840.34 \text{ mm}$$

- Conclusion :

L'analyse des paramètres climatiques observés sur une de période 29 ans (1972/2001) à la station de Tebessa ont permet de déduire que :

- Le climat est typiquement semi-aride de type continental (hiver froid et été chaud) ;
- La température annuelle moyenne est de l'ordre de 15.57 C° ;
- Les précipitations annuelles moyenne est de 362.81 mm ;
- L'évapotranspiration réelle est de l'ordre de 336.3 mm ce qui présente 92% des précipitations ;
- Le bilan hydrique dans l'ensemble est déficitaire, mais il est excédentaire aux mois de janvier, février et mars;
- L'infiltration ne laisse percoler que 3.97 mm soit 1% des précipitations. Cela, traduit que l'alimentation directe de la nappe par les eaux de précipitation est très faible, ce qui permet d'admettre d'autres sources d'alimentation indirectes. Ici, les calcaires fissurés qui bordent la plaine contribuent largement à l'alimentation de la nappe.

Chap.IV. Hydrogéologie

1. Introduction

Nous entendons par le bassin d'effondrement de Tebessa-Morsott, la région qui s'étend de Bekaria au Sud-Est à Morsott au Nord-Ouest.

La ville de Tebessa tire ses besoins actuels en eau potable à partir de 28 forages implantés au niveau de la plaine, et cela dès l'an 1970. Avant, les besoins en eaux sont obtenus par le captage des sources qui prennent naissance dans les calcaires qui bordent la plaine (Ain Chabro, Kissa, Youkous.....etc).

Ici, nous intéressons uniquement aux formations alluvionnaires qui constituent l'aquifère le plus sollicité dans le bassin.

2- Géométrie de l'aquifère:

2.1- Prospection géophysique (fig.11):

Le bassin de Tebessa-Morsott a été couvert par deux prospections géophysiques assez importantes réalisées par la compagnie de géophysique (C.G.G) en 1970 et Stroj Export Brague 1978. L'étude comporte plus de 570 S.E.V en ligne AB= 2000 m et AB= 6000 m, ce qui correspond à une profondeur d'investigation réelle de 350 m et 1000 m. Les sondages électriques ont été réalisés suivant des profils espacés de 1 Km orientés sensiblement SW-NE. A la suite de cette étude, des forages ont été entrepris, exploitant les formations du remplissage alluvionnaire.

L'objectif de cette prospection géophysique était donc de déterminer:

- Les lentilles à lithologie grossière dans le remplissage alluvionnaire, avec la reconnaissance des zones à forte salure des eaux ;
- La profondeur et la nature du substratum, en particulier la position du Trias salifère;
- Les grands accidents de bordure qui accompagnent le fossé d'effondrement.

Au centre de la plaine, les sondages électriques révèlent la présence d'un complexe conducteur intercalé en plusieurs fois par un niveau résistant dont la résistivité varie de 10 à 25 Ohm.m

En profondeur moyenne, le forage N69 (soviétique) a mis en évidence une épaisse formation de sables consolidés ou grès tendres ayant une matrice plus au moins argileuse entre 253 à 325 m de résistivité 100 Ohm.m (fig.13) qui sont attribués aux formations de Pliocène (W.Kowalski et al.).

En grande profondeur, le terrain est conducteur de résistivité faible (1.5 Ohm.m) (fig.12).

Aux bordures, principalement sur la rive gauche depuis Ain Chabro jusqu'à Tebessa, la résistivité est plus importante et varie 40 à 250 Ohm.m pour une épaisseur d'environ de 270 m de sédiments.

2.2- Description lithologique et stratigraphique:

Le fossé a été comblé, par une alternance sur plusieurs centaines de mètres de sédiments détritiques d'âge Mio-plio-quadernaire. Les différentes phases d'érosion et de sédimentation qu'a connue la plaine ont influencé cette alternance.

Les coupes des forages profonds (fig.14) ont bien montré que les séries du Mio-plio-quaternaire sont formées par d'alternance de sédiments perméables et aquifères, sables, graviers, cailloutis de calcaires, argiles et limons plus au moins sableux séparées par écrans étanches.

Sur la plaine, les sédiments détritiques s'étendent de manière continue et présentent des variations du faciès de bordures vers le centre traduisant un grano-classement latérale des sédiments. Ce grano-classement est confirmé par la variation latérale des résistivités apparentes, elles sont aussi accentuées par l'augmentation de la conductivité de l'eau.

- Au centre, des alluvions récentes composées par des argiles avec graviers fins, sont réparties sur l'axe de la plaine;
- Aux bordures, des alluvions anciennes, il s'agit des dépôts de cailloutis de calcaires.

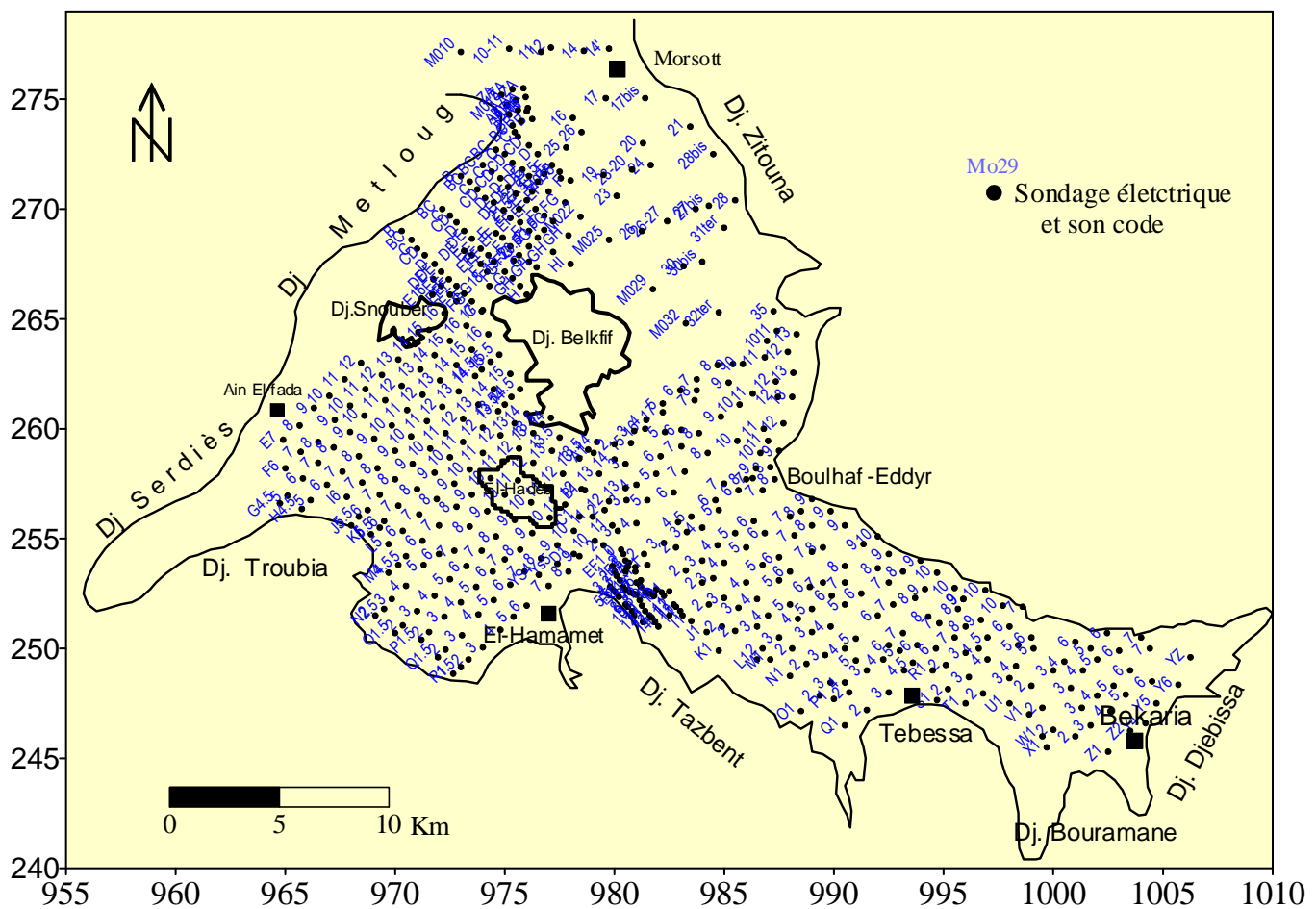


Fig.11. Carte de situation des sondages électriques (C.G.G, 1978)

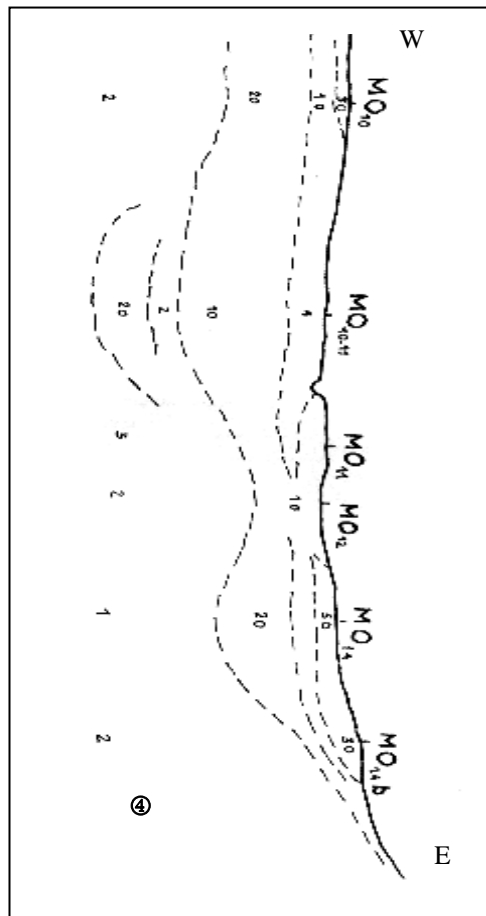
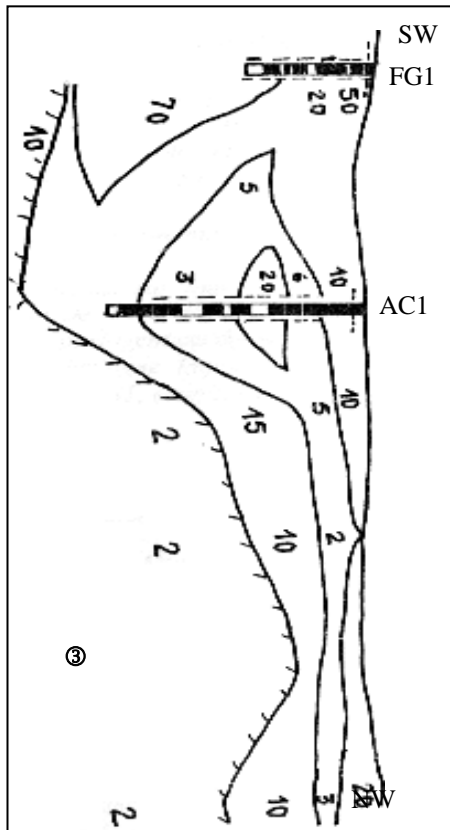
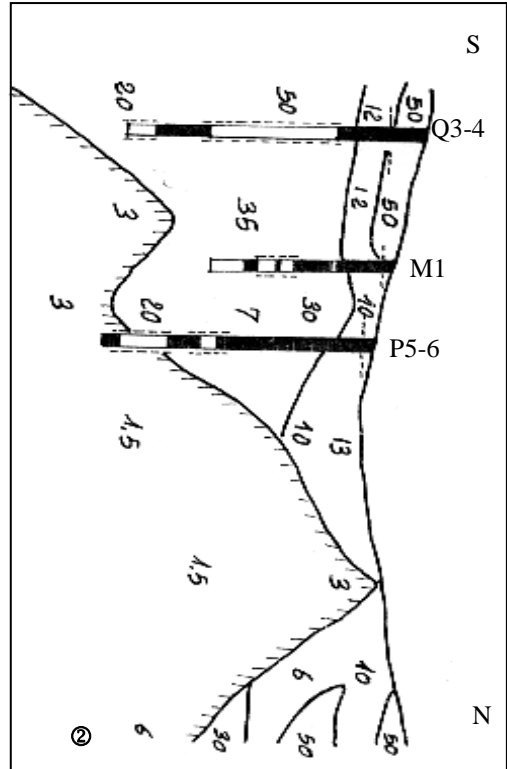
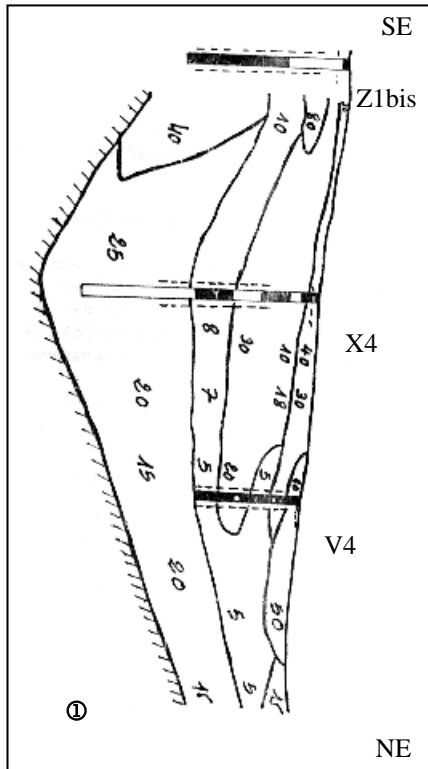


Fig.12. Profils électriques

- ① Bekaria ② Tebessa
- ③ Hamamet ④ Morsott

Fig.13. Coupe géo-électrique (Tebessa-Ain Chabro)

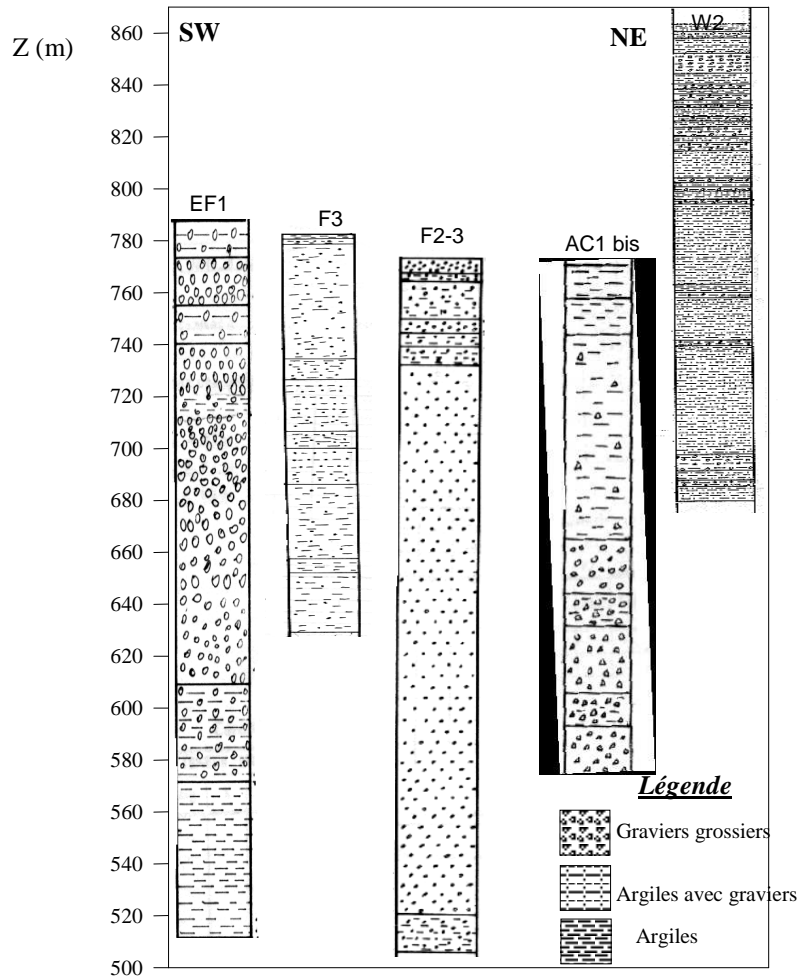
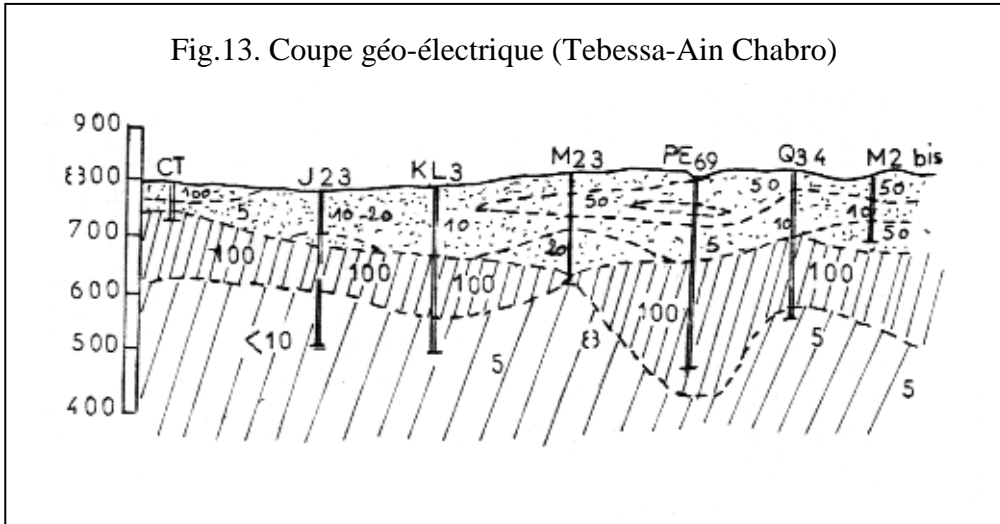


Fig.14. Profile géologique

2.3- Epaisseur du remplissage (fig.15):

L'évolution et le dimensionnement des réservoirs du remplissage alluvionnaire en espace, que ce soit en longueur ou en profondeur sont mis en évidence au cours de l'étude géophysique par prospection électrique réalisée en 1970 par la C.G.G et améliorée par Stroj Export Brague en 1978. Afin de mieux comprendre l'évolution des dimensions de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott, nous avons combiné les données géophysiques et les logs stratigraphiques des forages.

Le recouvrement est constitué d'une part, à sa base par un remplissage argileux très conducteur, au moins dans les fossés d'effondrement, d'autre par à sa partie supérieure, par des dépôts quaternaires sableux ou sablo-argileux et en bordure par des éboulis anciens et cône de déjection.

On constate sur la carte de l'épaisseur du remplissage entre El-Hamamet, Tebessa et Bekaria (la rive gauche de la plaine) les épaisseurs sont très importantes et varient de 150 à 450 m. On trouve également de fortes épaisseurs aux pieds de Dj. Hameimat, Zitouna et dans l'axe de la plaine au niveau de Morsott. Il faut noter que ses zones de fortes épaisseurs sont localisées aux bordures et au sein des fossés d'effondrements d'El-Hamamet, Tebssa, Bekaria et Morsott, présentant généralement de fortes résistivités.

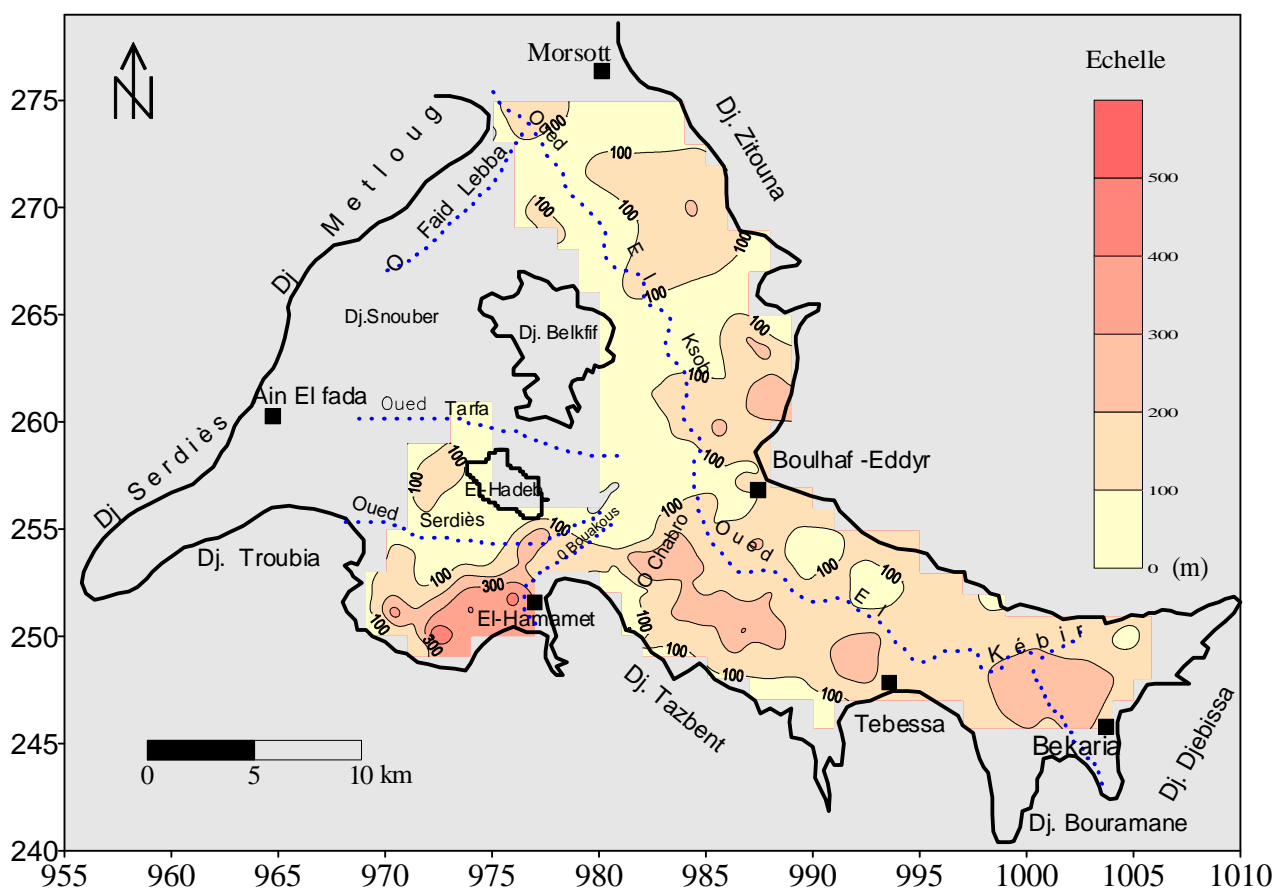


Fig.15. Carte d'épaisseur du remplissage alluvionnaire

2.4- Substratum (fig.16):

Après l'établissement de la carte du substratum ayant pour toit une couche conductrice de résistivité qui varie de 2,5 à 10 Ohm.m au centre de la plaine et une couche résistante aux bordures avec une résistivité variant de 150 à 250 Ohm m; on remarque que :

- Le toit de substratum varie entre 350 et 960 m d'altitude; ce qui traduit la structure faillée du bassin de la plaine de Tebessa-Morsott;
- Le substratum est moins profond au Nord d'El-Hamamet (100 m au maximum) mais très profond au Sud (350 m) traduisant un bon réservoir pour les eaux souterraines, par contre il affleure à la surface du sol au Nord-Est de la plaine;
- Au niveau de la zone de Ain Chabro à Tebessa ville et Bekaria, le substratum se trouve à une profondeur de 50 à 250 m en allant vers l'axe de la plaine;
- A l'exutoire de la plaine, le substratum devient encore profond (150 à 250 m) en particulier au centre de la plaine.

La structure onduleuse du substratum a permis d'envisager plusieurs fossés au sein même du grand fossé de Tebessa-Morsott : fossé d'El-Hamamet, Tebessa/Ain Chabro, Bekaria et celui de Morsott (ceci a confirmé ce qui a été déjà évoqué au chapitre géologie quant à la structure du bassin).

Cette structure a divisé le bassin du point de vue hydrogéologique en quatre systèmes hydrogéologiques qui peuvent avoir des caractéristiques hydrodynamiques différentes : Bekaria, Tebessa (ville), El-Hamamet et Morsott et a pu générer des zones qui peuvent constituer des bons réservoirs pour les eaux souterraines à savoir:

- La zone de Bekaria (partie Nord);
- La zone d'Ain Chabro-Tebessa;
- La zone située au Nord d'El-Hamamet
- La zone située, en bordure, en face du Dj.Dyr
- La zone en face de Dj.Zitouna.
- La zone de Morsott (aux pieds de Dj.Metloug).

2.5- Echelle des résistivités (Tabl.4):

Un certain nombre de sondages réalisés sur les forages et sur les formations affleurantes ont permis d'obtenir des valeurs des résistivités. Ces résistivités sont le plus souvent des valeurs moyennes, à cause de la complexité des formations qui ne permet pas d'obtenir une seule valeur de la résistivité pour une même formation. Le problème se pose aussi pour les matériaux de remplissage, constitués d'une alternance de niveaux argileux, sableux à graviers.

2.5.1- Remplissage du Quaternaire :

Les résistivités du Quaternaire sont extrêmement variables, et varient de 0.5 à 1 Ohm.m pour les terrains argileux ou salés (S.E. B1) et, plusieurs centaines d'Ohm.m pour les éboulis anciens, aux pieds des reliefs calcaires (S.E. Ys4). Deux sondages électriques sont réalisés sur deux forages Q5 et Q5bis de Tebessa.

- Interprétation des données :

S.E.B1		S.E.YS4	
Profondeur (m)	Résistivité (Ohm.m)	Profondeur (m)	Résistivité (Ohm.m)
2.030231	1.33524	7.133503	183.2261
2.979971	1.456301	10.47055	287.5056
4.373999	1.46191	15.36867	338.7201
6.420153	1.268895	22.55812	266.7964
9.423495	1.173523	33.11079	154.5634
13.8318	1.417407	48.6	90.78323
20.30231	1.927164	71.33505	75.61424
29.79971	2.20803	104.7055	77.94591
43.73999	1.782979	153.6867	59.00285
64.20153	1.173722	225.5813	25.32653
94.23496	1.027303	331.108	8.498402
138.318	1.464685	99999	3.126936
203.0231	2.540788		
297.9971	4.499012		
99999	8.021512		

- Etalonnage des résistivités

S.E. B1

0 à 203 m : alluvions salés
203 à 400 m : marnes ou argiles.

S.E. YS4

0 à 22 m : alluvions sèches
22 à 225 m : éboulis anciennes humides
225 à 400 m : marnes ou argiles

2.5.2- Pliocène:

Le sondage électrique (E.S. P12) est situé sur des dépôts pliocènes formés par un ensemble de blocs de calcaires de résistivité 40 à 150 Ohm.m. Le sondage (E.S. H10) indique quant à lui pour le Pliocène des valeurs faibles (< 5 Ohm.m).

- Interprétation des données:

S.E. P12		S.E. H10	
Profondeur (m)	Résistivité (Ohm.m)	Profondeur (m)	Résistivité (Ohm.m)
1.839489	142.5236	1.827207	8.646551
2.7	50.00428	2.681974	6.580032
3.963058	33.77571	3.936599	4.641308
5.816974	45.15781	5.778138	4.137609
8.538151	39.23568	8.481147	5.262583
12.53229	15.01763	12.44862	5.334705
18.39489	7.299645	18.27208	3.563808
27	9.50139	26.81974	2.889982
39.63059	10.65913	39.366	3.712409
58.16975	8.759686	57.78138	5.933963
85.38152	7.193415	84.81148	10.95218
125.3229	5.108065	124.4862	20.87993
183.9489	5.112882	182.7208	31.9364
99999	11.55287	268.1974	30.91829
		99999	16.0149

- Etalonnage des résistivités

S.E. P12

0 à 9 m: Pliocène avec blocs de calcaires
 9 à 185 m: marne du Danien
 185 à 200 m: calcaires (Maestrichtien).

S.E. H10

0 à 58 m: argiles (Pliocène);
 58 à 270 m: calcaires (Eocène)
 270 à 400 m: marnes.

2.5.3- Maestrichtien :

Le sondage électrique S7 situé sur l’affleurement du Maestrichtien montre que cette formation peut avoir des résistivités variant de 70 à 150 Ohm.m. Par contre la même formation constituant le plateau du Chéra a une résistivité de 300 à 400 Ohm.m.

Au forage d'Ain Chabro, le sondage électrique (S.E. H1 bis) situé au-dessus de la source, les calcaires du Maestrichtien ont une résistivité qui peut atteindre 1000 Ohm.m.

- Interprétation des données :

S.E. S7

Profondeur (m)	Résistivité (Ohm.m)
6.420153	38.07258
9.423495	52.27776
13.8318	77.19975
20.30231	113.6027
29.79971	140.5804
43.73999	123.876
64.20153	71.67149
94.23496	32.16682
138.318	19.11468
203.0231	17.76314
297.9971	11.25292
99999	4.750045

S.E. H1 bis

Profondeur (m)	Résistivité (Ohm.m)
1.489986	243.7658
2.187	249.7034
3.210077	293.6062
4.711749	387.737
6.915902	533.0087
10.15116	717.3246
14.89986	896.6474
21.87	1007.668
32.10078	1001.695
47.1175	845.239
69.15903	579.1359
101.5116	337.6176
148.9986	182.8119
99999	95.63824

- Etalonnage des résistivités

S.E. S7

0 à 10 m : graviers ;
 10 à 95 m : calcaires Maestrichtien
 95 à 400 m : marnes du Campanien

S.E. H1 bis

0 à 150 m : calcaires Maestrichtien ;
 150 à 200 m : marnes bleues.

2.5.4- Turonien:

Dans la région de Morsott, les calcaires du Turonien moyen ont une résistivité de 300 à 500 Ohm.m, pouvant atteindre et dépasse 1000 Ohm.m (S.E. M0 36). Par contre à Tebessa, la résistivité de ces calcaires au-delà de 22.5 m de profondeur oscillerait de 60 à 160 Ohm.m (S.E. KT1).

- Interprétation des données:

S.E. M0 36

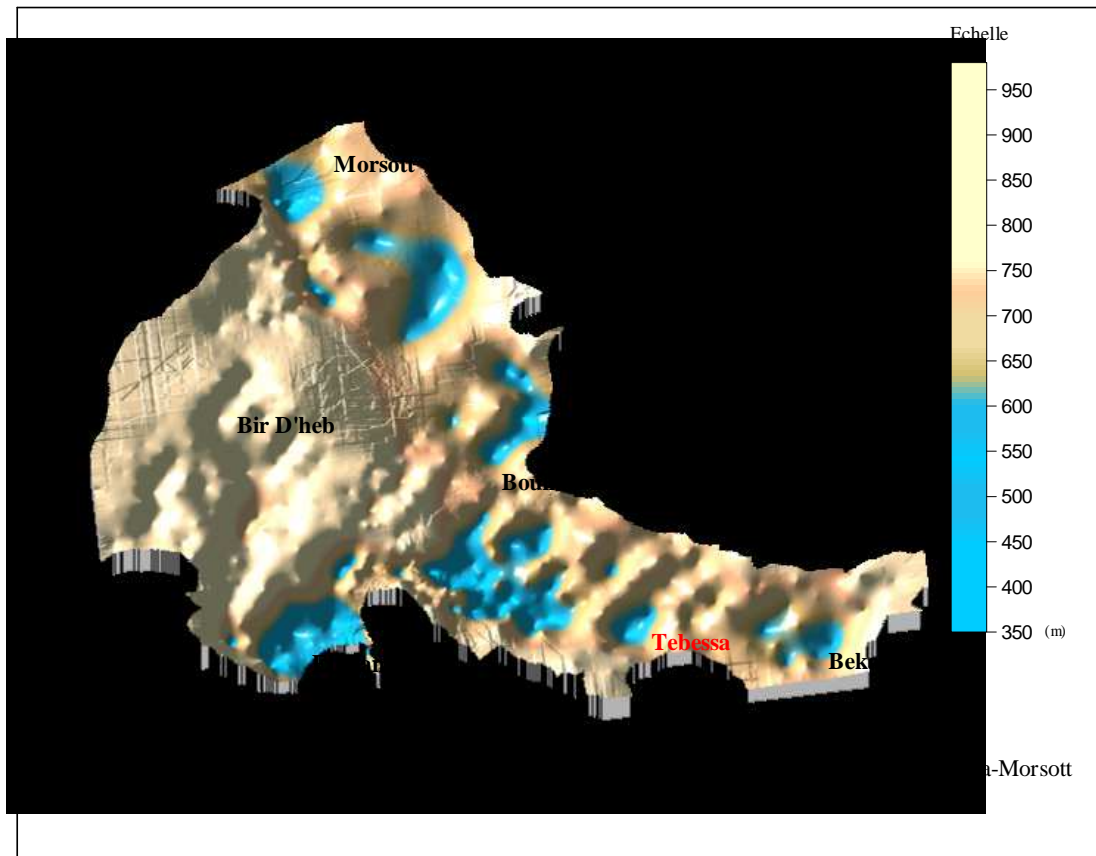
S.E. KT1

Profondeur (m)	Résistivité (Ohm.m)	Profondeur (m)	Résistivité (Ohm.m)
10.47055	1092.706	4.86	449.6548
15.36867	738.9529	7.133504	671.9106
22.55812	565.8048	10.47055	822.1294
33.11079	479.6974	15.36867	721.3535
48.59999	425.7	22.55812	413.3737
71.33504	370.602	33.1108	167.3753
104.7055	309.0106	48.60001	78.21918
153.6867	282.5402	71.33505	60.70462
225.5812	256.9754	104.7055	60.40957
331.108	149.9578	153.6867	70.89276
99999	39.34359	225.5813	81.45673
		331.108	78.79705
		99999	65.43778

L'examen des sondages électriques étalonnés aux logs stratigraphiques des forages Q5, Q5bis, Ain Chabro et les sondages électriques ont permis d'établir l'échelle des résistivités suivante:

Tab. 4. Echelle des résistivités des formations géologiques

Ages	Lithologie	Résistivité (Ohm.m)
Quaternaire	Limons salés du centre de la plaine	1- 3
	Limons et argiles	5- 10
	Alluvions argilo-sableuse	15-20
	Alluvions sableuse	25-50
	Eboulis ses	300-400
	Eboulis humides	70-100
Plio-Quaternaire	Marnes à gypse	0.5-2
	Alluvions caillouteuses (Pliocène)	30-50
	Alluvions argileuses (Pliocène)	3-5
Eocène	Calcaire blanc à silex (Eocène moyen)	100-200
Crétacé	Marnes (Dano-Montien)	2-8
	Calcaire Maestrichtien	100-1000
	Marnes et calcaire marneux (Emschérien)	5-10
	Calcaire Turonien	50-1000
	Marnes et marno-calcaires (Cénomaniens)	5-25
	Calcaire-Dolomie (Aptien)	150-200



3. Hydrogéologie de la plaine:

3.1- Introduction:

L'étude hydrogéologique a pour finalité la planification de l'exploitation des ressources en eaux souterraines. L'exploitation des eaux souterraine dans la nappe alluviale de Tebessa-Morsott pour les différents usages se limite:

- Aux nombreux puits dispersés dans la plaine qui exploitent faiblement la nappe superficielle aux seuls usages agricole, familiaux et animaux et rarement pour l'A.E.P
- Aux forages (au nombre de 28) qui exploitent la nappe profonde
- Aux captages des sources prenant naissance dans les calcaires d'age Turonien, Maestrichtien et Eocène;

3.2- Indentifications des différents niveaux aquifères:

Ici, nous nous sommes intéressés uniquement au système aquifère des formations du Mio-plio-quaternaire car c'est le plus exploité dans la plaine. Néanmoins nous donnons un aperçu sur les autres niveaux aquifères du bassin d'effondrement.

3.2.1- Le milieu fissuré:

Les possibilités de reconnaissance du substratum proprement dit, dans le fossé de Tebessa-Morsott s'avèrent être très réduites en raison de sa grande profondeur (2 Km, d'après M.Zerdazi). Les calcaires sont hors d'atteinte de tout forage dans le centre de la plaine. Il reste

également les compartiments hauts des bordures où la présence de niveau résistants (calcaires Turoniens, Maestrichtien ou Eocène) a été reconnue sur une certaine largeur.

Ce niveau fissuré présente un potentiel hydraulique important qui se traduit par un débit considérable des sources en particulier celle de Youkous, Gagaa qui draine les calcaires Maestrichtiens du système aquifère de Chéria. La source de Kissa draine les calcaires Eocène du système aquifère de Dyr.

Actuellement, deux forages (F9 et l'autre non encore codé) implantés à Boulhef-edyr dont l'étude géophysique est faite par nous même, exploitent les calcaires Maestrichtiens du Dyr:

Profondeur 150 m,
Toit du résistant à 26 m,
Débit de 60 l/s (rabattement de 0.4 m pendant l'essai à l'air lift).
N.S à 26 m.

3.2.2- Le milieu poreux:

Le remplissage du Mio-plio-quaternaire du bassin d'effondrement s'étale sur toute la plaine et constitue un grand réservoir pour les eaux de précipitations (alimentation directe) et les eaux en provenance des bordures (alimentation indirecte). Il est capté par la majorité des forages, possédant une résistivité de 50 à 100 voir 200 Ohm.m au voisinage des bordures et de très faible résistivité inférieure à 2 Ohm.m au centre de la plaine à cause de leur degré de salinité et des sédiments fins.

L'hydrogéologie de cette série détritique est compliquée d'un fossé à un autre à cause de:

- la grande variation de la profondeur du substratum;
- le type des matériaux de remplissage dominant (Quaternaire, Miocène ou Pliocène) ;
- les formations qui bordent le fossé (calcaires Maestrichtien, Turonien, Eocène ou Trias);
- le grano-classement latéral.

3.3- Caractéristiques hydrauliques du remplissage:

Au centre de la plaine, l'ordre de grandeur du débit d'exploitation est de 10 l/s $<Q < 20$ l/s, par contre en bordures et principalement sur la rive gauche depuis Hamamet jusqu'à Bekaria, il dépasse 20 l/s.

3.4- Comportement hydrodynamique:

3.4.1- Carte piézométrique (fig17, 18 et 19):

Plusieurs campagnes piézométriques ont été effectuées dans la plaine depuis 1993 au 2002. Nous avons recensé plus de 90 puits et 28 forages dont la majorité des puits sont des ouvrages récents et imparfait, répartis irrégulièrement sur toute la plaine et qui servent en grande partie à l'irrigation et aux besoins domestiques. Le diamètre des puits varie entre 0.8 et 4 m avec la prédominance des puits tubulaires et d'une profondeur variant de 2 à 40 m.

Le tracé des cartes piézométriques (1993, 1998 et 2002) nous permet cependant de faire quelques observations sur l'écoulement des eaux souterraines, l'alimentation de la nappe et l'évolution de la surface piézométrique dans le temps.

- La profondeur de l'eau est moins de 10 m au centre de la plaine et plus de 20 m aux bordures.

- L'écoulement des eaux souterraines est très influencé par les oueds et le pompage extensif pour ne pas dire surexploitation de la nappe. L'arrangement des courbes piézométriques est sensiblement perpendiculaire à l'axe de la plaine et aux bordures.

- Les cotes s'abaissent progressivement vers le Nord d'environ de 210 m sur une distance de 30 km, soit une perte de charge de 7 m/km. L'examen des courbes isopièzes montre que la surface piézométrique n'est pas régulière et qu'elle présente de nombreuses et importantes anomalies. Nous pouvons distinguer quatre systèmes hydrogéologiques distincts:

- Zone de Hamamet/Ain Chabro,
- Zone de Bekaria,
- Zone de Tebessa/Merdja,
- Zone de Morsott.

a) Zone de Hamamet/Ain Chabro

Au Nord d'El-Hamamet, les courbes deviennent espacées traduisant une zone de décharge ou d'accumulation des eaux souterraines avec une perte de charge de 30 m. L'oued Serdiès contribue au drainage d'une partie de ces eaux par contre le resté est drainé par la source de Ain Chabro.

b) Zone de Bekaria:

Les courbes sont espacées régulièrement au Nord et deviennent très espacés au centre, présentant une concavité orientée du centre vers l'aval où est concentré la majorité des puits, ce qui traduit une zone d'accumulation et de drainage par l'oued El-Kébir. Notons ici, que cet arrangement des courbes isopièzes est beaucoup plus influencé par l'exploitation intensive.

c) Zone de Tebessa/Merdja.

Les courbes piézométriques sont serrées régulièrement au début puis deviennent plus espacées dans le sens d'écoulement, reflétant une zone d'accumulation et de drainage par l'oued El-kebir avec une perte de charge de 35 m.

d) Zone de Morsott:

Les courbes piézométriques sont espacées au centre et plus particulièrement sur la rive droite de la plaine, traduisant une zone d'accumulation des eaux souterraines et drainage par l'oued.

3.4.2- Conditions d'alimentation:

L'alimentation directe de la nappe est faible et provienne par l'infiltration directe des eaux de précipitation à travers les cônes de déjections aux bordures. Au centre, l'infiltration est quasiment nulle à cause des dépôts fins et argileux, donc l'alimentation indirecte est la plus importante et qu'elle doit être la plus considérée.

Deux facteurs peuvent être retenus: les apports des eaux de surfaces en particulier celles d'oued Bouakous et Serdiès qui vient se perdre dans les alluvions du system aquifère

Hamamet/Ain Chabro. L'autre facteur, l'alimentation latérale par les bordures est très complexe due aux jeux de failles affectant les bordures et qui mettent en contact direct les formations du remplissage et fissurées.

Néanmoins, d'après l'arrangement des courbes piézométriques aux bordures, il apparaît clairement que:

- Au Sud de Morsott, lorsque la plaine devient étroite, les courbes piézométriques sont parallèles au massif de calcaire de Dj.Zitouna et Dj.Metloug, témoignant d'un apport latéral en eau;
- Une alimentation dans la région de Bekaria où le cône de déjection à la base de Dj. Bouramane reçoit les eaux de ce massif, mais aussi le trop plein de la source de Bekaria située au Sud-Est du village;
- L'apport en provenance des calcaires Turoniens au Sud-Est de Tebessa marqué par l'inflexion des courbes piézométriques;
- L'apport en provenance du calcaire Turonien au Sud-Ouest d'El-Hamamet et du calcaire Maestrichtien à travers le vidange des sources de Youkous et Gagaa.

3.4.3- Sens d'écoulement des eaux souterraines:

Le sens d'écoulement général des eaux souterraines est de direction Sud-Est/Nord-West. Au sein de la nappe, l'écoulement n'est pas continu à cause des zones de décharges ou d'accumulation qui caractérisent chaque zone. Alors, il peut être caractérisé comme un écoulement compartimenté ou par palier d'un fossé à un autre, confirmant l'idée de plusieurs systèmes au sein même du grand système de Tebessa-Morsott.

La zone d'Ain Chabro peut être qualifiée comme un carrefour pour les eaux souterraines en provenance des systèmes aquifères d'El-Hamamet, Tebessa et Bekaria pour reprendre leur trajet vers l'exutoire Morsott où la perte se fait par évaporation et exploitation.

3.4.4- Relation Oued-nappe (fig.20):

La plaine de Tebessa-Morsott a un réseau hydrographique plus au moins dense. Les eaux de surface sont collectées par oued El-Kébir, Chabro, Ksob et Sediès. L'axe principal du réseau est Oued El-Kébir qui draine toutes les eaux de surface de la plaine.

Du point de vue hydrodynamique, la relation entre l'oued et la nappe est évidente aux zones d'Ain Chabro, Bekaria (aval) et Tebessa (Merdja). Ces zones sont caractérisées par l'espace des courbes piézométriques d'où un gradient hydraulique faible et la vitesse d'écoulement est minimale. Pour mieux visualiser cette relation du point de vue structurale, trois profils le long d'oued El-Kébir (amont, centre et aval) ont été établis au niveau de ces zones.

D'après ces profils, on constate l'existence d'une relation structurale directe entre l'oued et la nappe au niveau de la zone d'Ain-Chabro. A Tebessa, la relation est double (structurale et hydrodynamique). Par contre à Bekaria la relation structurale devient plus favorable en aval.

Fig.17. Carte piézométrique de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott (Avril, 1993)

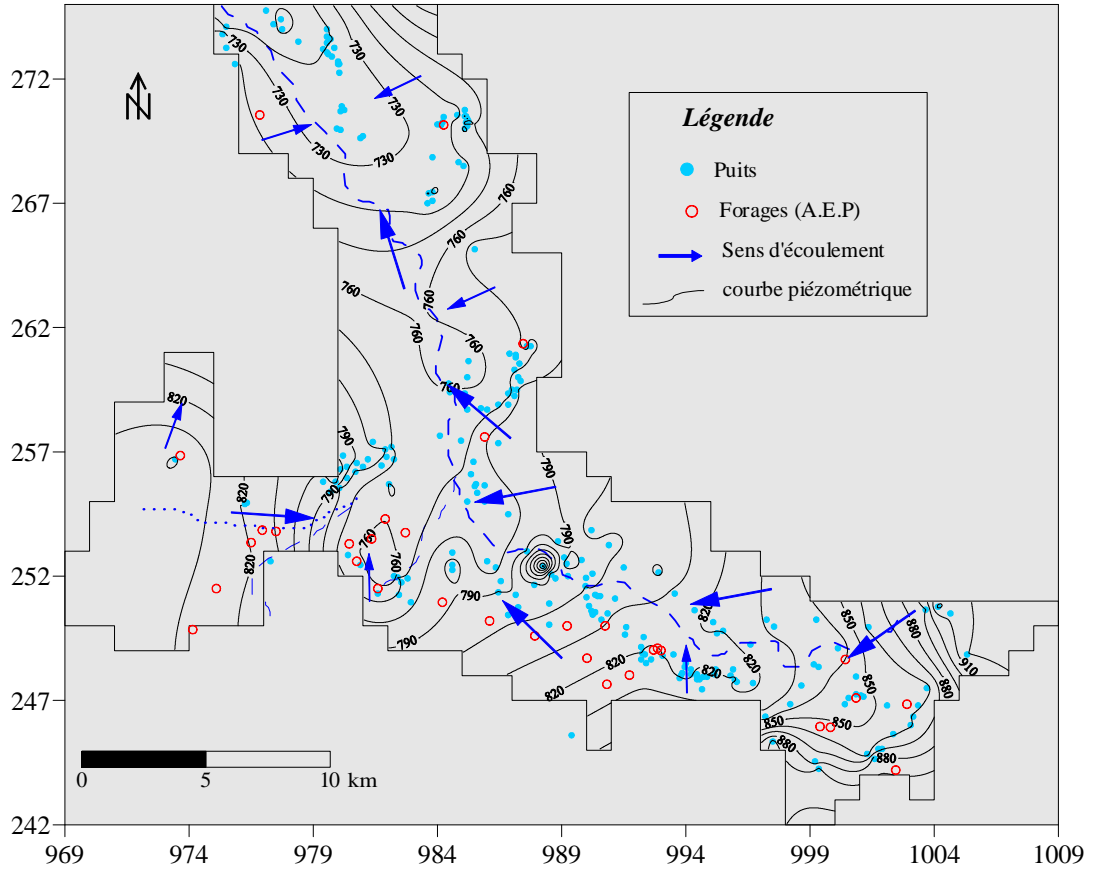


Fig.18. Carte piézométrique de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott (Mai, 1998)

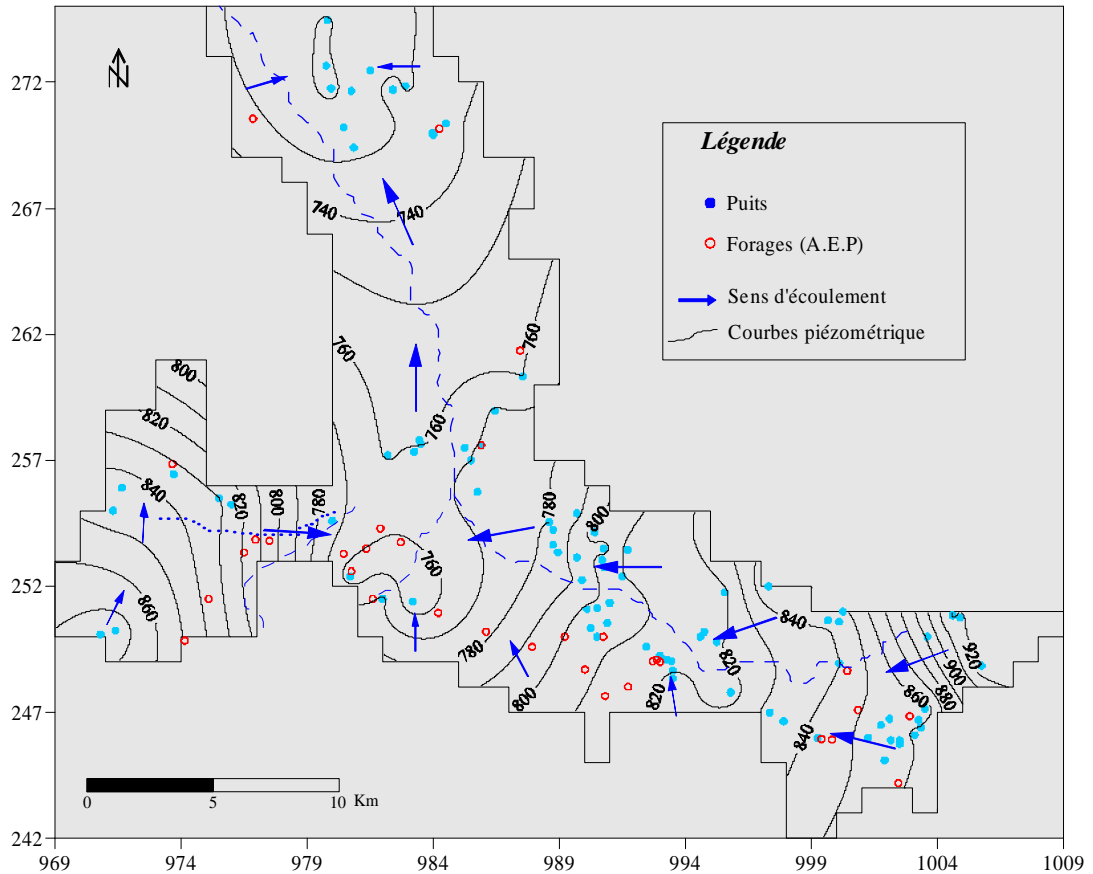


Fig.19. Carte piézométrique de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott (Avril, 2002)

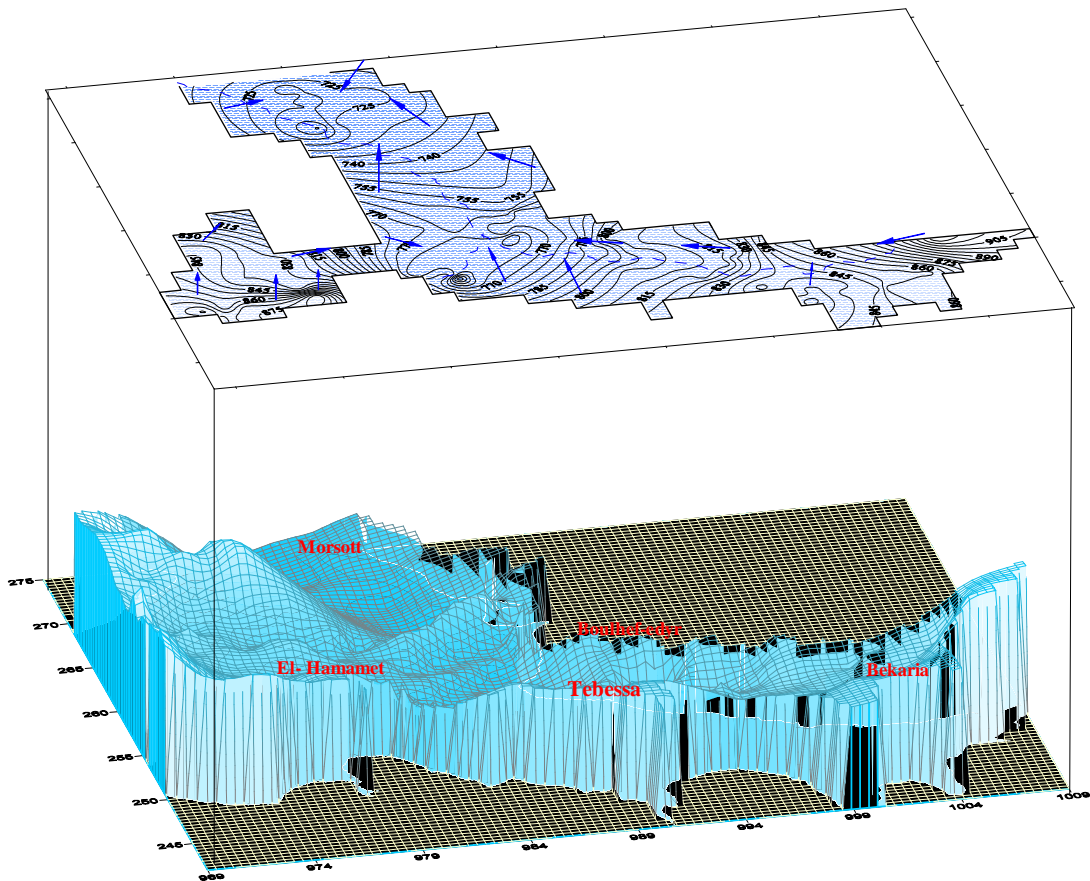
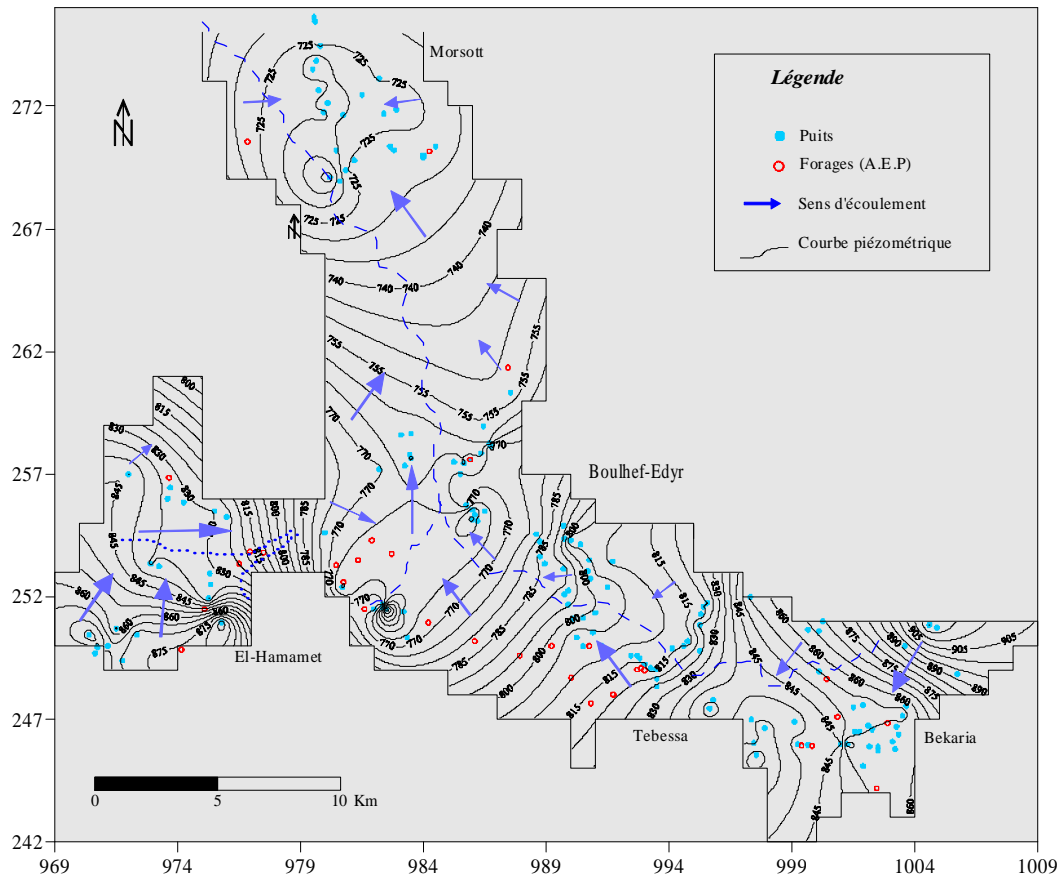


Fig.19bis. Superposition de la carte piézométrique sur un fond de substratum

Entre oued Chabro et la station de Morsott, les jaugeages effectués par l'A.N.R.H de Tebessa en trois points différents ont montré qu'il n'y a pas de pertes par infiltration en profondeur; cependant entre Chabro et le Pont soit une distance de 6 km, se développe une évapotranspiration intense tout particulièrement dans la zone de marécage où la profondeur de l'eau est faible et le phénomène d'évaporation semble prédominer.

Sur les cartes piézométriques, cette zone se traduit par un espacement des courbes piézométriques (gradient hydraulique faible). Ce qui implique une zone de décharge pour les eaux souterraines en provenance des systèmes aquifères: Bekaria, Tebessa et El-Hamamet, pour reprendre ensuite leur trajet vers Morsott (l'exutoire principal du grand système aquifère Tebessa-Morsott).

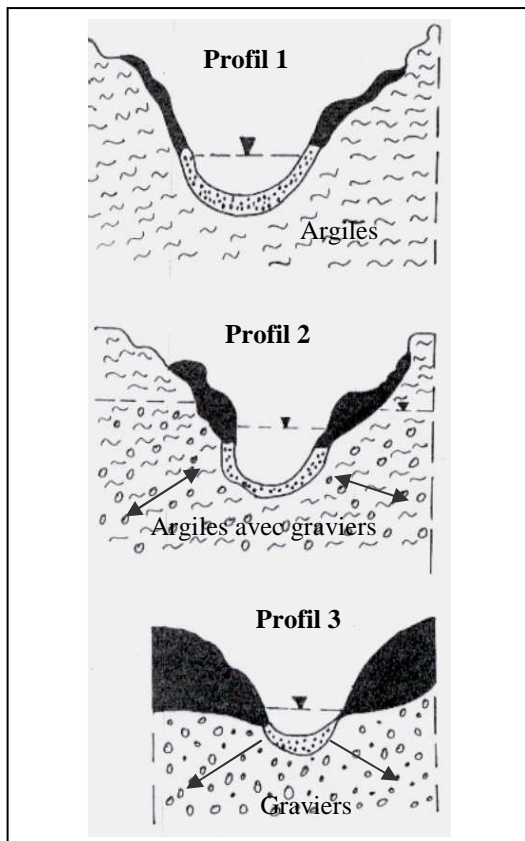


Fig.20. Profils transversaux de l'oued El-Kébir

Profil 1 : Bekaria

X= 996 , Y = 248.7, Z = 818.5 m

Longueur = 10 m

Largeur = 5 m

Hauteur = 4.5 m

La lame d'eau = 1 m

Vitesse d'écoulement = 0.40 m/s

Profil 2 : Tebessa (El-Merdja)

X = 992.2 , Y = 241.5, Z = 799.5 m

Longueur = 8 m

Largeur = 4 m

Hauteur = 3.5 m

La lame d'eau = 1.5 m

Vitesse d'écoulement = 0.38 m/s

Profil 3 : Ain Chabro

X = 986.3 , Y = 254 , Z = 780.5 m

Longueur = 7 m

Largeur = 3 m

Hauteur = 3 m

La lame d'eau = 0.3 m

Vitesse d'écoulement = 0.20 m/s

3.4.5- Relation sources-nappe:

Les sources qui naissent par débordement au sein même du système aquifère de Tebessa-Morsott, elles ont de très faible débit (0.35 à 1.5 l/s). Les autres sources issues des systèmes aquifères bordant la plaine, elles proviennent des formations calcaires de bordures, sauf celle de Ain Bekaria qui provient du sable du Miocène (J-Ricard, 1975).

Actuellement, les plus importantes à considérer sont: Youakous, Gagaa, Kissa, Bekaria. La source de Ain chabro est tarie depuis 1980. Les jaugeages effectués ont révélé que la source de Bouakous participe à l'alimentation du système aquifère d'El-Hamamet de 2 Hm³/an (J-Ricard, 1975). La source de Bekaria avec un débit moyen capté de 15 l/s en 1975 et de 0.8 l/s en 2002. Actuellement, elle contribue à l'alimentation du système aquifère de Bekaria au temps de crue. Il faut noter, que la contribution actuelle des sources dans l'alimentation de la nappe

est presque négligeable, à l'exception aux périodes de crue, cependant la nappe reste éventuellement alimentée par contact alluvions et calcaires des bordures.

3.5- Les grands problèmes d'hydrogéologie:

L'hydrogéologie de la plaine est compliquée par la pluralité des différents niveaux aquifères possibles, la structure faillée et les formations triasiques qui semblent très actives en profondeur et au niveau des bordures.

3.5.1- Structure :

La structure faillée confirmée par l'étude géophysique ainsi que par les forages, que les bordures son affectées par une série de failles très importantes provoquant l'affaissement de toute la plaine créant ainsi un véritable fossé d'effondrement.

3.5.2- Hydrogéologie :

3.5.2.1- la pluralité des différents niveaux aquifères :

- Calcaires Aptien (Dj.Bouramane);
- Calcaires Maestrichtien (bordure Sud-Est)
- Calcaires Turonien (bordure Sud-Est);
- Calcaires Eocène (bordure Nord-Est) ;
- Alluvions récentes et anciennes, Plio-quadernaire (centre de la plaine).

3.5.2.2- L'hétérogénéité de l'aquifère :

L'aquifère est formé par les sédiments détritiques de la série du Mio-plio-quadernaire de lithologie variable et présentent des variations de faciès des bordures vers le centre de la plaine.

En profondeur, et au delà de 400 m, le terrain est conducteur (fig.12). La présence de ce terrain pose de délicat problème d'interprétation: s'agit-il d'un terrain réellement conducteur ou d'un niveau résistant dont l'eau est très chargée en sel, car la salinité a tendance d'augmenter avec la profondeur. Elle est très active au niveau de la bordure Nord-Est. Ce problème ne sera résolu que par les forages profonds.

3.5.2.3- Système aquifère à nappes empilées :

La série du Mio-plio-quadernaire constitue un système aquifère à nappe empilées, communicantes entre elles.

3.5.2.4- Seuil hydraulique (artésianisme):

La subsidence modérée qui a affecté le fossé, après le second stade, a localement favorisé la sédimentation d'argile. Le fossé de Tebessa est entièrement recouvert par un manteau alluvial, grossier aux bordures et fin au centre.

Les sédiments fins jouent le rôle d'un seuil hydraulique pour les eaux en provenance des bordures, constituant ainsi un véritable barrage naturel sous terrain d'où jaillissement des eaux souterraines au niveau du centre, en particulier dans la zone d'El-Merdja.

3.5.2.5- Structure onduleuse du substratum :

La structure onduleuse du substratum pose un problème de communication et de continuité entre les différents systèmes aquifères.

3.5.2.6- Hydrodynamique :

Écoulement compartimenté des eaux souterraines (c'est-à-dire d'un fossé à un autre) qui se fait suivant une direction générale Sud-Est/Nord-West. A l'exception du fossé d'El-Hamamet où l'écoulement est orienté du Sud-West/Sud-Est ayant pour exutoire la source d'Ain Chabro.

3.5.2.7- Conditions d'alimentation :

L'alimentation directe est faible (bilan hydrique déficitaire dans l'ensemble), par contre l'alimentation indirecte est la plus importante mais elle est très complexe à quantifier.

3.5.3- Les pertes :

Les pertes se font par exploitation directe et évaporation à l'exécutoire et aux zones de faible profondeur d'eau (zone d'El-Merdja).

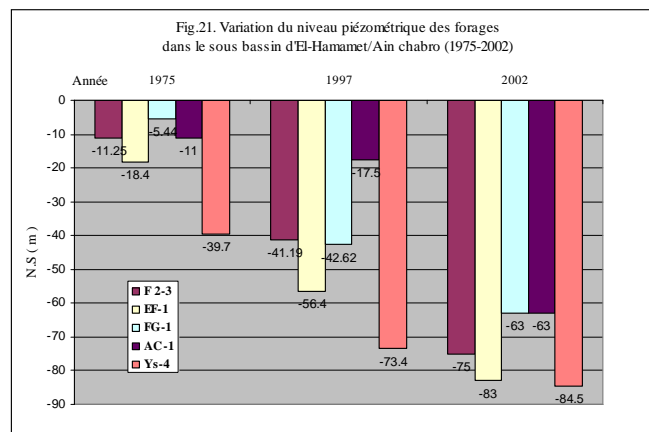
3.5.4- Exploitation (fig.21):

En plus de la complexité de ces caractéristiques hydrogéologiques, s'ajoutent d'autres facteurs plus dangereux qui menacent sévèrement la qualité (pollution) et la quantité (surexploitation) des eaux souterraines de la plaine de Tebessa-Morsott.

L'exploitation qui dure plus de 30 ans, elle est plus intensive en périodes sèches dont l'impact se traduit actuellement par :

- Un rabattement général du niveau de la nappe, de 40 m dans la zone d'Ain Chabro ;
- Un assèchement des puits de faible profondeur ;
- Dénoyage des équipements de pompage entraînant une réduction des débits d'exploitation ;
- Tarissement de la source de la source d'Ain Chabro et actuellement la source thermale d'El-Hamamet.

3.5.5- Pollution: Les problèmes issus de la pollution seront exposés et développés au chap.VI.



3.6- Paramètres hydrodynamiques:

Dans le but d'identifier les paramètres hydrodynamiques à savoir la Transmissivité (T), perméabilité (K) et coefficient d'emmagasinement (S) au sein de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott, nous avons utilisé les résultats des essais définitifs des forages déjà effectués par la direction de l'hydraulique de Tebessa. Leur interprétation graphique est basée sur l'expression de l'approximation logarithmique de C.E. Jacob (1950).

$$s = \frac{0.183Q}{T} \cdot \log \frac{2.25Tt}{x^2 S} \quad \text{où}$$

s = rabattement dans un piézomètre, en m

T = transmissivité en m²/s

Q = débit de pompage constant en m³/s

S = coefficient d'emmagasinement, sans dimension,

T = temps écoulé depuis le début de pompage, en seconde,

x = distance du piézomètre à l'axe du forage, en m.

3.6.1- La transmissivité (Tab.5):

La productivité d'un captage dans un aquifère est fonction de son coefficient de perméabilité, K et de son épaisseur (h). C'est pourquoi un nouveau paramètre, noté T a été créé. Il régit le débit d'eau qui s'écoule par unité de largeur, L d'un aquifère, sous l'effet d'une unité de gradient hydraulique (i)

Ici, elle est obtenue par la résolution graphique de l'expression de Jacob en reportant sur un papier semi-logarithmique, les rabattements exprimés en mètre en ordonnées arithmétiques et le temps de pompage exprimé en secondes en abscisses logarithmiques.

La transmissivité est déterminée à partir de la pente de la droite obtenue, pour un cycle logarithmique, par la formule suivante:

$$T = \frac{0.183Q}{C} \quad \text{où} \quad T = \text{Transmissivité en (m}^2\text{/s),}$$

Q = débit de pompage en (m³/s)
C = pente de la droite

3.6.1.1- Carte de transmissivité (fig.22):

La carte de transmissivité établie présente une morphologie variable, due à l'hétérogénéité de l'aquifère. Des fortes valeurs comprises entre 4 à 7x10⁻³ m²/s sont enregistrées au niveau des bordures et dans plusieurs zones situées en général aux cônes de déjection de:

Dj. Matloug à Morsott,
Dj. Bouramane à Bakaria,
Dj. Tazbent et zone de décharge d'oued Bouakous à El-Hamamet
Dj. Ozmor et Djoua à Tebessa
Dj. Dyr à Boulhef-edyr

Ailleurs, dans la plaine, on retrouve les plus faibles valeurs, de l'ordre 10⁻⁴ à 10⁻³ m²/s.

3.6.2- La perméabilité (Tab.5):

La perméabilité est l'aptitude d'un réservoir à se laisser traverser par l'eau sous l'effet d'un gradient hydraulique (G. Castany). Elle est mesurée notamment par le coefficient de perméabilité K défini par la loi de Darcy comme le volume d'eau gravitaire traversant une unité de section perpendiculaire à l'écoulement en 1 seconde sous l'effet d'une unité de gradient hydraulique. En prenant comme unités le m^2 et le m^3 , K est exprimé en m/s

Le coefficient de perméabilité dépend à la fois des caractéristiques du réservoir (granulométrie, porosité efficace) et des caractéristique du fluide (viscosité, donc température, et masse volumique). Il est grossièrement proportionnel au carré du diamètre des grains pour une nappe libre et varie de 10^{-11} à 10^{-5} m/s . Un matériau est considéré comme imperméable au delà de 10^{-9} m/s .

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

où

- K = perméabilité (m^2/s)
- T = transmissivité (m^2/s)
- h = épaisseur mouillée de l'aquifère

La perméabilité est calculée en prenant comme épaisseur mouillée (h), les valeurs estimées d'après la carte piézométrique (Avril, 2002).

3.6.2.1- Carte de perméabilité (fig.23) :

Géographiquement, les valeurs de perméabilité ont tendance de montrer les mêmes zones déjà mentionner dans la carte de transmissivité. Des fortes valeurs de perméabilité ($> 4 \times 10^{-5}$ m/s) sont toujours localisées aux bordures et enregistrées dans les zones suivantes: Tebessa, El-Hamamet, Bekaria, Boulhef-edyr et Morsott. Dans le reste de la plaine, les valeurs varient de 10^{-6} à 10^{-5} m/s .

Tab.5. Quelques valeurs des paramètres hydrodynamiques (T et K)

Systèmes aquifères	Forages	$T \times 10^{-3}$ (m ² /s)	Epaisseur mouillée (Avril, 2002)	$K \times 10^{-5}$ (m/s)
Hamamet/A.chabro	Ys4	0.65	171	0.38
	QR5	0.22	330	0.06
	AC1bis	1.83	164	1.11
	F2-3	3	176	1.70
	F3	0.9	200	0.45
	EF1	4.25	58.5	7.26
	FG1	4.55	77	5.90
	OS1	0.17	---	---
	M9	0.65	171	0.38
	CT	0.25	155	0.16
	YS5	0.148	95	0.15
	Ys4-5	0.85	180	0.47
	Tebessa/Merdja	Q5-6	1.3	114
Q5		0.45	204	0.22
N°69		0.8	320	0.25
J2-3		1.8	130	1.38
FTA2		2.5	150	1.66
M2bis		0.6	204	0.29
M1		7.3	204	3.57
Q3-4		3.2	212	1.50
M2-3		0.24	142.5	0.17
AC2		1.15	39	2.94
D12		0.05	258.5	0.019
KL3		2	250	0.8
Bekaria		W2bis	2.4	144.5
	X2	0.18	144	0.12
	V4	0.4	216	0.18
	E1bis	2.36	130	1.76
	FA2bis	1.09	229	0.47
	X4	0.73	274.5	0.26
Morsott	MR3	0.23	110	0.20
	E2-3	3.66	65	5.6
	M27bis	----	----	-----

Fig.22. Carte de Transmissivité de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott (Tx10-3 m²/s)

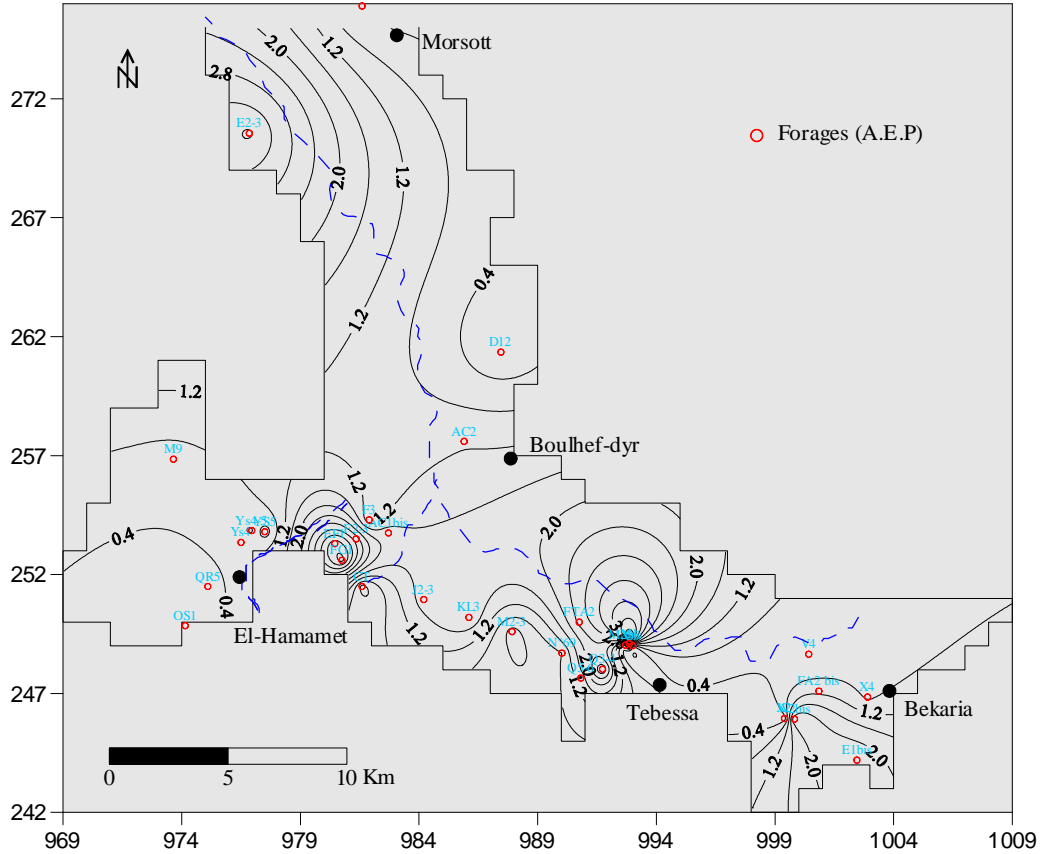
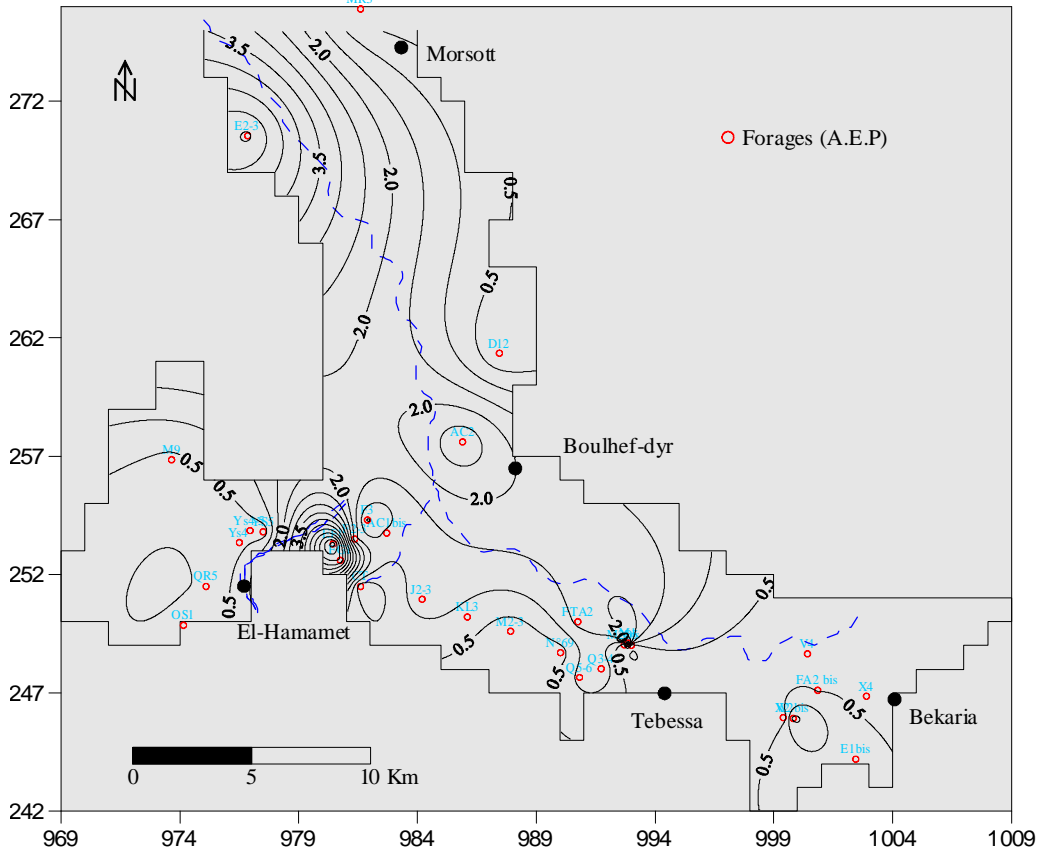


Fig.23. Carte de perméabilité de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott (Kx10-5 m/s)



3.7- Estimation des paramètres hydrodynamiques par sondages électriques:

Les aquifères sont notamment caractérisés par leur capacité à stocker de l'eau et à conduire le flux. Ces paramètres hydrodynamiques, la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement sont généralement estimés par l'interprétation de mesures in situ : les pompages d'essai. Les coûts importants engendrés par leur mise en œuvre ne permettent pas toujours de multiplier les essais de façon satisfaisante dans l'espace et dans le temps, et la densité d'observation est parfois faible pour caractériser les hétérogénéités des réservoirs.

Comparée à la réalisation de forages et de pompages d'essai, l'acquisition des mesures géophysiques est généralement plus rapide et moins coûteuse. Il est ainsi possible d'obtenir une densité d'information supérieure. Mais pour exploiter ces mesures géophysiques en terme hydrogéologique, il s'agit de chercher si elles donnent accès aux paramètres hydrodynamiques des aquifères. Les travaux antérieurs portent notamment sur les fonctions de transfert entre la résistivité électrique des terrains et les propriétés des aquifères (Yadav et Abolfazli, 1998).

3.7.1- Modèle de transmissivité et perméabilité:

Les résultats des cartes de transmissivité et de perméabilité déjà établies pour la nappe alluviale de Tebessa-Morsott sont très discutables à cause de leur élaboration qui est basé sur le principe de l'extrapolation dont la fourchette d'erreur est plus importante. Les données de 32 forages sont insuffisantes pour l'établissement d'une carte représentative dans une vaste plaine de 600 km² de superficie et à terrain hétérogène. Afin de minimiser cette fourchette d'erreur, la construction d'un modèle de transmissivité est inconcevable.

Ce modèle sera basé sur la relation qui puisse exister entre la résistance transversale de la couche aquifère au niveau des forages et leurs transmissivités. Pour compléter ces travaux et notamment chercher comment estimer la porosité de la couche aquifère, à partir des sondages électriques réalisés dans la plaine.

3.7.1.1- La résistance transversale:

Elle est exprimée par le produit de la résistivité apparente par l'épaisseur de la couche:

$$R_T = \rho \cdot E \quad \text{où}$$

R_T = résistance transversale en Ohm.m²

ρ = résistivité Ohm.m

E = épaisseur de la couche

Dans le cas où la couche aquifère est composée par plusieurs horizons résistants, il convient de calculer la résistance transversale totale de la manière suivantes: la résistance transversale est égale à la somme des résistances transversales de chaque horizon aquifère.

$$R_{Tt} = R_{t1} + R_{t2} + R_{t+} + \dots + R_{tn}$$

d'où

$$R_T = \sum R_t$$

Nous tenons à signaler, que le calcul de la résistance transversale est limité pour les horizons dont la résistivité apparente est supérieure ou égale à 10 Ohm.m.

3.7.1.2- La résistivité électrique des roches et l'effet des sels:

La résistivité électrique des roches (ρ) est un paramètre important dans la prospection hydrogéologique. En effet, pour la plus part des roches, la résistivité est presque toujours de type électrolytique: c'est-à-dire que les roches conduisent le courant électrique grâce à l'eau qu'elle contient. Seuls quelques gites métallifères minéraux se comportent en conducteur métalliques ou semi-conducteur.

On peut dire que la résistivité électrique du sous-sol dépend essentiellement de:

- La qualité de l'électrolyte, c'est à dire de la résistivité de l'eau d'imbibition (ρ_w) et par conséquent, de la qualité des sels dissous,
- La quantité d'électrolyte contenue dans l'unité de volume de la roche,
- du mode de distribution de l'électrolyte.

a) Le rôle de la qualité de l'électrolyte:

- Salinité :

Quand un sel se dissout dans l'eau, il se dissocie en ions chargés positivement et ions chargés négativement. Sous l'effet d'un champ électrique, les ions se déplacent, en donnant naissance à un courant électrique. Ce déplacement est gêné par la viscosité de l'eau et pour un ion donné atteint une vitesse limitée appelée la mobilité des ions.

- Conductivité (inverse de la résistivité):

la conductivité d'un électrolyte dépend en fait de:

- sa teneur en sels,
- la mobilité des ions en solution.

$$C = \frac{1}{\rho}$$

où

C = conductivité, $\mu\text{S}/\text{cm}$
 ρ = résistivité, Ohm.m

- Température:

Une variation de la température provoque la variation de la viscosité de l'eau qui influe dans certaines mesures sur la mobilité des ions, donc de la résistivité électrique. L'abaque (fig.24) montre la variation de la résistivité en fonction de la qualité des sels dissous en équivalence en NaCl et de température

b) Quantité des sels dissous:

La résistivité électrique d'une eau dépend de la quantité de sels dissous, mais aussi de la nature de ces sels. Or, dans les roches, la qualité des sels en solution dans l'eau d'imbibition varie avec de nombreux facteurs qui sont:

- la salinité des eaux originelles,
- la solubilité des minéraux des roches encaissantes,
- la surface de contact eau/minéraux,

Le résidu sec, obtenu après filtrage et évaporation, représente la totalité des sels dissous dans l'eau. On admet en général que si le résidu sec est plus élevé que 8 g/l, l'eau est non potable. Cette valeur, quelque peu arbitraire, varie en fonction de la ressource en eau de la région considérée.

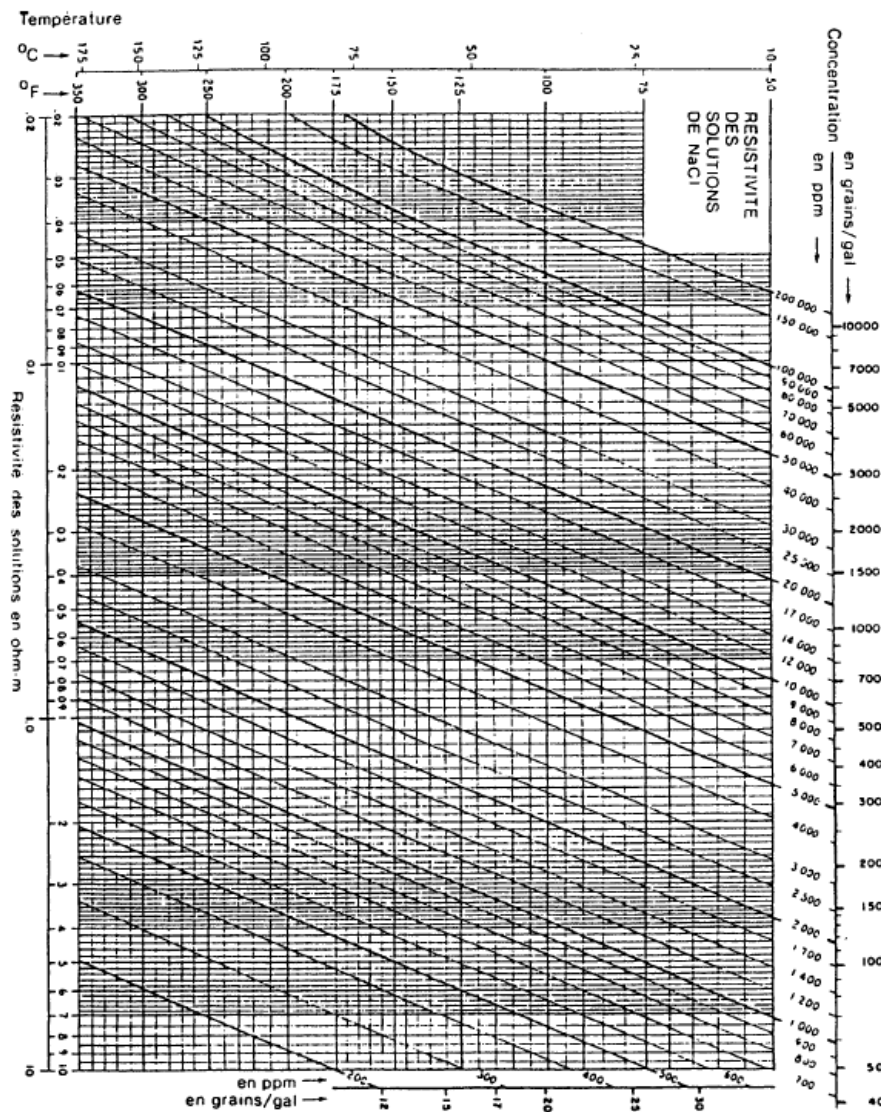


Fig.24. Abaque 1: Résistivité – Température – Salinité.

3.7.1.3- Relation résistivité transversale et transmissivité:

Reposant sur le fait que la circulation du courant électrique dans un conducteur répond à des lois d'expressions mathématiques identiques à celles de l'écoulement dans un milieu poreux. La loi d'Ohm et la loi de Darcy ont la même expression mathématique d'où la résistance transversale et transmissivité expriment la même grandeur par analogie.

$$T = K.h$$

$$RT = \rho_f .E$$

avec: T = transmissivité (m²/s)

K= perméabilité (m/s)

h et E = épaisseur mouillée de l'aquifère

RT = résistance transversale (Ohm.m²)

ρ_f = résistivité vraie de la formation (Ohm.m)

Cette relation n'est valable que dans la mesure où la résistivité de l'eau est constante. Donc, pour établir la relation entre la résistance transversale et la transmissivité, il convient d'abord de corriger les résistivités de la formation, en les ramenant à une résistivité de l'eau constante.

a) Fiabilité des données:

- *Transmissivité :*

Pour que la transmissivité soit plus représentative du comportement hydrodynamique réel de la nappe, il est préférable qu'elle soit calculée à partir des données de rabattement enregistrées au niveau des puits d'observation (piézomètre) mais pas au niveau du puit de pompage. Afin de garder le même esprit d'analyse, nous avons pris en considération que les valeurs de transmissivité calculées à partir des données de la remontée au niveau des forages.

- *La résistance transversale:*

Nous avons déjà expliqué l'influence de la salinité sur la résistivité de la roche par conséquent sur la conductivité d'où sur la résistance transversale.

Afin d'homogénéiser et de minimiser l'effet de la salinité sur la résistivité de la couche aquifère, on a ramener la résistivité de l'eau à 10 Ohm.m, ce qui correspond aux normes de potabilité avec une teneur en sels de l'ordre de 0.5 à 1 g/l et une conductivité de 1000 µS/cm à la température de 20°C.

Pour une roche saturée en eau, Archie a établie une relation expérimentale liant la résistivité de la roche, la porosité, le mode de distribution et la résistivité de l'électrolyte.

$$\rho_f = \rho_w \cdot F$$

ρ_f = résistivité vraie de la roche (Ohm.m)

ρ_w = résistivité de l'eau d'imbition (Ohm.m)

F = facteur de formation (caractérise la structure de la roche).

b) Principe de base:

Nous allons ramener, la résistance transversale à ce qu'elle aurait été pour une eau de résistivité égale à 10 Ohm, soit une conductivité de 1000µS/cm.

$$RT\ brute = \rho\ brute \cdot E = F \cdot \rho_w \cdot E \quad (1)$$

$$RT\ corrigée = \rho\ corrigée \cdot E = F \cdot 10\ (Ohm.m) \cdot E \quad (2)$$

Si on fait le rapport entre l'équation (1) et (2) on aura:

$$\frac{RT\ corrigée}{RT\ brute} = \frac{10 \cdot F \cdot E}{\rho_w \cdot F \cdot E}$$

On déduit alors que: **RT corrigée** = $\frac{RT\ brute \cdot 10}{\rho_w}$ = **RT brute. 0.001C**

$$RT\ corrigée = RT\ brute \times 0.001C$$

avec (C) la conductivité (µs/cm)

3.7.1.4- Etablissement du modèle de transmissivité:

Comme on a déjà mentionné, l'importance de la transmissivité dans chaque étude hydrogéologique ainsi que dans le choix des sites pour l'implantation des forages futurs. Mais ce paramètre ne peut être déterminé qu'après la réalisation du forage suivie par des essais de pompage à débit constant.

Du point de vue économique, un essai de pompage coûte actuellement aux environs de 300000 DA plus le facteur temps. D'où la nécessité à la recherche d'une autre approche est souhaitable.

a) Correction des données:

- *Principe de base:*

Les valeurs de la transmissivité calculées à partir des essais de pompage sont supposées de représenter la transmissivité du niveau aquifère saturé, mais en réalité, elle ne reflète que la transmissivité des horizons crépinés au niveau de chaque forage. Pour cela, et afin que la relation entre la résistance transversale et la transmissivité soit cohérente, elles sont ramenées à ce qu'elles auraient été pour une épaisseur mouillée. Les valeurs corrigées de la résistance transversale et de la transmissivité sont représentées dans le Tab. 6 et 7.

b) Représentation des données (fig.25):

Les deux paramètres (T et RT) sont représentés sous forme de nuage de points sur une échelle linéaire, à l'axe des ordonnées les valeurs de (RT) et aux abscisses les valeurs de (T). Après ajustement de plusieurs courbes de tendance à savoir:

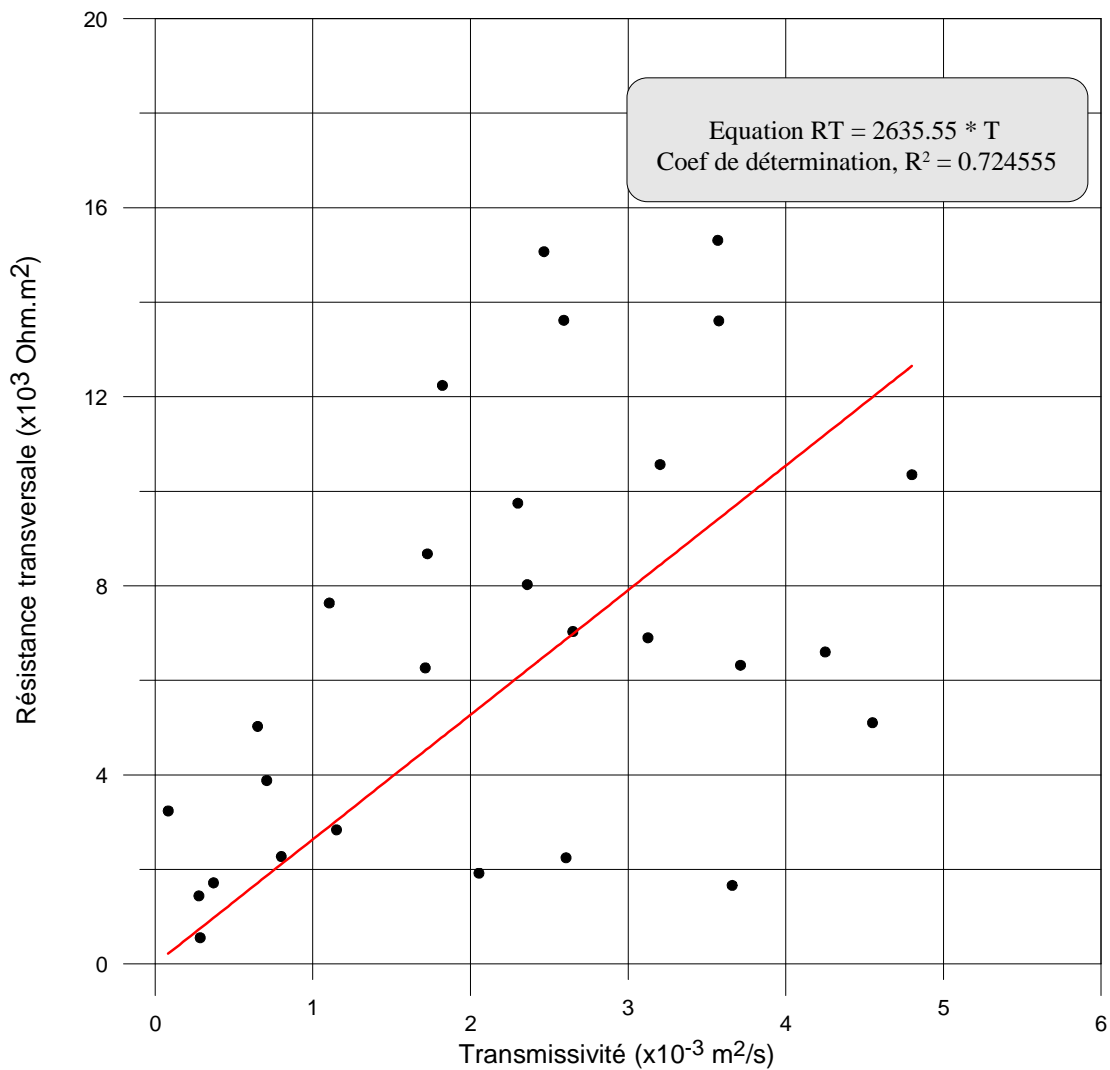
- fonction puissance ($\ln(y) = a \cdot \ln(x) + b$),
- fonctions linéaires ($y = a \cdot x + b$ et $y = a \cdot x$),
- fonction logarithmique ($y = a \cdot \ln(x) + b$),
- fonction exponentielle ($\ln(y) = a \cdot x + b$)
- fonction polynomiale,

Seule, la fonction linéaire de la forme $y = a \cdot x$ qui passe par l'origine exprime bien la relation entre la résistance transversale et la transmissivité avec un coefficient de détermination : $R^2 = 0.724555$. Celui-ci présente le pourcentage de la cohérence entre les points des deux paramètres ajustés par une ligne.

c) Fiabilité du modèle:

Les valeurs de la transmissivité sont recalculées par le modèle obtenu entre la relation de (RT) et (T) au niveau de chaque forage. Elles sont plus rapprochées de celui de Jacob, sauf aux forages ys4, ys4-5 et y5 où les valeurs sont supérieures au modèle de Jacob (Tab.8).

Fig.25. Correlation entre la transmissivité et résistance transversale (nappe alluviale de Tebessa-Morsott)



d) Etablissement de la carte de transmissivité et perméabilité (fig.26 et 27):

A la lumière de ce modèle, on a pu déterminer la valeur de la transmissivité au niveau d'environ 500 sondages électriques, d'où une meilleure présentation de la carte de transmissivité et par conséquent de la perméabilité. Les deux cartes établies ont bien visualisé l'évolution des paramètres hydrodynamiques T et K au sein de la plaine et apporté des informations nouvelles quant aux choix des zones propices à l'implantation des forages futur, en particulier au Nord-Est de Boulhef-edyr et à l'Ouest d'El-Hamamet.

Les fortes valeurs de $10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ et $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ sont observées aux bordures et dans les zones d'El-Hamamet, Tebessa, Bekaria, Boulhef-edyr et Morsott et décroît tout en allant vers le centre de la plaine.

Fig.26. Carte de Transmissivité de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott ($T \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$)
(d'après le modèle de relation entre Tet RT)

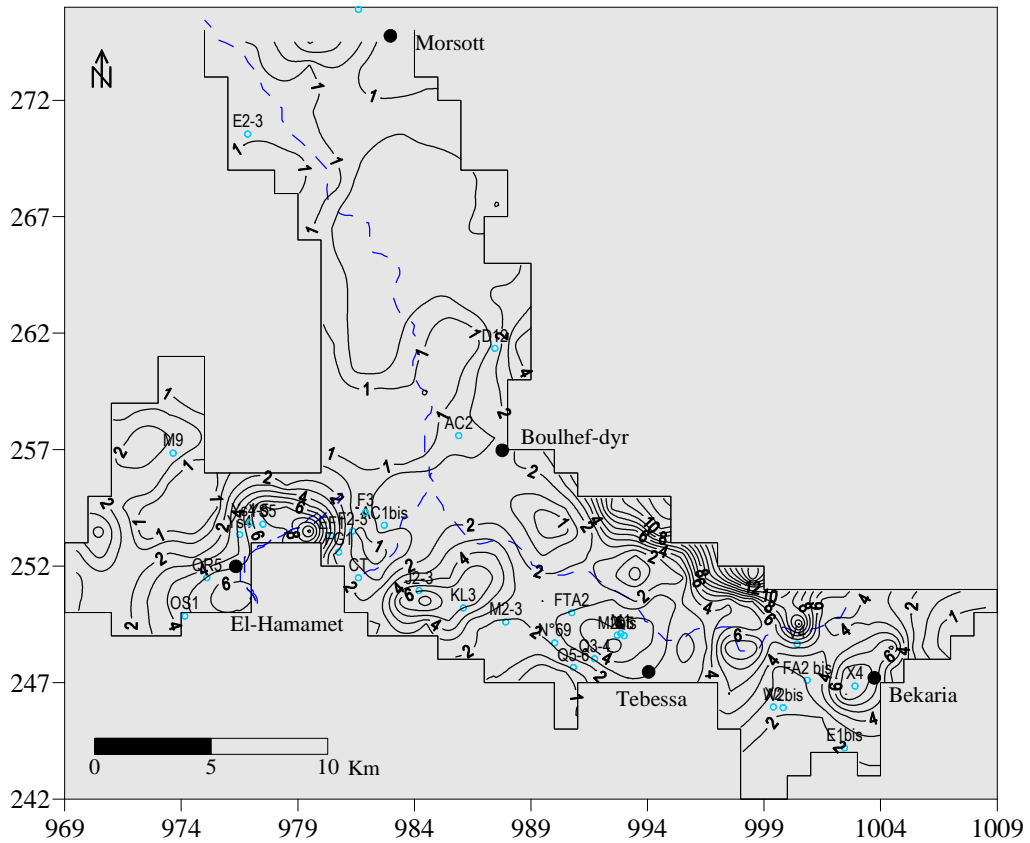
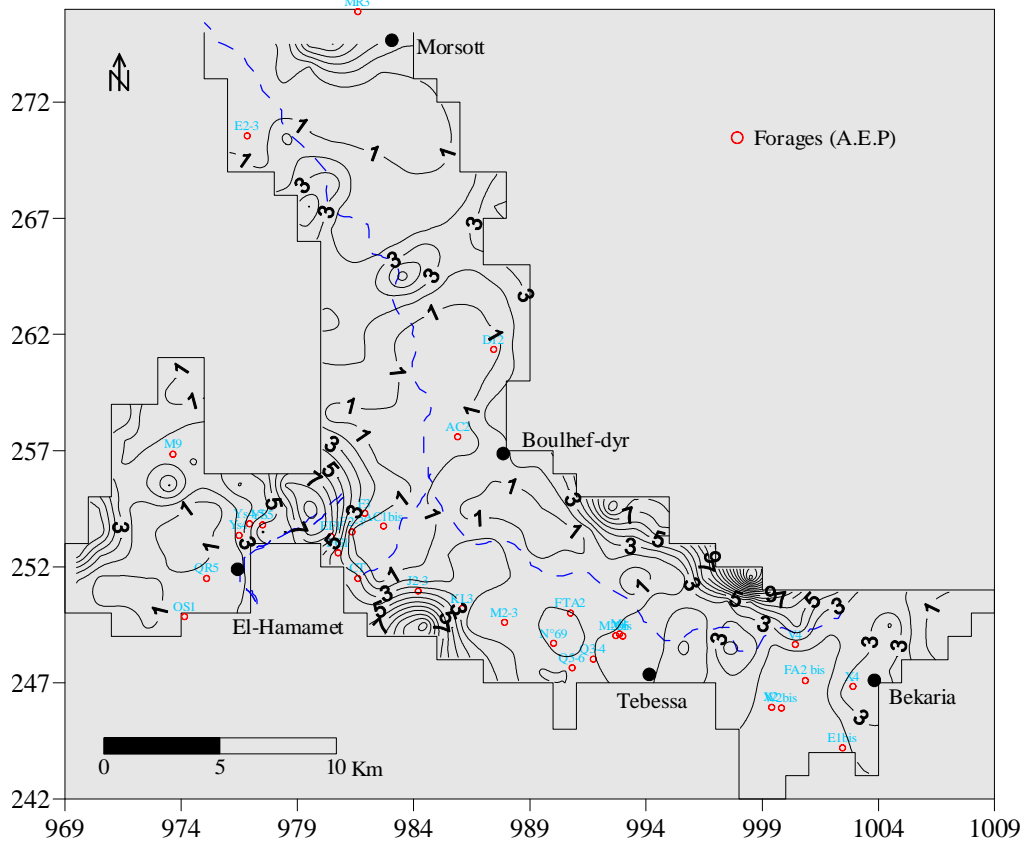


Fig.27. Carte de perméabilité de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott ($K \times 10^{-5} \text{ m/s}$)
(d'après le modèle de relation entre RT et T)



Tab.6. Valeurs des résistances transversale corrigées

X	Y	Forages	RT brute	Cond. moy (19.98 et 2002)	RT corri-gée	Epaisseur mouillée	Epai/Aquifère $\rho > 10 \text{ Ohm.m}$	Coefficient Correction	RT corrigée
		code	(Ohm.m ²)	$\mu\text{S/cm}$	(Ohm.m ²)	(Hm) en m	(H) en m	(Hm/H)	(Ohm.m ²)
980.75	252.6	FG1	6000	1546	9276	55	100	0.55	5101.8
1002.9	246.85	X4	6450	3481	22452.45	247.31	250	0.1	2245.245
981.35	253.5	F2-3	5300	1839	9746.7	175.9	112	1	9746.7
981.9	254.3	F3	4850	1789	8676.65	197	175	1	8676.65
987.45	261.35	D12	1865	1736	3237.64	258.53	165	1	3237.64
980.45	253.3	EF1	5811	1992	11575.512	130	225	0.57	6598.04184
986.1	250.2	KL3	10075	1038	10457.85	250.15	340	0.73	7634.2305
999.82	245.92	W2	5880	1797	10566.36	144.27	130	1	10566.36
1000.42	248.65	V4	1850	3673	6795.05	216	230	0.93	6319.3965
990.02	248.7	N69	28000	1193	3340.4	188	275	0.68	2271.472
987.92	249.6	M2-3	4000	1221	738.705	142.5	190	0.75	554.02875
999.4	245.95	X2	4400	1598	7031.2	144.27	130	1	7031.2
992.7	249.03	M2bis	6000	2040	12240	204.31	180	1	12240
984.2	250.95	J2-3	10000	897	30946.5	129.65	290	0.44	13616.46
982.71	253.75	AC1bis	5350	1501	8030.35	164.11	210	0.78	6263.673
991.73	248.02	Q3-4	18000	1294	10350.706	212.26	210	1	10350.706
992.86	249.1	M1	6503	2354	15308.062	204.31	180	1	15308.062
976.85	270.55	E2-3	1569	1058	1660.002	60	60	1	1660.002
993	249.01	Q5	6300	2392	15069.6	204.31	180	1	15069.6
974.15	249.85	Os1	1500	1143	1714.5	291	290	1	1714.5
976.95	253.85	Ys4-5	19950	1896	37825.2	130	190	0.68	25721.136
975.1	251.5	QR5	1500	1245	1867.5	329.7	425	0.77	1437.975
1000.85	247.1	FA2bis	4300	1783	7666.9	229.66	255	0.9	6900.21
990.75	250	FTA2	7550	1802	13605.1	147.17	115	1	13605.1
981.6	251.5	CT	3000	1267	7323.26	42.5	80	0.53	3881.3278
977.5	253.8	Ys5	19950	1964	39181.8	93.22	155	0.6	23509.08
990.82	247.65	Q5-6	6500	1018	6617	50.5	170	0.29	1918.93
976.5	253.35	Ys4	19950	1639	32698.05	171.77	155	1	32698.05
973.65	256.85	M9	2478	2028	5025.384	39.09	39	1	5025.384
985.9	257.6	AC2	1772	1601	2836.972	82.7	65	1	2836.972
1002.45	244.2	E1 bis	6456	1177	7598.712	130	130	1	7598.712

Tab.7. Valeurs de la transmissivité corrigées

X	Y	Forages	T	Epaiss.cripinée	Epaiss.mouillée	Epaiss. aquifère	Rapport	Coefficient de correction	T corrigée
		Code	($\times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$)	(Hcrip) en m	(Hm) en m	$\rho > 10 \text{ Ohm.m}$	(Hcrip/Hm)		($\times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$)
980.75	252.6	FG1	4.55	55	55	100	55/55	1	4.55
1002.9	246.85	X4	0.73	70	247.31	250	250/70	3.57	2.6061
981.35	253.5	F2-3	2.3	112	175.9	112	112/112	1	2.3
981.9	254.3	F3	0.89	90	197	175	175/90	1.94	1.7266
987.45	261.35	D12	0.05	100	258.53	165	165/100	1.65	0.0825
980.45	253.3	EF1	4.25	130	130	225	130/130	1	4.25
986.1	250.2	KL3	0.42	95	250.15	340	250/95	2.63	1.1046
999.82	245.92	W2	1.83	74	144.27	130	130/74	1.75	3.2025
1000.42	248.65	V4	0.55	32	216	230	216/32	6.75	3.7125
990.02	248.7	N69	0.8	188	188	275	188/118	1	0.8

987.92	249.6	M2-3	0.24	119	142.5	190	142.5/119	1.19	0.2856
999.4	245.95	X2	0.92	45	144.27	130	130/45	2.88	2.6496
992.7	249.03	M2bis	0.66	65	204.31	180	180/65	2.76	1.8216
984.2	250.95	J2-3	1.8	90	129.65	290	129.65/90	1.44	2.592
982.71	253.75	AC1bis	1.15	110	164.11	210	164/110	1.49	1.7135
991.73	248.02	Q3-4	3.2	140	212.26	210	210/140	1.5	4.8
992.86	249.1	M1	1.83	92	204.31	180	180/92	1.95	3.5685
976.85	270.55	E2-3	3.66	60	60	60	60/60	1	3.66
993	249.01	Q5	1.37	100	204.31	180	180/100	1.8	2.466
974.15	249.85	Os1	0.166	130	291	290	290/130	2.23	0.37018
976.95	253.85	Ys4-5	0.22	130	130	190	130/130	1	0.22
975.1	251.5	QR5	0.168	200	329.7	425	330/200	1.65	0.2772
1000.85	247.1	FA2bis	1.089	80	229.66	255	230/80	2.87	3.12543
990.75	250	FTA2	2.5	80	147.17	115	115/80	1.43	3.575
981.6	251.5	CT	0.25	15	42.5	80	42.5/15	2.83	0.7075
977.5	253.8	Ys5	0.148	65	93.22	155	93/65	1.43	0.21164
990.82	247.65	Q5-6	1.3	107.3	50.5	170	170/107	1.58	2.054
976.5	253.35	Ys4	0.64	65	171.77	155	155/65	2.38	1.5232
973.65	256.85	M9	0.65	39	39.09	39	39/39	1	0.65
985.9	257.6	AC2	1.15	65	82.7	65	65/65	1	1.15
1002.45	244.2	E1 bis	2.36	60	130	60	60/60	1	2.36

Tab.8. Valeurs de la transmissivité (d'après les deux modèles)

X	Y	Forages	RTcorrigée	T (Jacob)	T corrigée	T (d'après modèle)
		code	(Ohm.m ²)	(x10 ⁻³ m ² /s)	(x10 ⁻³ m ² /s)	(x10 ⁻³ m ² /s)
980.75	252.6	FG1	5102	4.55	4.55	1.94
1002.9	246.85	X4	2245	0.73	2.61	0.85
981.35	253.5	F2-3	9747	2.3	2.30	3.70
981.9	254.3	F3	8677	0.89	1.73	3.29
987.45	261.35	D12	3238	0.05	0.08	1.23
980.45	253.3	EF1	6598	4.25	4.25	2.50
986.1	250.2	KL3	7634	0.42	1.10	2.90
999.82	245.92	W2	10566	1.83	3.20	4.01
1000.42	248.65	V4	6319	0.55	3.71	2.40
990.02	248.7	N69	2271	0.8	0.80	0.86
987.92	249.6	M2-3	554	0.24	0.29	0.21
999.4	245.95	X2	7031	0.92	2.65	2.67
992.7	249.03	M2bis	12240	0.66	1.82	4.64
984.2	250.95	J2-3	13616	1.8	2.59	5.17
982.71	253.75	AC1bis	6264	1.15	1.71	2.38
991.73	248.02	Q3-4	10351	3.2	4.80	3.93
992.86	249.1	M1	15308	1.83	3.57	5.81
976.85	270.55	E2-3	1660	3.66	3.66	0.63
993	249.01	Q5	15070	1.37	2.47	5.72
974.15	249.85	Os1	1715	0.166	0.37	0.65
976.95	253.85	Ys4-5	25721	0.22	0.22	9.76
975.1	251.5	QR5	1438	0.168	0.28	0.55

1000.85	247.1	FA2bis	6900	1.089	3.13	2.62
990.75	250	FTA2	13605	2.5	3.58	5.16
981.6	251.5	CT	3881	0.25	0.71	1.47
		Suite Tab.8				
977.5	253.8	Ys5	23509	0.148	0.21	8.92
990.82	247.65	Q5-6	1919	1.3	2.05	0.73
976.5	253.35	Ys4	32698	0.64	1.52	12.41
973.65	256.85	M9	5025	0.65	0.65	1.91
985.9	257.6	AC2	2837	1.15	1.15	1.08
1002.45	244.2	E1 bis	7599	2.36	2.36	2.88

3.7.2- La porosité:

La quantité d'eau contenue dans les roches dépend de la porosité, donc l'identification ainsi que la distribution spatiale de ce paramètre sera d'une grande importance en hydrogéologie, en particulier pour comprendre la répartition du potentiel hydraulique au sein de l'aquifère et le mécanisme de dispersion des polluants ainsi que de cerner les zones les plus exposées à la pollution de surface.

La plupart des matériaux géologiques sont de mauvais conducteurs, sauf les oxydes et sulfures métalliques et le graphite. Il en résulte que la conductivité électrique des roches est la plupart du temps due à la présence de l'eau dans les pores ou fractures.

Il existe plusieurs modèles reliant la porosité et la conductivité électrique. Nous se limiterons ici à présenter la relation d'Archie et d'Humble, développée pour les roches sédimentaires, mais appliquée aussi à tous les types de roches. La loi d'Archie est couramment utilisée en pratique.

3.7.2.1- La loi d'Archie (fig.28):

Dans le cas d'une roche saturée, Archie a établi une relation expérimentale liant la résistivité de la roche à la porosité et à la résistivité de l'eau d'imbibition.

$$\rho_r = \rho_w a \phi^{-m}$$

Avec : ρ_w = résistivité de l'eau d'imbibition ρ_r = résistivité vraie de la roche;

ϕ = porosité ; a = facteur qui dépend de la lithologie et qui varie entre 0.6 et 2 (a < 1 pour les roches à porosité d'interstices et a > 1 pour les roches à porosité de fracture) ;

m = facteur de cimentation (il dépend de la forme des pores, de la compaction et varie entre 1,3 pour les sables non consolidés à 2,2 pour les calcaires cimentés).

La conductivité électrique des milieux poreux est caractérisée par un nombre sans dimension appelé *facteur de formation*. On a l'habitude de regrouper sous le terme de facteur de formation.

$$F = a \phi^{-m}$$

Dans la pratique on admet pour les formations meubles, sable et grès, la formule de Humble:

$$F = 0,62. \phi^{-2,15} \text{ ou } F = 0,81 \phi^{-2}$$

L'abaque 2 (fig.27) permet, à partir de la valeur de la porosité, d'obtenir la valeur de F et vice versa. Les relations expérimentales sont relativement rigoureuses lorsqu'il s'agit de formations propres, c'est-à-dire dépourvues d'argile.

En présence d'argile, il faudra faire intervenir des facteurs de correction. De plus, lorsque le réservoir est constitué de sables fins non consolidés et que l'eau d'imbibition est douce, ces relations ne sont plus rigoureuses. Divers auteurs ont en effet montré que dans ce cas :

- La valeur de F varie avec la valeur de la résistivité de l'eau d'imbibition ρ_w
- La valeur de F varie avec la taille des grains.

3.7.2.2- Etablissement de la carte de porosité totale (fig.29):

En hydrogéologie, nous nous trouvons très rarement des cartes de porosité malgré leur apport à la compréhension des problèmes hydrogéologiques. Dans cet esprit, et à l'aide des formules empiriques nous avons pu identifier ce paramètre ainsi que sa distribution spatiale dans la nappe alluviale de Tebessa-Morsott.

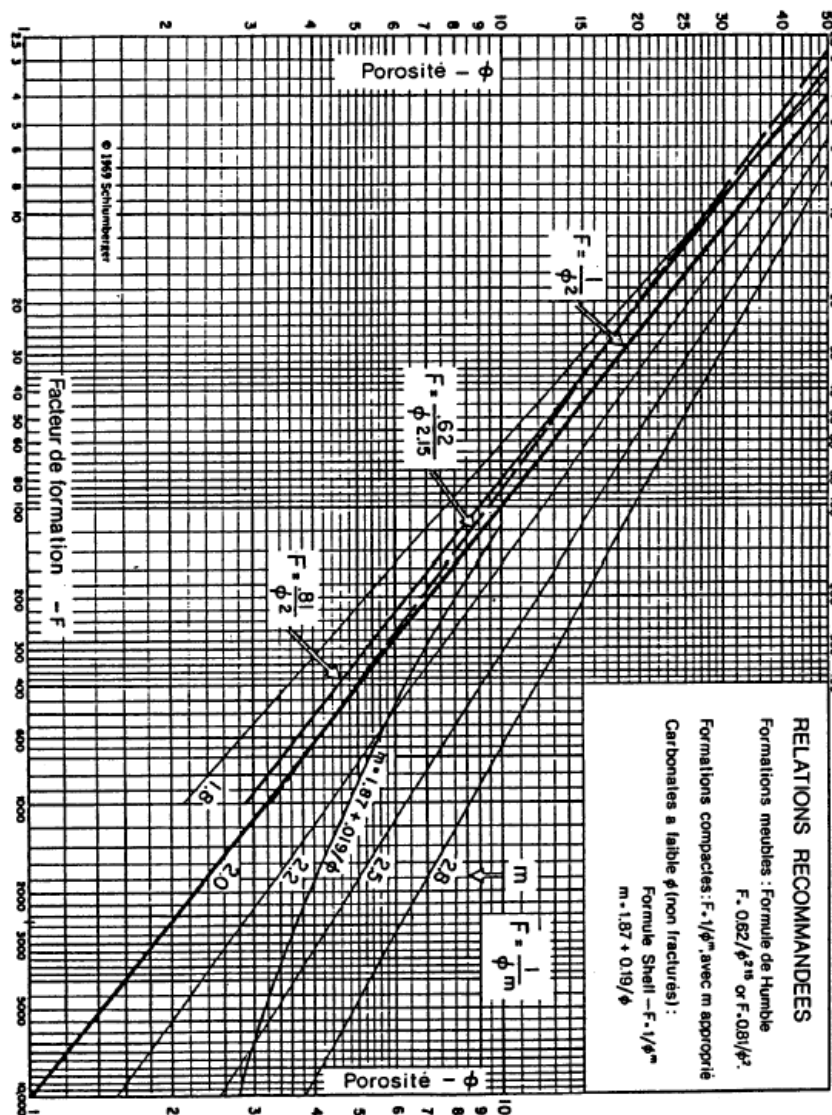


Fig.28. Abaque 2. Porosité versus facteur de formation.

a) Principe et méthode de calcul :

Pour apporter plus de précision sur la répartition spatiale de la porosité, on a discrétisé le domaine d'étude en 440 mailles régulières.

Le facteur de formation (F) est calculé par la relation suivante:

$$F = \frac{\rho_r}{\rho_w}$$

où : ρ_r : la résistivité de la roche (Ohm.m) ;
 ρ_w : la résistivité de l'eau d'imbibition (Ohm.m).

Afin d'éliminer l'influence de la teneur en sels sur la résistivité de la roche aquifère et de prendre en compte l'épaisseur saturée de l'aquifère, des corrections ont été faites en supposant que la résistivité de l'eau est constante et égale à 10 Ohm.m, ce qui correspond à environ à 1 g/l. La résistance transversale pour l'épaisseur mouillée (RTm) de la couche aquifère est calculée par la relation suivante:

$$RTm = Rtc \cdot \frac{E_m}{E}$$

avec RTm = résistance transversale pour l'épaisseur mouillée de la couche aquifère (Ohm.m²);

Rtc = résistance transversale pour l'épaisseur de la couche aquifère (Ohm.m²)

E_m = épaisseur mouillée de la couche aquifère (m);

E = épaisseur de la couche aquifère (m).

Le facteur de formation est calculé par la relation en équation (2) en remplaçant E par E_m.

$$F = \frac{RTm}{E_m \cdot 10}$$

La porosité totale est calculée à partir de la formule de Humble au niveau de chaque maille. A partir de ces valeurs, on a établi la carte de la porosité totale de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott. Cette carte a traduit une nouvelle répartition des matériaux de l'aquifère de porosité totale différente.

Conclusion :

La nappe alluviale de Tebessa-Morsott est composée par des séries sédimentaires d'âge Mio-plio-quatenaire format un complexe aquifère qui se comporte comme une seule unité hydrogéologique et de plusieurs systèmes aquifères communicants entre eux.

L'utilisation des données géophysiques en hydrogéologie a apporté des précisions quant à l'identification et la répartition spatiale de la transmissivité, perméabilité et porosité totale au sein de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott.

Enfin, pour une étude hydrogéologique détaillée, il faut bien distinguer entre l'hydrogéologie des bordures de celle du centre de la plaine.

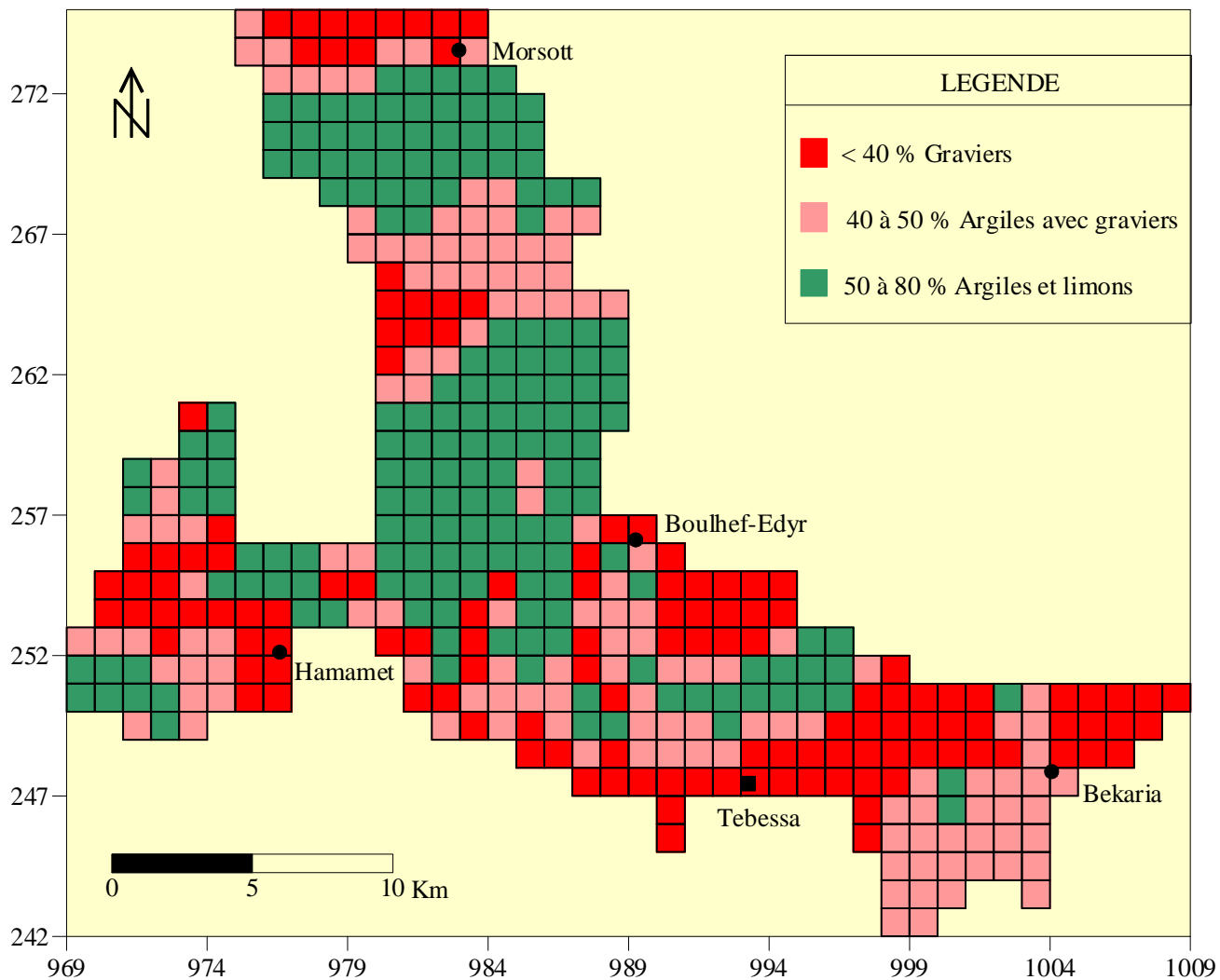


Fig.29. Carte de la porosité totale de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott

Chap.V. Hydrochimie

1- Introduction:

La qualité de l'eau constitue un enjeu environnemental primordial pour tous les secteurs utilisateurs. Les ressources en eaux souterraines peuvent être de mauvaise qualité en raison de problèmes d'origine naturelle ou de contamination, ou les deux. Il est souvent nécessaire de connaître la qualité d'une eau avant de s'en servir.

L'accroissement rapide de la population, en particulier dans les pays sous développés et en voie de développement où l'extension de la culture irriguée et le développement industriel, influençant fortement la quantité et la qualité de l'eau dans la nature. Dès lors, la nécessité d'une politique cohérente de gestion rationnelle et de protection des ressources s'impose. Mais cette gestion rationnelle ne saurait se fonder que sur la connaissance des problèmes d'hydrogéologie posés.

Dans le même contexte, nous essayerons de présenter les caractéristiques physico-chimiques des eaux de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott, en se basant sur des données nouvelles et anciennes.

2- Chimie des eaux souterraines de la plaine:

2.1- Origine des eaux:

- L'alimentation directe de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott par les eaux de précipitations est faible et ne représente que 1 % du volume précipité; par contre l'alimentation latérale par les calcaires qui bordent la plaine est très complexe et c'est la plus considérée ;

- L'alimentation en charge à travers les jeux de failles dans certaines zones est confirmée par la température élevée des eaux souterraines (voir cartes de température).

- Les eaux s'écoulent dans des formations détritiques du Mio-plio-quaternaire, graviers, cailloutis de calcaires, grès, argiles et limons séparés par des écrans étanches et présentent un grano-Classement latéral des bordures vers le centre.

2.2- Faciès chimique :

2.2.1- Eaux des forages (eau profonde):

2.2.1.1- Interprétation des données chimiques:

a) Formule ionique (Tab.9):

On dispose des anciennes analyses chimiques des eaux profondes de 25 forages effectuées par la direction d'hydraulique de Tebessa en 1972/73.

Afin de comparer les eaux entre elles et d'indiquer les types de cations et anions les plus dominants dans la composition chimique des eaux analysées consiste, partant des teneurs en mg/l, à calculer les milliéquivalents par litre de chaque élément ainsi que son pourcentage par rapport à la somme des quantités en réaction. Pour faire une comparaison ionique, on classe

de gauche à droite, par ordre décroissant de quantités en réaction en pourcent, d'abord le groupe des anions, puis des cations. Les données interprétées sont représentées dans le Tab. 9 et qui ont permis de distinguer les faciès chimiques suivants:

- Les forages EF1, F2-3, AC1bis, M1, FG1 et CT: faciès *bicarbonaté calcique*,
- Les forages M2- 3, X2, F3, QR54 et YS4: faciès *sulfaté calcique*,
- Les forages Q3-4, Q5-6, J2-3 et E2-3: faciès *sulfaté sodique et potassique*,
- Les forages N69, V4 et KL3: faciès *chloruré sodique et potassique*,
- Les forages X4 et FA2bis: faciès *bicarbonaté sodique et potassique*,
- Les forages Q5 et W2 : faciès *sulfaté magnésienne*,
- Le forage FTA2: faciès *chloruré calcique*.

Tab. 9: Faciès chimique des eaux des forages.

Forages	Quantité en réaction en (%)		Faciès chimiques
	Anions	Cations	
X ₄	r HCO ₃ > r SO ₄ > r Cl	r (Na + K) > r Ca > r Mg	Eau bicarbonatée sodique
FA ₂ bis	r HCO ₃ > r SO ₄ > r Cl	r (Na + K) > r Ca > r Mg	Eau bicarbonatée sodique
V ₄	r Cl > r HCO ₃ > r SO ₄	r (Na + K) > r Mg > r Ca	Eau chlorurée sodique
X ₂	r SO ₄ > r Cl > r HCO ₃	r Ca > r (Na + K) > r Mg	Eau sulfatée calcique
W ₂	r SO ₄ > r Cl > r HCO ₃	r Mg > r (Na + K) > r Ca	Eau sulfatée magnésienne
M ₂ bis	r HCO ₃ > r SO ₄ > r Cl	r Ca > r Mg > r (Na + K)	Eau bicarbonatée calcique
M ₁	r HCO ₃ > r SO ₄ > r Cl	r Ca > r (Na + K) > r Mg	Eau bicarbonatée calcique
Q ₅	r SO ₄ > r HCO ₃ > r Cl	r Mg > r Ca > r (Na + K)	Eau sulfatée magnésienne
FTA ₂	r Cl > r SO ₄ > r HCO ₃	r Ca > r (Na + K) > r Mg	Eau chlorurée calcique
N°69	r CL > r HCO ₃ > r SO ₄	r (Na + K) > r Mg > r Ca	Eau chlorurée sodique
Q ₃₋₄	r SO ₄ > r Cl > r HCO ₃	r (Na + K) > r Mg > r Ca	Eau sulfatée sodique
Q ₅₋₆	r SO ₄ > r HCO ₃ > r Cl	r (Na + K) > r Ca > r Mg	Eau sulfatée sodique
M ₂₋₃	r SO ₄ > r Cl > r HCO ₃	r Ca > r Mg > r (Na + K)	Eau sulfatée calcique
KL ₃	r CL > r SO ₄ > r HCO ₃	r (Na + K) > r Mg > r Ca	Eau chlorurée sodique
J ₂₋₃	r SO ₄ > r Cl > r HCO ₃	r (Na + K) > r Mg > r Ca	Eau sulfatée sodique
CT	r HCO ₃ > r SO ₄ > r Cl	r Ca > r Mg > r (Na + K)	Eau bicarbonatée calcique
AC ₁ bis	r HCO ₃ > r SO ₄ > r Cl	r Ca > r Mg > r (Na + K)	Eau bicarbonatée calcique
F ₃	r SO ₄ > r HCO ₃ > r Cl	r Ca > r (Na + K) > r Mg	Eau sulfatée calcique
F ₂₋₃	r HCO ₃ > r SO ₄ > r Cl	r Ca > r Mg > r (Na + K)	Eau bicarbonatée calcique
EF ₁	r HCO ₃ > r SO ₄ > r Cl	r Ca > r Mg > r (Na + K)	Eau bicarbonatée calcique
FG ₁	r HCO ₃ > r SO ₄ > r Cl	r Ca > r (Na + K) > r Mg	Eau bicarbonatée calcique
YS ₄₅	r SO ₄ > r Cl > r HCO ₃	r Ca > r Mg > r (Na + K)	Eau sulfatée calcique
YS ₄₋₅	r SO ₄ > r HCO ₃ > r Cl	r Ca > r Mg > r (Na + K)	Eau sulfatée calcique
QR ₅₄	r SO ₄ > r HCO ₃ > r Cl	r Ca > r (Na + K) > r Mg	Eau sulfatée calcique
E ₂₋₃	r SO ₄ > r Cl > r HCO ₃	r (Na + K) > r Mg > r Ca	Eau sulfatée sodique

En général, nous pouvons retenir trois types d'eau: Bicarbonatée sodique et calcique, chlorurée sodique et calcique, et sulfatée calcique et magnésienne/sodique. Ils sont représentés dans une carte sous forme de faciès ponctuels (fig.30).

b) *Digramme de Piper* (fig.31):

La représentation minérale des eaux des forages de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott sous la forme d'un diagramme triangulaire de Piper à l'aide du logiciel (Diagrammes) du laboratoire d'hydrogéologie d'Avignon, indique qu'il y a peu de diversité: la grande majorité des eaux sont du type Chlorurées et sulfatées calcique et magnésique, à l'exception des forages suivants:

- CT et F2-3: faciès bicarbonatés calcique et magnésique;
- N69, KL3, V4, AC2 et Q5-6: faciès sodiques et potassique ou sulfaté sodique
- X4 : faciès carbonaté sodique et potassique.

Remarque : Nous avons retenus que les forages dont la balance ionique est inférieure à 5% et les données sont représentées dans le Tab. 10.

2.2.1.2- Interprétation des données physiques:

Les paramètres physico-chimiques des eaux profondes de la nappe sont présentés dans le Tab. 10. Les valeurs de conductivité électrique des eaux de la nappe indiquent que celles-ci sont moyennement à fortement minéralisées avec des valeurs de conductivité électrique comprises entre 600 et 2600 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La concentration en sels dissous oscille entre 300 à 1750 mg/l.

Tab. 10. Paramètres physico-chimiques des forages

Forage	pH	R.S (mg/l)	Cond. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	HCO_3^-	Cl ⁻	NO_3^-	SO_4^{--}	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na+	K+	Bal %
ys4	8.2	300	600	97	42	37	100	45	22	30	0	-1
ys4-5	8.2	514	800	134	105	4	176	74	32	52	1	-2
ys5	8	1028	1700	275	170	12	322	118	52	138	10	1
w2	8.6	580	900	309	52	13	120	8	20	177	0	3
EF1	8.4	494	700	177	45	34	88	72	22	30	0	1
CT	8.2	400	600	281	0	38	42	64	34	10	0	3
J2-3	7.4	1016	2200	295	252	6	525	132	88	188	12	-1
N69	8.5	764	1500	287	214	6	195	75	46	155	14	-1
Q3-4	8	1234	1900	275	230	50	320	104	65	136	19	-4
W2bis	8.1	580	1000	105	90	7	293	43	62	88	0	3
FG1	8	842	1200	305	130	32	204	140	22	78	7	-4
M2-3	8.3	762	1100	134	80	36	322	124	43	60	5	3
F2-3	7.6	366	700	262	30	64	60	92	24	28	3	3
X4	8.4	720	1100	409	45	56	166	34	16	202	16	-1
Q5-6	8	1038	2400	239	135	0	290	112	18	172	0	3
X2	8.3	1746	2600	140	113	1	1000	251	80	200	2	3
Z1 bis	8.2	408	600	153	35	0	114	62	23	16	4	-1
M2 bis	7.7	816	1200	433	190	100	260	174	78	120	6	2
V4	7.9	1400	2200	372	375	12	290	66	42	354	6	-1
AC2	8.1	404	600	530	2025	350	440	80	160	1515	0	1
KL3	8.4	1322	1800	256	350	26	296	126	40	224	0	-3

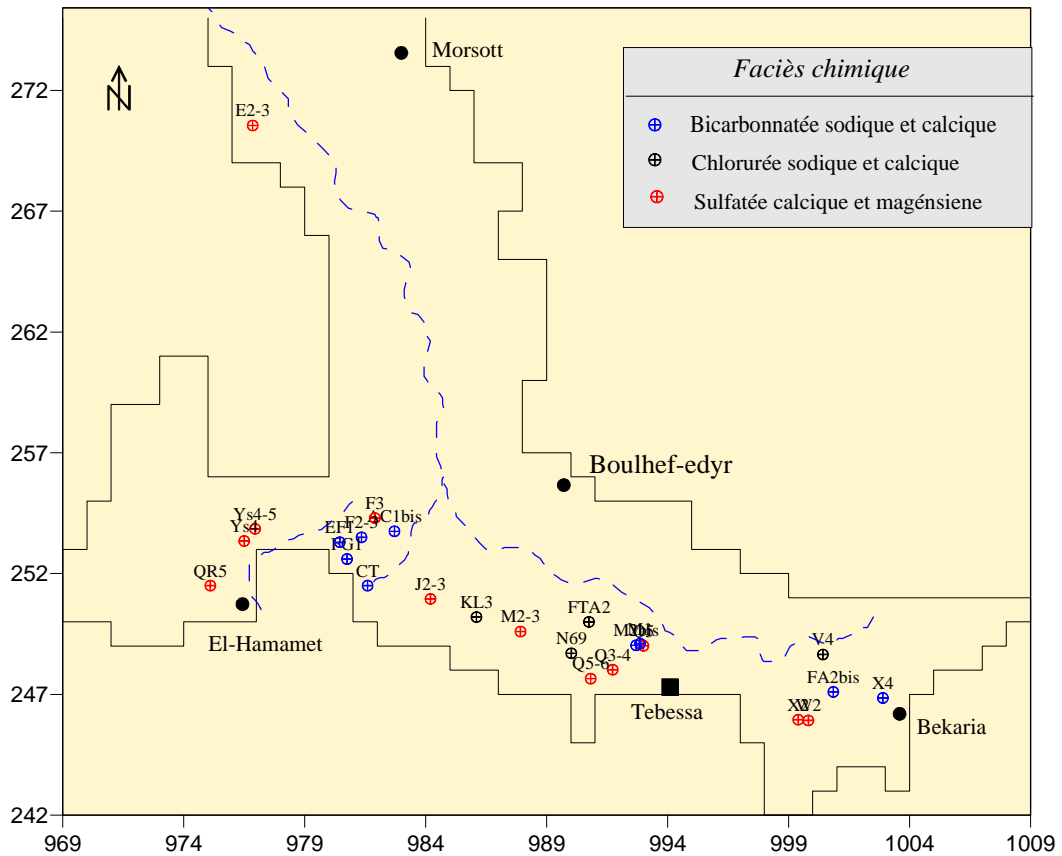


Fig.30. Répartition ponctuelle des faciès chimiques des eaux profondes de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott

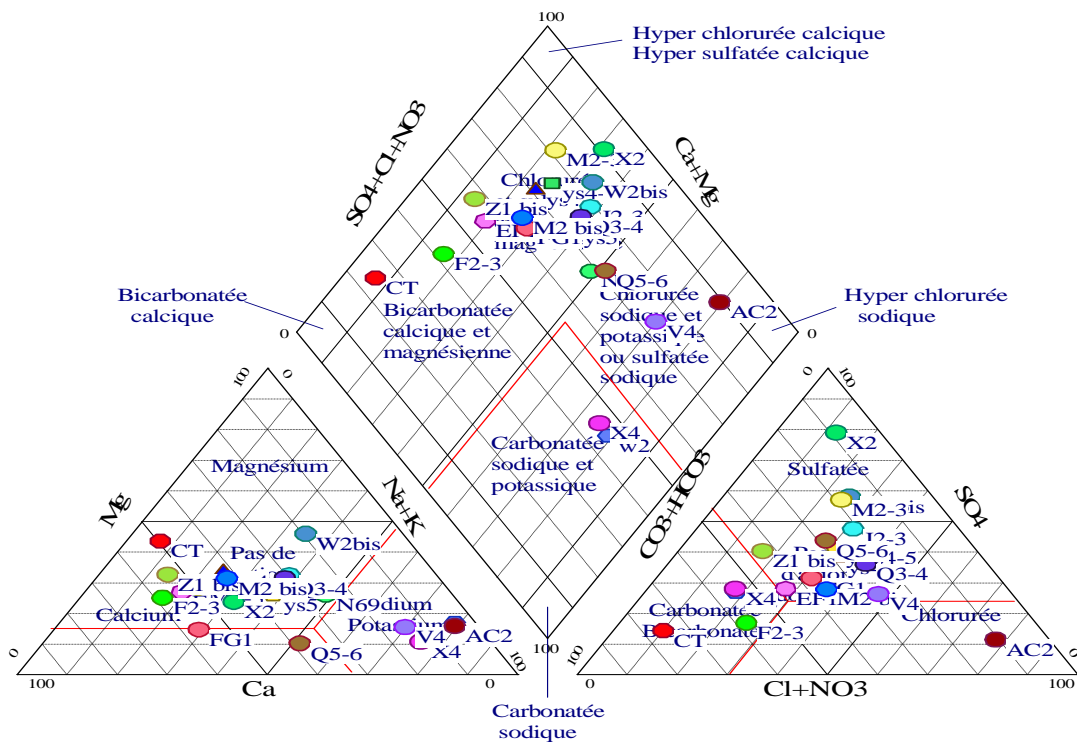


Fig.31. Diagramme triangulaire de Piper (à base du programme réalisé par R. SIMLER)

2.2.1.3- Relation faciès chimique et lithologie de l'aquifère:

Les caractéristiques chimiques des eaux sont l'héritage de l'érosion et du lessivage des roches traversées. Elles varient donc en fonction de la nature de celles-ci. Les substances contenues dans l'eau sont sous forme de solutions salines ou gazeuses d'une part et sous forme de suspensions solides ou liquides d'autre part.

Les teneurs de ces solutions et suspensions varient en fonction de quatre facteurs :

- La solubilité des minéraux qui composent les roches aquifères,
- La vitesse d'écoulement de l'eau souterraine entraînant à des degrés divers l'érosion mécanique des roches aquifères,
- La température de l'eau souterraine qui dépend à la fois de la profondeur de la roche aquifère (degré géothermique) et de sa proximité éventuelle d'une zone d'activité magmatique.

D'après la répartition des faciès des eaux profondes (fig.30) au sein de la nappe, nous pouvons déduire l'influence de la lithologie de l'aquifère ou celle des bordures pour chaque type de faciès:

- Faciès bicarbonatés calciques :

Ils caractérisent la zone d'Ain Chabro, l'exutoire du bassin d'El-Hamamet dont la composition lithologique de la couche aquifère est formée essentiellement d'éboulis de calcaires Maestrichtiens. Aux zones de Bekaria et Merdja, il s'agit de sables et d'argiles sableuses (sables fins et moyens) avec galets de calcaires (fins et moyens).

- Faciès chlorurés sodiques et calcique :

Il est le moins répandu, et caractérise la zone entre Merdja et Ain Chabro et au Nord de Bekaria, malgré la lithologie grossière (d'après les logs stratigraphiques) des horizons captés au niveau de ces forages. Ici, ce type d'eau est influencé soit par la poussée du Trias en profondeur ou par l'échange qui peut se produire entre les différents niveaux aquifères.

- Faciès sulfatés sodiques et calcique:

C'est le faciès le plus dominant, il caractérise la zone amont du sous bassin d'El-Hamamet où la couche aquifère est composée par des galets et cailloutis de calcaires Maestrichtiens. Ici, ce faciès non carbonaté peut être expliqué par le lessivage des formations marneuses (camparienne) aux bordures car la vitesse de l'eau est très rapide ce qui ne laisse pas le temps d'interaction entre eau/roche (contrairement à l'exutoire). Aux zones de Bekaria vers Ain Chabro, la couche aquifère ayant une lithologie à dominance argiles avec éléments de graviers ou galets.

2.2.1.4- Norme de potabilité:

Concernant les critères de potabilité chimique en Tab.11, ces normes fixent deux niveaux de qualités, donc généralement deux niveaux de concentration:

- Les concentrations maximales admissibles ou excessives au-delà desquelles l'eau peut être responsable d'effets gênants ou dangereux pour la santé et, en dessous desquelles l'eau peut être consommée régulièrement durant la vie entière.

- Les concentrations désirables constituent l'objectif à atteindre surtout, dans le but de conserver pour l'avenir une bonne qualité de nos ressources en eau souterraine.

En comparant les teneurs des différents éléments chimiques de la nappe avec les normes internationales et françaises, on constate que:

- Les eaux profondes de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott ont une conductivité électrique moyenne de l'ordre de 1300 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La C.E.E préconise une concentration maximale admise de l'ordre de 1250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et de 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ comme valeur minimale requise. En se référant à ces valeurs, les eaux captées par les forages sont impropres à la consommation.

- Le pH indique que les eaux sont légèrement basiques, avec une valeur moyenne de 8.

- Les températures mesurées sont comprises entre 15°C et 19°C avec une moyenne de 17°C. Elles correspondent aux températures atmosphériques ambiantes et indiquent l'ouverture du système aquifère, donc sa vulnérabilité vis-à-vis de la pollution.

- Les eaux de la nappe présente une dureté moyenne de 43 °F, par contre les eaux potables de bonne qualité ont une dureté acceptable jusqu'à 30 °F (normes françaises) ou 35 °F (normes C.E.E).

- Le sodium ne cause aucun inconvénient pour la santé sauf que, certaines maladies chroniques tels que l'hypertension recommandent des teneurs plus faibles. Dans la plaine, les teneurs en sodium dépassent deux fois les normes de la C.E.E.

- Les teneurs en sulfates dépassent les normes admises Françaises et les normes internationales acceptées.

Tab.11. Normes de potabilité chimique et concentrations dans la nappe

Paramètres (mg/l)	Normes internationales		Normes françaises		Teneurs dans la nappe alluviale de Tebessa-Morsott (forages, A.E.P)		
	Admis	accepté	Admis	accepté	Moyenne	Minimale	Maximale
T°C	25	15	12	25	17	15	19
Ph	9.5	6.5	9.5	6	8.1	7.4	8.5
Cond. $\mu\text{S}/\text{cm}$			2000	400	1300	600	2600
Dureté °F				35	43.1	10	96
Ca ⁺⁺			100		99.4	34	251
Mg ⁺⁺			50	30	48.45	16	160
Na ⁺			100	<20	189.80	10	1515
K ⁺			12	<10	5.25	0	19
So ₄ ⁻	400	200	250	5	275.15	42	1000
Cl ⁻	250		600	250	232.8	0	2025
No ₃ ⁻			100	50	43.55	0	350

2.2.2- Eaux des puits (faible profondeur):

Cette partie traite de la qualité physico-chimique des eaux de faible profondeur de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott captées par les puits domestiques. On doit caractériser le type

d'eau rencontré, et étudier les influences lithologiques de l'aquifère sur la minéralisation et de cerner les secteurs de degré de potabilité différent.

La plus part des puits retenus pour l'analyse sont localisés au centre de la plaine dont la profondeur varie de 3 à 25 m.

Plusieurs campagnes de prélèvement d'échantillons ont eu lieu en avril 1993, mai 1998, et avril 2002. Les paramètres mesurés sont le pH, la conductivité, la température et le résidu sec. Les paramètres chimiques sont les cations et les anions majeurs, analysés durant la campagne de mai 1998.

2.2.2.1- Les paramètres physiques:

a) Campagne d'échantillonnage (avril, 1993):

- Conductivité (fig.32):

La conductivité électrique permet d'avoir une idée sur la salinité de l'eau. Une conductivité élevée traduit soit des pH anormaux, soit une salinité élevée.

Eau d'alimentation : Nombre guide = 400 μ S/cm

- 50 à 400 : qualité excellente
- 400 à 750 : bonne qualité
- 750 à 1500 : qualité médiocre mais eau utilisable
- > 1500 : minéralisation excessive

D'après ces normes, les eaux de surfaces de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott sont fortement minéralisées avec une conductivité qui dépasse 1500 μ S/cm. A l'exception de certaines zones où la minéralisation est inférieure à 1500 μ S/cm traduisant une eau de qualité médiocre à excellent: La bordure Sud-Ouest du sous bassin Tebessa/Ain Chabro, la bordure Nord du sous bassin de Morsott, le centre du sous bassin de Bekaria et au Nord de Boulhef-edyr. Par contre les fortes valeurs sont enregistrées dans la zone d'El-Merdja.

Afin de mieux comprendre l'évolution de la conductivité avec le sens d'écoulement des eaux souterraines, on a superposé les deux cartes. Seul, le système aquifère Hamamet/Ain Chabro traduit une diminution de la conductivité dans le sens d'écoulement. Ailleurs, la conductivité semble beaucoup plus liée à la lithologie de l'aquifère et à l'évaporation des eaux où le niveau piézométrique est plus proche de la surface du sol.

- Résidu sec (fig.33):

D'après la carte du résidu sec, la concentration en sels dissous oscille entre 0.05 à 12 g/l, et qui révèle l'existence d'une eau douce et très saumâtre. Les fortes minéralisations (> 6 g/l) se situent dans le sous bassin de Tebessa et en particulier au niveau de la bordure Nord-Est de la plaine. Une minéralisation moyenne (3 à 6 g/l) est enregistrée aussi dans cette zone, en amont du sous bassin d'El-Hamamet/Ain Chabro et au Sud-Ouest du sous bassin de Morsott.

- Acidité de l'eau (pH) (fig.34):

Le pH doit être compris entre 6,5 et 8,5. Le maximum admis est 9,5. Des pH inférieurs à 7 peuvent provoquer une corrosion des tuyauteries métalliques. La corrosion augmente avec la

diminution du pH. Des concentrations élevées en Plomb, par exemple, peuvent résulter de la corrosion de canalisations par une eau exagérément acide.

Les eaux de la plaine ont des pH qui varient de 6.5 à 8.5 sur toute la plaine, à l'exception de certaines anomalies au niveau de l'embouchure d'oued Chabro et oued El-kébir, la zone d'El-Merdja et au Sud-Ouest de Bekaria où le pH est inférieur à 6.5 traduisant des eaux acides. Le pH est supérieur à 8.5 à l'exutoire des sous bassin de Morsott et d'El-Hamamet, et au niveau de la zone située entre Tebessa et Ain Chabro.

- *Température de l'eau (fig.35):*

La carte de température établie montre que la température des eaux souterraines atteint sa valeur maximale aux bordures puis diminue progressivement vers le centre de la plaine.

Les faibles températures (10 à 17 °C) sont localisées aux niveaux des zones de convergences des eaux souterraines, confirmant la variation la température dans le sens d'écoulement.

Les fortes températures (19 à 24 °C) sont enregistrées en particulier à la bordure Nord-Est de la plaine, témoignent de l'arrivée de l'eau d'une grande profondeur à travers les jeux de failles affectant la structure des fossés au niveau de ces zones. Ceci explique probablement l'origine du thermalisme dans la plaine.

Fig.32. Carte de conductivité (uS/cm) de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott (avril 1993)

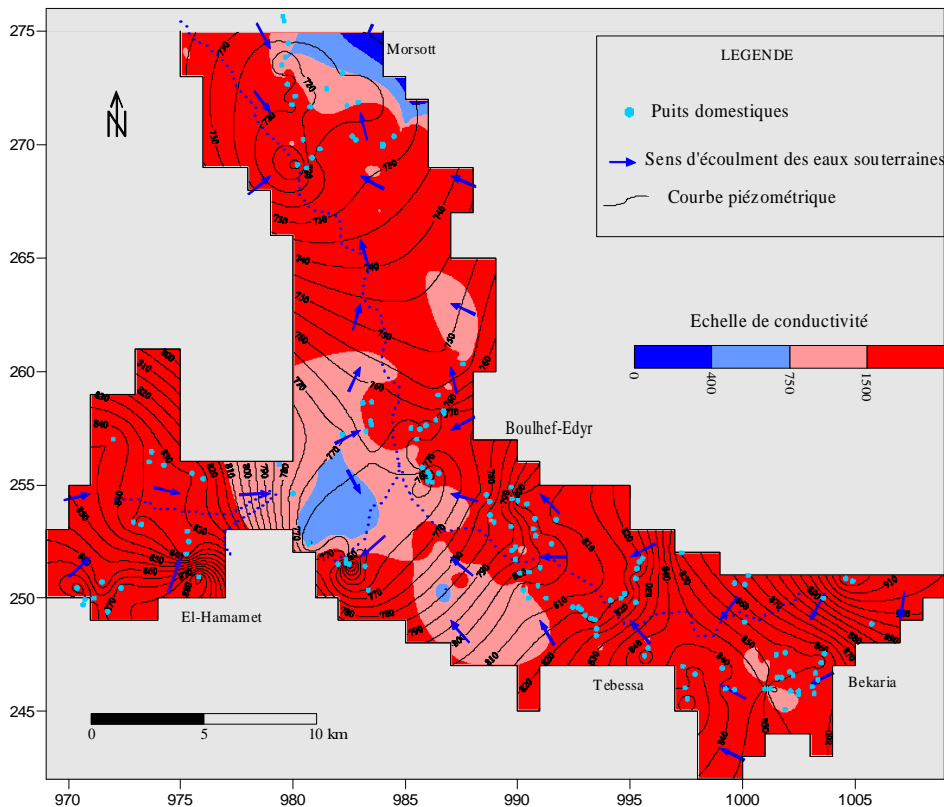


Fig.33. Carte du résidu sec (g/l) de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott (avril 1993)

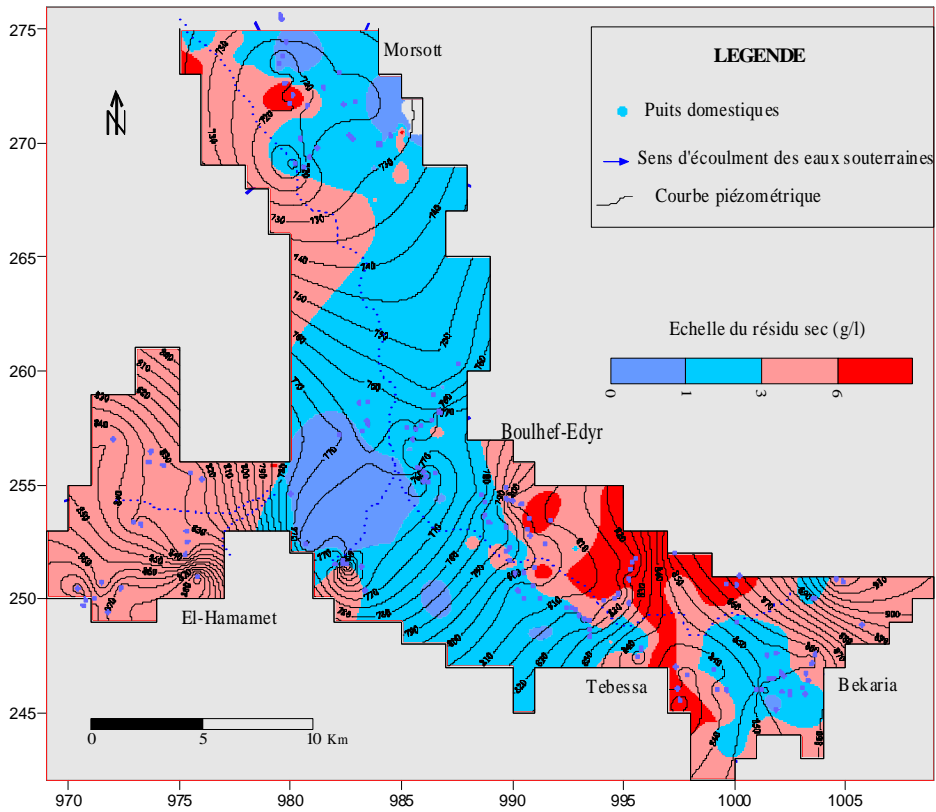


Fig.34. Carte de Ph de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott (avril 1993)

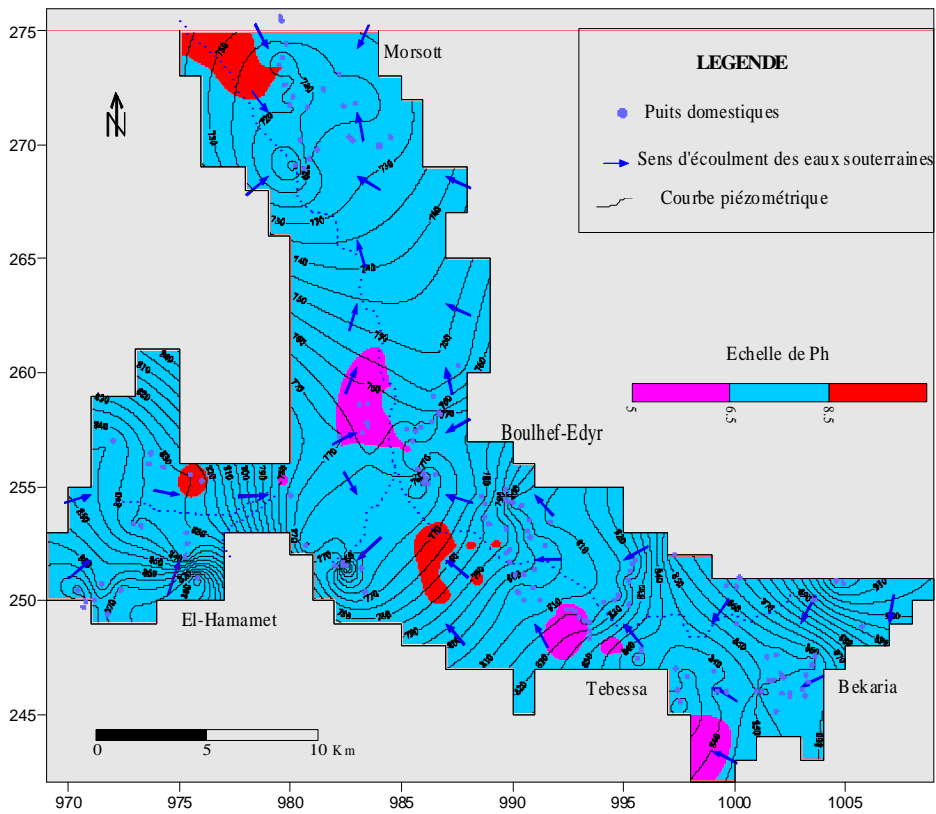
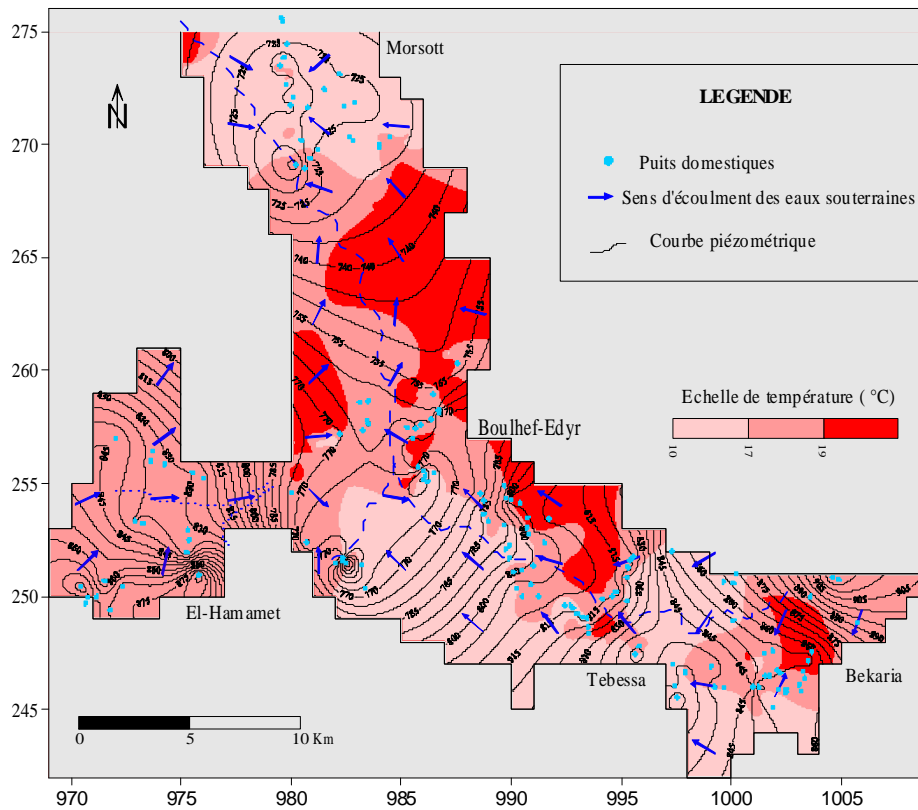


Fig.35. Carte de température (C°) de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott (avril 1993)



b) Campagne d'échantillonnage (mai, 1998):

- Conductivité (fig.36):

La carte de conductivité établie pour cette campagne d'échantillonnage qui a concerné 86 points d'eau répartie sur toute la plaine, montrée que la conductivité varie 150 à 20000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les faibles valeurs sont enregistrées au Sud-Ouest de Tebessa en allant vers Ain Chabro, par contre les fortes minéralisations concernent le sous bassin de Bekaria, Tebessa, Hamamet nord et la zone entre Boulhef-edyr et Morsott. Le reste de la plaine est caractérisé par une minéralisation moyenne avec une conductivité comprise entre 750 et 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

- Résidu sec (fig.37):

Les valeurs faibles du résidu sec (<1g/l) se localisent à la bordure Sud-Ouest de la plaine entre Tebessa et Hamamet et à l'exutoire, au niveau de Morsott.

Les valeurs moyennes (entre 1 et 3 g/l) caractérisent la partie Nord d'El-Hamamet, la bordure Sud de Bekaria et Tebessa, et la zone comprise entre Boulhef-edyr/Morsott.

Les valeurs maximales (entre 6 et 16 g/l) se situent dans la bordure Nord-Est entre Tebessa et Bekaria. Ces teneurs élevées sont dues à l'influence des formations triasiques de Dj.Djebissa.

- Acidité de l'eau (pH) (fig.38):

La carte de pH établie révèle que les eaux de surface de plaine ont un pH qui varie entre 6.5 et 8.5, sauf à l'exutoire du sous bassin d'El-Hamamet, à l'embouchure d'oued Chabro/El-Kébir et

Hameimet Nord où le pH est compris entre 8.5 et 9 traduisant une eau alcaline. Une eau acide avec un pH variant de 5 à 6.5 est repérée au Sud-Ouest de Tebessa et à l'exutoire du sous bassin de Morsott.

- *Température (fig.39):*

La température des eaux de surfaces de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott varie de 14 à 25°C.

Les zones de faible température de 14 à 17°C sont localisées au centre des sous bassins de Bekaria, Tebessa et Morsott.

Les zones de température moyenne de 17 à 19°C s'étendent presque sur la totalité de la plaine et caractérise la température des eaux souterraines du bassin.

Les zones de forte température dépassant 20°C se situent au Sud-Ouest d'El-Hamamet, au Sud de Bekaria et juste après la confluence d'oued Chabro et El-Kébir.

La zone à très forte température de 24 à 25°C se situe à la limite Sud-Ouest du sous bassin d'El-Hamamet, au pied du calcaire Turonien moyen. Cette zone chaude, découverte pour la première fois avec une température de l'eau qui dépasse largement la température moyenne annuelle de l'air (16°C), confirme encore l'alimentation en charge de la nappe à travers les jeux de failles affectant les bordures.

Fig.36. Carte de conductivité (uS/cm) de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott (mai,1998)

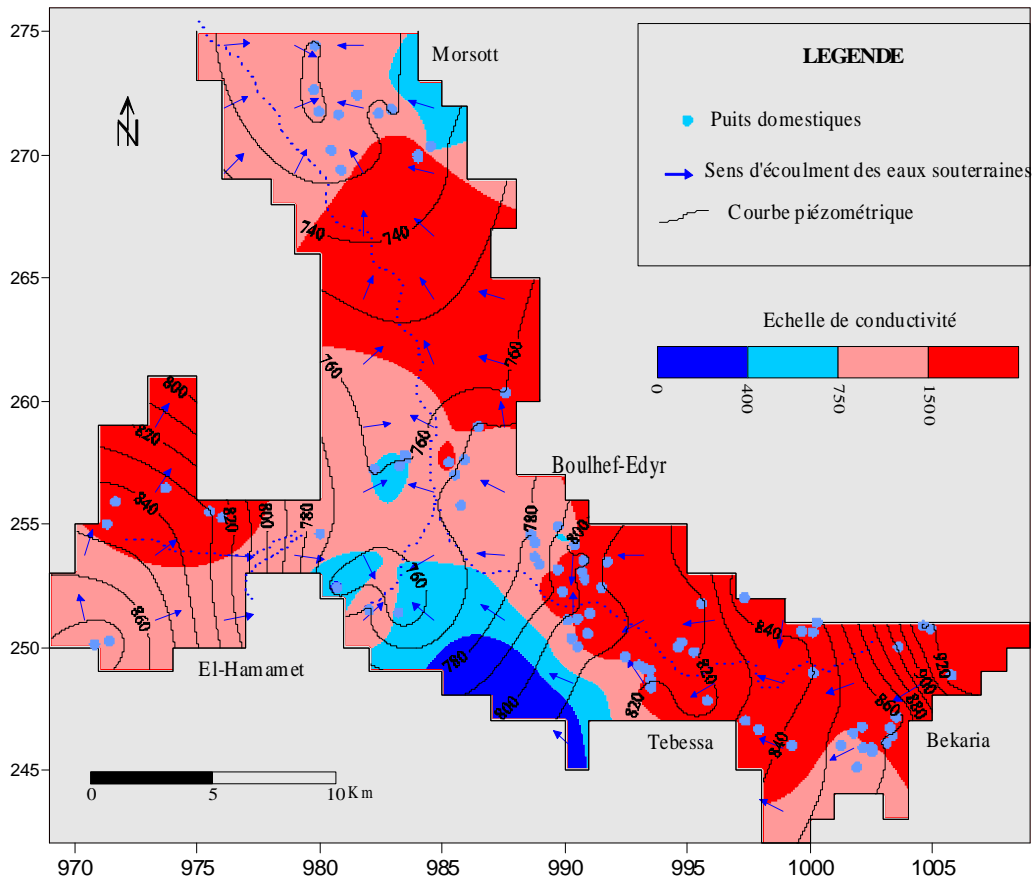


Fig.37. Carte de résidu sec (g/l) de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott (mai, 1998)

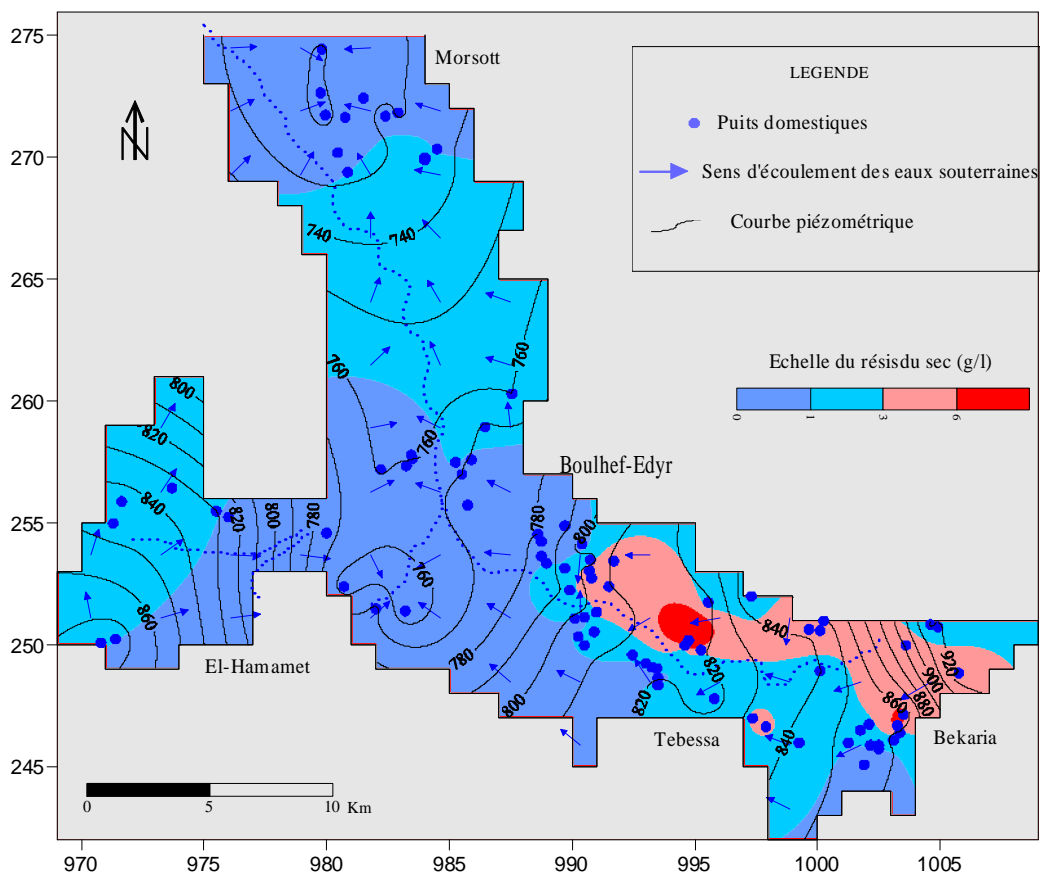


Fig.38. Carte de pH de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott (mai, 1998)

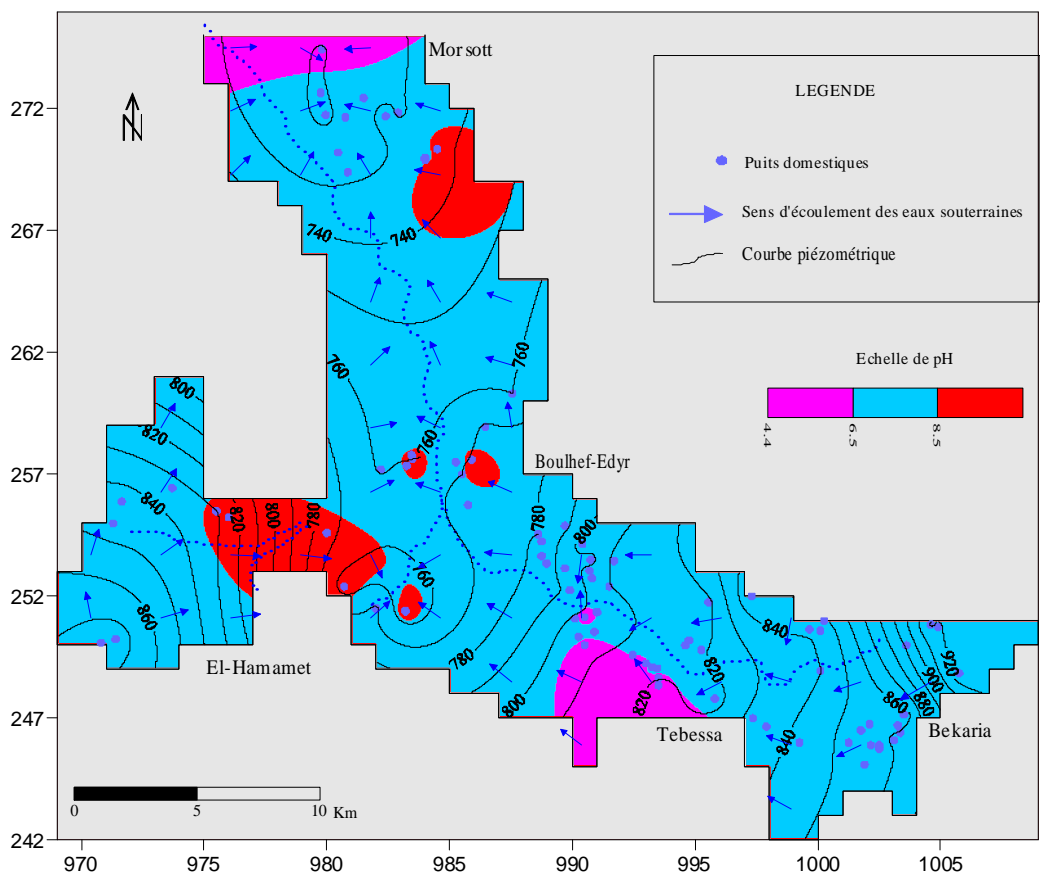
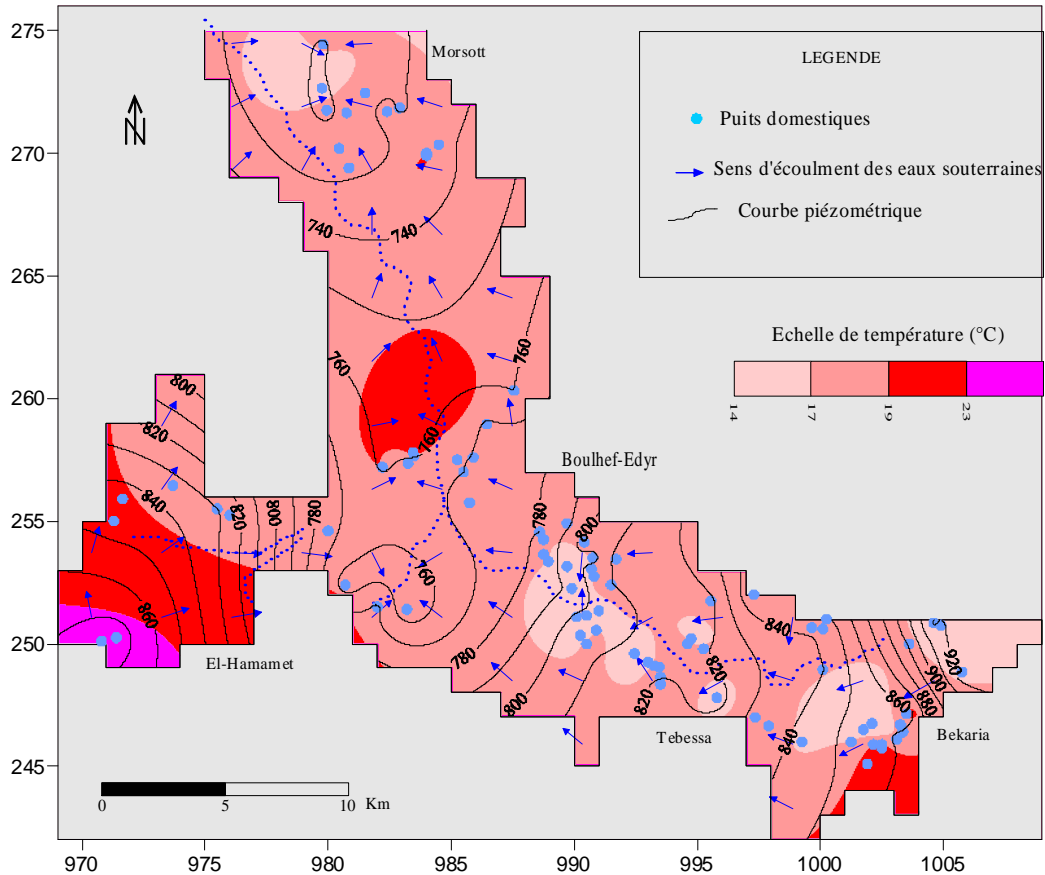


Fig.39. Carte de température (°C) de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott (mai,1998)



c) Campagne d'échantillonnage (avril, 2002):

- Conductivité (fig.40):

La conductivité est faible à moyenne (400 à 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$) au niveau de la bordure Sud-Ouest de la plaine et en amont du sous bassin de Morsott. Elle est forte (1500 à 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) au centre de la plaine, de Ain Chabro vers Morsott. Par contre, elle est très forte au niveau des sous bassins de Bekaria, Tebessa et au Nord d'El-Hamamet.

- Résidu sec (fig.41):

La carte du résidu sec établie montre des valeurs de 0.05 à 10 g/l. Les faibles teneurs (0.05 à 1g/l) sont localisées à la bordure Sud-Ouest du sous bassin d'El-Hamamet, Morostt et entre Tebessa et Ain Chabro. Les valeurs comprises entre 1 et 3 g/l caractérisent la majorité des eaux souterraines de la plaine et occupent le centre de la plaine. Les fortes à très fortes minéralisations (3 à 6 et > 6 g/l) caractérisent la bordure Nord-Est de la plaine, entre Bekaria et Tebessa.

- Acidité de l'eau (pH) (fig.42):

La carte de pH révèle certaines anomalies au Sud de Tebessa avec un pH supérieur à 8.5 traduisant des eaux faiblement basiques et au Nord-Ouest d'El-Hamamet où le pH est inférieur à 6.5 traduisant des eaux faiblement acides. Dans le reste de la plaine, le pH des eaux souterraines est compris entre 6.5 à 8.5.

- *Température (fig.43):*

La lecture des courbes isothermes montre que les eaux souterraines ont une température de 17 à 20°C avec un maximum de 30°C enregistré au niveau de Boulhef-edyr et El-Hamamet.

Les faibles valeurs sont relevées au Nord d'El-Hamamet (Bir D'heb), entre Tebessa/Ain Charbro et à l'exutoire de la plaine (Morsott).

L'enregistrement des pics de température de 24 et 30°C au niveau d'El-Hamamet et Boulhef-edyr, témoignent encore de l'arrivée de l'eau d'une grande profondeur à travers les failles affectant les bordures. Il faut noter que la température de 30°C est très voisine de celle de la source thermique de Youkous (35°C), actuellement tarie. Le repérage de ces points chauds pour la première au niveau de Boulhef-edyr peut nous renseigner sur l'origine du thermalisme dans le bassin.

Fig.40. Carte de conductivité (uS/cm) de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott (avril, 2002)

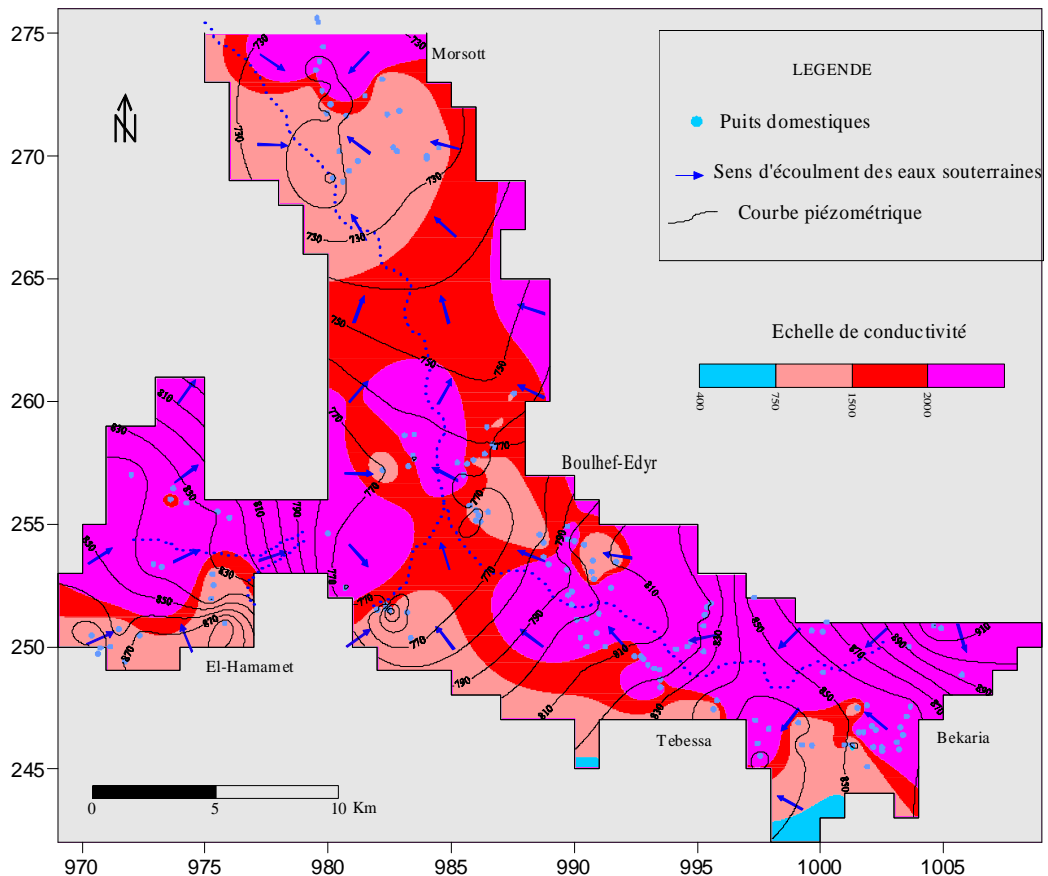


Fig.41. Carte du résidu sec (g/l) de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott (avril, 2002)

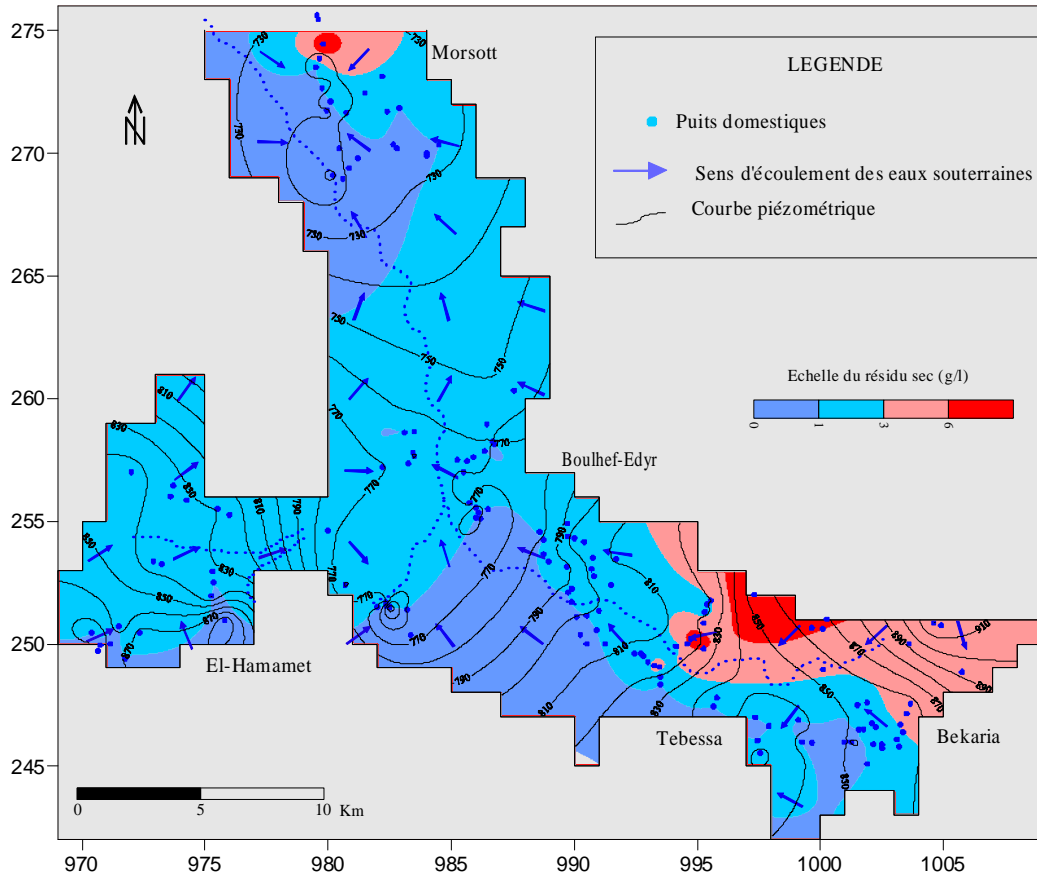


Fig.42. Carte de pH de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott (avril, 2002)

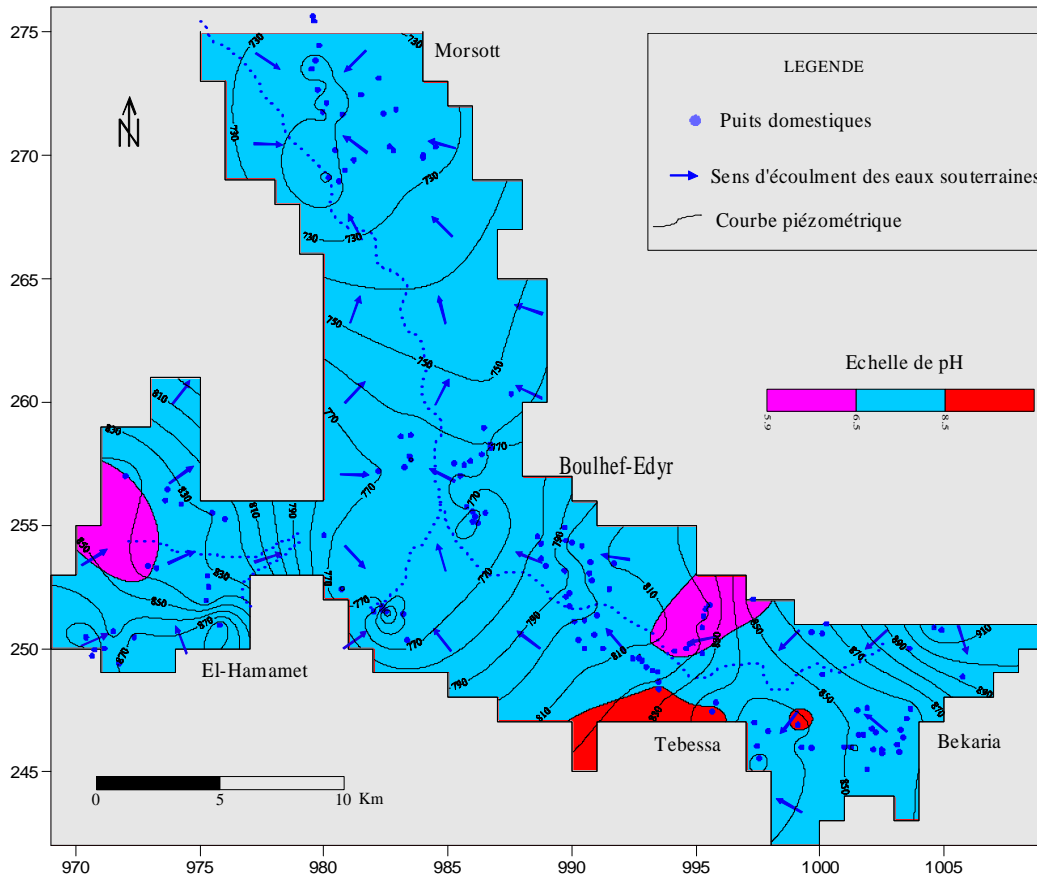
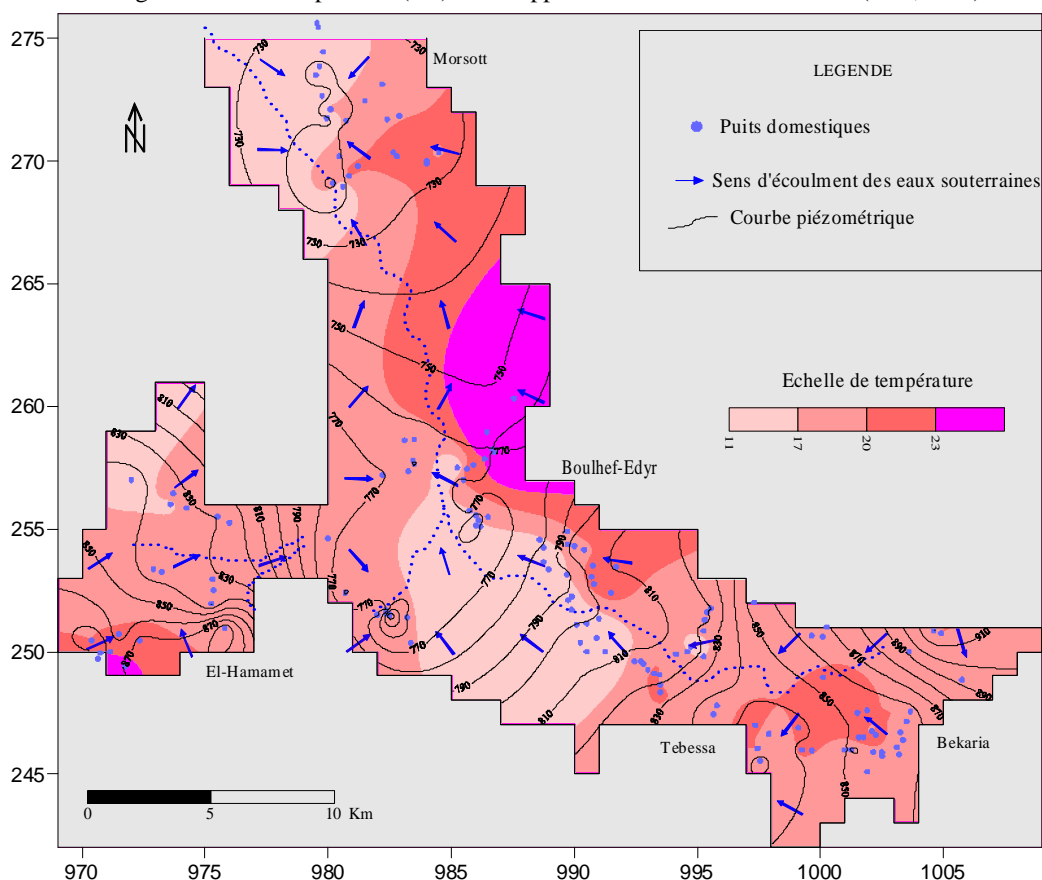


Fig.43. Carte de température (°C) de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott (avril, 2002)



Les paramètres physiques durant les trois campagnes d'échantillonnage sont représentés dans le Tab.12. Les valeurs moyennes montrent une nette augmentation des paramètres en particulier de la température et de la minéralisation.

Tab.12. Evolution des paramètres physiques durant les périodes d'échantillonnages

Paramètres physiques	Compagne avril, 1993			Compagne mai, 1998			Compagne avril, 2002		
	Min.	Max.	Moy.	Min.	Max.	Moy.	Min.	Max.	Moy.
N.piézométrique	708	922	789.43	719	927	806.67	708	920	802.5
T°C	10.5	24	17.6	14	24.8	17.78	11.3	30.2	18.61
pH	5.2	9.2	7.31	4.43	9.07	7.52	6	8.77	7.44
Cond. (µS/cm)	280	12820	2583	294	20000	2725.7	291	20800	2684.5
Résidu sec (g/l)	0.02	10.7	1.52	0.1	16.9	2.11	1	10.2	1.9

2.2.2.2- Les paramètres chimiques:

1- Introduction:

La composition lithologique du sous-sol influence de manière significative la qualité de l'eau souterraine. En outre, celle-ci dépend également de l'origine de l'eau et de son temps de séjour dans les couches aquifères. Globalement, on peut affirmer que la composition des eaux souterraines en un lieu donné et à un moment donné dépend des apports extérieurs (dépôts

atmosphériques, excédent des précipitations, infiltration des eaux de surface), de la nature des zones non saturée et saturée (géochimie), du chemin parcouru par l'eau, du temps de séjour et des variations dans la vitesse d'écoulement et dans les processus de dépôts.

La répartition relative des ions majeurs dans les eaux naturelles peut être illustrée par les diagrammes de Piper. En regroupant Na^+ et K^+ d'une part, et HCO_3^- et CO_3^{2-} d'autre part, la proportion des cations et anions majeurs peut être traduite dans des diagrammes trilineaires (A. Piper, 1944). Les diagrammes de Piper constituent ainsi depuis de nombreuses années, un moyen important de classification hydrochimique des eaux naturelles, sur la base des ions dominants dans un faciès.

2- Faciès chimique (formule ionique) (Tab.13):

Des analyses des éléments chimiques (cations et anions) sont effectuées sur 65 échantillons prélevés durant la campagne du mois de Mai (1998) et couvrent toute la plaine. Les résultats sont portés dans le Tab.13 montrent globalement deux faciès: bicarbonaté calcique et chloruré calcique ou sodique.

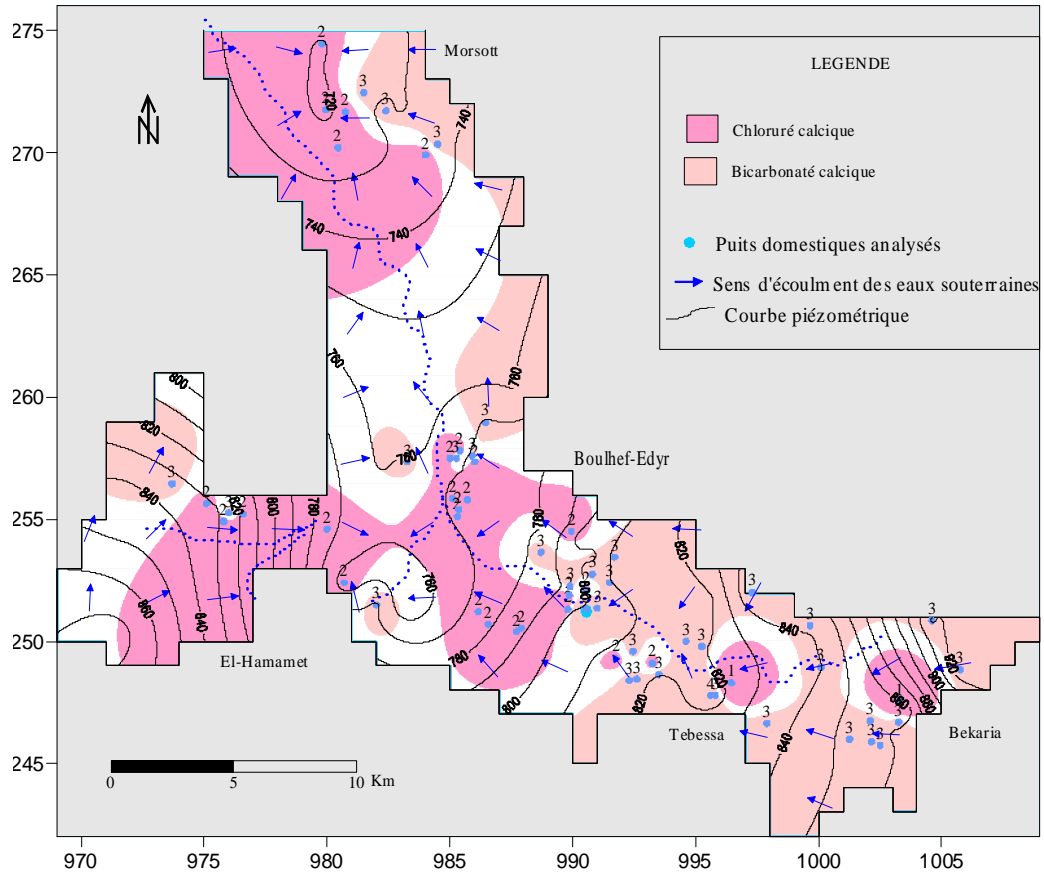
Les résultats interprétés sous forme de carte de faciès (fig.44), montre que:

- Le faciès bicarbonaté calcique caractérise surtout les systèmes aquifères de Bekaria, Tebessa et la bordure "Est" entre Boulhef-edyr et Morsott. Il provient de la dissolution des sédiments et fragments calcaires contenus dans les couches aquifères et en particulier de l'apport des eaux en provenance des formations calcaires de bordure. Cette dissolution provoque l'augmentation des teneurs en ions Ca^{2+} et HCO_3^- . Seuls deux échantillons localisés au centre diffèrent quelque peu, principalement à cause de leurs teneurs élevées en chlore.

- Le faciès chloruré calcique est remarqué dans le sous bassin d'El-Hamamet–Ain Chabro et à l'axe du sous bassin de Morsott. Ces eaux sont caractérisées par une minéralisation légèrement élevée par rapport au faciès précédent, traduisant l'alimentation directe de l'aquifère par les eaux de précipitation. Il provient probablement de lessivage des formations marneuses aux bordures d'âge Maestrichtien et Danien et des formations Triasiques de Dj.Belkif et Dj.Djebissa.

On constate que les aquifères libres d'El-Hamamet et Morsott sont caractérisés par des concentrations plus élevées en chlore que dans les aquifères libres à semi-captifs de Bekaria et Tebessa.

Fig.44. Carte du faciès chimique de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott (mai, 1998)



3- Norme de potabilité (Tab.14):

Il faut rappeler que l'action de la qualité de l'eau sur la santé est déjà relativement bien connue. La composition de l'eau de boisson doit répondre à certaines normes de caractères physiques, organoleptiques, chimiques et bactériologiques. Notre étude concerne les deux derniers critères. Les paramètres physico-chimiques de la nappe sont présentés en tableau 14 montrent que:

- Les valeurs de conductivité électrique des eaux de la nappe indiquent que celles-ci sont moyennement à fortement minéralisées avec des valeurs de conductivité électrique comprises entre 294 et 20000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.
- Le pH indique que les eaux sont légèrement acides, avec des valeurs comprises entre 4.43 et 9. La valeur moyenne de pH mesurée est compatible avec le milieu alluvionnaire qui constitue l'aquifère.
- Les températures mesurées sont comprises entre 14°C et 24.8°C avec une moyenne de 17.78°C. Elles correspondent aux températures atmosphériques ambiantes, sauf aux zones d'El-Hamamet et Boulhef-edyr, et indiquent l'ouverture du système aquifère, donc sa vulnérabilité vis-à-vis de la pollution de surface.

Tab.13. Faciès chimique des puits analysés (formule ionique)

Zone	Puits	Quantité en réaction en (%)		Faciès chimiques
		Anions	Cations	
Bekaria	E2	Hco3>Cl>So4	Ca>Mg>(Na+K)	Bicarbon.calcique
	E4	Hco3>Cl>So4	Ca>Mg>(Na+K)	Bicarbon.calcaique
	E6	Hco3>Cl>So4	Ca>Mg>(Na+K)	Bicarbon.calcique
	E9	Hco3>Cl>So4	Ca>Mg>(Na+K)	Bicarbon.calcique
	E11	Hco3>Cl>So4	Ca>Mg>(Na+K)	Bicarbon.calcique
	E12	Hco3>Cl>So4	Ca>Mg>(Na+K)	Bicarbon.calcique
	E14	Hco3>Cl>So4	Ca>Mg>(Na+K)	Bicarbon.calcique
	E17	Hco3>Cl>So4	Ca>Mg>(Na+K)	Bicarbon.calcique
	E21	Hco3>Cl>So4	Ca>Mg>(Na+K)	Bicarbon.calcique
	E24	Hco3>Cl>So4	Ca>Mg>(Na+K)	Bicarbon.calcique
	E1	Cl>Hco3>So4	(Na+k)>Ca>Mg	Chloruré sodique
Morsott	E71	Hco3>Cl>So4	Ca>Mg>(Na+K)	Bicarbon. calcique
	E73	Cl>Hco3>So4	Ca>Mg>(Na+K)	Chloruré calcique
	E75	Hco3>Cl>So4	Ca>Mg>(Na+K)	Bicarbon. calcique
	E76	Hco3>Cl>So4	Ca>Mg>(Na+K)	Bicarbon. calcique
	E77	Cl>Hco3>So4	Ca>Mg>(Na+K)	Chloruré calcique
	E78	Cl>Hco3>So4	Ca>Mg>(Na+K)	Chloruré calcique
	E80	Cl>Hco3>So4	Ca>Mg>(Na+K)	Chloruré calcique
	E82	Cl>Hco3>So4	Ca>Mg>(Na+K)	Chloruré calcique
El-Hamamet	E29	Cl>Hco3>So4	Ca>Mg>(Na+k)	Chloruré calcique
	E31	Cl>So4>Hco3	Ca>(Na+k)>Mg	Chloruré calcique
	E33	Cl>So4>Hco3	Ca>(Na+k)>Mg	Chloruré calcique
	E62	Cl>Hco3>So4	Ca>Mg>(Na+K)	Chloruré calcique
	E63	Hco3>Cl>So4	Ca>Mg>(Na+K)	Bicarbon. calcique
	E65	Hco3>Cl>So4	Ca>Mg>(Na+K)	Bicarbon. calcique
	E67	Hco3>Cl>So4	Ca>Mg>(Na+K)	Bicarbon. calcique
	E68	Cl>Hco3>So4	Ca>Mg>(Na+K)	Chloruré calcique

Suite Tab.13

Tebessa	E3	Cl>Hco3>So4	(Na+k)>Ca>Mg	Chloruré sodique
	E5	Cl>So4>Hco3	Ca>(Na+k)>Mg	Chloruré calcique
	E26	Hco3>So4>Cl	Ca>Mg>(Na+k)	Bicarbon.calcique
	E7	Cl>Hco3>So4	Ca>Mg>(Na+k)	Chloruré calcique
	E8	So4>Cl>Hco3	Ca>Mg>(Na+k)	Sulfaté calcique
	E10	Hco3>So4>Cl	Ca>Mg>(Na+k)	Bicarbon.calcique
	E13	Cl>Hco3>So4	Ca>Mg>(Na+k)	Chloruré calcique
	E15	Cl>Hco3>So4	Ca>Mg>(Na+k)	Chloruré calcique
	E16	Cl>Hco3>So4	Ca>(Na+k)>Mg	Chloruré calcique
	E18	Cl>So4>Hco3	Ca>Mg>(Na+k)	Chloruré calcique
	E22	Hco3>Cl>so4	Ca>Mg>(Na+k)	Bicarbon. calcique
	E23	Cl>Hco3>So4	(Na+k)>Ca>Mg	Chloruré calcique
	E27	Cl>Hco3>So4	Ca>(Na+k)>Mg	Chloruré calcique
	E19	Hco3>Cl>So4	Ca>Mg>(Na+K)	Bicarbon. calcique
	E20	Hco3>Cl>So4	Ca>(Na+K)>Mg	Bicarbon. calcique
	E25	Hco3>Cl>So4	Ca>Mg>(Na+K)	Bicarbon. calcique
	E28	Hco3>Cl>So4	Ca>Mg>(Na+K)	Bicarbon. calcique
	E30	Hco3>Cl>So4	Ca>Mg>(Na+K)	Bicarbon. calcique
	E32	Cl>Hco3>So4	Ca>Mg>(Na+K)	Chloruré calcique
	E34	Hco3>Cl>So4	Ca>Mg>(Na+K)	Bicarbon.calcique
E39	Hco3>Cl>So4	Ca>Mg>(Na+K)	Bicarbon.calcique	
E41	Hco3>Cl>So4	Ca>Mg>(Na+K)	Bicarbon.calcique	
E42	Hco3>Cl>So4	Ca>Mg>(Na+K)	Bicarbon.calcique	
E43	Hco3>Cl>So4	Ca>Mg>(Na+K)	Bicarbon.calcique	
E44	Hco3>Cl>So4	Ca>Mg>(Na+K)	Bicarbon.calcique	

Boulhef- edyr	E35	Cl>So4>Hco3	Ca>(Na+k)>Mg	Chloruré calcique
	E36	Cl>Hco3>So4	Ca>Mg>(Na+k)	Chloruré calcique
	E37	Cl>Hco3>So4	Ca>(Na+k)>Mg	Chloruré calcique
	E38	Cl>Hco3>So4	Ca>Mg>(Na+k)	Chloruré calcique
	E40	Cl>Hco3>So4	Ca>(Na+k)>Mg	Chloruré calcique
	E45	Cl>Hco3>So4	Ca>(Na+k)>Mg	Chloruré calcique
	E46	Cl>So4>Hco3	Ca>Mg>(Na+k)	Chloruré calcique
	E56	Hco3>Cl>So4	Ca>Mg>(Na+K)	Bicarbon. calcique
	E57	Hco3>Cl>So4	Ca>Mg>(Na+K)	Bicarbon. calcique
	E58	Hco3>Cl>So4	Ca>Mg>(Na+K)	Bicarbon. calcique
	E69	Hco3>Cl>So4	Ca>Mg>(Na+K)	Bicarbon. calcique

Tab.14. Normes de potabilité chimique (Internationales et Françaises) et concentrations dans la nappe (eau des puits, mai 1998)

Paramètres (mg/l)	Normes internationales		Normes françaises		Teneurs dans la nappe alluviale de Tebessa-Morsott		
	Admis	accepté	Admis	accepté	Moyenne	Minimale	Maximale
T°C	25	15	12	25	17.78	14	24.8
Ph	9.5	6.5	9.5	6	7.52	4.43	9.07
Cond.µS/cm			2000	400	2725.7	294	20000
Dureté °F				35			
Ca			100		174.40	70.24	387.27
Mg			50	30	55	16.70	164.20
Na			100	<20	55.42	3.2	400.42
K			12	<10	8.2	0.26	28.53
SO ₄	400	200	200	5	163.76	39.36	370
Cl	250		600	250	234.68	84.36	753.76
NO ₃			100	50	29.35	2.34	93.33

Concernant les critères de potabilité chimique, le tableau ci-dessus donne la comparaison des teneurs des différents éléments des eaux de surface de la nappe avec les normes internationales et françaises définies. Ce sont les teneurs moyennes excessives en Ca, Mg, Na et SO₄ qui remettent en cause la bonne qualité chimique des eaux des puits.

4- Cartographie des éléments chimiques:

Les eaux naturelles qu'elles soient souterraines contiennent toujours des sels dissous qui leur confèrent les caractéristiques du milieu dont elles sont issues, ou sur les résultats exogènes qui ont contribué nettement à des modifications du chimisme des eaux, parmi lesquels on note l'évaporation, le lessivage et la dilution.

Afin d'identifier l'origine de ces éléments chimiques qui dépendent évidemment des conditions géologiques, direction d'écoulement, zones d'alimentation et de localiser les zones à forte et faible teneur, nous avons présenté les résultats obtenus sous forme des cartes d'isoteneurs.

4.1- Carte de Calcium (fig.45):

La concentration moyenne en calcium (Ca) des eaux de surface de la nappe est de 174.4 mg/l. L'évolution des teneurs en calcium montrent que les plus fortes teneurs sont localisées aux bordures (Bekaria/Ain Chabro et au Nord de Boulhef-edyr) dépassant de trois à quatre fois la teneur maximale admissible (100 mg/l) pour la consommation humaine. Le reste de la plaine présente des teneurs comprises entre 100 à 200 mg/l. L'apport en Calcium au centre de la plaine peut être dû à la dissolution de gypse contenu dans les argiles des alluvions anciennes. Par contre aux bordures, à des apports indirectes par la dissolution des formations carbonatées.

4.2- Carte de Sodium (fig.46):

La valeur moyenne des concentrations en Na⁺ est de 55.42 mg/l qui est en dessous de la limite maximale admissible. La carte montre également que les teneurs en sodium présentent les valeurs les plus élevées en bordures (entre Tebessa/Ain Chabro) et au centre de la plaine. Des con-

centrations entre 20 et 100 mg/l caractérisent les eaux de la plaine, à l'exception du sous bassin de Morsott où les teneurs sont en dessous de la concentration admissible.

4.3- Carte des Bicarbonates (fig.47):

Pour les bicarbonates, la concentration moyenne est de 350 mg/l. Les valeurs les plus élevées variant de 350 à 620 mg/l se rencontrent en bordure Sud-Ouest du sous bassin de Tebessa et au Nord de Boulhef-edyr, confirmant l'apport latéral en eau à travers les bordures. A Bekaria, des teneurs plus fortes caractérisent la majorité des eaux dont l'origine peut être due aux formations de calcaire de Dj.Bouramane. Le reste des eaux de la plaine présentant des teneurs en dessous de la moyenne.

4.4- Carte des Chlorures (fig.48):

La concentration moyenne en chlorures de la nappe est de 235 mg/l. La carte montre que les valeurs les plus élevées sont localisées à la bordure Sud-Ouest (entre Tebessa et Ain Chabro) et dans le centre de la plaine (le long d'oued Chabro-Ksob) où la concentration est supérieure à la valeur maximale admissible (200 mg/l). Ici, les formations argileuses et les eaux usées collectées par l'oued El-Kébir (très riches en chlorures) sont à l'origine des concentrations élevées. Dans la zone d'El-Hamamet, les plus fortes valeurs sont localisées au Sud et au centre, sauf au Nord et à l'exutoire du sous bassin où les concentrations sont inférieures à la teneur maximale admissibles. Les argiles du quaternaire au centre et les formations marneuses aux bordures sont à l'origine de ces teneurs.

4.5- Carte des Sulfates (fig.49):

La concentration moyenne en sulfates au sein de la nappe est de 163.76 mg/l. La carte montre que les concentrations les plus élevées caractérisent la bordure Sud-Ouest entre Tebessa ville et Ain Chabro et le sous bassin d'El-Hamamet où les teneurs dépassent les teneurs admissibles. Dans le reste de la plaine, les teneurs en sulfates sont inférieures à la concentration maximale admissible de 200 mg/l pour l'eau de boisson. L'apport en sulfates à la nappe peut être dû à la dissolution de gypse contenu dans les alluvions ou à des apports indirects liés au lessivage des formations marneuses ou triasiques en bordures.

4.6- Carte des Nitrates (fig.50):

L'évolution spatiale des nitrates au sein de la nappe montre que les concentrations sont variables des bordures au centre de la plaine.

Les plus fortes valeurs de concentration en nitrates sont réparties de part et d'autre et tout le long d'oued Chabro/Ksob qui draine tous les rejets des eaux usées et urbaines, avec des foyers de pollution localisés au niveau d'El-Merdja, à l'embouchure d'oued Chabro/Ksob, à l'exutoire du système aquifère d'El-Hamamet et en aval de la zone urbaine de Bekaria. Ces foyers de pollution correspondent bien aux rejets urbains (voir fig.51).

Des concentrations modérées (40 mg/l) sont enregistrées juste en aval de la zone urbaine de Morsott. Les faibles teneurs sont observées dans le sous bassin de Bekaria (le long d'oued El-Kébir), cela est dû au rôle protecteur que joue la couverture argileuse dont l'épaisseur atteint 20 m.

Fig.45. Carte de calcium (mg/l) de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott (mai,1998)

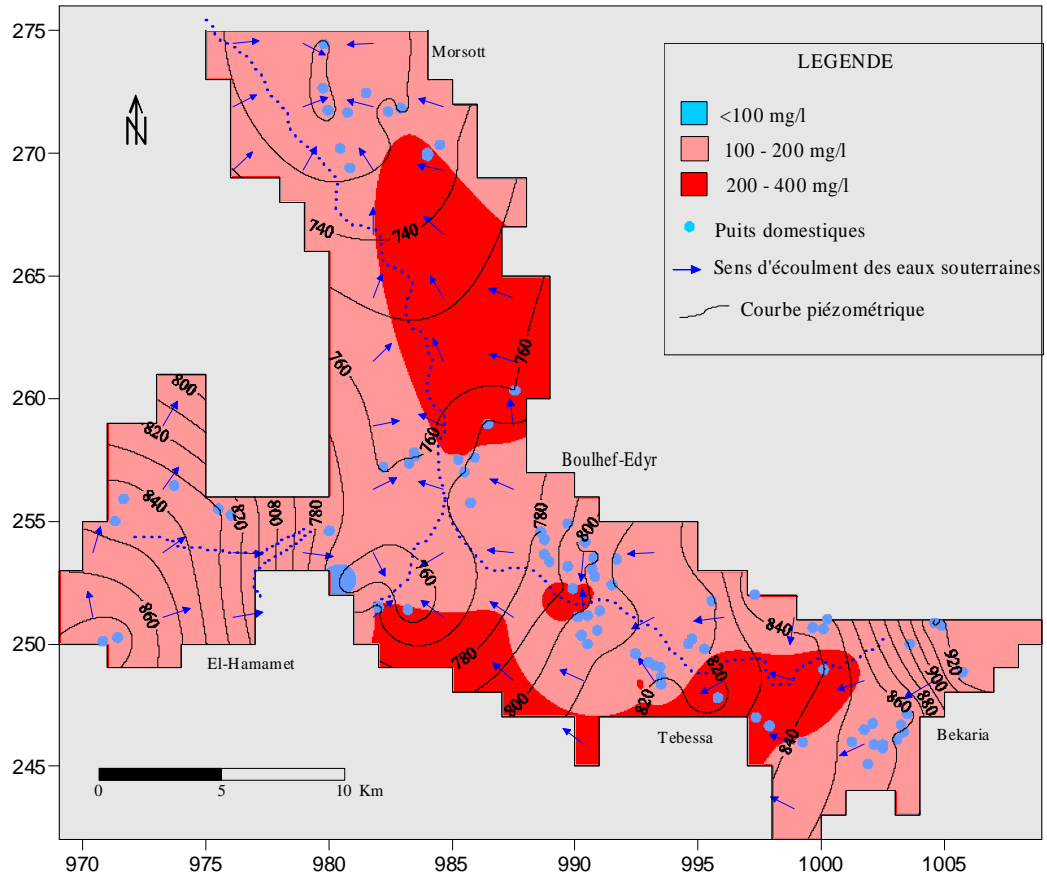


Fig.46. Carte de sodium (mg/l) de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott (mai,1998)

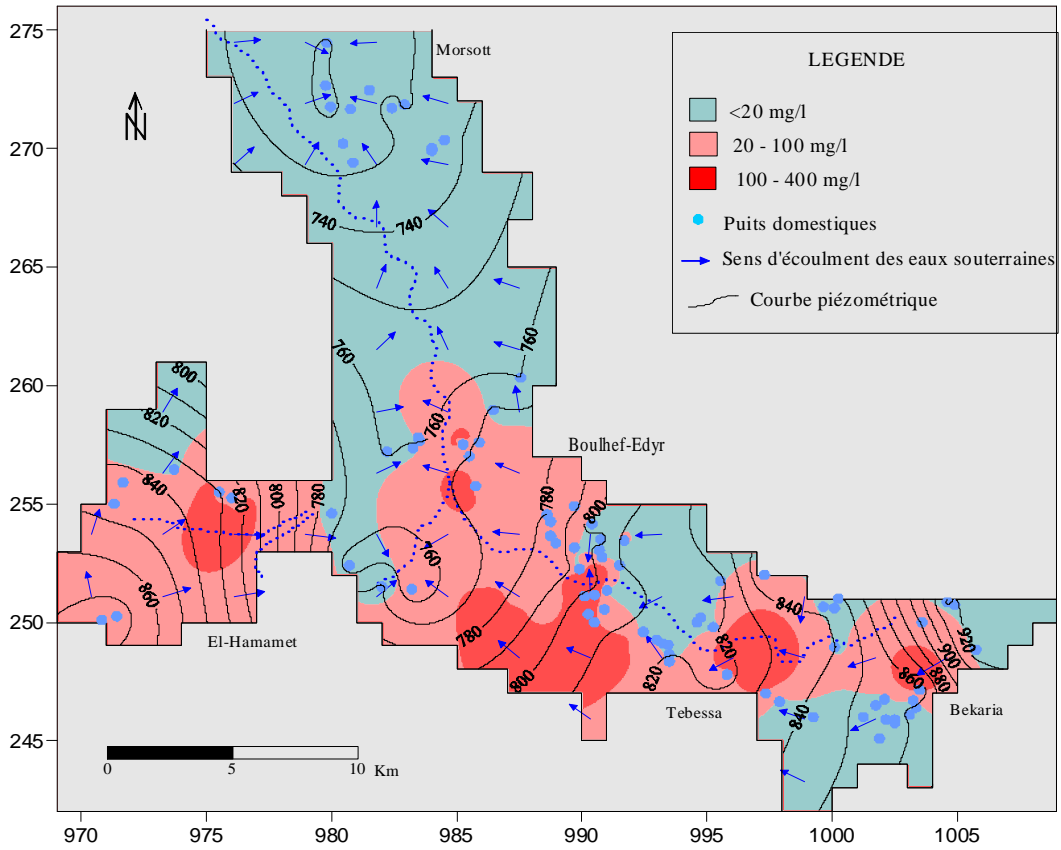


Fig.47. Carte des bicarbonates (mg/l) de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott (mai,1998)

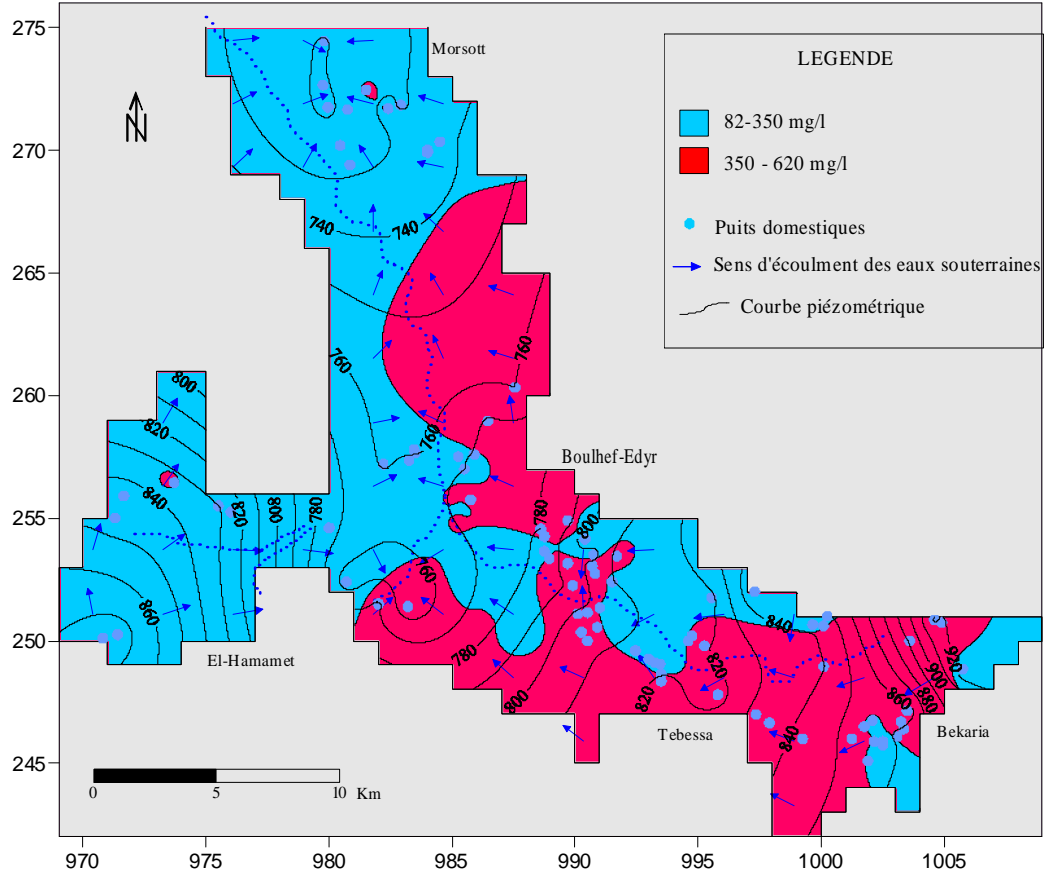


Fig.48. Carte des chlorures (mg/l) de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott (mai,1998)

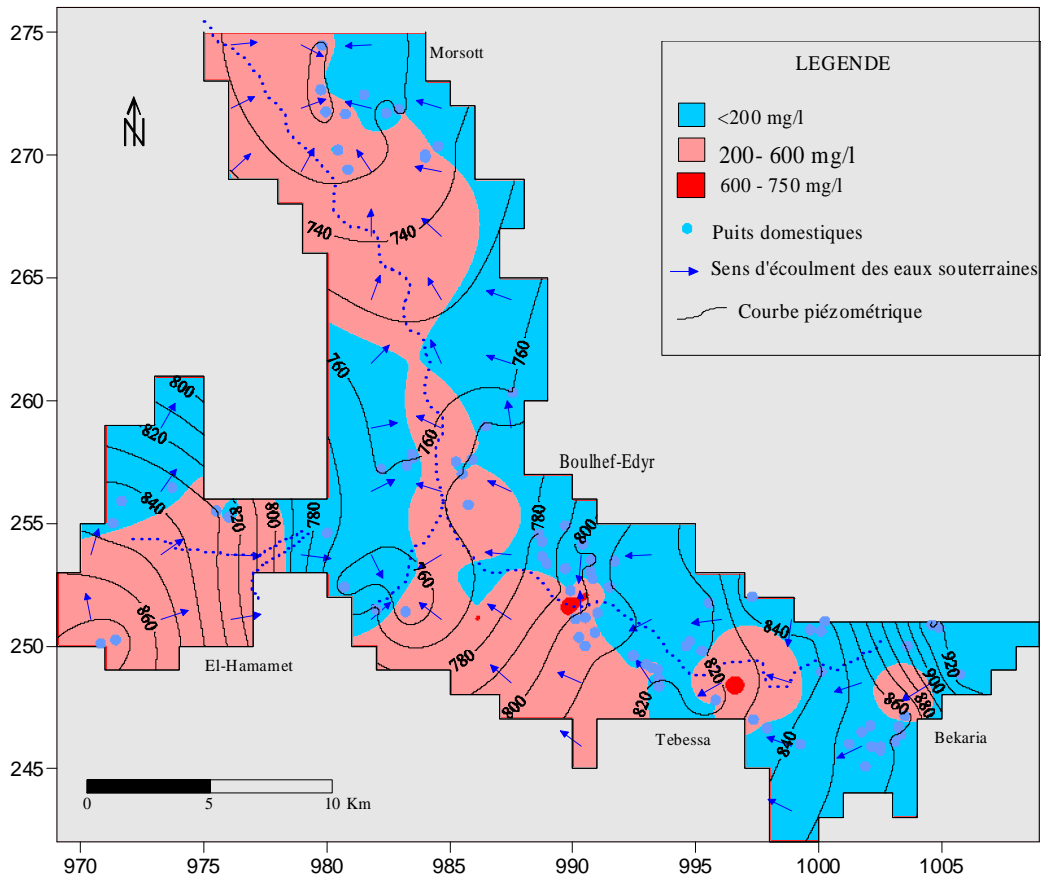


Fig.49. Carte des sulfates (mg/l) de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott (mai,1998)

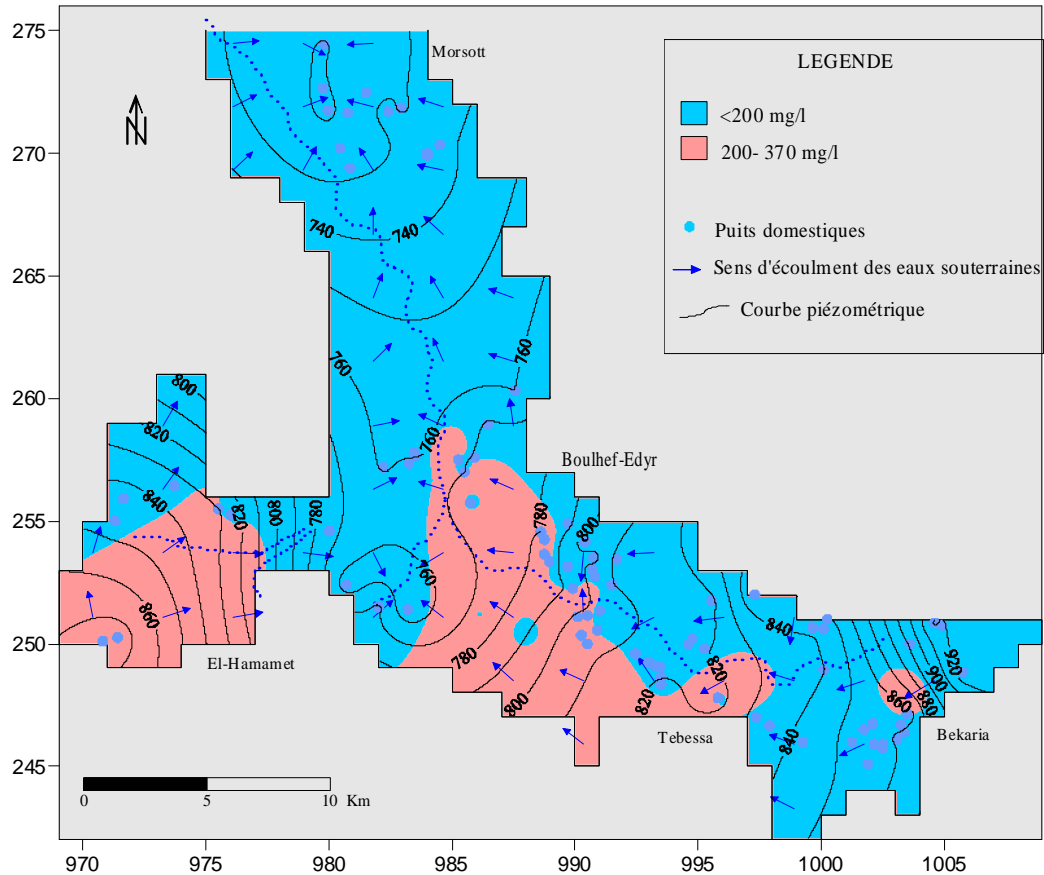
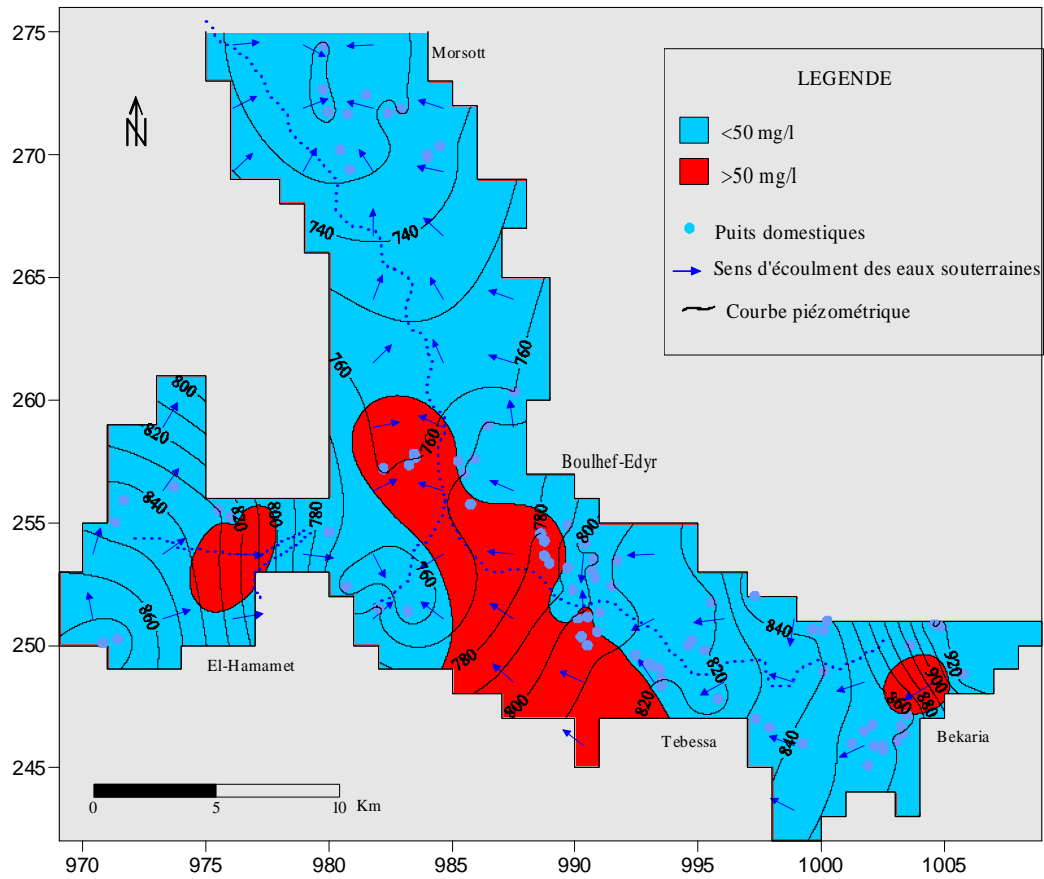


Fig.50. Carte des nitrates (mg/l) de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott (mai,1998)



Conclusion:

La température des eaux peu profondes de la plaine est influencée par la température de l'air, des eaux d'infiltration et surtout de la température des eaux en provenance des grandes profondeurs.

La minéralisation est influencée par la nature lithologique de la couche aquifère au centre de la plaine et par les formations triasiques en bordures.

La minéralisation de la nappe en éléments majeurs montre que c'est en bordure de la plaine que les teneurs en Ca, Na et HCO_3 sont les plus élevées et au centre pour les sulfates, les chlorures et les nitrates.

Le faciès chimiques des eaux de la nappe est bicarbonaté au voisinage des bordures et sulfaté à chlorurer dans le reste de la plaine.

Ce sont les teneurs excessives en (Na, SO_4 , Mg, Ca) qui remettent en cause la bonne qualité chimique des eaux profondes et de surfaces de la nappe.

Chap. VI. Evaluation de la pollution et de la vulnérabilité

1- Introduction:

Lors des précipitations, l'eau ruisselle ou s'infiltré et se charge en composants des sols et des roches mères. Ceci lui donne une "identité de base". Ainsi, elle peut acquérir des sels minéraux en grande quantité (calcium, magnésium, sulfates...) ou d'autres composés (fer, manganèse...). D'autres éléments liés à l'activité de l'homme peuvent être entraînés (nitrates, matières organiques, pesticides, micro-organismes...). La nature et l'occupation des sols jouent donc un rôle prépondérant.

L'eau contient des substances ou des micro-organismes qui par leur nature et leur concentration peuvent être indispensables, acceptables, indésirables, voire toxiques ou dangereux. L'eau prélevée dans le milieu naturel n'est généralement pas utilisable directement pour la consommation humaine. Elle doit subir des traitements pour pouvoir être consommée sans danger par l'ensemble de la population.

Tout le monde reconnaît aujourd'hui la fragilité de la ressource en eau et les risques de détérioration auxquels elle est soumise si aucune gestion rigoureuse n'est envisagée.

L'information qui est faite sur des éléments de pollution et sur la qualité des eaux de consommation permet une réelle sensibilisation des citoyens et des politiques. Cette meilleure connaissance se traduit par une exigence de qualité et de transparence dans les usages et assurément par une amélioration des équipements de traitement des eaux usagées.

En ce qui concerne l'eau potable, sa qualité et les paramètres qui permettent de la définir sont en constante évolution. La qualité de l'eau ne se vérifie plus à la mise à disposition de l'eau mais au robinet ou elle doit être potable quelle que soit son utilisation.

2- Pollutions

2.1- Définition:

La définition générale : dégradation d'un milieu naturel. Appliqué aux eaux souterraines, ce terme désigne toute perturbation des équilibres chimiques et biologiques originels des eaux souterraines en provenance de la surface par ruissellement et infiltration.

2.2- Normes de potabilités:

Les eaux naturelles (souterraines ou de surface) destinées à la consommation doivent être traitées si elles ne sont pas conformes aux normes de potabilité en vigueur.

L'OMS établit pour chaque paramètre les recommandations qui doivent être adaptées dans chaque pays en fonction de l'état sanitaire et des considérations économiques de ce pays, pour aboutir aux normes réglementaires nationales.

Certaines pollutions sont inoffensives, alors que d'autres peuvent être très dangereuses si l'on consomme l'eau qui en est le siège. La plupart des pollutions dangereuses résultent de l'activité humaine. Nous donnons ci-après les valeurs maximales des différents paramètres applicables à la notion de potabilité de l'eau de consommation courante selon les normes internationales.

2.2.1- Paramètres chimiques naturels:

- Chlorures < 250 mg/1 - Sulfates < 250 mg/1 - Calcium < 100 mg/1 - Magnésium < 50 mg/1	- Sodium < 150 mg/1 - Potassium < 12 mg/1 - Aluminium < 0,2 mg/1
--	--

La quantité de résidus secs, après évaporation à 180 ° C, doit être inférieure ou égale à 1.500 mg/l.

2.2.2- Paramètres concernant des substances indésirables:

- Nitrates < 50 mg/1 - Azote libre < 2 mg/1 - Fer < 0.02 mg/1 - Cuivre < 1 mg/1	- Manganèse < 0.05 mg/1 - Zinc < 5 mg/1 - Phosphore < 5 mg/1 - Fluor < 1,5 mg/1 - Argent < 0.01mg/1
--	---

2.2.3- Paramètres concernant des substances toxiques:

- Arsenic < 0.05 mg/1 - Cadmium < 0.005 mg/1 - Cyanure < 0.05 mg/1 - Chrome < 0.05 mg/1 - Mercure < 0.001 mg/1	- Nickel < 0.05 mg/1 - Antimoine < 0.01mg/1 - Sélénium < 0.01mg/1 - Pesticides < 0,0005 mg/1
--	---

2.2.4- Paramètres biologiques:

Nombre d'organismes dans 100 ml d'eau = 0 coliformes et streptocoques fécaux.
Nombre total de bactéries aérobies dans 100 ml d'eau à 20° : < 100 (pendant 24 heures)

2.3- Classification de la pollution:

La pollution peut être classée suivant différents critères :

2.3.1- En fonction de l'origine de la pollution :

- *Urbaines* : eaux usées, domestiques, eau pluviale, eau d'infiltration sous les dépôts d'ordure...etc.
- *Industrielles* : eaux usées, eaux d'infiltrations sous les stockages des déchets industrielles, liquides dangereux telle que hydrocarbures et solvants, eaux d'infiltration de drainage et de ruissellement sous aires cultivées ou sous aires agricoles (élevage, stockage et épandage d'engrais et de produits phytosanitaires).
- *Naturelle*: géologique (nature lithologique de l'aquifère, formations triasiques et gisements miniers).

2.3.2- En fonction de la nature des polluants :

- *Physique* : Les trois principaux agents physiques de la pollution sont :
 - La chaleur,
 - Transport de matières solides en suspension (introduites par la précipitation et ruissellement);
 - La radioactivité : elle est la plus dangereuse des polluants physiques ;
- *Chimique* : l'eau par son pouvoir dissolvant élevé, dissout les substances rejetées par l'activité humaine. Les polluants chimiques sont nombreux et d'origines diverses :
 - Sels minéraux dissout : les plus nocifs sont composés de l'azote : nitrates (No₃) et nitrites (No₂), les sulfates et chlorures ;
 - Métaux lourds, pesticides et détergents : se sont les micropolluants de faible teneur dans l'eau et nocifs pour le corps humain;
 - Les hydrocarbures, solvants : elle provient de la dilution des autres matières, ces teneurs dans l'eau sont très faibles.

2.3.3- En fonction de la répartition géographique :

- Pollution diffuse ;
- Pollution ponctuelle.

2.3.4- En fonction de la répartition dans le temps :

- Pollution permanente (chronique) ;
- Pollution accidentelle.

2.4- Principaux sources de pollutions dans la plaine :

Dans les pays en voie de développement et dans les régions semi-arides, dont Tebessa, il n'a pas été pris suffisamment de mesures pour contrôler l'urbanisation spontanée dans des zones vulnérables; les populations, face à l'insuffisance ou à l'inexistence de réseaux d'assainissement rejettent directement des eaux usées dans la nature faisant courir un risque certain sur la qualité des eaux souterraines. De plus, les activités de la population donnent naissance à une multitude de variétés de déchets dont les dérivés seront entraînés par les eaux de surface, pour atteindre par la suite les eaux souterraines.

Dans la plaine de Tebessa, la quasi-totalité de la population en zones rurales ne dispose pas de branchements privés au réseau d'eau potable. La minorité s'approvisionne aux quelques rares bornes fontaines de ruelle installées par la direction de l'hydraulique alors que la majorité puise directement dans les puits traditionnels captant la nappe phréatique.

De même, les ménages ne disposent pas de dispositifs d'assainissement satisfaisants. Les déchets ménagers solides et liquides sont rejetés directement sur ou dans le sol.

Dans la plaine, la pollution a différentes origines tels que :

2.4.1- La pollution domestique (fig.51):

Les rejets des eaux usées domestiques sont déversés sans traitement, soit directement dans l'oued El-Kébir, soit dans des collecteurs en terre qui traversent la plaine avant de déboucher dans l'oued (voir photo), soit encore dans des puits perdus ou des fosses. La quantité rejetée des eaux usées domestiques dans la plaine est évaluée à 7 millions de mètre cube par an. Les réseaux d'assainissement de la ville de Tébessa et de ses petites agglomérations ne sont pas séparatifs.

Les rejets d'eaux usées sont très chargés en polluants (Gouaidia.A, 2000), ces derniers, en plus de leur action sur les milieux aquatiques, ils dégagent des odeurs nauséabondes. Certaines conditions hydrodynamiques et structurales dans la plaine favorisent le contact ou le transfert de ces polluants vers la nappe (Chap.IV. relation oued nappe).

2.4.2- La pollution industrielle (fig.51):

Elle est essentiellement générée par des effluents des petites industries (Elatex, station de lavage, unités de carrelage...).



Photo. Drainage des eaux usées par Oued Chabro-Ksob

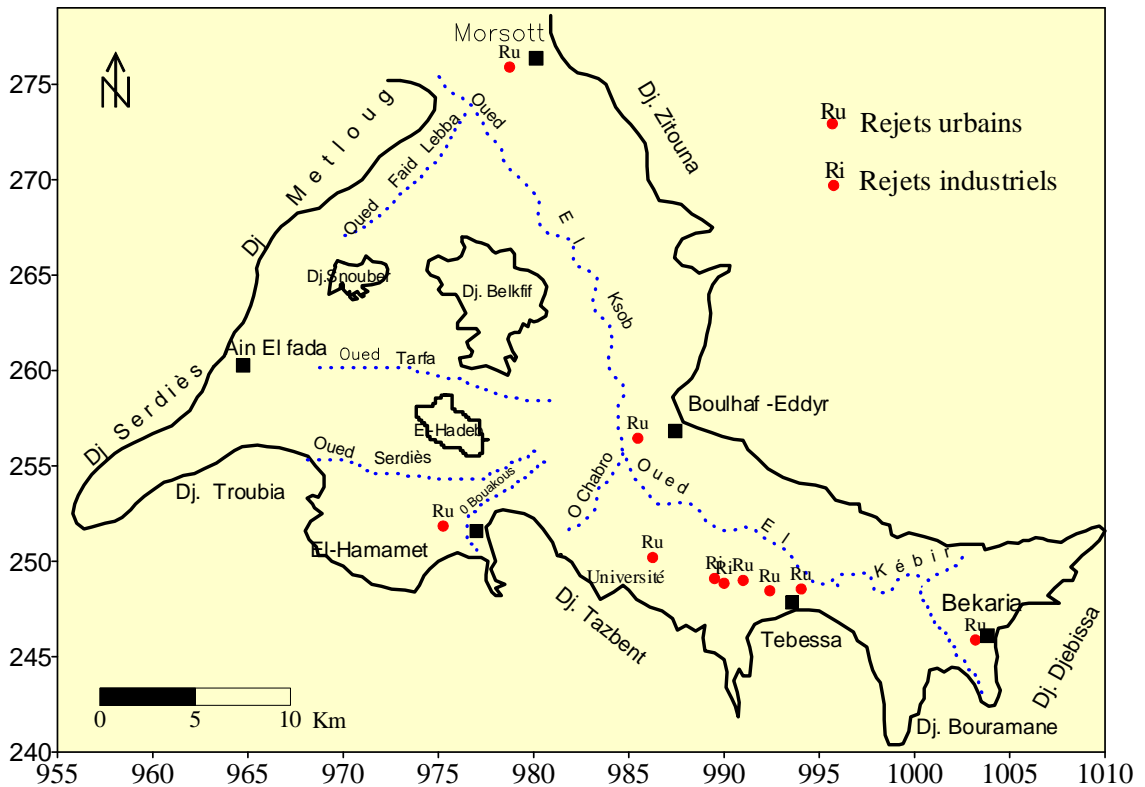


Fig.51. Carte de position des rejets urbains et industriels

2.4.3- La pollution agricole:

Cette pollution est due principalement à l'utilisation des engrais et des produits phytosanitaires. Dans la plaine de Tebessa, le sol est pauvre en matière organique, donc l'utilisation intensive des engrais pour maintenir la productivité est indispensable. L'entraînement dans le sol des composés contenus dans les engrais tels que les nitrates, les chlorures, les sulfates, les phosphates et le potassium peut donner lieu à une pollution accidentelle de la nappe.

L'utilisation des eaux usées pour l'irrigation par certains fellahs, habitant au voisinage d'oued El-Kébiri favorise la dispersion des polluants.

2.4.4- La pollution géologique:

- L'affleurement des formations triasiques qui se manifestent sous forme de diapir à Dj.Djebissa, Dj.Belkif et Hameimet Nord dont les dépôts salins sont très développés, ont un effet direct sur la qualité chimique des eaux souterraines de la nappe.

- La présence des formations marneuses d'âge Cénomaniens et Danoniens aux bordures du bassin contribuent à la détérioration de la qualité des eaux.

- La nature lithologique fine de la roche réservoir au centre de la plaine, composée essentiellement par des dépôts argileux.

- Les jeux de failles affectant les bordures et le centre de la plaine favorise la montée des formations triasiques en profondeur. Ce qui explique probablement l'augmentation de la salinité en profondeur dans certaines zones.

2.5- Evaluation de la pollution:

2.5.1- Introduction:

Les premières analyses d'une observation de la qualité des eaux souterraines de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott ont été réalisées entre les années 1971-81 par le service d'hydraulique de la wilaya sur l'ensemble des captages. Les résultats déjà obtenus montraient des teneurs élevée en particulier en nitrate supérieure à 50 mg/l (valeur limite européenne), donc la nécessité de disposer d'un réseau d'observation de la qualité des eaux souterraines est indispensable. Au delà de cette période, les analyses furent interrompues et aucun réseau n'est installé.

Cependant, une vision cohérente de la qualité de la ressource en eau souterraine sur l'ensemble de la nappe, manquait jusqu'à présent. Même pour des polluants aussi réputés que les nitrates et les produits phytosanitaires. Pour cela, notre objectif est de faire un diagnostic général sur l'état de santé de la nappe vis-à-vis de certains éléments polluant en période de basses eaux où le risque de contamination est considéré le plus élevé.

Les résultats présentés ici comblent désormais pour la première fois cette lacune. Ils permettent aux services concernés de se conformer aux normes de potabilité des eaux.

2.5.2- Paramètres indésirables :

Sont dites indésirables, certaines substances qui peuvent créer soit un désagrément pour le consommateur: goût (matières organiques, phénols, fer...), odeur (matières organiques, phénols...), couleur (fer, manganèse...), soit causer des effets gênants pour la santé (nitrates, fluor).

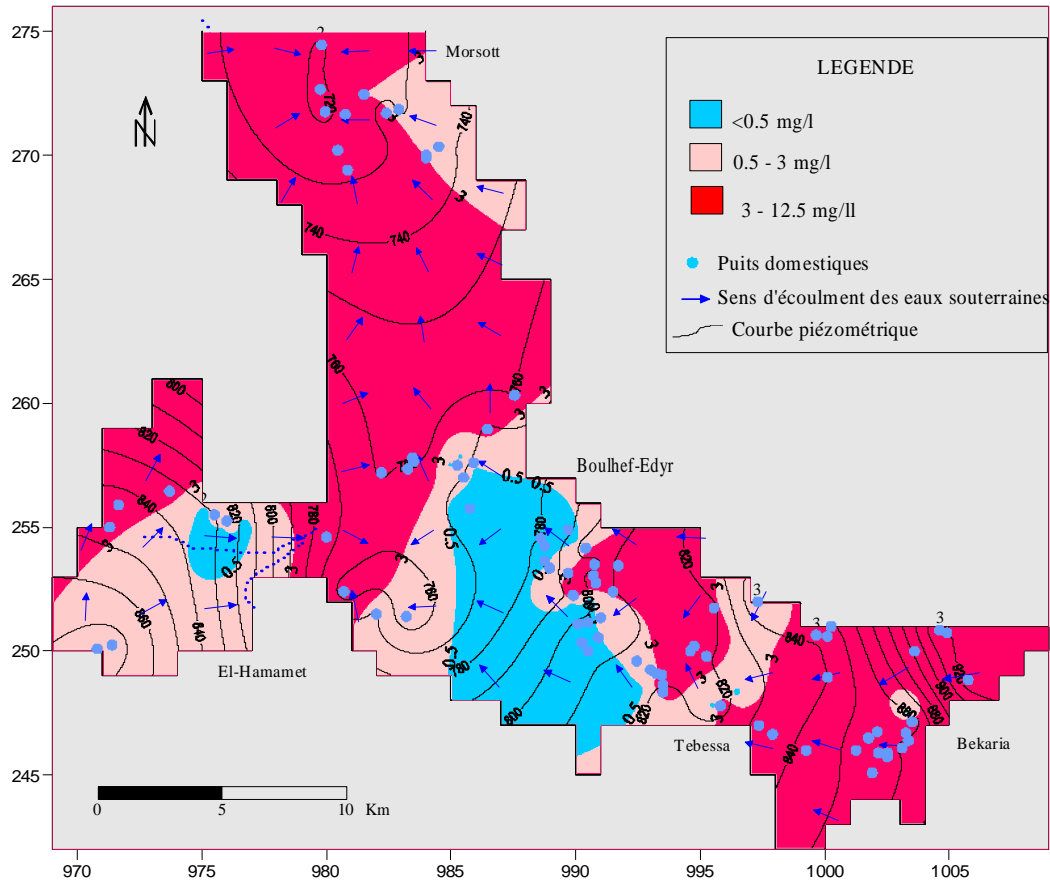
Durant la campagne d'échantillonnage de mai 1998, sur 100 puits recensés, 65 ont été retenus pour les analyses vis-à-vis de certains éléments polluants à savoir: Ammonium, Nitrate, Fluor, Fer, Zinc et le Plomb. Les analyses ont été réalisées au laboratoire de Ferphos, Tebessa.

2.5.2.1- Ammonium (fig.52):

Il résulte de la décomposition de la matière organique sous forme de radicaux NH_2 qui conduit à la formation de NH_4 . Nombre guide: 0,05 mg/l, concentration maximale: 0,5 mg/l. Si la concentration est supérieure à 0,05 mg/l il faut suspecter une pollution d'origine industrielle ou humaine. Elle est récente, si la teneur en ce polluant est très importante et ancienne dans le cas de teneurs faibles.

Les résultats de l'analyse chimique des eaux prélevées révèlent la présence d'indice de pollution en ammoniacque. Les concentrations maximales enregistrées sur toute la plaine atteignent 12.5 mg/l avec une moyenne de 3 mg/l. En effet, 60 % des eaux de puits prélevées présentent un taux d'ammoniacque supérieur à la teneur maximale admissible (0,5 mg/l), norme recommandée par l'OMS. A l'exception de la zone étendue entre Tebessa et Ain Chabro où les teneurs sont inférieurs à 0.05 mg/l. La répartition de ces fortes teneurs dans le centre de la plaine et en aval des zones urbaines pourrait s'expliquer par le niveau de l'assainissement et de l'hygiène publique dans la plaine.

Fig.52. Carte d'ammonium (mg/l) dans la nappe alluviale de Tebessa-Morsott (mai, 1998)



2.5.2.2- Les nitrates:

Nitrate et pesticides sont certainement d'excellents indicateurs de l'intensification de la pression anthropique sur l'environnement au cours des dernières décennies. En ce qui concerne les nitrates, la contamination provient principalement de trois sources :

a) Origine naturelle:

Les sols incultes, jamais fertilisés par l'homme, contiennent des nitrates en faible quantité. Ils proviennent de la transformation de la matière organique en décomposition par les microorganismes du sol. Les nitrates sont l'aboutissement d'un processus de décomposition de la matière organique azotée :

Composé organique →	Ammonium →	NO ₂ ⁻ →	NO ₃ ⁻
Azoté	NH ₄	Nitrites	Nitrates

b) Origine domestique et industrielle:

- L'accroissement de la densité de population a engendré une augmentation simultanée des quantités d'eaux usées résiduares qui sont rejetées dans la nature. Leurs déversements en eau de surface ou dans de simples fossés, et l'absence des stations d'épuration ont contribué à la détérioration de la qualité des eaux de surface et souterraines. Actuellement dans la plaine de Tebessa-

Morsott, l'assainissement des eaux usées n'atteint même pas le réseau hydrographique principal (Oued El-Kébir) aux zones urbaines d'El-Hamamet, Morsott, Tebessa (El-Merdja).

- De même, les combustions des moteurs des voitures, les rejets des industries vont également contribuer à la contamination des eaux de surface et souterraines, libèrent dans l'atmosphère des oxydes nitreux, pouvant générer des nitrates.

- L'exploitation intensive, d'autant plus intensive en période sèche, créant un gradient hydraulique fort qui contribue à une large dispersion des polluants.

c) Origine agricole:

Les productions agricoles (céréales, fourrages, légumes) sont dépendantes de la quantité de matière azotée présente dans le sol. C'est pourquoi les agriculteurs utilisent largement les engrais azotés, dont les nitrates, jusqu'à 500 kg par hectare et par an. Les besoins en nitrates varient suivant le type de plante. Si un agriculteur dépasse les doses optimales en nitrates, ceci entraîne un surplus (la plante ne l'absorbe plus) qui va être entraîné soit par ruissellement, soit par infiltration dans les nappes d'eau souterraine où sont puisées les eaux de consommation humaine. Cette dernière source est, de loin, la plus importante cause de pollution des eaux par les nitrates dans la plaine.

Les effets néfastes des nitrates sur la santé: l'ingestion de nitrates à fortes doses est susceptible, sous certaines conditions, de perturber l'oxygénation du sang chez les nourrissons. Par ailleurs, ils sont suspectés de participer à l'apparition de cancers digestifs. Les effets néfastes des nitrates sur l'écosystème: associés au phosphore, les nitrates modifient le comportement de certaines espèces végétales.

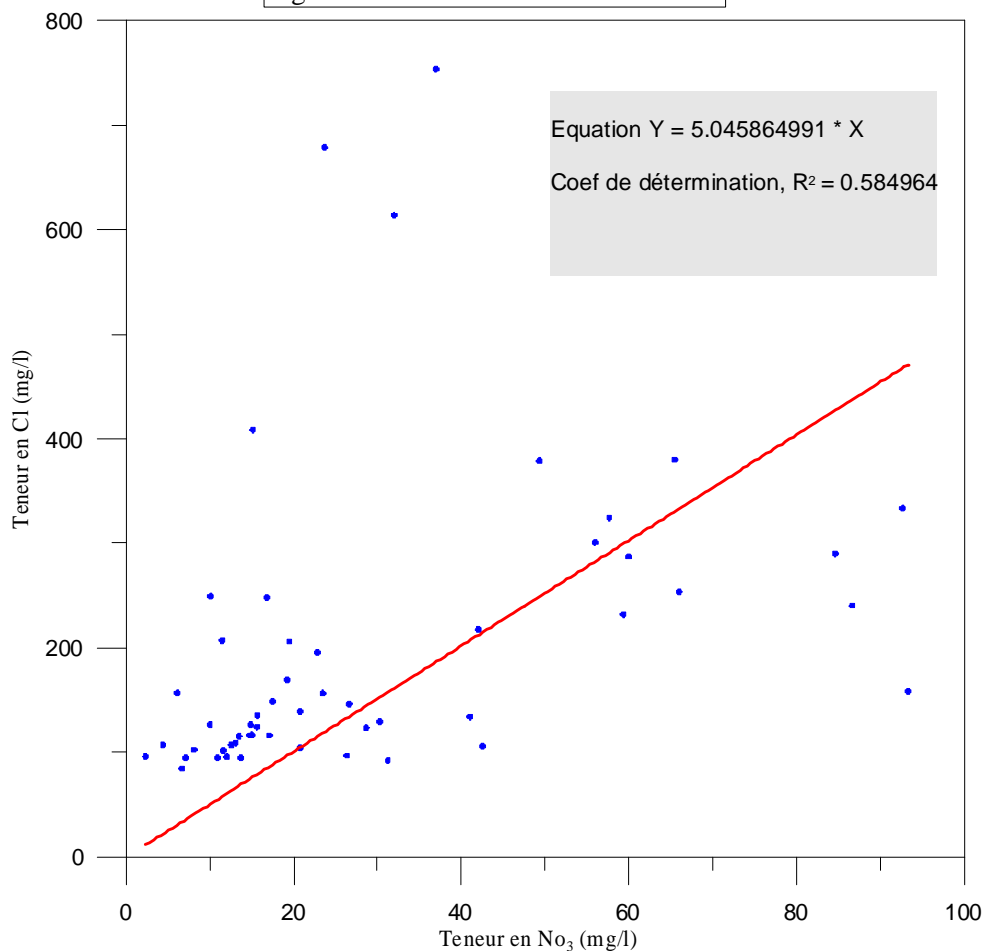
La carte des nitrates déjà établie (fig.50) montrée que parmi les puits investigués, ont une teneur en nitrate supérieure aux normes recommandées par l'OMS. La bonne corrélation linéaire (fig.53) établie entre les teneurs en nitrates et les chlorures des eaux des puits implique une même source de contamination dont l'origine est organique anthropique.

2.5.2.3- Fluor (fig.54):

Une région géographique peut naturellement avoir du fluor dans ses eaux souterraines. De même, on peut aussi rajouter artificiellement du fluor dans les eaux de boisson d'une région qui en est dépourvue. Dans les deux cas, il y a pour chaque eau de boisson un seuil en fluor à ne pas dépasser, au risque d'être toxique pour la consommation humaine. Les normes de l'OMS sont 0.8 à 1.7 mg/l et celles de C.E.E de 0.7 à 1.5 mg/l.

Le fluor provient des minéraux suivants (Ayres et Hellier, 1998): CaF_2 (fluorite), $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ (Fluoroapatite) et biotite. Dans des conditions normales, les concentrations en fluor sont inférieures à 1mg/l.

Fig.53. Correlation entre les nitrates et Cl



Les contaminations d'origine anthropique peuvent être les suivantes:

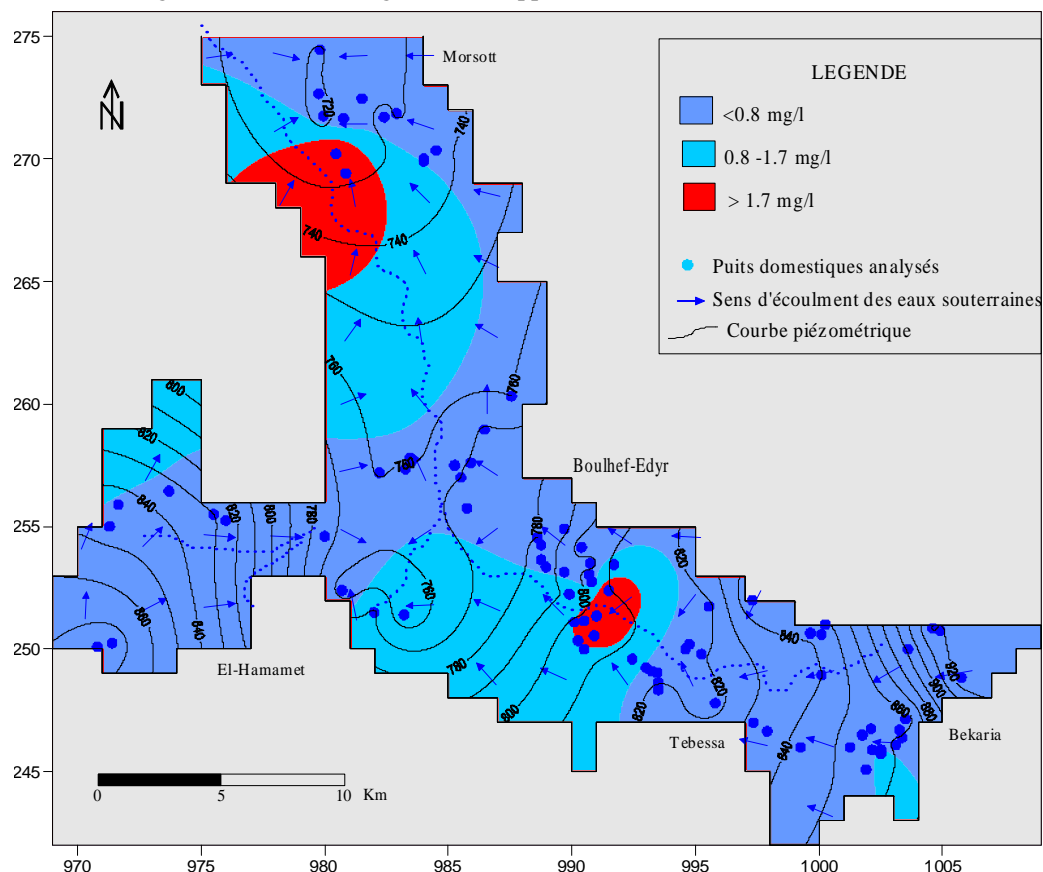
- Rejets industriels contenant l'acide hydrofluorique,
- Fertilisants fabriqués à partir de roches phosphatées contenant également du fluor.

Une augmentation de la concentration en calcium (Ca) entraîne généralement une diminution de la concentration en fluor (F) car ce dernier précipite à saturation avec le calcium pour former la fluorite (CaF_2). C'est vraisemblablement ce qui se passe dans l'aquifère de Tebessa-Morsott, avec pour conséquence, des teneurs en fluor généralement très faibles.

Dans la plaine de Tebessa-Morsott les teneurs en fluor varient de 0.04 à 2.4 mg/l, mais on constate deux valeurs élevées localisées au centre de l'aquifère et au niveau de la zone d'El-Merdja et Morsott. Ces teneurs élevées peuvent provenir du rejet de carbonates riches en fluor (influence anthropique) pour le cas de Morsott et d'un horizon géologique phosphaté riche en fluor dans la zone d'El-Merdja (des études ont montré la présence des niveaux phosphatés dans la bordure Est de la plaine).

A petites doses (1mg/l dans l'eau de boisson), le fluor favorise la santé dentaire : la fréquence des caries et le nombre de cavités diminuent et la dégénérescence est plus lente. A des concentrations > 1.5 mg/l favorise la fluorose dentaire ; il apparaît souvent sous forme d'une modification de l'émail dentaire provoquant des tâches jaunes ou marron.

Fig.54. Carte de fluor (mg/l) dans la nappe alluviale de Tebessa-Morsott (mai, 1998)



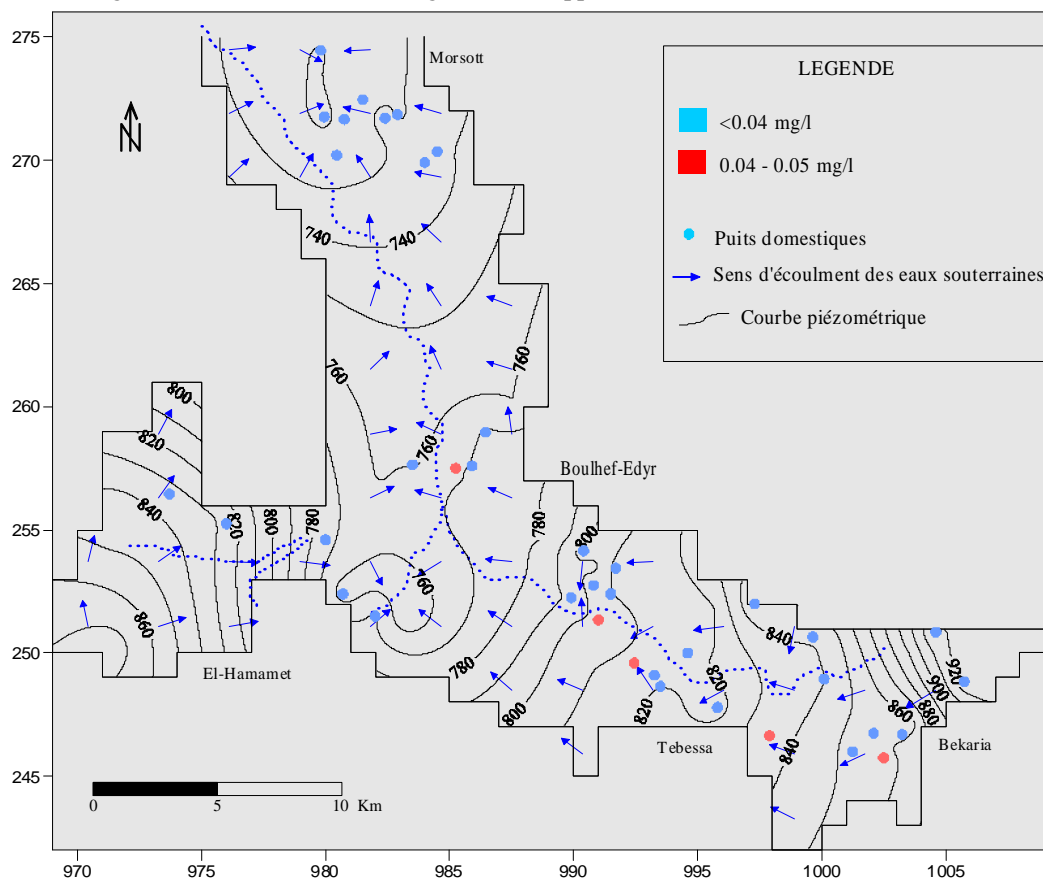
2.5.2.4- Fer (fig.55):

Nombre guide: 0.05 mg/l, concentration maximale : 0.2 mg. Les besoins journaliers de l'organisme sont de 1 à 2 mg de fer. Les limites de potabilité sont basées sur des effets esthétiques, le seuil gustatif, les effets ménagers et les inconvénients qu'entraîne le fer, à trop fortes concentrations, dans les réseaux de distribution. A des concentrations de l'ordre de 0.3 mg/l, le fer tache le linge et les installations sanitaires et donne mauvais goût à l'eau.

Les teneurs en fer dans la plaine sont inférieures ou égales à la concentration minimale admissible et variant de 0.01 à 0.05 mg/l. Les plus fortes teneurs sont enregistrées à la bordure Sud-Ouest entre Bekaria et Tebessa. Leur origine peut être associée à l'ancien gisement minier d'El-Kouif, situé au voisinage de Bekaria.

2.5.2.5- Zinc et Plomb: Tous les points d'eau analysés révèlent des concentrations très faibles (< 0.01 mg/l).

Fig.55. Carte du teneur en fer (mg/l) dans la nappe alluviale de Tebessa-Morsott (mai,1998)



2.5.3- Les paramètres physiques:

2.5.3.1- La salinité (fig.56 et 57):

La minéralisation d'une eau veut dire sa concentration en sels solubles (NaCl , CaCl_2 ; Na_2SO_4 , ...etc.). Durant la campagne d'échantillonnage en avril, 2002, les paramètres mesurés sont le résidu sec, conductivité, salinité de l'eau et taux de sels dissous (TDS) qui sont considérés comme des indicateurs de la salinité et permet de compléter l'information sur la nature lithologique du terrain traversé.

En plus, des polluants d'origines urbaines et industrielles viennent s'ajouter les formations triasiques qui constituent une source de pollution naturelle permanente. Celle-ci menace sévèrement la qualité des eaux souterraines de la nappe, en particulier là où les relations structurales et hydrodynamiques sont favorables.

L'établissement de la carte de salinité et du taux des sels dissous (TDS) montrent que les zones à forte et moyenne minéralisation sont réparties au Nord du sous bassin d'El-Hamamet, Morsott et la bordure Nord-Est (entre Bekaria et Tebessa).

a) Origine de la salinité :

La salinité des eaux souterraines est plus remarquable au centre de la plaine et à la bordure Nord-Est. La salinité a tendance d'augmenter avec la profondeur au centre de la plaine. Les eaux de surface sont moins chargées en sels que les eaux profondes. On notera, aussi une hétérogénéité

té de la salinité en surface, en fonction de la profondeur et du temps. Elle peut avoir plusieurs origines géologiques et lithologiques. Par contre, les facteurs favorisant une large dispersion de la salinité au sein de l'aquifère sont en l'occurrence: la tectonique, hydrodynamique, température et l'exploitation intensive des eaux souterraines (en particulier en périodes sèches).

- Géologique:

L'affleurement des formations triasiques qui se manifestent sous forme de diapir à Dj. Djebissa, Belekfif et Hameimet a un effet direct sur la qualité des eaux souterraines ;

La présence des formations marneuses d'âge Cénomaniens et Dano-mention aux bordures du bassin (sous bassin d'El-Hamamet).

- Lithologique:

La roche réservoir au centre de la plaine est composée essentiellement par des dépôts fins, argileux provenant des formations marneuses des bordures.

b) Facteurs influençant la salinité:

- Tectonique :

La montée des formations triasiques se fait à travers les jeux de failles affectant les formations du Crétacé en profondeur. Ce qui explique probablement l'augmentation de la salinité avec la profondeur ainsi que son hétérogénéité.

- Hydrodynamique :

La faible vitesse d'écoulement des eaux souterraines dans les formations fines du centre de la plaine, favorise l'échange entre la roche et l'eau.

- L'exploitation :

L'exploitation intensive par forage en particulier en période sèche contribue à une large dispersion des eaux salées au sein de la nappe.

- L'évaporation :

L'augmentation de la température en période d'étiage favorise le phénomène de l'évaporation des eaux souterraines de faible profondeur, ce qui augmente leurs teneurs en sels.

Fig.56. Carte de salinité (mg/l) de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott (avril, 2002)

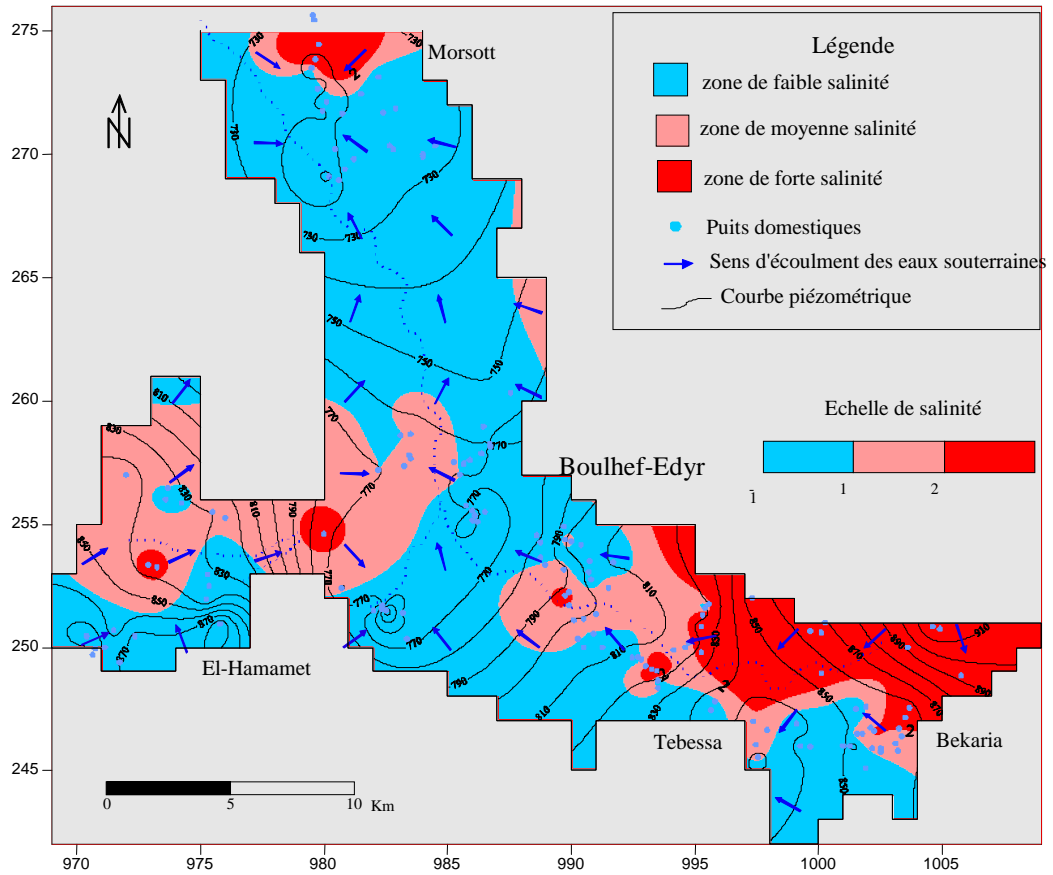
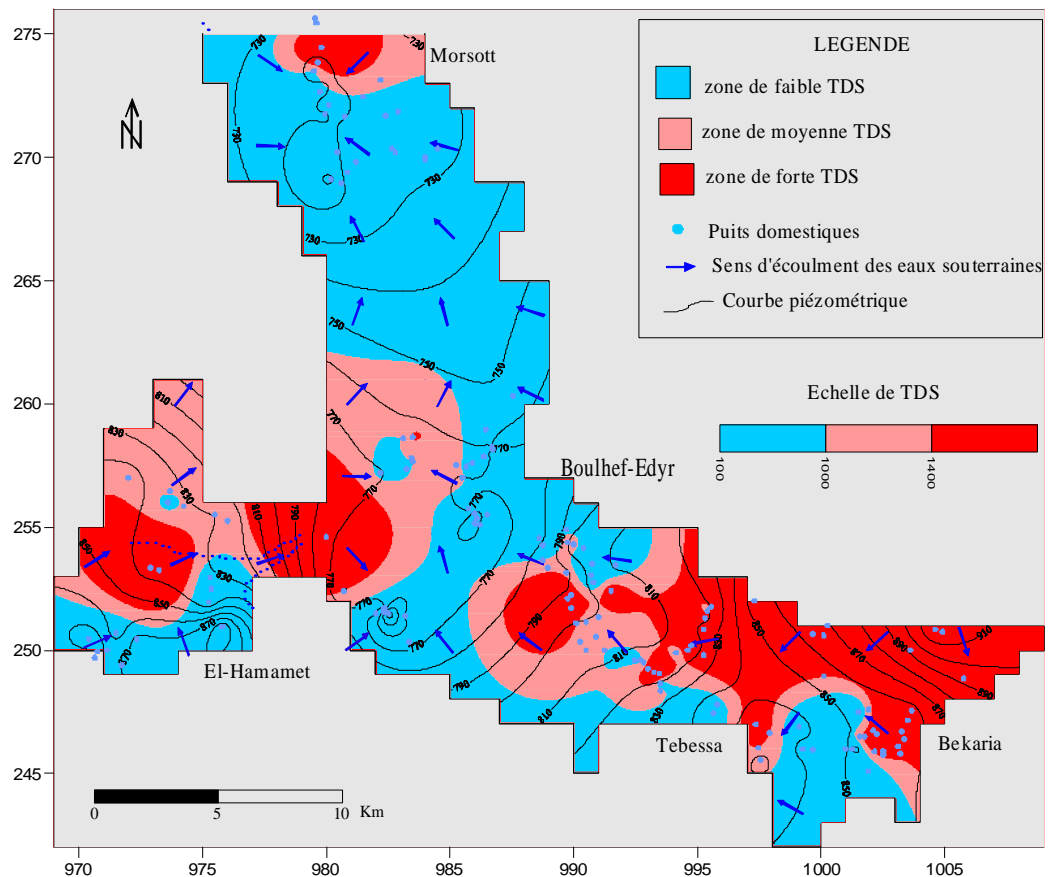


Fig.57. Carte du taux des sels dissous (mg/l) de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott (avril, 2002)



2.5.3.2- La température (58 a, b et c):

Au moment de l'enquête en avril 1993, mai 1998 et avril 2002, l'eau de la nappe a une température moyenne de 17.6, 17.78 et 18.61°C respectivement, ce qui traduit une nette augmentation de la température. Pour plus de 30% des puits, la température de l'eau est supérieure à la température moyenne annuelle (20 °C). En ce qui concerne les températures élevées comprises entre 22 et 30°C sont enregistrées dans neuf puits dont la profondeur de l'eau varie de 18 à 42 m. A l'exception des mesures de l'année 1993 où les pics de température sont observés à des profondeurs inférieures à 5 m.

Pour le reste des puits, les températures correspondent aux températures atmosphériques ambiantes et indiquent l'ouverture du système aquifère, donc sa vulnérabilité vis-à-vis de la pollution.

Il convient de souligner qu'une eau de température située entre 25°C et 28°C constitue un bon milieu de culture pour les micro-organismes de l'environnement, ce qui veut dire que l'élévation de la température des eaux de puits crée des conditions favorables à la pollution des eaux.

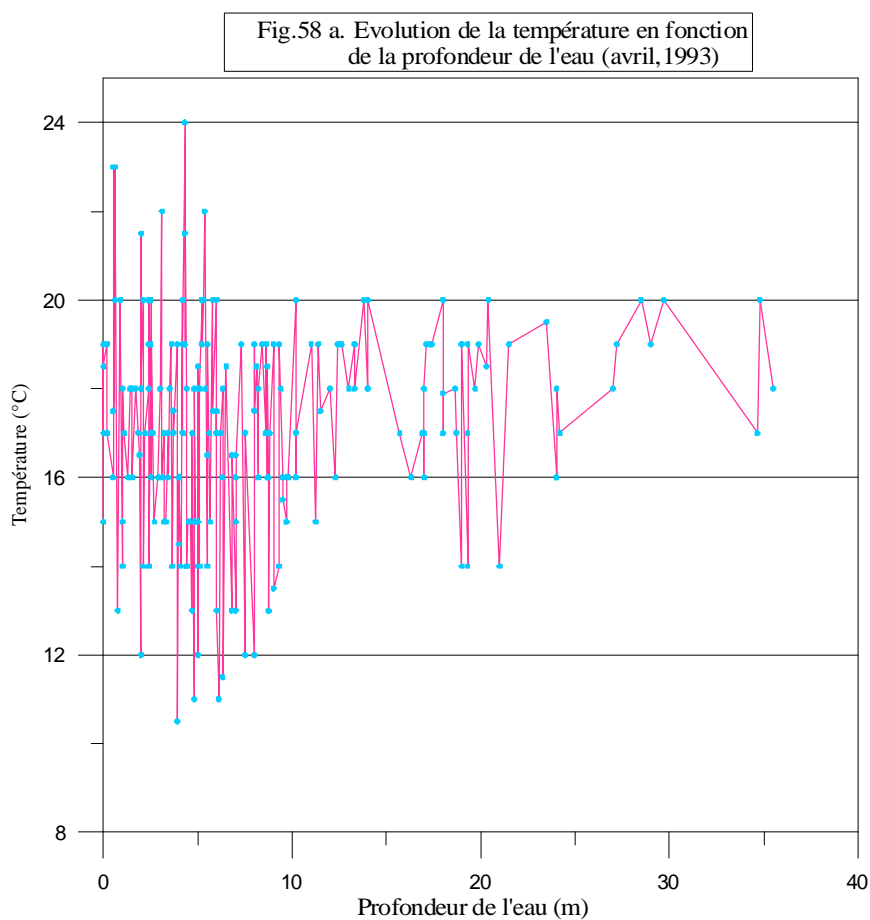


Fig.58 b. Evolution de la température en fonction de la profondeur de l'eau (mai, 1998)

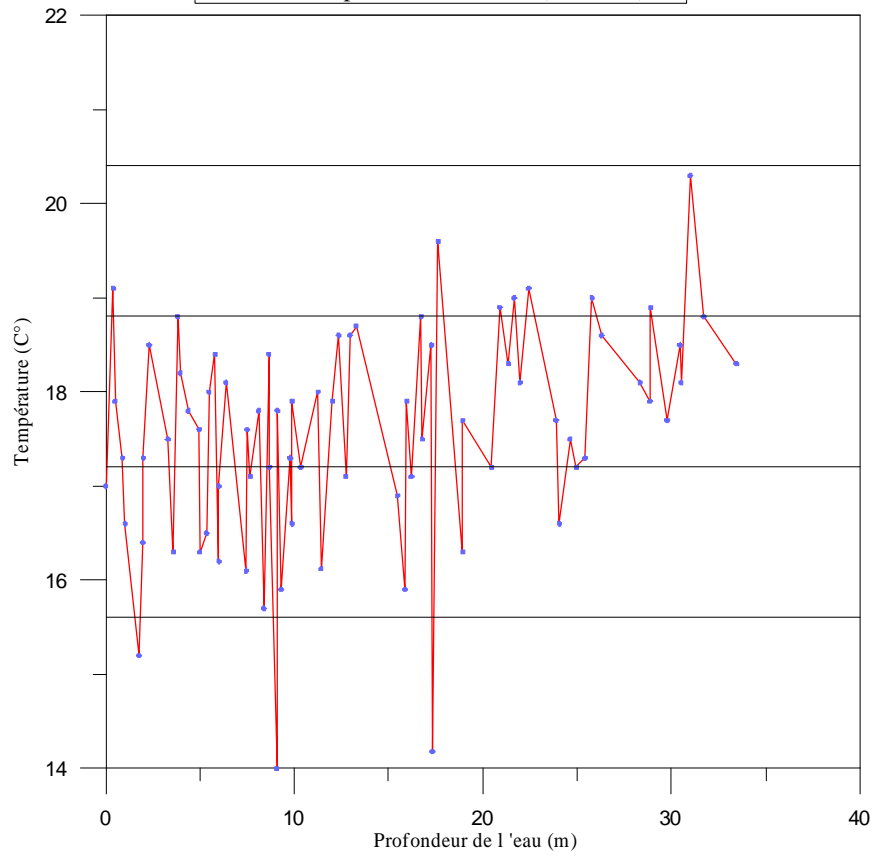
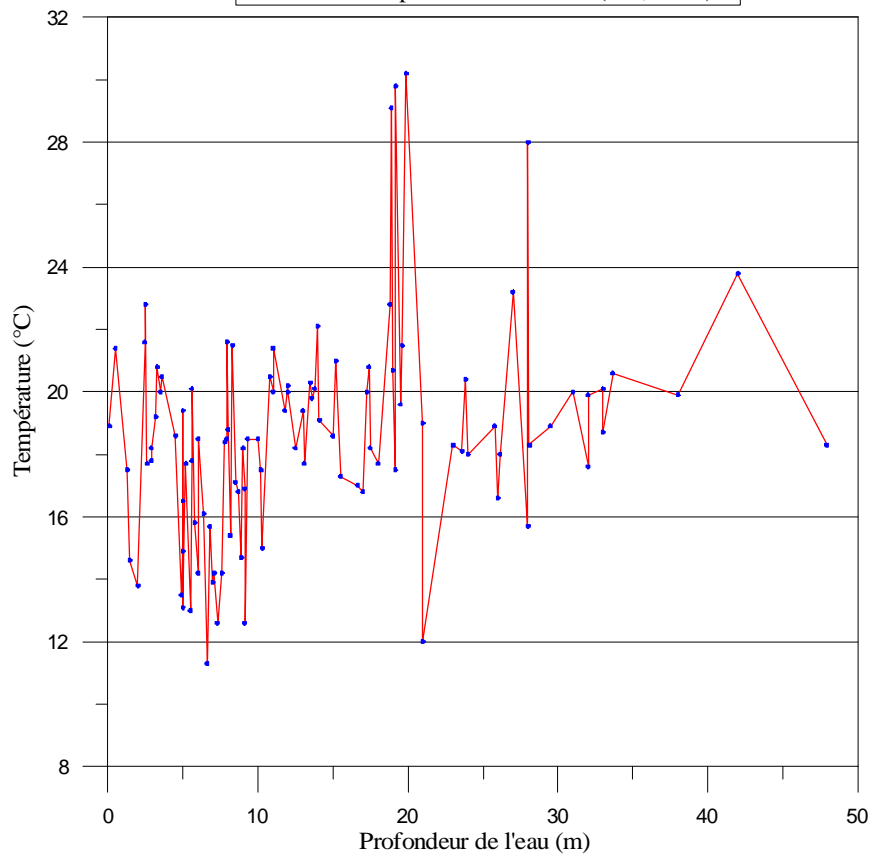


Fig. 58 c. Evolution de la température en fonction de la profondeur de l'eau (mai, 2002)



2.5.3.3- Acidité (fig.59 a, b et c):

Globalement, tous les profils d'évolution du pH en fonction de la profondeur de l'eau obtenu durant les différentes campagnes d'échantillonnage montrent un éventail plus large de valeurs de pH pour les puits ayant une profondeur de l'eau inférieure à 10 m et modéré pour une profondeur de l'eau supérieure à 10 m. Ceci provient du fait que dans le centre de la plaine (aquifère peu profond) la qualité de l'eau peut être influencé par la qualité de l'eau de surface et par les activités anthropiques, mais aussi par les caractéristiques lithologiques de l'aquifère.

Au-delà de 10 m de profondeur, les eaux sont caractérisées par des valeurs de pH, généralement plus élevées (> 7.5). L'aquifère est composé par des éboulis et cailloutis de calcaire, et une augmentation du pH se produit suite à une dissolution de ces derniers.

2.5.3.4- Dureté (fig.60):

La dureté de l'eau est due à la présence de sels solubles des métaux alcalino-terreux, dont les plus importants sont le calcium et le magnésium. La dureté totale est en gros la somme des duretés dues à Ca et à Mg. Ce paramètre ne fait pas l'objet de normes strictes. Il varie le plus souvent entre 10 mg/l et 500 mg/l. La valeur de 100 mg/l est couramment atteinte. Avec l'intervention d'autres facteurs (pH, alcalinité), une dureté de plus de 200 mg/l peut entraîner l'entartrage des canalisations et des appareils de chauffage.

A l'inverse, une dureté trop faible (inférieure à 100 mg/l) ne permet pas la formation d'une couche carbonatée protégeant les canalisations de certains risques de corrosion.

Dans la plaine, la dureté totale est globalement plus élevée dans les eaux à faible profondeur (<10 m) par rapport aux eaux de profondeur supérieure. Les valeurs extrêmes élevées sont toujours liées à des pollutions locales, comme elles peuvent provenir de l'utilisation démesurée d'engrais chimiques qui peut entraîner une diffusion des ions calciums dans l'aquifère.

L'augmentation de la dureté peut également être une conséquence de la dénitrification. Le résultat de ce processus consiste en la formation d'acide qui peut dissoudre le calcaire présent.

Fig.59 a. Evolution du pH en fonction de la profondeur de l'eau (avril, 1993)

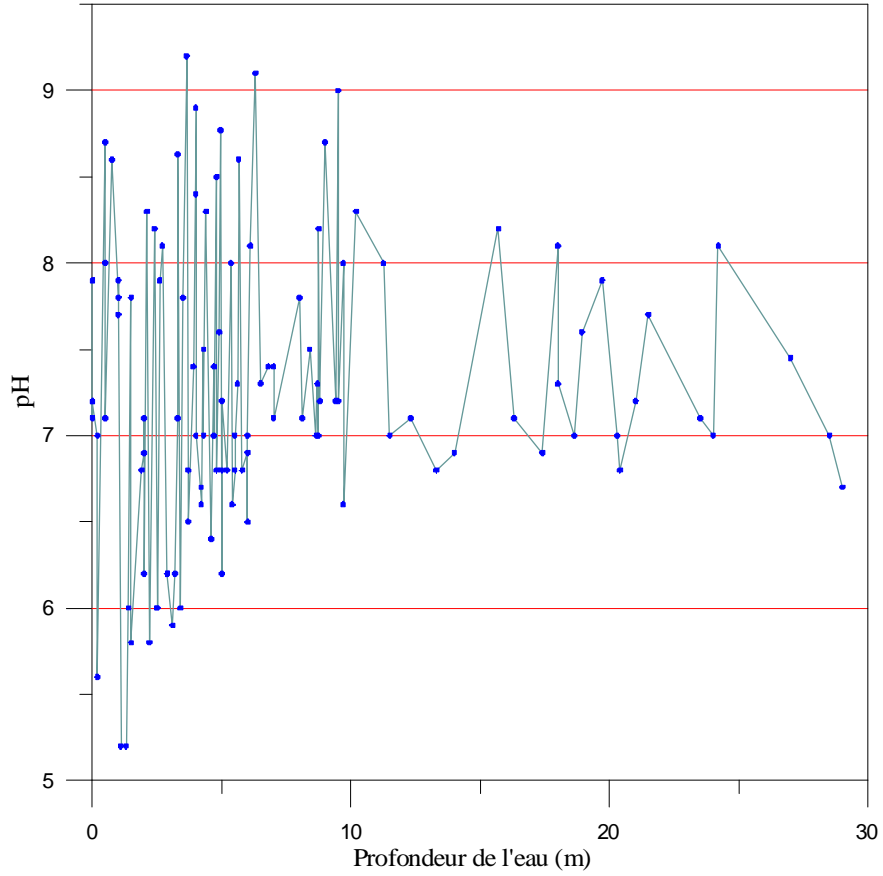


Fig.59 b. Evolution du pH en fonction de la profondeur de l'eau (mai, 1998)

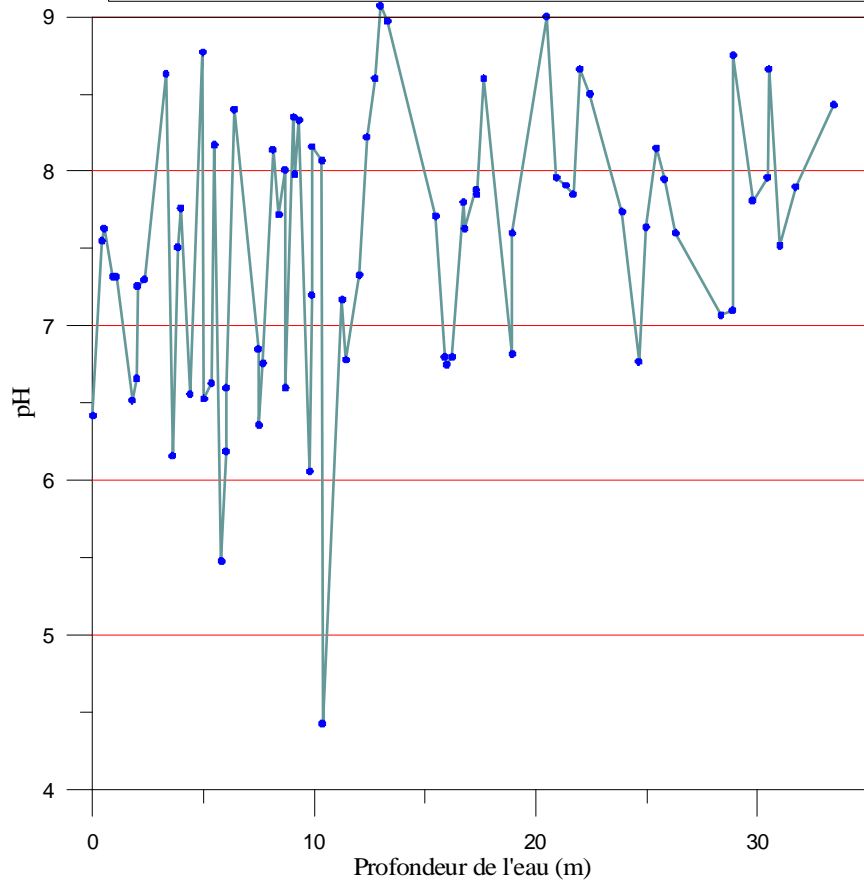


Fig.59 c. Evolution du pH en fonction de la profondeur de l'eau (avril; 2002)

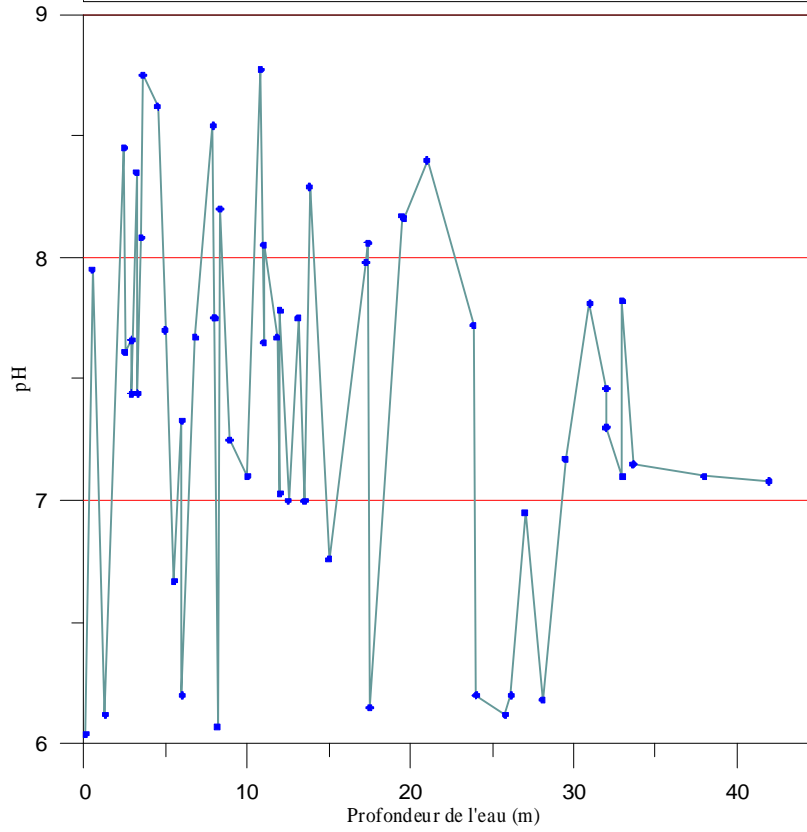
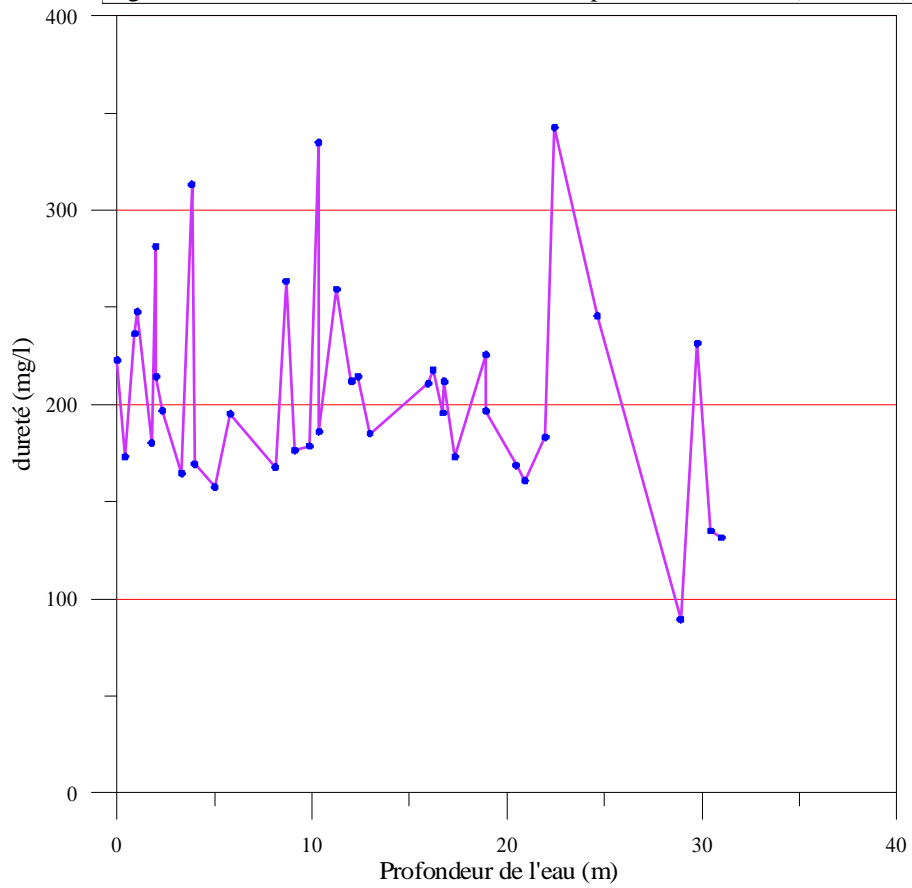


Fig.60. Evolution de la dureté en fonction de la profondeur de l'eau (mai, 1998)



2.5.4- Les paramètres microbiologiques:

2.5.4.1- Introduction:

Il convient tout d'abord de rappeler ce qu'est la pollution organique et ce qu'elle devient une fois rejetée dans la rivière sans transiter dans une station d'épuration.

En fait, les eaux résiduaires urbaines rassemblent les eaux grises (cuisine, bains) et les eaux noires (chasse d'eau). Sel (NaCl), détergents, savons, urines constituent l'essentiel de leur contenu.

On peut définir la charge polluante journalière d'un habitant (soit l'équivalent-habitant ou EH) comme suit :

Charge hydraulique : 180 litres/j.hab
Charge en matières en suspension : 86 g/j.hab
Charge en DCO : 135 g-O₂/j.hab
Charge en DBO₅ : 54 g-O₂/j.hab
Charge en azote total : 15 g-N/j.hab
Charge en phosphore total : 4 g-P/j.hab

Une partie des matières en suspension (matières organiques particulaires) va passer sous forme dissoute progressivement. On voit donc que la plus grande part des éléments polluants est sous forme organique. D'autre part, elle est surtout composée de carbone, d'azote et de phosphore.

Dès leur arrivée dans le réseau d'égouttage puis dans la rivière, ces matières organiques vont être transformées en matières minérales par l'action bactérienne en aérobie (oxydation) puis en anaérobie (fermentation) si la réoxygénation naturelle du cours d'eau n'est pas suffisante. Au bout de cette transformation, il reste du gaz carbonique émis dans l'atmosphère (et en partie dissous dans l'eau), des nitrates et des phosphates.

Dans les zones rurales de la plaine de Tebessa, les résidents tirent leurs besoins en eau des puits privés dont la qualité sanitaire des eaux est rarement connue. La plus part d'entre eux font appel à un sourcier pour déterminer son emplacement, sans tenir en compte d'aucun risque de pollution. On note aussi, l'absence de périmètres de protection pour les ouvrages de captage (forages et puits) dont le but est de réglementer ou d'interdire certaines activités qui constituent un risque potentiel pour la qualité de l'eau.

La mauvaise qualité d'une eau de boisson est responsable des risques sanitaires chez les consommateurs. Les risques à moyen et à long terme sont liés à une mauvaise qualité physico-chimique, alors que ceux à court terme sont liés aux caractéristiques microbiologiques. Donc, l'analyse régulière de la qualité bactériologique de l'eau est indispensable au maintien d'une réserve d'eau fiable et sûre.

Les indicateurs de la contamination bactériologique de l'eau sont: les coliformes totaux et les coliformes fécaux. Les coliformes totaux sont des bactéries qui se trouvent dans la végétation, les déjections animales, les égouts et le sol. Les coliformes fécaux proviennent des intestins des animaux chauds, ils ne survivent pas longtemps à l'extérieur du corps. Leur présence dans l'eau indique un problème à la fois récent et peu éloigné.

Ce travail vise à déterminer la qualité bactériologique à travers des analyses effectuées au niveau des puits domestiques et forages destinés à l'alimentation en eau potable. Les résultats de l'analyse permettent de prendre les mesures contre une éventuelle contamination et de choisir le traitement approprié.

2.5.4.2- Choix des sites de prélèvements (Tab.15):

Plus de 100 puits et 28 forages ont été recensés dans la plaine. L'eau de 18 puits a été analysée dans cinq zones urbaines (Tebessa-ville, Bekaria, El-Hamamet, Boulhef-edyr et Morsott) intéressant la nappe superficielle. Les points d'eau ont été choisis en fonction de leur répartition spatiale, de leur potentiel hydraulique et de leur emplacement par rapport aux sources de pollution. La prospection s'est déroulée en juin 2003. Une seconde campagne de prélèvement (12/07/2003) a été menée uniquement sur les forages intéressant la nappe profonde, et a concerné 9 forages (3 à Tebessa-ville, 3 à Bekaria et 3 El-Hamamet). On s'est limité uniquement à ce nombre de points d'eau à cause du manque des réactifs.

a) Prélèvement et analyse des échantillons :

Les échantillons d'eau ont été prélevés dans des flacons en verre stériles de 500 ml après cinq à dix minutes de pompage, transportés en enceinte réfrigérée (glacière) et analysés, immédiatement, dès l'arrivée au laboratoire. Certains paramètres sont mesurés in situ: Ph, température et la profondeur de l'eau. Les échantillons pris au niveau des puits et forages sont analysés respectivement par le laboratoire d'hygiène et de l'E.P.D.M.I.A de la wilaya de Tebessa.

Les prélèvements ont été effectués pendant la période de basses eaux, où le risque de contamination est supposé le plus élevé.

Les éléments bactériologiques recherchés sont: les coliformes totaux, les coliformes fécaux; streptocoques fécaux, clostridium sulfito-réducteurs et salmonelles.

b) Méthode d'analyse:

La recherche et dénombrement des paramètres microbiologiques ont été déterminés par la méthode appelée colimétrie. Elle consiste à déceler et dénombrer les germes coliformes et comporte deux temps:

La recherche présomptive des coliformes;

La recherche confirmative de l'escherichia-coli et éventuellement des autres coliformes.

Le dénombrement est effectué par la méthode du nombre le plus probable (N.P.P).

2.5.4.3- Interprétation des résultats:

a) Aquifère superficiel

Les puits de ce niveau ont une profondeur d'eau qui varie entre 0.8 à 25 m et de profondeur variant de 3 à 25 m. Au niveau de ces puits, les concentrations de coliformes totaux et de coliformes fécaux s'échelonnent respectivement entre 0 et 1400 et entre 0 et 93 dans 100 ml d'eau. Elles sont nulles pour les autres éléments bactériologiques (streptocoques fécaux, clostridium et salmonelles.). Malgré pour un nombre limité de puits échantillonnés, on trouve une proportion importante de puits présentant des coliformes (Tab.16).

Tab.15. Puits et forages retenus pour analyse bactériologique

Puits	X	Y	Z	NS	Ph	T°C	Prof. (m)	Débit (l/s)
2	976	255.25	830	3	8.14	18.7	14	7
4	985	257.5	780	6.9	7.83	19.8	10	faible
5	985.4	249	775	7	7.96	20.7	15	faible
6	989.9	252.25	792	0.9	7.73	20.4	5	faible
7	995.8	247.8	818	1.65	7.78	17.3	21	faible
8	995.7	247.75	830	0.78	7.84	22.4	18	faible
9	995.15	248	935	2.1	7.64	18.9	3	faible
10	993	249.25	819	4.5	7.69	21.5	8	faible
11	1002	246.75	873	18.5	7.72	21.5	18	faible
12	1000.5	246.9	810	16	7.72	20.1	60	faible
13	1000	248.9	884	25.39	7.74	20.3	60	3
14	999.4	248.5	889	9	7.77	19.4	16	faible
15	997.3	246.5	887	5.84	7.75	21.5	25	7
16	979.7	275	885	25	7.8	20.8	42	3
17	978.65	274	883	16.65	7.87	21.1	34	4
18	979.75	271.75	728	10	7.73	22.6	11	faible
19	980.75	271.65	734	12.5	7.74	21.1	25	faible
20	987.65	253.8	880	10	7.9	22	60	faible

Suite du Tab.15

Forage	X	Y	Forage	X	Y
EF1 bis	980.45	253.3	FTA1	990.75	250
M2	992.7	249.035	T1	996	247.35
FA2 bis	1000.85	247.1	ZI bis	1002.5	244.685
W2 bis	999.82	245.92	YS4 bis	976.5	253.35
F1	979.5	253.5			

La corrélation déterminée entre la profondeur de l'eau et le taux d'infection (fig.61, 62 et 63) montre que le taux d'infection diminue nettement avec la profondeur (sauf pour le puits 13), par contre plus de 80% du taux d'infection correspond aux puits dont la profondeur est comprise 3 et 25 m. Au delà de cette profondeur, la qualité bactériologique des eaux de la nappe est bonne.

Cette observation indique que :

- Les eaux superficielles de la nappe sont plus contaminées que les eaux profondes.
- La contamination de la nappe par les coliformes fécaux qui témoigne d'une origine fécale pourrait impliquer celle-ci dans la transmission des parasitoses à partir des eaux de puits.
- L'apparition de la pollution bactériologique des eaux de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott suggère une origine fécale des fortes teneurs en nitrates déjà enregistrées.

Tab.16. Qualité bactériologique de l'eau (norme OMS)

Puits N°	Colif.tot. /100ml	Colif.f./100ml	Qualité bactériologique de l'eau
2	150	0	Mauvaise
4	1400	0	Mauvaise
5	150	15	Mauvaise
6	1400	28	Mauvaise
7	1100	7	Mauvaise
8	240	0	Mauvaise
9	1400	93	Mauvaise
10	15	7	Mauvaise
11	450	29	Mauvaise
12	29	29	Mauvaise
13	0	0	Bonne
14	450	4	Mauvaise
15	93	93	Mauvaise
16	0	0	Bonne
17	9	4	Mauvaise
18	1400	20	Mauvaise
19	93	9	Mauvaise
20	0	0	Bonne

Fig.61. Correlation ente le taux d'infection et la profondeur de l'eau

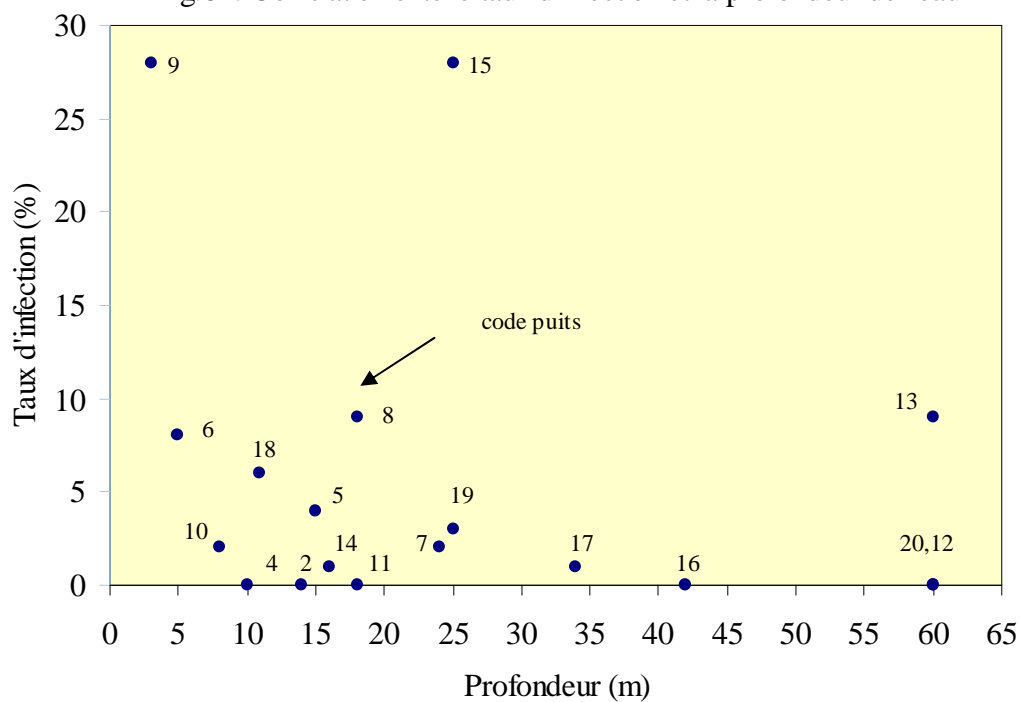


Fig.62. Densité des coliformes fécaux avec la profondeur de l'eau

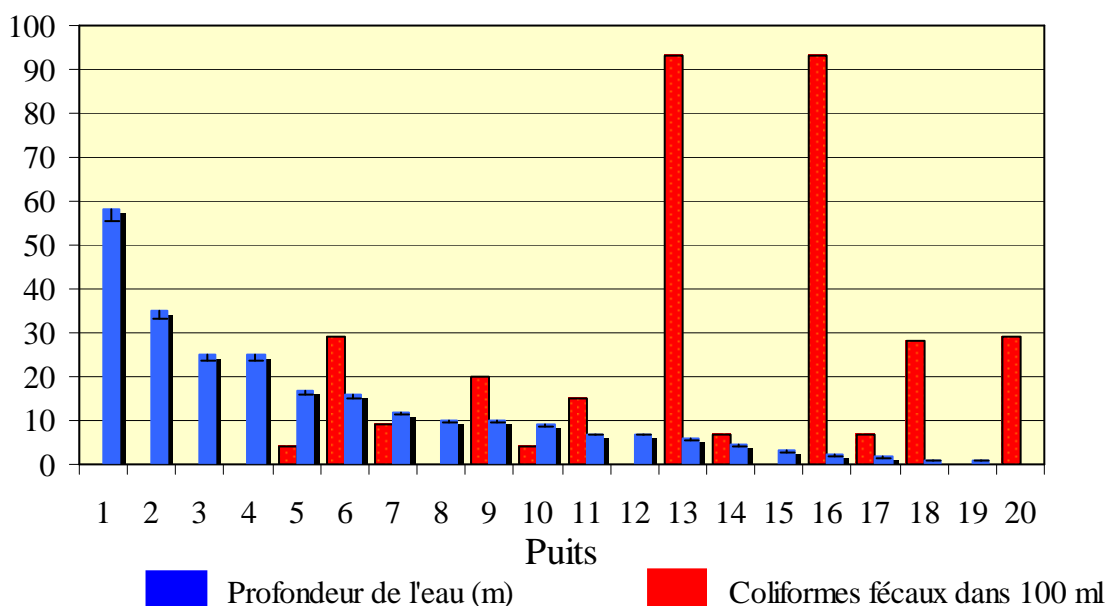
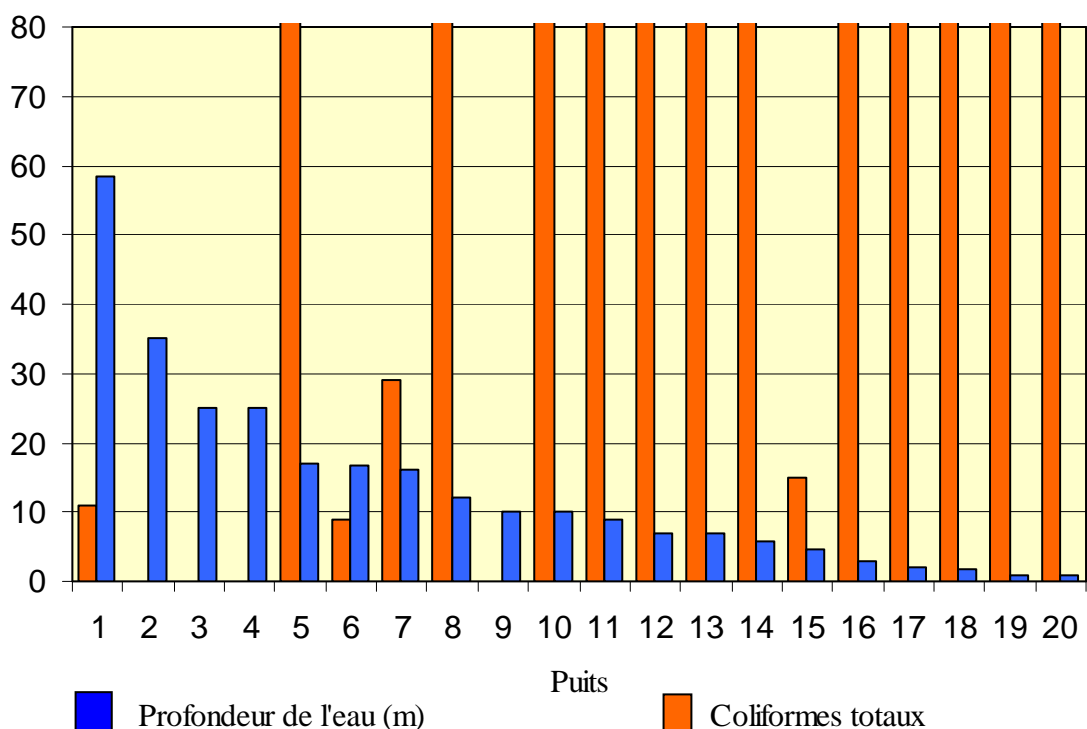


Fig.63. Densité des Coliformes totaux avec la profondeur de l'eau



Les concentrations maximales de coliformes totaux et fécaux dans les eaux de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott s'échelonnent respectivement entre 1400 et 93 dans 100 ml d'eau.

Il ressort des figures 62 et 63 que les eaux de la nappe phréatique superficielle de Tebessa-Morsott hébergent de fortes densités de bactéries fécales et pathogènes opportunistes. Les densités subissent d'amples fluctuations spatiales. La concentration des coliformes totaux et fécaux diminue avec la profondeur de l'eau. Autrement dit, les eaux souterraines de la nappe phréatique

de Tebessa-Morsott apparaissent plus vulnérables à la pollution bactériologique que le sommet de la nappe est plus proche de la surface du sol. Ce qui permet d'admettre que:

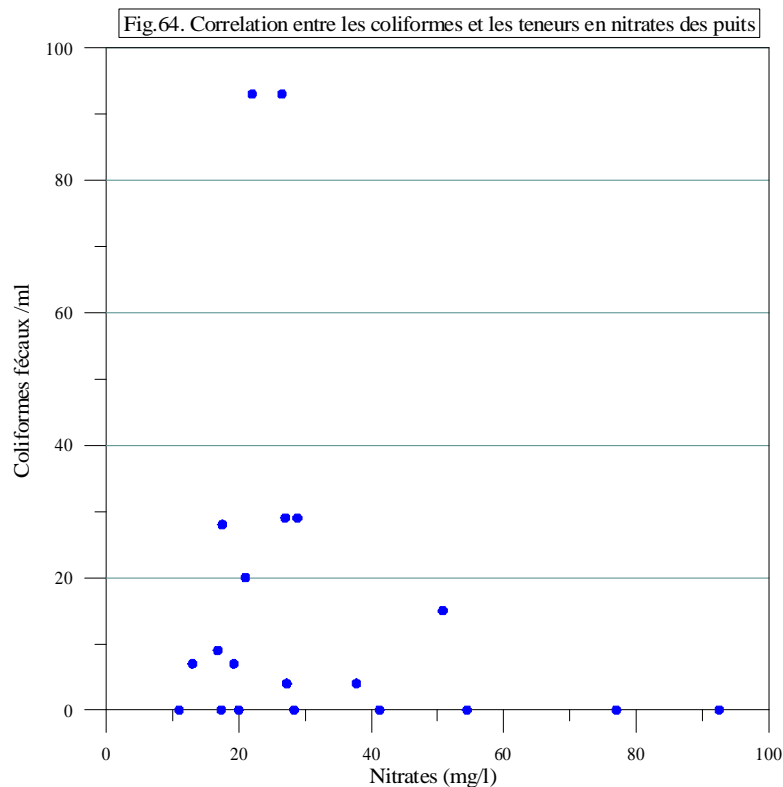
- Les eaux de ruissellement (en période hivernale), à cause des propriétés du sol (granulométrie, porosité et perméabilité) pourraient favoriser la pollution de la nappe en entraînant dans le sol et jusqu'aux eaux souterraines de nombreuses cellules et particules;
- Le versement des eaux usées dans la nappe sans traitement au préalable et la forte relation hydrodynamique entre Oued-nappe constituent une source de pollution permanente;
- L'irrigation par les eaux usées en particulier pour les zones approximatives d'oued Chabro-ksob où la profondeur de la nappe est faible d'ou plus vulnérable. Les fortes concentrations sont enregistrées au niveau de ces zones.

b) Aquifère profond

En profondeur, la qualité de la nappe a été analysée à partir des forages (EF1 bis, M2, FA2 bis W2 bis, F1, FTA1, T1, Z1 bis et Ys4 bis) dont les profondeurs sont de l'ordre 150 à 200 m. La contamination fécale reste dans les limites de potabilité avec une absence totale de tous les éléments bactériologiques analysés (Tab.2), contrairement à ce qui est observé au niveau des puits.

2.5.4.4- Corrélation entre les coliformes et les teneurs en nitrates (fig.64):

La relation entre les coliformes fécaux et les teneurs en NO_3 , ne montre pas une tendance significative, indique cependant que la pollution chimique prédomine sur la pollution bactériologique.



Conclusion:

La nappe superficielle accessible par les puits de profondeur comprise entre 3 et 25 m, apparaît fortement contaminée et héberge de forte densité des bactéries fécales et pathogènes d'origine humaines et animales. Mais, cette pollution trouve très probablement son origine dans le rejet des eaux usées et industrielles dans la plaine sans traitement préalable et de l'insuffisance des infrastructures d'assainissement. Les densités de ces germes subissent d'importante fluctuation spatiale.

Par ailleurs, l'existence de coliformes fécaux dans certains puits est très inquiétante et impose une réaction urgente pour rechercher et appliquer les solutions adéquates afin de stériliser les eaux de puits utilisées directement comme eau de boisson.

L'éventualité d'une pollution bactériologique de la nappe profonde doit être envisagée sérieusement. Surtout lorsqu'on sait que la nappe est actuellement sous une exploitation intensive et continue avec un débit mobilisé plus de 500 l/s. En effet, cela favorise la contamination de la nappe profonde par les polluants de surface.

Selon les normes de l'OMS relatives aux eaux de besoins, les micro-organismes isolés dans cette étude devraient être absents. Les consommateurs de ces eaux s'exposent à des risques sanitaires à court terme.

Un seul prélèvement momentané ne suffit pas à établir un diagnostic fiable: il établit seulement la certitude de la contamination et non son importance. En effet, des prélèvements à des fréquences régulières doivent se poursuivre pour surveiller l'évolution de la pollution de la nappe, notamment en profondeur afin d'hierarchiser les différents facteurs de pollution et prendre les mesures conservatoires appropriées.

2.5.5- Les paramètres concernant les pesticides :

Dans les années 1940, sont apparus les premiers pesticides de synthèse sur le marché, avec des résultats très positifs quant à l'augmentation des rendements agricoles.

Les produits phytosanitaires, utilisés pour combattre toutes espèces nuisibles ou concurrençant les cultures, sont apportés dans l'environnement par les grandes cultures, par le maraîchage agricole, par le traitement des forêts, par le traitement sur plans d'eau, par les traitements en zone urbaine (espaces verts, jardins, trottoirs, rues), par certains rejets industriels de conditionnement ou de fabrication, par le traitement des routes et des voies de chemin de fer.

Les pesticides, classés selon leur rôle biologique, regroupent les insecticides, les fongicides, les herbicides, les acaricides, les nématocides, les rodenticides, les corvicides, etc. Pour l'étude des problèmes liés à l'eau, les pesticides peuvent être répertoriés suivant leurs caractéristiques chimiques :

- les substances minérales comme le soufre, le sulfate de cuivre, les arsénates de plomb et de calcium ;
- les composés organo-chlorés des insecticides : DDT (dichlorodiphényltrichloroéthane), lindane, aldrine, dieldrine, heptachlore, etc ;
- les composés organo-chlorés des herbicides : dérivés chlorés de phénoxyacides (2,4D ou acide 2,4-dichlorophénoxyacétique, 2, 4, 5-TP ou acide trichlorophénoxypropionique ;
- les organophosphorés utilisés comme insecticides (parathion, malathion, phosdrisne,...)

- les composés organiques ou organométalliques dont les molécules comportent des groupes fonctionnels très variés comme les dérivés de l'urée, les phytohormones, les triazines (atrazine, simazine, tertbuthylazine) employées comme herbicides, les carbamates et les dithiocarbamates utilisés comme insecticides ou fongicides, ... ;

La réglementation fixe à 0,1 µg/l la concentration maximale par substance individuelle et à 0,5 µg/l le total des substances mesurées. A forte dose, la toxicité sur l'homme (travailleurs exposés professionnellement) et les animaux est largement prouvée. Les pathologies les plus souvent décrites sont des cancers. En revanche, les effets liés à l'ingestion de faibles teneurs, aussi bien dans l'alimentation que dans l'eau distribuée, restent encore peu connus. On suspecte les pesticides de perturber les régulations hormonales et d'accroître le risque de cancers du sein, de la prostate et du testicule (étude de De Hayo et Van der Werf citée par *Eurêka* no 36 octobre 98), et de diminuer la fertilité masculine.

En ce qui concerne la plaine alluviale de Tebessa-Morsott, nous ne possédons pas des analyses concernant ce paramètre, mais le sol est très pauvre en matières organiques, cependant l'utilisation des engrais pour garantir la productivité des sols est indispensable. L'utilisation arbitraire, irrationnelle et non contrôlée par les agriculteurs doit être l'une des priorités pour l'avenir. Actuellement, ces polluants ne sont pas mesurés (pour ne pas dire ignorés), risquent de manifester prochainement leurs effets.

2.5.6- Répartition des éléments chimiques selon la profondeur de l'eau:

2.5.6.1- Les éléments majeurs:

- *Les bicarbonates (fig.65):*

C'est dans la nappe peu profonde, que nous enregistrons toujours les teneurs les plus fortes avec une large variation. Les activités humaines sont probablement à l'origine des concentrations extrêmes. A une profondeur moyenne de la nappe, ces teneurs ont une variation modérée et s'échelonnent entre 300 à 400 mg/l, traduisant une origine naturelle liée au phénomène d'échange ionique, en grande partie dans la couche aquifère et aux zones d'alimentations.

- *Calcium (fig.65) :*

Les concentrations en Ca²⁺ très élevées retrouvées dans la nappe peu profonde (ns<10 m) occupant le centre de la plaine sont certainement d'origine humaine. En ce qui concerne les dépôts plus au moins grossiers de la nappe à profondeur moyenne (ns>10m), les teneurs sont au voisinage de 150 mg/l, inférieure à la teneur maximale admissible (200 mg/l), confirmant leur origine naturelle.

- *Magnésium (fig.65):*

Les teneurs en magnésium (Mg²⁺) atteignent des valeurs maximales (> 50 mg/l) sur des puits dont le niveau d'eau est inférieur à 10 m. Dans la tranche d'eau comprise entre 10 et 30 m de profondeur, les teneurs sont au voisinage des normes (< 50 mg/l).

- *Chlore (fig.66):*

Les valeurs extrêmes constatées dans les puits à niveau statique inférieur à 10 m (entre 100 et 750 mg/l) sont à mettre en relation avec des contaminations urbaines et industrielles. Au delà de ce niveau statique, les valeurs sont moins élevées (entre 100 et 400 mg/l), peut cependant être expliquée par la lithologie de l'aquifère et de la zone d'alimentation.

- Sodium (fig.66):

Pour le sodium (Na^+), les pics de concentration supérieure à la teneur maximale admissible de 150 mg/l pour la consommation humaine sont également enregistrés dans la tranche d'eau superficielle.

- Les sulfates (fig.67):

Il semble que dans le centre de la plaine, l'aquifère peu profond soit caractérisé par des valeurs en sulfates plus élevées et dépassent largement les normes de l'OMS (250 mg/l). Ces valeurs extrêmes peuvent être imputées aux rejets urbains et industrielles et aux activités agricoles. Dans la nappe de profondeur moyenne, les teneurs sont dans les normes et peuvent avoir une origine naturelle.

- Potassium (fig.67):

Les concentrations sont en dessous des teneurs maximales admissibles (<12 mg/l) pour les différents niveaux d'eaux.

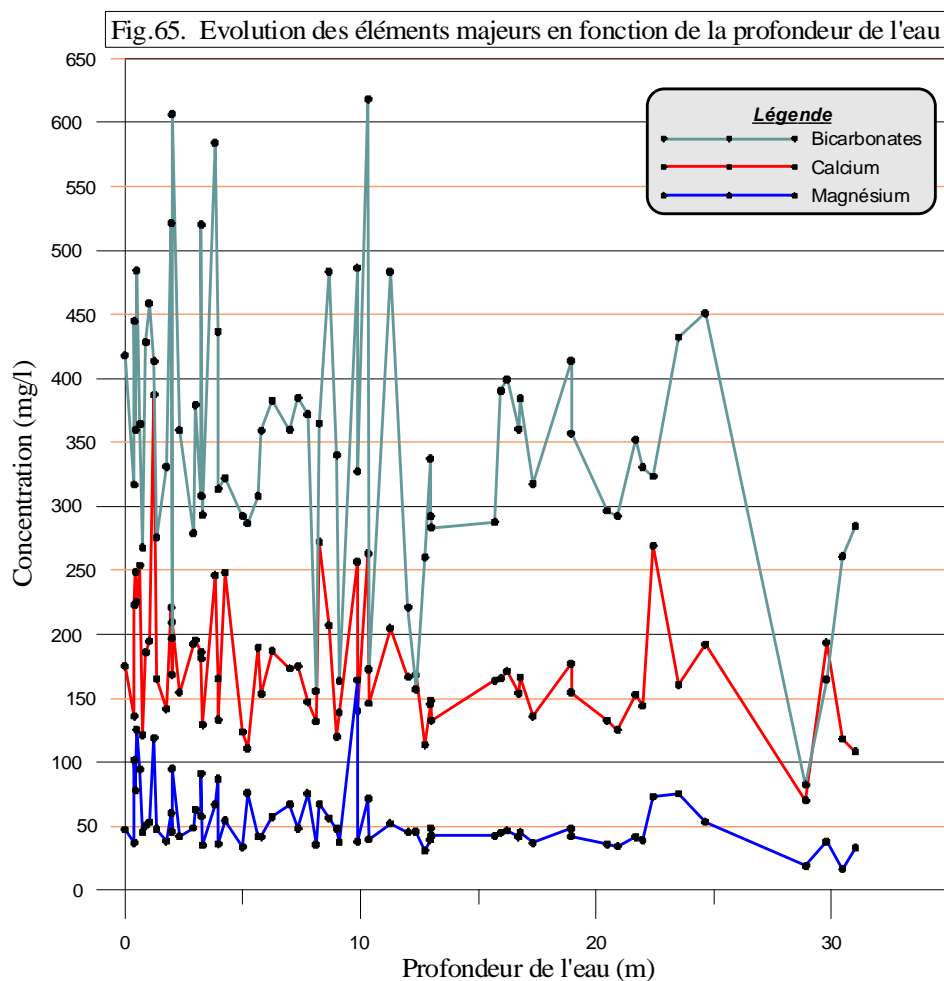


Fig.66. Evolution des éléments majeurs en fonction de la profondeur de l'eau

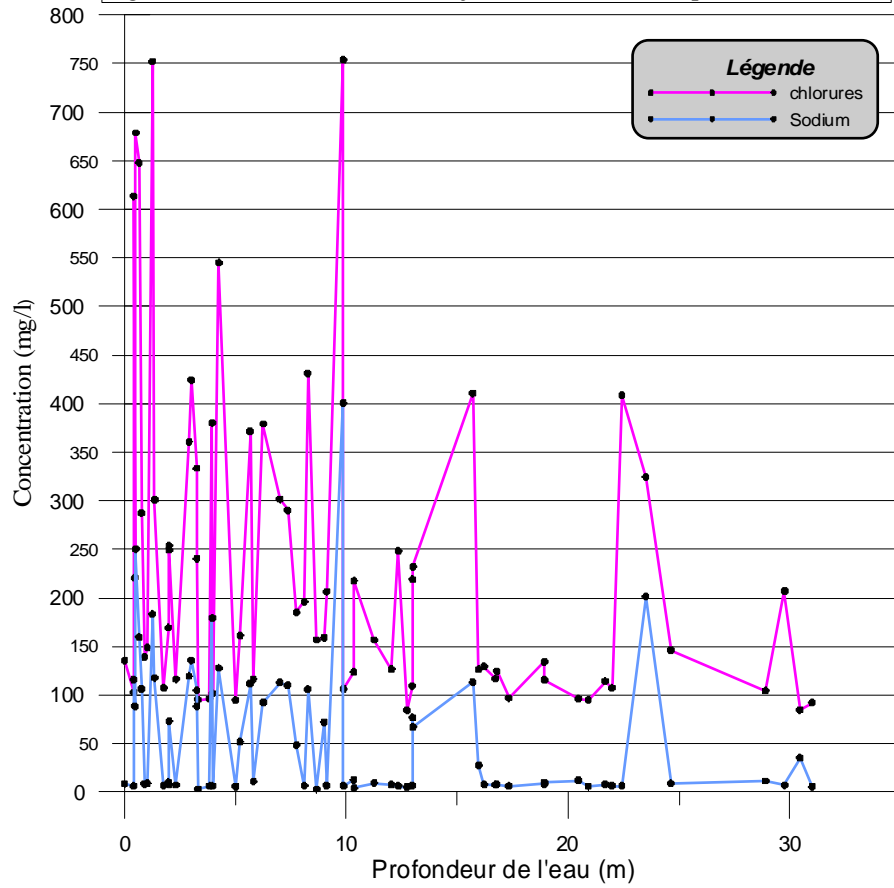
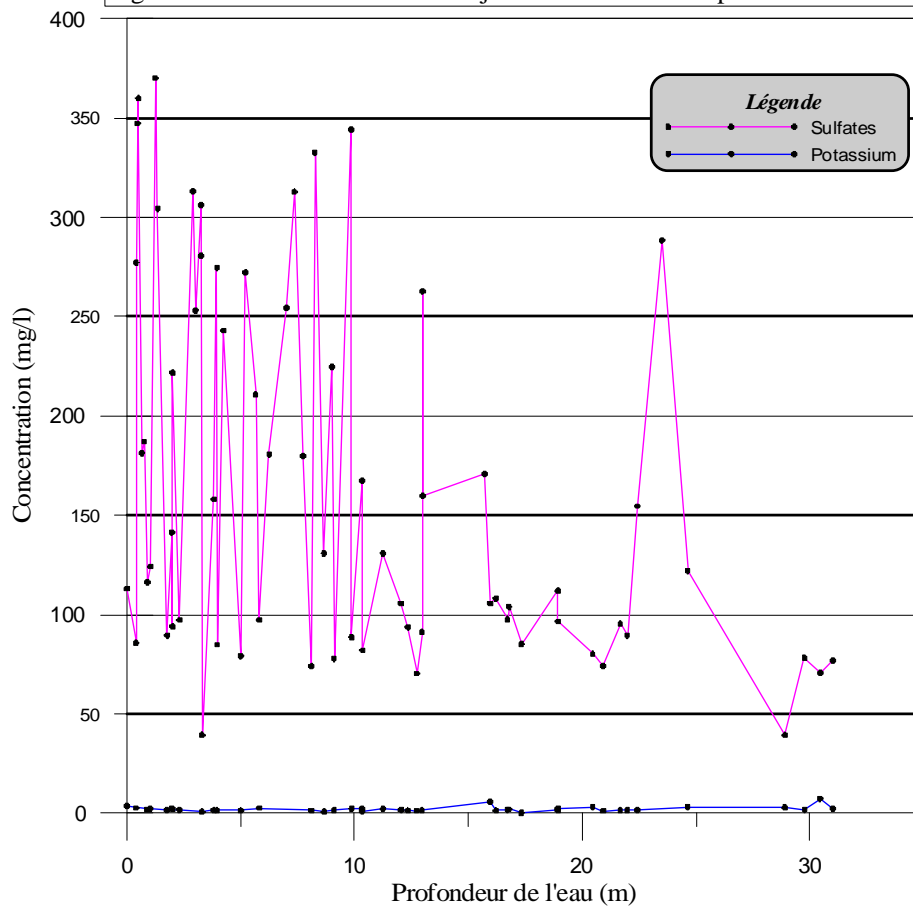


Fig. 67. Evolution des éléments majeurs en fonction de la profondeur de l'eau



2.5.6.2- Les éléments indésirables:

- Les nitrates (fig.68):

Sur le profil de la répartition des teneurs en nitrates selon la profondeur de l'eau, montre d'importantes variations. Les concentrations fortes (>50 mg/l) sont observées dans les puits dont la profondeur est inférieure à 8 m. Cette observation suggère que les rejets de déchets organiques dans le sol participent à la contamination de la nappe.

- L'ammoniaque (fig.69):

L'évolution de l'ammonium en fonction de la profondeur montre que les plus fortes se produisent dans les puits dont la profondeur de l'eau est comprise entre 8 et 18 m.

- Fluor (fig.70):

Les plus fortes teneurs sont enregistrées dans les puits ayant pour profondeur de l'eau inférieure à 8 m, ce qui traduit que les rejets des eaux usées et industrielles sont à l'origine de la pollution.

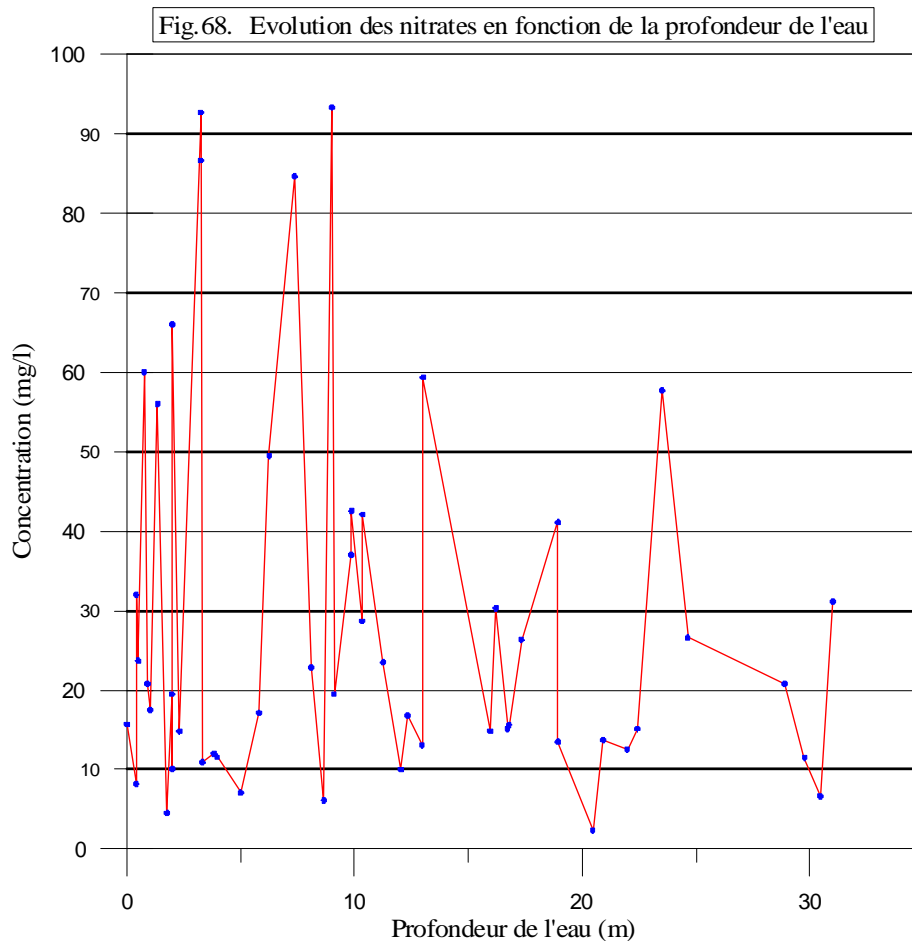


Fig.69. Evolution d'amonium en fonction de la profondeur de l'eau

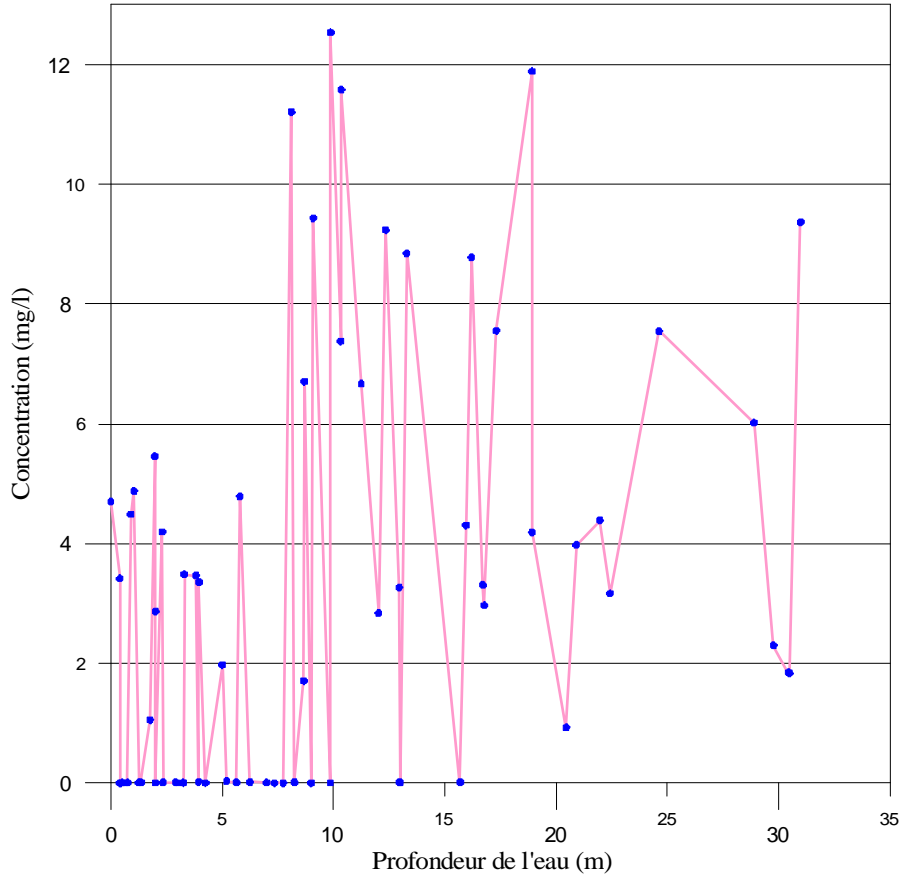
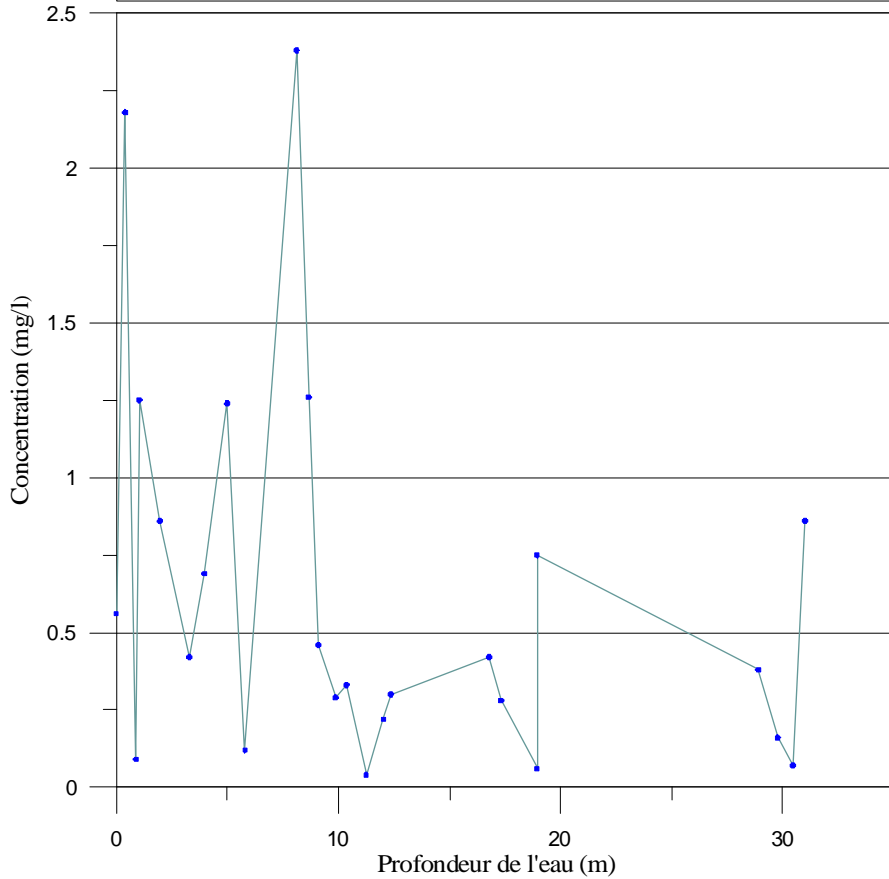


Fig.70. Evolution du fluor en fonction de la profondeur de l'eau (mai, 1998)



2.6- Mécanismes de transport des polluants:

2.6.1- Introduction:

Dans les milieux géologiques poreux, la présence d'eau libre est possible grâce aux ouvertures constituées par les pores. Les pores sont de grosseur variable et leur degré d'interconnexion est également variable. La porosité (n) est définie comme le rapport du volume des vides sur le volume total.

Les eaux souterraines représentent généralement une excellente source d'approvisionnement en eau potable. Le filtre naturel constitué par les matériaux géologiques produit le plus souvent une eau de grande qualité, avec notamment de très faibles teneurs en micro-organismes et autres substances en suspension.

2.6.2- Les principes de l'écoulement souterrain:

L'écoulement des eaux souterraines est causé par les forces physiques agissant dans le milieu souterrain et par l'environnement géologique de ce milieu. Ces eaux s'infiltrent d'abord à la surface des terrains, s'écoulent dans les milieux géologiques sur des distances variables, puis elles retournent à la surface sous l'action de l'écoulement naturel, ou de l'être humain.

Les forces qui agissent sur l'eau souterraine incluent notamment la gravité et l'attraction moléculaire entre l'eau et le milieu solide. La gravité est souvent la principale force produisant l'écoulement.

L'eau circule donc dans les terrains en réponse aux différences de pression et d'élévation. La force motrice est communément mesurée en termes de charge hydraulique et cette dernière est définie par l'équation de Bernoulli :

$$h = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g}$$

où h (m) est la charge hydraulique, z (m) l'élévation géodésique, p (Pa ou $N.m^{-2}$) la pression du fluide, ρ ($kg.m^{-3}$ ou $g.L^{-1}$) la densité du fluide, g ($m.s^{-2}$) l'accélération gravitationnelle et v (m/s) la vitesse du fluide. Le terme incorporant la pression est souvent appelé la charge de pression h_p (m):

$$h_p = \frac{p}{\rho g}$$

La charge hydraulique est souvent exprimé par :

$$h = z + h_p$$

La loi de Darcy (1856) est un fondement essentiel des équations de l'écoulement en milieu poreux; elle s'exprime ainsi : le débit d'eau entre deux points d'un milieu poreux saturé est proportionnel au gradient hydraulique entre ces deux points, soit:

$$Q = -KA \frac{dh}{dl}$$

avec : Q = débit d'écoulement (m^3/s), A = section d'écoulement (m^2),
 l = distance entre deux points de référence (m),
 dh/dl = gradient hydraulique

Le flux souterrain v (ou flux de Darcy) est déterminé par le rapport du débit sur la superficie de la section d'écoulement:

$$v = \frac{Q}{A} = -K \frac{dh}{dl}$$

La vitesse de filtration V (ou vitesse moyenne de pore) est définie comme le rapport du flux souterrain sur la porosité efficace (n_e), pour tenir compte du fait que l'eau ne circule que dans l'espace des pores:

$$V = \frac{v}{n_e} = \frac{Q}{n_e A} = -\frac{K}{n_e} \frac{dh}{dl}$$

2.6.3- Écoulement souterrain sous l'influence d'un pompage (fig.71):

Le pompage dans un puits génère un rabattement du niveau d'eau de la nappe phréatique formant un cône dont le puits est le foyer. La zone qui est influencée par le pompage s'appelle la *zone d'influence*. On considère que la limite de la zone d'influence correspond à la distance où le rabattement causé par le pompage est négligeable.

L'aire d'alimentation d'un ouvrage de captage correspond à la surface de terrain sur laquelle toute l'eau qui s'infiltré aboutit tôt ou tard à l'ouvrage. Cette surface est généralement beaucoup plus étendue que la zone d'influence. Par contre, à cause de l'écoulement régional naturel, il arrive qu'une partie de la zone d'influence du côté aval du puits ne fasse pas partie de l'aire d'alimentation. La partie de la zone d'influence qui est incluse dans l'aire d'alimentation est appelée *aire d'appel*.

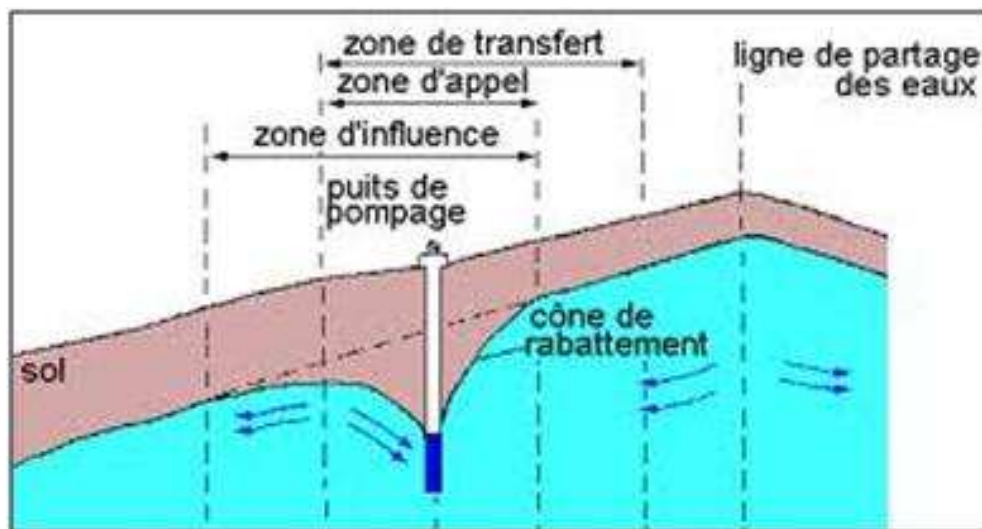


Fig.71. Cône de rabattement induit par pompage

2.6.4- Les équations de l'écoulement souterrain en milieu poreux:

L'équation de l'écoulement souterrain est basée sur la loi de conservation de masse de l'eau souterraine en mouvement, combinée à la loi de Darcy décrite plus haut, laquelle incorpore les propriétés du milieu. Pour le cas général de l'écoulement en trois dimensions d'une eau à densité constante dans un milieu poreux saturé, hétérogène et anisotrope, cette équation s'écrit:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

où S_s est le coefficient d'emmagasinement spécifique, incorporant l'élasticité de l'eau et celle du milieu. Si on considère un milieu isotrope et homogène, alors $K_x = K_y = K_z$, et K peut sortir des dérivées:

$$K \left[\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right] = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

- Dans le cas d'une *nappe captive*, la composante verticale de l'écoulement peut souvent être négligée. En utilisant les définitions du coefficient d'emmagasinement ($S = bS_s$) et de la transmissivité ($T = Kb$), où b est l'épaisseur de l'aquifère, l'équation devient:

$$\left[\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right] = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t}$$

- Le cas d'une *nappe libre* est sensiblement plus complexe parce que l'épaisseur saturée de l'aquifère change avec le temps et selon l'endroit, en suivant les changements de la charge hydraulique. Par conséquent, la transmissivité de l'aquifère n'est pas constante. Pour un milieu hétérogène et anisotrope, l'équation de l'écoulement s'écrit alors :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y h \frac{\partial h}{\partial y} \right) = R_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

où R_s [sans dimension] est le rendement spécifique du milieu.

Pour un aquifère homogène et isotrope, l'équation de l'écoulement d'une nappe libre s'écrit :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h \frac{\partial h}{\partial y} \right) = \frac{R_s}{K} \frac{\partial H}{\partial T}$$

2.6.5- Le transport du soluté en milieu poreux:

2.6.5.1- Mécanismes régissant le transfert de masse :

La migration de soluté dans le milieu poreux, à la faveur de l'écoulement de l'eau, est considérée comme résultant des effets conjugués de la convection et de la dispersion (diffusion moléculaire et dispersion cinématique). A ceux-ci s'ajoutent les effets des échanges physiques avec l'eau immobile et avec le milieu solide ainsi que les réactions chimiques et biologiques qui entraînent une disparition partielle du soluté ou au moins un retard dans son transport.

- *La convection :*

La convection est due au déplacement de l'eau sous l'effet du gradient hydraulique correspondant à la loi de Darcy. Celle-ci entraîne le soluté selon sa vitesse propre. L'importance du flux de matière dû à la convection est fonction de la vitesse effective d'écoulement de fluide (u), de la porosité cinématique du milieu ($w = v/u$) et de la concentration volumique de la solution (c), soit :

$$\phi_c = u.w.c = v.c$$

où

$v =$ est la vitesse de Darcy [LT^{-1}]

$\phi_c =$ est le flux massique unitaire de soluté par convection [$M.L^{-2}.T^{-1}$]

$c =$ concentration de la solution (ML^{-3})

- *La diffusion moléculaire :*

Ce phénomène correspond au mouvement de soluté induit par des gradients de concentration au sein de la solution, sous l'influence de l'agitation moléculaire. Les particules seront donc déplacées des zones à concentration élevées vers les zones à concentration faible. Dans le milieu poreux et saturé, le flux massique du traceur échangé par diffusion moléculaire suit la première loi de Fick:

$$\phi_d = - D_m \text{ grad } c$$

où $D_m =$ est le coefficient de diffusion moléculaire dans le milieu poreux [$L^2.T^{-1}$]

$\phi_d =$ le flux massique unitaire par diffusion moléculaire [$M.L^{-2}.T^{-1}$]

- *La dispersion cinématique :*

Pendant le transfert de soluté dans un milieu poreux, la distribution des vitesses n'est pas uniforme. C'est la conséquence des phénomènes suivants:

- a) Le profil des vitesses dans l'espace inter granulaire est parabolique.
- b) La variation de la dimension des pores crée une variation des vitesses d'une section à l'autre.
- c) La fluctuation des trajectoires réelles de courant par rapport à la direction de courant.

L'action simultanée de ces phénomènes dans un écoulement souterrain est la cause de cette dispersion cinématique.

2.6.5.2- Les paramètres influençant la dispersion :

La dispersion est influencée par un très grand nombre de paramètres, qu'on peut classer en trois groupes :

- a) Paramètre caractérisant le milieu poreux dont la structure peut être décrite d'une part la porosité et la perméabilité des matériaux, d'autre part la granulométrie des grains et des pores ainsi que le degré de consolidation du milieu.
- b) Paramètre caractérisant le régime d'écoulement, la distribution des vitesses et la distance de déplacement.
- c) Les paramètres caractérisant les fluides (eau et soluté) étudiés masse volumique, viscosité et coefficient de diffusion moléculaire composant important de la dispersion.

2.6.6- Essais de traçage en eau souterraine:

2.6.6.1- Introduction:

La pollution de l'eau souterraine est le risque permanent de limitation de la ressource en eau dans un proche avenir. En particulier dans les régions semi-aride à titre d'exemple la plaine de Tebessa où les eaux urbaines sont rejetées dans la plaine sans traitement préalable.

L'objectif de réaliser des essais de traceur est pour déterminer les paramètres responsables au transfert de la masse polluante à savoir, le temps de séjours et la vitesse de déplacement du traceur (polluant) sous des conditions hydrodynamiques différentes (régime d'écoulement transitoire et permanent). Autrement dit pour mieux comprendre le mécanisme de dispersion d'un polluant et de présenter le modèle mathématique décrivant mieux le transfert de la masse polluant d'un milieu poreux et hétérogène.

Divers phénomènes physico-chimiques, tels la dispersion, l'adsorption et l'absorption, affectent les essais de traçage en eau souterraine. La dispersion est le résultat de l'étalement d'un traceur dans l'espace. En général, la dispersion latérale représente environ 10 % de la dispersion longitudinale (Davis *et al.* 1985). L'adsorption se produit lorsque le traceur reste attaché aux parois d'une particule solide. Celle-ci est plus forte lorsque le traceur est un cation tel le sodium, car de façon générale les particules solides sont chargées négativement. L'absorption consiste en le transfert du traceur à l'intérieur des particules solides.

2.6.6.2- Réalisation d'un essai de traceur en milieu poreux:

Un essai de traçage en eau souterraine consiste à injecter une substance (traceur) dans l'eau souterraine et à la suivre en différents points de l'aquifère. Ils peuvent être mis en œuvre selon diverses configurations: les essais par gradient naturel et les essais convergents:

- Les essais par gradient naturel consistent en l'injection d'un faible volume de traceur et au suivi analytique en aval dans divers puits d'observation;
- Les essais convergents consistent en l'injection d'un faible volume d'eau tracée en un point de l'aquifère et son captage dans un puits de pompage;

a) Traceur:

Un traceur est toute substance atomique ou moléculaire, dont les propriétés physiques, chimiques ou biologiques permettent l'identification, l'observation et l'étude de son comportement durant l'écoulement dans un aquifère.

b) Caractéristique d'un traceur idéal:

Le choix de traceur doit satisfaire le plus possible aux critères de sélection. Le traceur idéal doit présenter les avantages suivants:

- Grande solubilité dans l'eau;
- Présence nulle ou en quantité faible dans l'eau;
- Toxicité nulle;
- Détecté à des faibles concentrations;
- Ne pas susceptible aux pertes par fixation ou par décomposition.

Les traceurs peuvent être constitués par une substance insoluble, un produit chimique soluble, un colorant ou un élément radioactif. Le traceur utilisé ici, est le chlorure de sodium (sel de cuisine) a été choisi parce qu'il est peu coûteux, très soluble dans l'eau et sans effet négatif sur l'environnement.

2.6.6.3- Méthode au chlorure de sodium :

La méthode consiste à déverser sur les points repérés une solution de chlorure de sodium, sous forme concentrée. La solubilité varie entre 300 à 400 g/l, aux températures ordinaires.

Bien entendu cette méthode n'est valable que pour les eaux faiblement chlorurées, elle à l'inconvénient de conduire selon les cas des quantités très importantes de traceurs, il faut également se méfier de l'effet de densité avec des eaux se déplaçant lentement. Ce pendant cette méthode peut rendre des services si l'on souhaite faire une mesure commande par conductivimètre. Deux sites ont été retenus pour l'essai:

1- Site d'El-Hamamet (fig.72):

1.1- Régime d'écoulement :

Le pompage est effectué sur le puits (P1) selon un débit constant de 6 l/s pour une durée de 2 heures. L'eau pompée était évacuée directement dans les citernes. Le traceur est injecté juste avant le pompage donc en régime en transitoire.

1.2- Mode d'injection:

Le traceur est injecté en solution dans un piézomètre distant de 30 m du puits de pompage. Une masse de 20 Kg de NaCl est dissoute dans 50 l d'eau, ce qui peut ramener l'eau du piézomètre à une concentration d'environ de 3 g/l. La technique de l'injection était celle de « l'injection brève du traceur ». La durée de l'injection était d'environ de 2 minutes.

1.3- Echantillonnage :

Les prélèvements au puits de pompage ont été effectués à travers un robinet attaché à la conduite de pompage. Le temps de prélèvement des échantillons est très serré au premier temps de pompage et devient progressivement espacé jusqu'à la fin du pompage.

1.4- Résultats des analyses du traceur:

Quatre paramètres ont été mesurés: la Conductivité, Salinité, Taux de sels dessous (TDS), et le Résidu sec (Tab.17). L'évolution de la concentration de ces paramètres en fonction du temps au niveau du puits de pompage est représenté dans la figure 73 a, b, et c.

1.5- Interprétation:

Les courbes de restitution au puits de pompage de ces paramètres sont assez irrégulières avec de brusques variations de concentration en traceur. Ils présentent des séries de pics brefs en traceur, suivi d'une brusque descente de la concentration.

Nous observons deux groupes de série de pic (① et ②) durant les 40 premières minutes de pompage, une stabilisation entre 40 et 70 mn (③), puis augmentation et stabilisation de nouveau entre 70 et 120 mn (④). Donc, la migration du traceur se fait selon quatre phases. Seule la courbe du résidu sec présente deux phases, l'une avec un résidu sec minimal entre 0 à 60 mn et l'autre maximal entre 60 à 120 mn.

Les brusques baisses de concentration en traceur sont dues à une dilution par l'eau, moins minéralisée et non tracée. Par contre les pics sont dus à la remobilisation d'une partie du traceur stocké dans l'aquifère.

La première et deuxième phase se traduit par une perturbation du traçage avec des pics de faible et forte concentration qui peut être expliqué d'une part par la dilution partielle du traceur au fond du puits d'injection qui s'effectue par une propagation ponctuelle du soluté et par l'hétérogénéité latérale et verticale du milieu aquifère. La troisième phase est caractérisée par une stabilisation des concentrations, témoignant la fin des pics, par contre la quatrième phase est représentée par une évolution presque progressive des concentrations, traduisant l'arrivée du traceur.

Du point de vue hydrodynamique, on peut constater que les quatre phases de migration du traceur vers le puits de pompage se traduisent par des paramètres hydrodynamiques différents, traduisant l'hétérogénéité du milieu aquifère (Tabl.18).

Ces quatre phases sont très lisibles dans l'évolution du rabattement en fonction du temps où les points s'alignent assez bien selon une droite pour toutes les phases envisagées (fig.74).

Fig.72. Schéma descriptif du site expérimental d'El-Hamamet.

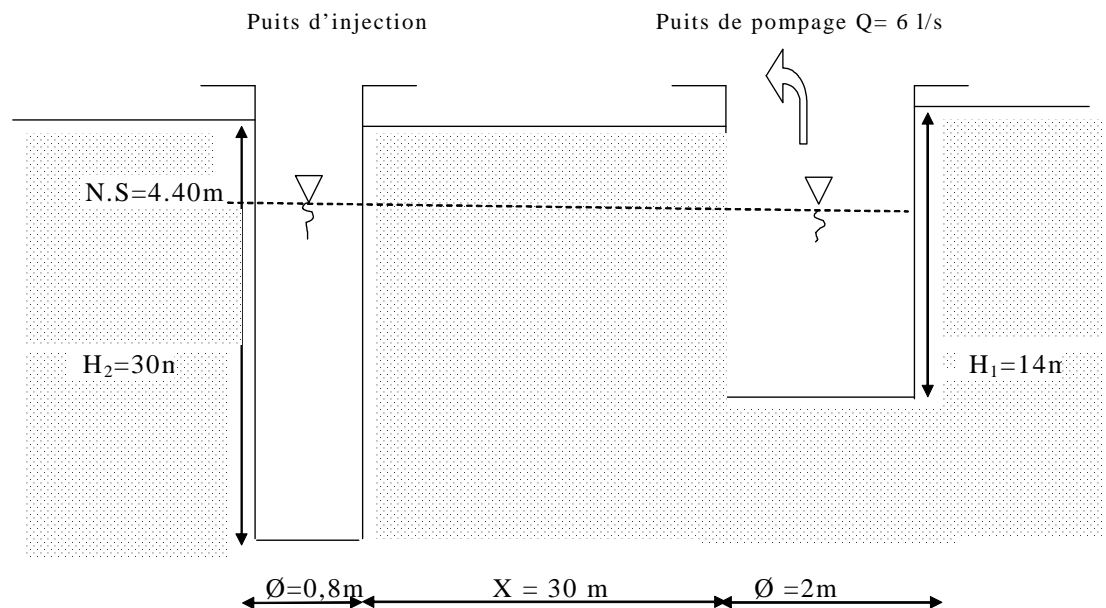


Fig.73 a. Evolution du résidue sec et de la salinité

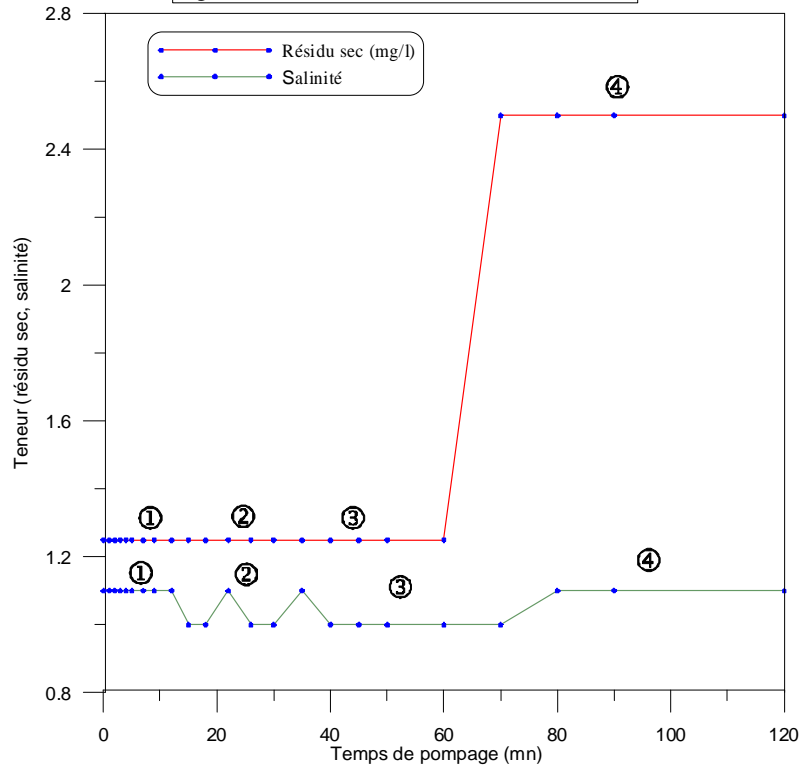


Fig.73 b. Evolution du taux de sels dissous (TDS)

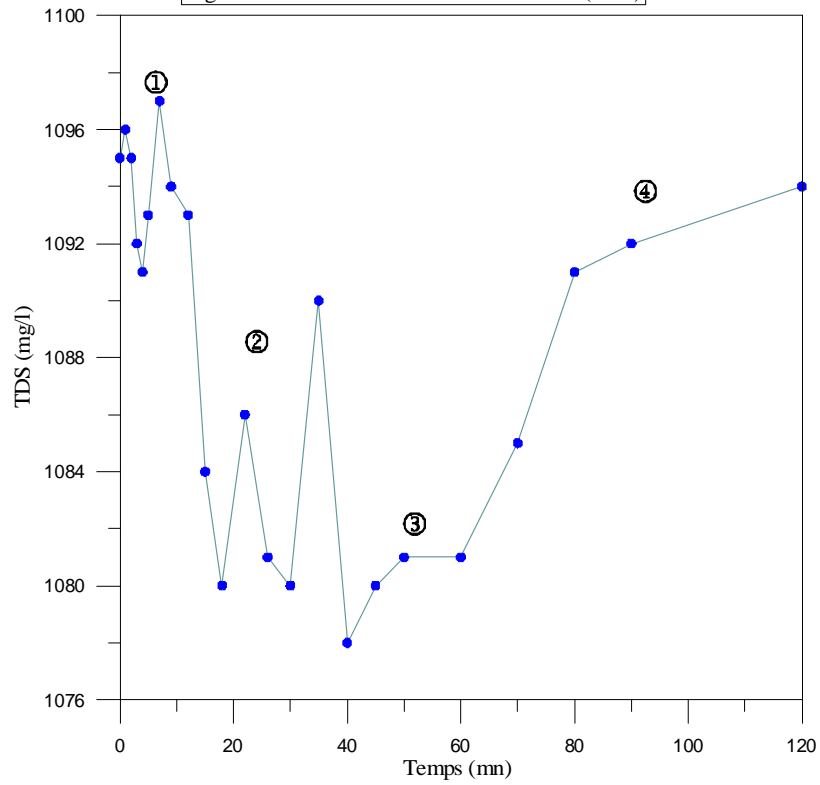


Fig.73 c. Evolution de la conductivité

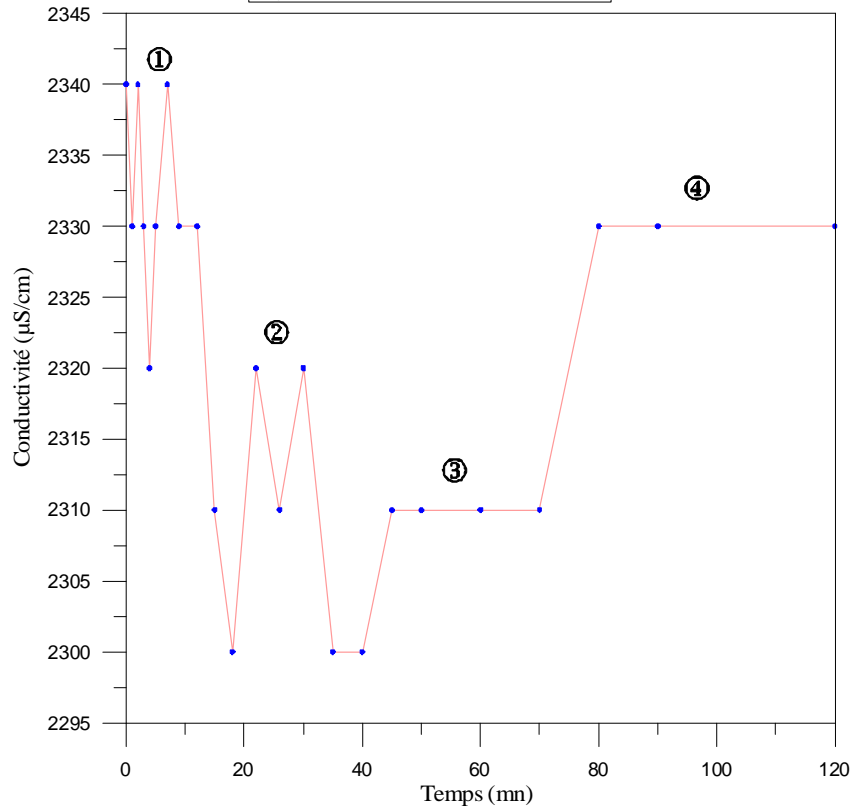
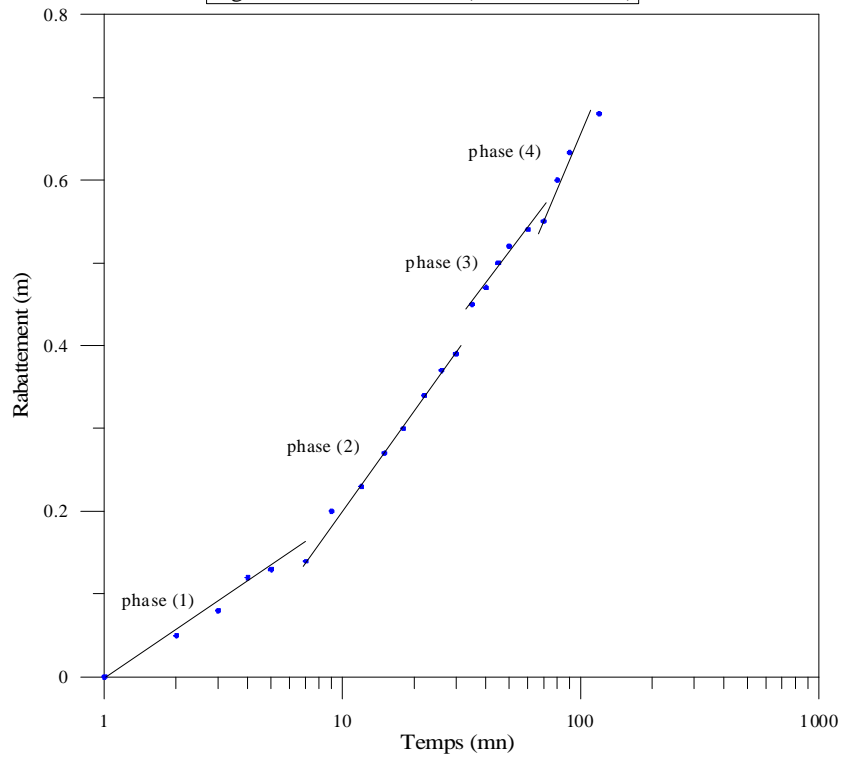


Fig.74. Courbe de décente (modèle de Jacob)



D'après les courbes de restitution du traceur, le temps d'arrivé est égale à 60 mn, ce qui correspond à une vitesse effective de déplacement de 30 m/h.

Tableau 17. Résultats des paramètres analysés.

Temps (mn)	Cond. $\mu\text{S/cm}$	Salinité	TDS mg/l	RS g/l	N.D (m)	Rabat. (m)
0	2,34	1,1	1095	1,25	4,4	0
1	2,33	1,1	1096	1,25	4,4	0
2	2,34	1,1	1095	1,25	4,45	0,04
3	2,33	1,1	1092	1,25	4,48	0,08
4	2,32	1,1	1091	1,25	4,52	0,12
5	2,33	1,1	1093	1,25	4,53	0,13
7	2,34	1,1	1097	1,25	4,54	0,14
9	2,33	1,1	1094	1,25	4,6	0,19
12	2,33	1,1	1093	1,25	4,63	0,23
15	2,31	1	1084	1,25	4,67	0,27
18	2,3	1	1080	1,25	4,7	0,29
22	2,32	1,1	1086	1,25	4,74	0,33
26	2,31	1	1081	1,25	4,77	0,37
30	2,32	1	1080	1,25	4,79	0,39
35	2,33	1,1	1090	1,25	4,85	0,44
40	2,3	1	1078	1,25	4,87	0,46
45	2,31	1	1080	1,25	4,9	0,5
50	2,31	1	1081	1,25	4,92	0,52
60	2,31	1	1081	1,25	4,94	0,54
70	2,31	1	1085	2,5	4,95	0,54
80	2,33	1,1	1091	2,5	5	0,6
90	2,33	1,1	1092	2,5	5,03	0,63
120	2,33	1,1	1094	2,5	5,08	0,67

Tableau 18 .Paramètres hydrodynamiques des différentes phases d'évolution du traceur

Paramètres hydrodynamiques	Phase (1)	Phase (2)	Phase (3)	Phase (4)
T $\text{m}^2/\text{s} \times 10^{-3}$	4.8	2.7	2.5	2.3
K $\text{m}/\text{s} \times 10^{-3}$	0.2	0.11	0.09	0.08
S (coef. d'emmagasinement)	0.75×10^{-3}	1.05×10^{-3}	0.86×10^{-3}	3.45×10^{-3}

2- Site de Boulhef-edyr (fig.75):

2.1- Régime d'écoulement :

L'essai est réalisé grâce un pompage continu à débit constant de 3 l/s. Le traceur est injecté dans un piézomètre distant de 130 m du puits de pompage. Le traceur est injecté après 4 h de pompage où le régime est supposé permanent.

2.2- Mode d'injection :

Le traceur est injecté en solution dans un piézomètre selon la technique (injection brève). Une masse de 40 Kg est dissoute dans 110 l d'eau, ce qui peut ramener l'eau du piézomètre à une concentration d'environ de 6 g/l. La durée de l'injection était d'environ de 5 mn.

2.3- Echantillonnage :

Les prélèvements au puits de pompage ont été effectués à travers la conduite d'évacuation de l'eau pompée. Le temps de prélèvement des échantillons est très serré au premier temps de pompage et devient progressivement espacé jusqu'à la fin du pompage (Tabl.19).

2.4- Résultats et analyses du traceur:

Les mêmes paramètres relatif au traceur ont été mesurés: La conductivité, Salinité, Taux de sels dessous (TDS), et le Résidu sec (Tabl.19).

2.5- Interprétation (fig.76 a, b et c):

Les courbes de restitution des paramètres relatifs au traceur sont plus au moins régulières, présentant des pics modérés avec des concentrations qui augmentent respectivement. Le pic maximal est enregistré après 210 mn de pompage. Donc, la migration du traceur en vers le puits de pompage s'effectue selon un nuage de concentration modérée, témoignant de la forte dilution durant son parcours.

Seule la courbe de restitution du résidu sec montre des pics bref suivi d'une chute brutale de la concentration. Par contre la courbe de salinité s'évolue en deux phases, l'une avec une salinité de 0.5 et comprise entre 0 et 12 mn et l'autre de 0.6 pour le reste du temps de pompage. Au pic maximal, la vitesse effective de déplacement est de 37 m/h.

Fig.75. Schéma descriptif du site expérimental de Boulhef-Edyr.

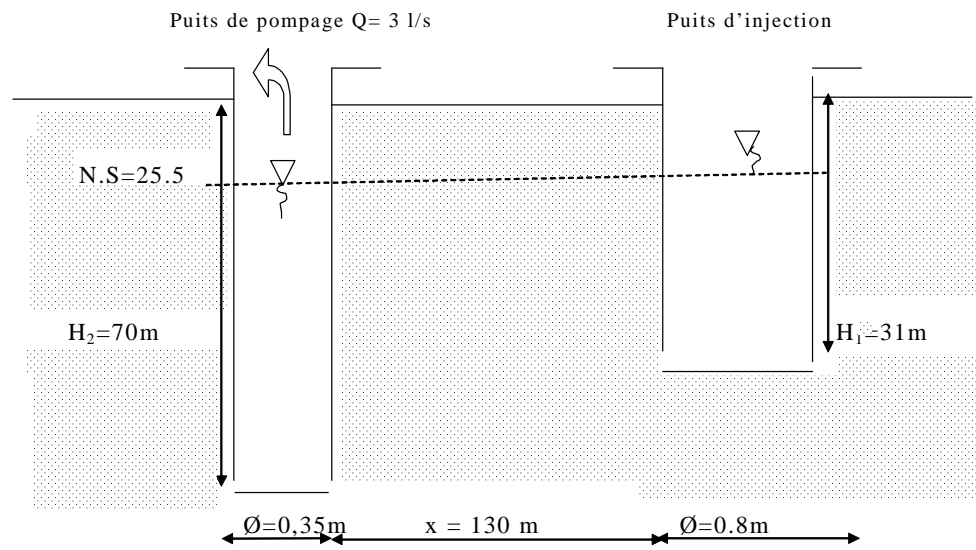


Tableau 19. Résultats des paramètres analysés

Temps (mn)	Salinité	TDS (mg/l)	Cond ($\mu\text{S/cm}$)	Résidu sec (g/l)
0	0.5	654	1390	2.50
0	0.5	656	1396	2.62
1	0.5	683	1453	3.00
3	0.5	683	1453	2.25
7	0.5	682	1450	3.12
12	0.5	686	1457	2.75
22	0.6	690	1466	2.37
35	0.6	692	1466	2.25
60	0.6	694	1475	3.00
85	0.6	697	1481	2.62
115	0.6	700	1488	2.62
135	0.6	706	1500	2.75
150	0.6	705	1495	2.37
165	0.6	704	1496	3.12
180	0.6	705	1500	3.00
195	0.6	707	1504	2.70
210	0.6	711	1512	3.25
225	0.6	710	1512	3.12
250	0.6	709	1508	2.12

Fig.76a. Evolution de la salinité et du résidu sec

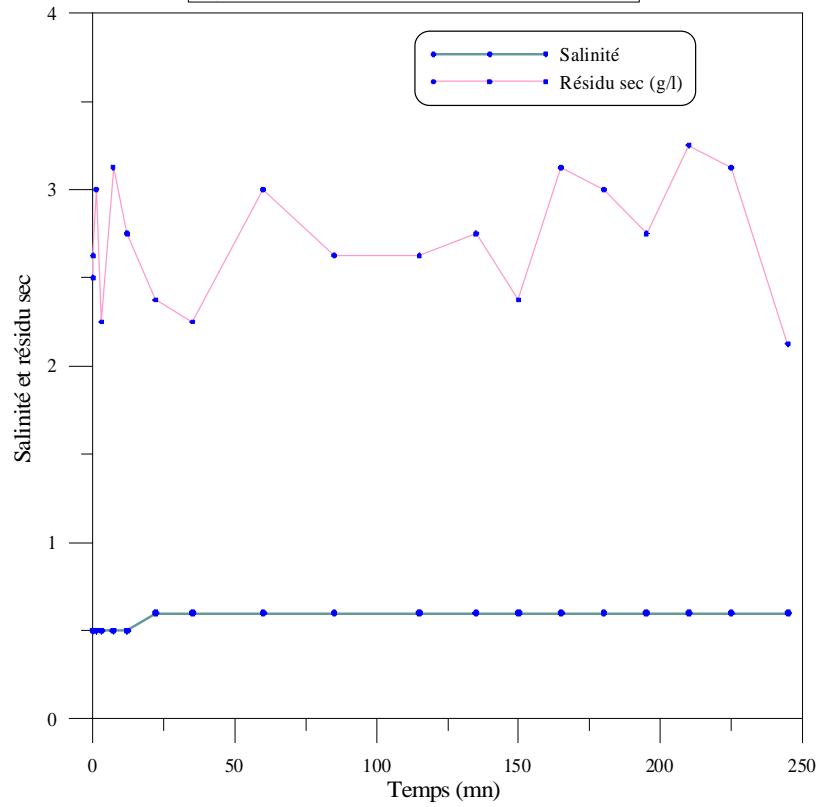
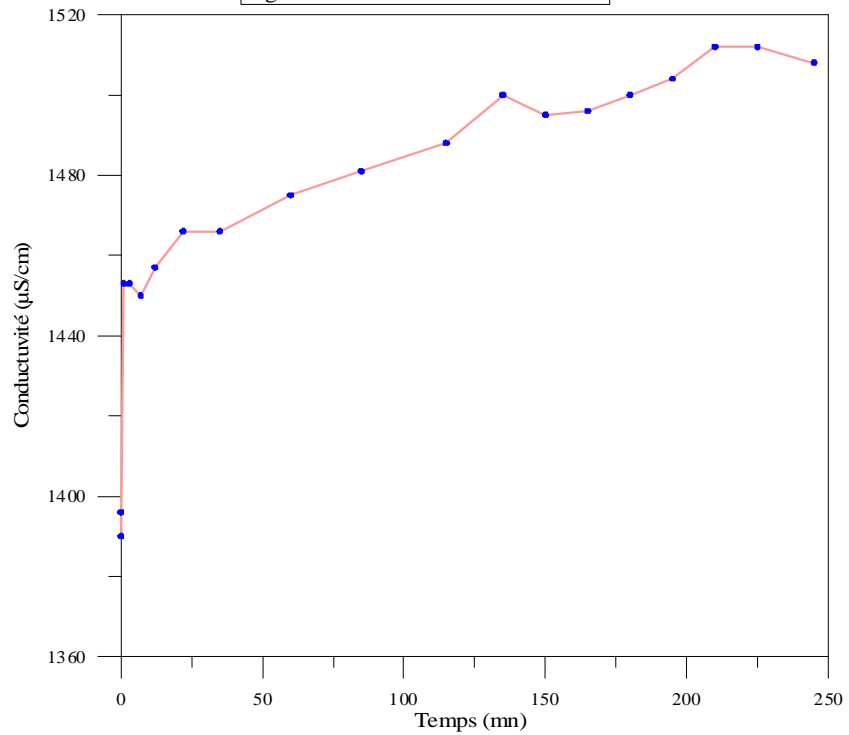
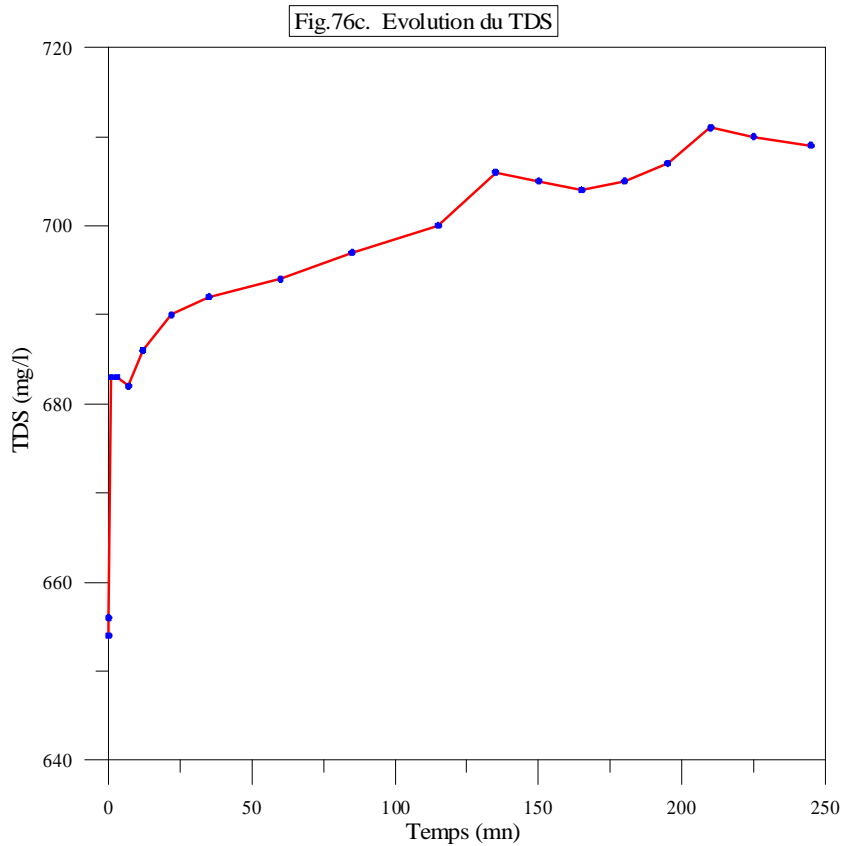


Fig.76b. Evolution de la conductivité





- Conclusion:

Les essais de traceur exécutés dans la plaine de Tebessa-Morsott montrent que dans un régime transitoire le transfert de la masse polluante se fait sous forme de plusieurs phases avec des séries de pics de concentration élevée, par contre en régime permanent, le transfert de la masse est toujours sous forme de pics mais modérés avec augmentation progressive de la concentration.

Ce mode de transfert de la masse en fonction du temps ne peut traduire que l'effet combiné du type de traceur, de l'hétérogénéité du milieu aquifère et les conditions hydrodynamiques qu'il contient. La compréhension de ces courbes perturbées peut servir à comprendre la courbe de restitution à traçage naturel à l'eau de pluie (celle qui aurait dû être enregistrée s'il avait eu de précipitations).

2.7- Les défenses naturelles contre les polluants:

Les sols constituent un système accumulateur de substances très diverses et aussi un puissant moyen d'épuration et de recyclage des eaux. La capacité d'adsorption ionique et la rétention des cations (Ca, Mg, K, Na) du sol varient essentiellement en fonction de son épaisseur, de sa teneur en argile et en matières organiques. Les anions tels que Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} ne sont pas retenus et migrent par convection ou par diffusion alors que certaines molécules sont fortement retenues dans le sol, comme par exemple les phosphates.

En revanche, les solvants chlorés, l'acétone et le benzène sont très peu retenus par les sols et peuvent atteindre rapidement les nappes avec une grande persistance en entraînant avec eux d'autres molécules polluantes adsorbées.

Le sol peut être un réservoir pour les germes pathogènes introduits accidentellement. Les bactéries circulent relativement peu dans les sols et sont retenues dans les premiers centimètres, à la différence des virus qui sont facilement entraînés et peuvent contaminer la nappe sous-jacente.

2.7.1- Recouvrement argileux de la plaine (fig.77):

La carte du recouvrement argileux a été obtenue à partir de l'interprétation des sondages électriques de l'étude géophysique (Strojexport, 1978) et de la carte pédologique de la plaine (C. Lepetit, 1974). La plaine est dominée par un recouvrement argileux au centre et varie de 0 à 10 m d'épaisseur, sauf à Boulhef-edyr où il dépasse les 20 m. Ce recouvrement argileux joue un rôle fondamental dans la protection de la nappe face aux micropolluants issus des rejets des eaux usées et industrielles. Le travail réalisé par F.Zeghaidia (mémoire d'Ing. en hydrogéologie, 1999) sur la limite de rétention de Fluor et Phénol sur les argiles de la plaine a montré que le phénol est peu absorbé sur l'argile avec un taux de 26%, alors que le fluor est moyennement absorbé avec un taux de 48.5%. Ce pendant, il est clair que l'argile de la plaine n'est pas un très bon support absorbant pour le fluor, encore moins pour le phénol. Donc, on pourrait l'utiliser comme une des étapes pour l'épuration des eaux polluées.

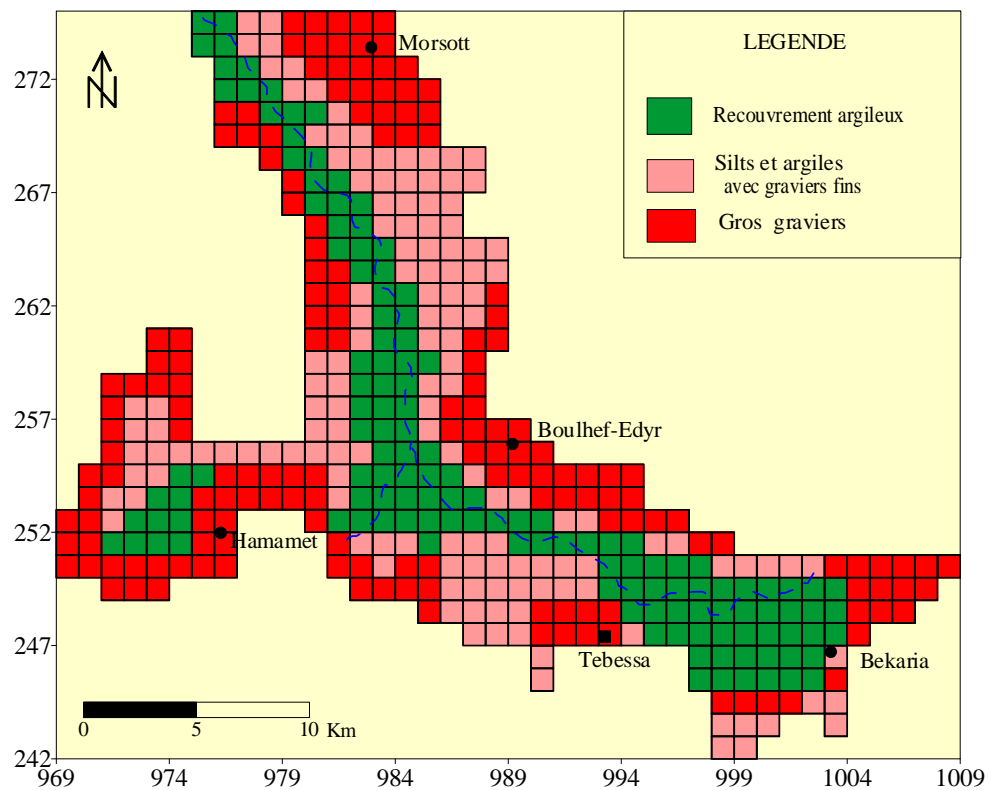


Fig.77. Carte du recouvrement de la zone non-saturée de la plaine de Tebessa-Morsott

2.8- Evaluation de la vulnérabilité:

2.8.1- Concept de vulnérabilité:

L'eau souterraine fait partie du grand cycle de l'eau : évaporation, précipitation, ruissellement, infiltration, etc. Sous l'effet de la gravité, l'eau provenant de la surface s'infiltré dans le sol par les fractures et pores existants jusqu'à ce qu'elle rejoigne la nappe d'eau souterraine. De là, l'eau voyage plus ou moins horizontalement à une vitesse de quelques mètres par année, suivant un parcours et une dynamique établis par les propriétés du milieu (roc ou dépôts meubles).

Après un temps allant de quelques jours à plusieurs milliers d'années, l'eau souterraine rejoint l'eau de surface par le biais de résurgences qui peuvent être des sources ou des rivières.

La présence de substances artificielles ou de quantités anormales de substances naturelles dans l'eau souterraine constitue une contamination de l'aquifère.

Au cours des années 1970, le terme vulnérabilité a commencé à être utilisé en hydrogéologie pour décrire la susceptibilité relative des aquifères à la contamination anthropique provenant de la surface du sol (Morris et Foster, s.d.). Une conception répandue de la vulnérabilité, appelée « vulnérabilité intrinsèque », repose sur le rôle que jouent les horizons géologiques situés entre l'aquifère et la surface du sol.

Dans la littérature, on distingue deux types de vulnérabilité; *la vulnérabilité intrinsèque* et *la vulnérabilité spécifique* (Schnebelen et al, 2002) :

- *La vulnérabilité intrinsèque* est le terme utilisé pour représenter les caractéristiques du milieu naturel qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la pollution par les activités humaines. Cette définition considère que la substance est appliquée directement en surface et voyage au même rythme que l'eau. Le type de contaminant, la vitesse de migration et la dégradation des contaminants ne sont alors pas considérés.

- *La vulnérabilité spécifique* est le terme utilisé pour définir la vulnérabilité d'une eau souterraine à un polluant particulier ou à un groupe de polluants. Elle prend en compte les propriétés des polluants et leurs relations avec les divers composants de la vulnérabilité intrinsèque.

La vulnérabilité intrinsèque peut-être considérée comme invariante dans le temps alors que la vulnérabilité spécifique (directement liée aux sources de pollution) est évolutive et ne caractérise qu'un instant précis. Pour tenir compte des objectifs de planification à long terme de la gestion de l'eau dans la nappe alluviale de Tebessa-Morsott, nous nous sommes prioritairement intéressés à la vulnérabilité intrinsèque.

2.8.2- Les méthodes de vulnérabilité:

Les méthodes d'estimation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution sont très nombreuses, allant des plus complexes avec des modèles prenant en compte les processus physiques, chimiques et biologiques dans la zone noyée, à des méthodes de pondération entre différents critères affectant la vulnérabilité (Gogu et Dassargues, 1998).

Les deux premières méthodes présentées sont spécifiques du milieu karstique « en grand », elles sont citées pour mémoire car le milieu qui nous concerne est de type poreux.

2.8.2.1- **EPIK**:

C'est la première méthode dédiée spécifiquement aux aquifères karstiques (Doerfliger, 1996 ; Doerfliger et Zwahlen, 1997). Elle a été développée dans le but de délimiter les périmètres de protection des captages, conformément à la législation suisse, à partir d'une base cohérente et rigoureuse. Un des avantages de cette méthode est de traduire la sensibilité des eaux souterraines vis-à-vis de tout type de contaminant.

La méthode est systématique puisqu'elle propose une analyse détaillée du bassin d'alimentation de la source karstique découpé en un maillage régulier. Elle est basée sur quatre critères :

- **Epikarst** ; **Protective Cover** (couverture protectrice : sol) ;
- **Infiltration Conditions** (conditions d'infiltration) ;
- **Karst network development** (développement du réseau karstique).

Ces critères correspondent à quatre aspects spécifiques déterminant l'organisation des écoulements en milieu karstique. Chaque paramètre est divisé en classes traduisant des degrés d'impact vis à vis d'une pollution. Un coefficient multiplicateur (facteur de pondération) est appliqué à chaque paramètre afin de traduire son importance relative par rapport aux autres (Petelet-Giraud *et al.* 2000).

L'indice final de vulnérabilité est calculé (facteur de protection) en chaque maille du système selon la formule :

$$F = \alpha E_i + \beta P_j + \gamma I_k + \delta K_l$$

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$: coefficients de pondération des critères ;
 E_i, P_j, I_k, K_l : valeur de chacun des critères indexés.

La gamme de variation du facteur de protection (F) est divisée en quatre classes correspondant à des zones de protection visant à répondre aux impératifs de la réglementation en matière de protection des points d'eau pour l'alimentation en eau potable.

2.8.2.2- **RISKE**:

Cette méthode s'inspire de la méthode suisse EPIK en raison de sa spécificité karstique. **RISKE** est un acronyme qui reprend les initiales des 5 critères pris en compte: **R**oche aquifère, **I**nfiltration, **S**ol, **K**arstification, **E**pikarst (Petelet-Giraud *et al.* 2000).

La combinaison des 5 cartes correspondant à la transcription des 5 critères **RISKE** permet de calculer l'indice global de vulnérabilité (I_g) en chaque maille de la zone d'étude. Le choix de la taille de la maille se fait généralement en fonction du pas du Modèle Numérique de Terrain (50 x 50 m par exemple) ou de la densité de l'information disponible. A chaque maille correspond une valeur de l'indice de chacun des critères. La compilation des cinq cartes élémentaires se fait en introduisant un facteur de pondération entre les critères traduisant l'importance relative qui leur est attri-

buée. Cette étape est largement facilitée par l'utilisation d'un Système d'Information Géographique (SIG). Le calcul de l'indice global de vulnérabilité **Ig** se fait selon la formule :

$$\mathbf{I_g} = \alpha\mathbf{R_i} + \beta\mathbf{I_j} + \delta\mathbf{S_k} + \gamma\mathbf{K_l} + \varepsilon\mathbf{E_m}$$

$\alpha, \beta, \delta, \gamma, \varepsilon$: poids des critères RISKE ;
 i, j, k, l, m : indices des critères RISKE.

Toutes les alternatives des critères sont classées en 5 catégories indexées de 0 à 4, du moins au plus vulnérable. Dans la même logique, l'indice global de vulnérabilité (**Ig**) obtenu en chaque pixel de la zone d'étude est divisé en 5 classes égales (0 à 4) allant du moins au plus vulnérable. La carte finale de vulnérabilité représente donc les zones appartenant à une même classe de vulnérabilité par le même code couleur (couleur claires à foncées pour représenter les zones de vulnérabilité faible à très forte).

2.8.2.3- GOD:

Ce système a été développé par Foster en 1987, il est illustré par la figure 78. Il présente la vulnérabilité de l'aquifère face à la percolation verticale de polluants à travers la zone non saturée et ne traite pas de la migration latérale des polluants dans la zone saturée. Le but de cette méthode est de réaliser une estimation rapide de la vulnérabilité d'un aquifère.

Cette méthode est basée sur l'identification de trois critères :

- Type de nappe (**G**roundwater occurrence) ;
- Type d'aquifère en termes de facteurs lithologiques (**O**verall aquifer class) ;
- Profondeur de la nappe (**D**epth to groundwater table).

2.8.2.4- DRASTIC:

La méthode DRASTIC est la méthode la plus utilisée dans l'élaboration de cartes de vulnérabilité intrinsèque. Elle a été développée entre 1983 et 1987 par la National Water Well Association (NWWA) pour le compte de l'Environmental Protection Agency (EPA), aux États-Unis (Aller *et al.* 1989). Cette méthode évalue la vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination par un système d'indices pondérés jumelés à des documents cartographiques qui font appel au concept d'unité hydrogéologique.

Elle s'applique à des unités cartographiables de superficie supérieure à 400 000 m², ce qui correspond à 40 ha (Aller *et al.*, 1989). Cette limite varie cependant en fonction de l'échelle à laquelle est réalisée la cartographie.

2.8.2.4.1- Principe de la méthode DRASTIC:

L'évaluation de la vulnérabilité par la méthode DRASTIC repose sur trois hypothèses fondamentales:

- La source de contamination potentielle est localisée en surface du sol;
- Les contaminants sont entraînés depuis la surface du sol jusqu'à l'aquifère par l'infiltration efficace, soit verticalement;
- Le type de contaminant n'intervient pas dans la définition de la vulnérabilité, c'est-à-dire que le contaminant est considéré comme possédant la même mobilité que l'eau.

L'évaluation de la vulnérabilité s'effectue en deux étapes. La première consiste à déterminer les unités hydrogéologiques à partir de caractéristiques de sept paramètres qui influencent l'écoulement des eaux souterraines depuis la surface du sol jusqu'à la formation aquifère ainsi qu'à l'intérieur de l'aquifère: profondeur de la nappe (**D**eep to **w**ater), recharge (net **R**echarge), nature lithologique de la zone saturée (**A**quifer **m**edia), texture du sol (**S**oil **m**edia), topographie (**T**opo-**g**raphy), nature lithologique de la zone saturée (**I**mpact of the **v**adose zone **m**edia), perméabilité (**C**onductivity **h**draulic of the **a**quifer).

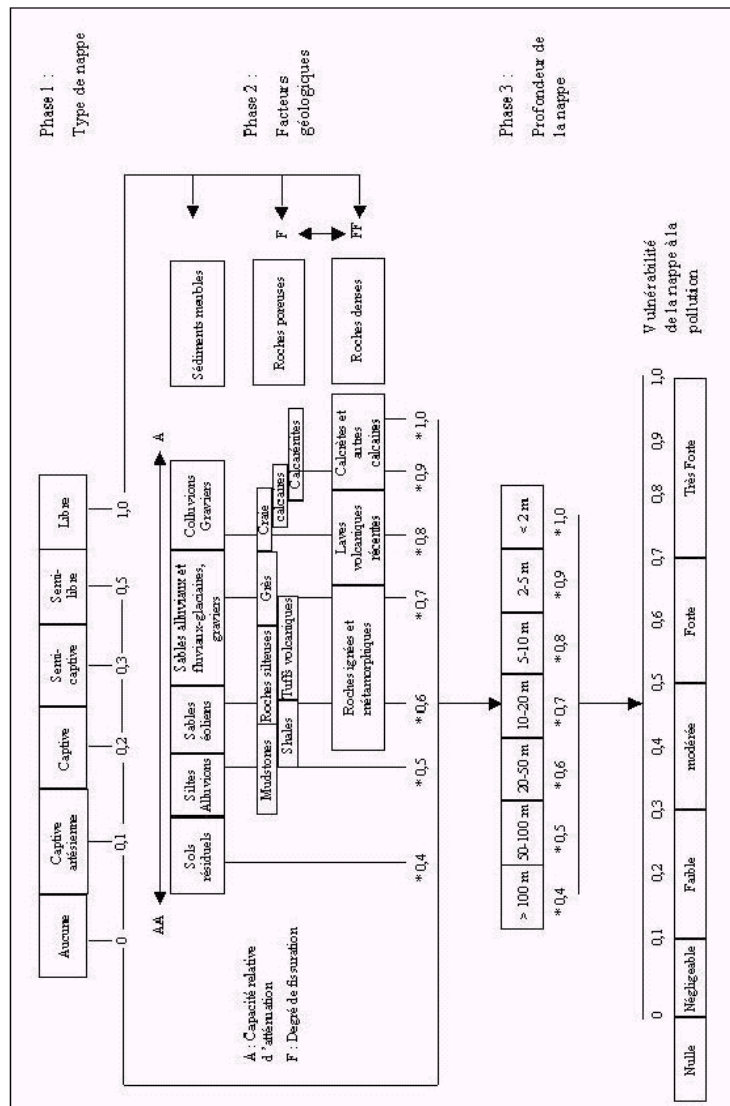


Fig.78. Système GOD (Foster, 1987)

Par la suite, l'indice DRASTIC de chaque unité est calculé par la somme pondérée des cotes attribuées à chacune des caractéristiques évaluées. Les unités hydrogéologiques correspondent à des zones géographiques bien délimitées qui peuvent être subdivisées en plusieurs sous-unités pour tenir compte des variations d'une caractéristique à l'intérieur d'une unité.

Chacun de ces paramètres est représenté par une cote (1à10) et un poids (1à5) qui dépendent de leur importance relative et des conditions hydrogéologiques locales et permettent l'élaboration d'une carte paramétrique. La combinaison de ces différentes cartes est effectuée par l'addition des notations et des coefficients de pondération accordés aux différents paramètres permettant l'obtention d'indice DRASTIC selon l'équation suivante :

$$\text{Indice DRASTIC} = D_n P_p + R_n R_p + A_n A_p + S_n S_p + T_n T_p + I_n I_p + C_n C_p$$

où D_n est la cote du paramètre D et P_n son poids.

La vulnérabilité augmente avec l'indice DRASTIC et cet indice représente une mesure relative de la vulnérabilité des eaux souterraines. Un site avec un indice DRASTIC faible n'est pas à l'abri d'une contamination, mais il est moins susceptible à la contamination par rapport à un site ayant un indice DRASTIC élevé (Osborn et al. 1998).

2.8.2.4.2- Acquisition des données:

Les paramètres DRASTIC sont obtenus à partir des données brutes ou mesurées sur le terrain et des cartes synthétiques ou fournies par les organismes concernés DHWT (Direction de l'Hydraulique de la Wilaya de Tebessa), et Direction d'Agriculture de Tebessa.

- Carte topographique à 1/50 000 de Tebessa, El-Hamamet, Morsott et Meskiana (feuille, N°206-B10-C31, N°205-B10-C30, N°178-B9-C31 et N°177-B9-C30),
- Carte pédologique à 1/50 000 de la plaine de Tebessa-Morsott (Cabinet Lepetit, 1974),
- Carte piézométrique et de profondeur d'eau à partir des mesures de 100 puits effectuées par nous mêmes lors d'une campagne en avril 2002,
- Carte de perméabilité déduite à partir des valeurs de la transmissivité de 28 forages (Direction d'Hydraulique de Tebessa),
- Log stratigraphique des forages et étude géophysique (Strojexport, 1978) utilisés pour identifier la nature lithologique de la zone saturée et non saturée,
- Les données pluviométriques enregistrées au niveau de la station météorologique de Tebessa sur une période de 25 ans (1972/73-1996/97) ont permis d'établir le bilan hydrique selon la méthode de Thornthwaite et d'estimer l'infiltration efficace par l'équation du bilan hydrologique :

$$I_e = P - ETR - R$$

où I_e = infiltration efficace,
 P = précipitation totale,
 ETR = évapotranspiration réelle
 R = ruissellement.

2.8.2.4.3- Elaboration des cartes thématiques des sept paramètres:

La fiabilité de la méthode DRASTIC repose sur une caractérisation détaillée des unités hydrogéologiques (en sous unités) de la zone d'étude ainsi qu'en l'exactitude des sept paramètres utilisés. Dans cet esprit d'analyse, on a discrétisé le domaine d'étude en 440 mailles carrées et régulières de 1 km² de surface, autrement dit en 440 "sous unités". La simulation par modèle mathématique, a permis de mieux connaître la répartition spatiale de certains paramètres comme : la profondeur de l'eau, perméabilité et recharge efficace.

Chacun des paramètres considérés par la méthode DRASTIC est déterminé au niveau de chaque maille et reçoit une cote variant de 1 à 10. Dans chaque maille, l'indice DRASTIC relatif est obtenu en multipliant sa cote par son poids relatif.

L'indice DRASTIC (général ou relatif aux pesticides) est calculé au niveau de chaque maille en faisant la somme de ces indices paramétriques. Ainsi, sont établies deux cartes de vulnérabilité DRASTIC, une concernant les polluants d'ordre général et l'autre relative aux pesticides.

- *Carte de profondeur de l'eau (fig.79):*

Dans la plaine de Tebessa-Morsott, la surface de la nappe par rapport au sol varie de bordures au centre de la plaine (relevés piézométriques d'avril 2002). Elle est plus proche du sol au centre (moins de 5 m), par contre elle est plus profonde en bordures (plus de 25 m).

- *Carte de la nature lithologique de la zone non saturée (fig.80):*

L'étude géophysique (Strojexport, 1978) ainsi que les logs stratigraphiques des forages (Direction d'Hydraulique de Tebessa) ont mis en évidence un grano-classement latéral des sédiments des bordures vers le centre de la plaine : texture grossière (blocs de différentes tailles) près des bordures et fine (argiles avec des graviers fins, limons et argiles) au centre de la plaine.

- *Carte pédologique (fig.81):*

L'étude pédologique des sols de la plaine de Tebessa-Morsott (Lepetit, 1974) a révélé trois textures : limono-argileuse, argilo-graveleuse et graveleuse. Du point de vue de la vulnérabilité, la texture graveleuse présente le plus grand risque et couvre 37.5 % de la surface totale. Les textures argilo-graveleuse et limono-argileuse sont moins vulnérables à la pollution et couvrent respectivement 31.5 % et 31% de la surface totale.

- *Carte des pentes (fig.82):*

Une des particularités morphologiques du bassin d'effondrement de Tebessa-Morsott réside dans sa topographie plane. La pente des terrains dépasse 18% aux bordures et est comprise entre 0 et 2% au centre de la plaine. On constate que 80% de la surface totale présente une pente très faible de 0 à 6 % ce qui favorise la migration du polluant vers la nappe. Les zones les moins vulnérables sont situées aux bordures.

- *Carte de recharge efficace (fig.83):*

La recharge de la nappe provient principalement de l'infiltration directe des eaux de précipitations à travers les sédiments grossiers des bordures et des eaux de ruissellement ou de crues dans les lits des affluents de l'oued principal (notamment l'oued Bouakous). L'alimentation de la nappe provenant de l'infiltration des eaux de précipitation est très faible et ne dépasse pas 170 mm/an, ce qui laisse admettre d'autres sources d'alimentation, en particulier à travers les bordures (calcaires Maestrichtien). La recharge est nulle au centre de la plaine (texture fine : limono-argileux) et maximale au niveau des bordures (texture grossière : blocs de différentes tailles).

- *Carte de la nature lithologique de l'aquifère (fig.84):*

L'étude géophysique (coupes géo-électriques) et les logs-stratigraphiques des forages ont permis de distinguer trois zones à différent degré de vulnérabilité:

- Zone I : Caractérisée par la prédominance de limons argileux avec parfois intercalations de graviers ou sables;
- Zone II : Caractérisée par des argiles avec des graviers de perméabilité moyennes (moins vulnérable) ;
- Zone III : Caractérisée par des gros cailloutis, voire des galets de calcaires très perméables (plus vulnérable).

- *Carte de perméabilité (fig.85):*

La perméabilité est déduite des valeurs de transmissivité de 28 forages. Ailleurs, elle est calculée par le modèle de transmissivité obtenu à partir de la relation entre la résistance transversale et la transmissivité au niveau de 250 sondages électriques. Elle varie de $4.7 \cdot 10^{-8}$ à $4.1 \cdot 10^{-4}$ m/s avec une moyenne de $2.20 \cdot 10^{-5}$ m/s.

2.8.2.4.4- Carte de vulnérabilité (fig.86):

Le calcul de l'indice DRASTIC (Id) au niveau des mailles varie de 66 à 169, il a permis d'établir une carte de vulnérabilité de la nappe alluviale de Tebessa–Morsott. Dans cette carte, nous distinguons quatre classes à degrés de vulnérabilité différents :

- Classe I : très faible vulnérabilité ($66 > Id < 77$)
- Classe II : faible vulnérabilité ($77 > Id < 105$)
- Classe III : moyenne vulnérabilité ($105 > Id < 133$)
- Classe IV : vulnérable ($133 > Id < 169$)

Ces classes peuvent être regroupées en deux zones formant respectivement 60.5 % et 39.5 % de la surface totale :

- Les zones à très faible et à faible vulnérabilité occupent respectivement 35% et 25.5% de la surface totale de la nappe. Elles sont localisées au centre de la plaine et le long de l'Oued Chabro-Ksob. Elles sont situées dans les aires influencées par les activités agricoles et les rejets urbains.

- Les zones à moyenne et forte vulnérabilité couvrent 15% et 24.5% de la surface totale de la nappe et sont localisées aux bordures en particulier au niveau des zones urbaines: Tebessa ville, Hamamet, Morsott et Boulhef-edyr. Dans ces dernières zones est concentré un grand nombre de forages destinés au développement agricole et à la Direction de l'Hydraulique d'où provient 70% de l'eau potable de Tebessa. Ces zones, dès à présent, doivent être soumises à un contrôle rigoureux pour définir les mesures de protection adéquates.

La diminution du degré de vulnérabilité au centre de la nappe est liée essentiellement :

- à la nature du sol matérialisé par une texture limono-argileuse et à la recharge nulle ;
- à la lithologie de la zone saturée caractérisée par la dominance des argiles avec parfois des intercalations de graviers ou de sables fins peu perméables.

L'augmentation du degré de vulnérabilité aux bordures de la nappe est liée beaucoup plus à la structure graveleuse du sol, de la zone vadose et des matériaux de l'aquifère qui sont très perméables.

2.8.2.4.5- Carte de vulnérabilité relative aux pesticides (fig.87):

L'indice DRASTIC relatif aux pesticides calculé au niveau des mailles varie de 42 à 201. La carte de vulnérabilité établie indique que les zones à risque de contamination élevé sont situées aux bordures, par contre vers le centre, un indice DRASTIC faible à moyen est enregistré, traduisant un degré de vulnérabilité plus faible.

Les zones à risque de contamination moyen et fort par les pesticides, représentent 65% de la surface totale (indice DRASTIC de 105 à 201) et de 40% pour les autres polluants (indice DRASTIC de 105 à 169). Donc, les eaux souterraines de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott sont plus exposées à la pollution par les pesticides que par les autres polluants de surface.

- Conclusion:

Ce travail présente une première application de la méthode DRASTIC dans la nappe alluviale de Tebessa-Morsott avec une amélioration dans l'établissement des cartes thématiques (en particulier celle de la profondeur de l'eau, perméabilité et recharge), d'où de la carte de vulnérabilité à la pollution, basée sur le principe de la discrétisation de la nappe en mailles régulières et carrées.

L'analyse de cette carte a permis de distinguer quatre classes à degrés de vulnérabilité différents. Ces classes peuvent être regroupées en deux zones formant respectivement 60.5% et 39.5% de la surface totale de la nappe:

- La première zone de très faible à faible vulnérabilité s'étend sur 60.5% et occupe le centre de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott. Elle est située dans les aires influencées par l'activité agricole (irrigation par pompage sur les puits domestiques) et les rejets urbains. A l'heure actuelle, il n'existe aucune mesure préventive dans cette zone.

- La deuxième zone à moyenne et forte vulnérabilité couvre 39.5% et sont localisées aux bordures en particulier au niveau des zones urbaines de Tebessa ville, Hamamet, Morsott et Boulhef-edyr. Dans cette zone est concentré un très grand nombre de forages de la Direction de l'Hydraulique d'où provient 70% de l'eau potable de Tebessa. Ici, presque tous les paramètres interviennent dans l'augmentation du degré de vulnérabilité de la nappe. Dans ce sens, cette zone, dès à présent doit être soumise un à contrôle rigoureux pour définir et réaliser les mesures de protection adéquates.

Les zones à risque de contamination moyen et fort par les pesticides représentent 65% de la surface la nappe et de 40% pour les autres polluants de surface. Donc, les eaux souterraines de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott apparaissent plus exposées à la pollution par les pesticides que par les autres polluants. .

L'établissement de la carte de vulnérabilité DRASTIC sur un domaine discrétisé a permis d'aboutir à une cartographie très détaillée du degré de vulnérabilité à la pollution de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott.

Les deux cartes de vulnérabilité établies, premières du genre, au niveau de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott, ne seront pas seulement utiles pour identifier et délimiter les zones où le risque de contamination est élevé mais aussi pour l'aménagement du territoire et l'examen préliminaire des nouveaux projets à incidence environnementale que le gestionnaire de la ressource en eau pourra consulter en tant qu'outil d'aide à la décision.

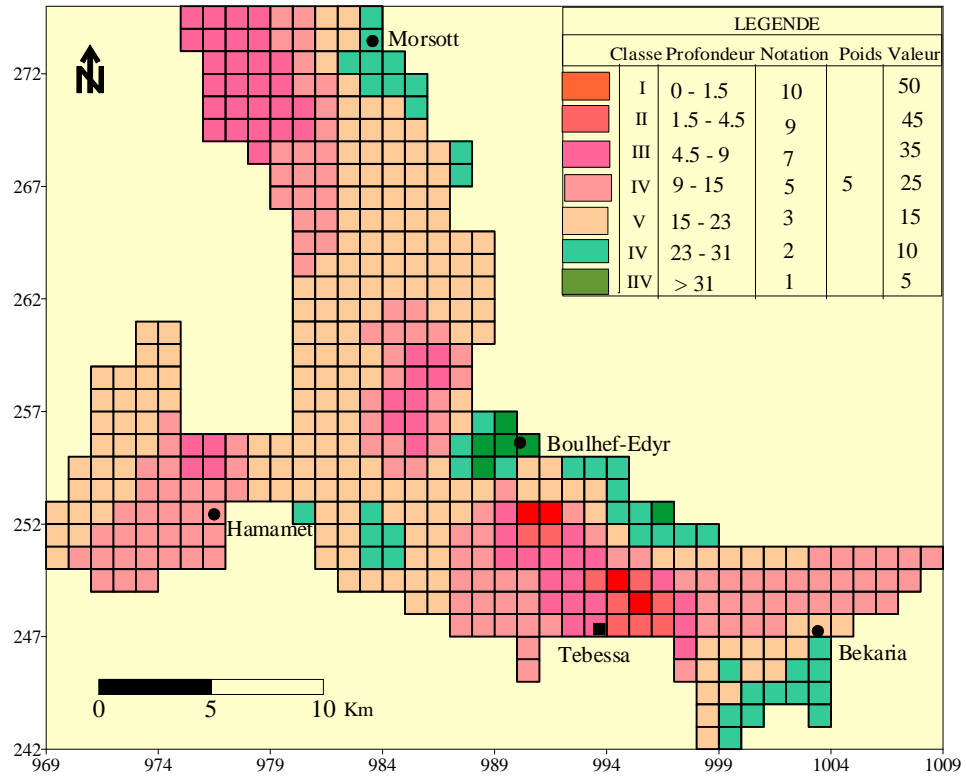


Fig.79. Carte de vulnérabilité de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott relative à la profondeur de l'eau

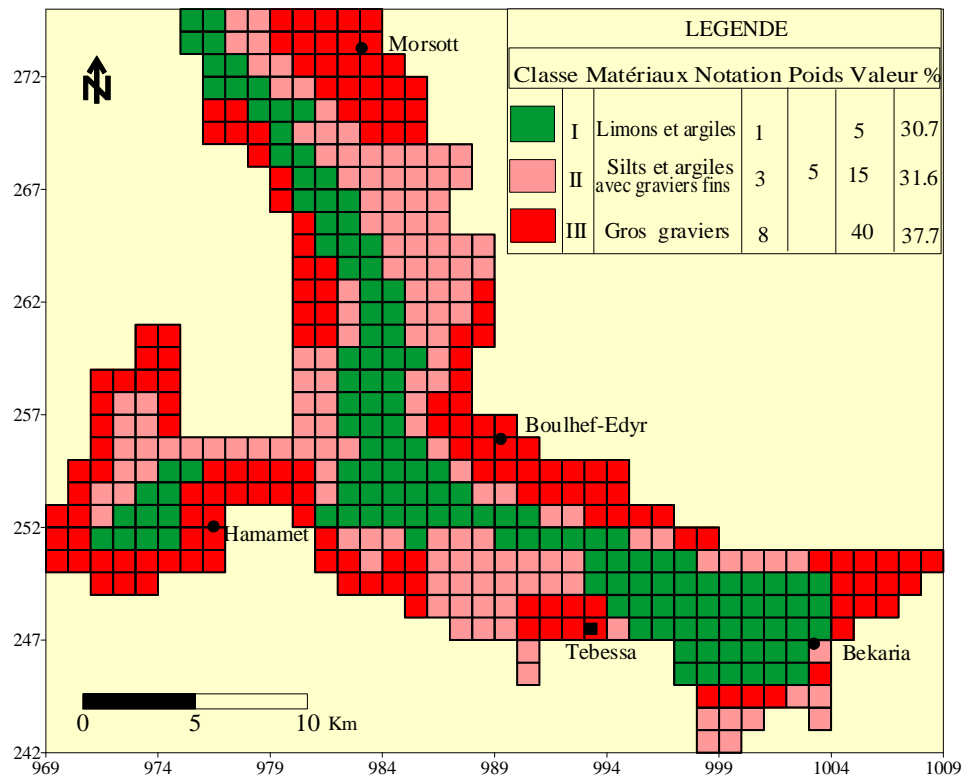


Fig.80. Carte de vulnérabilité de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott relative à la zone non saturée

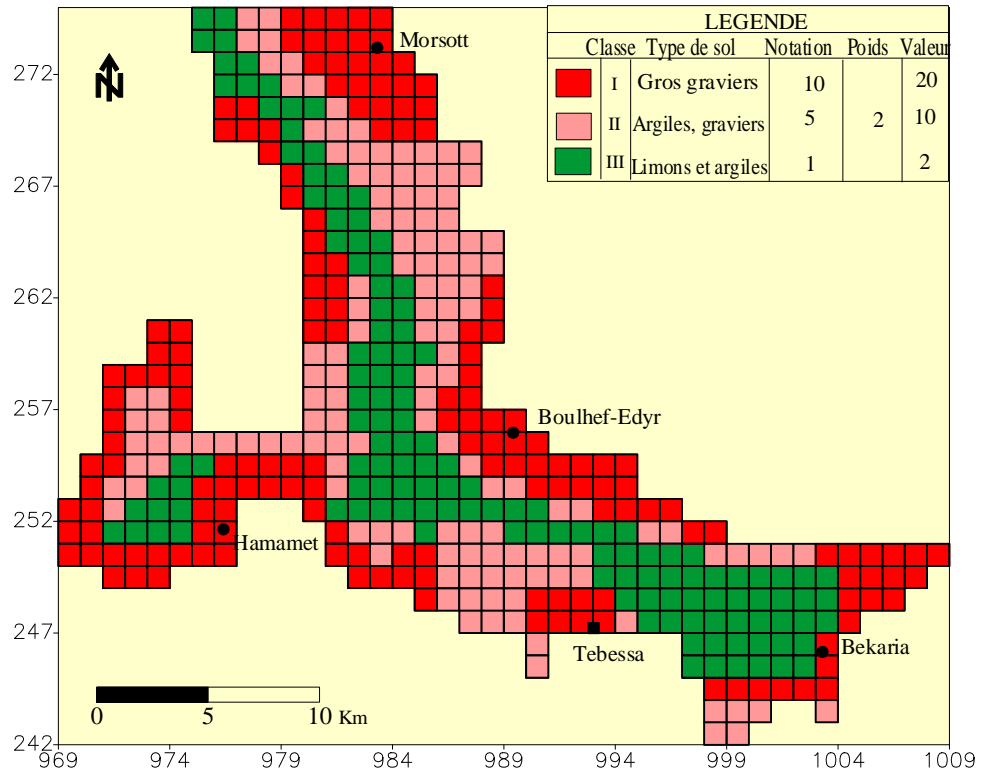


Fig.81. Carte de vulnérabilité de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott relative au sol.

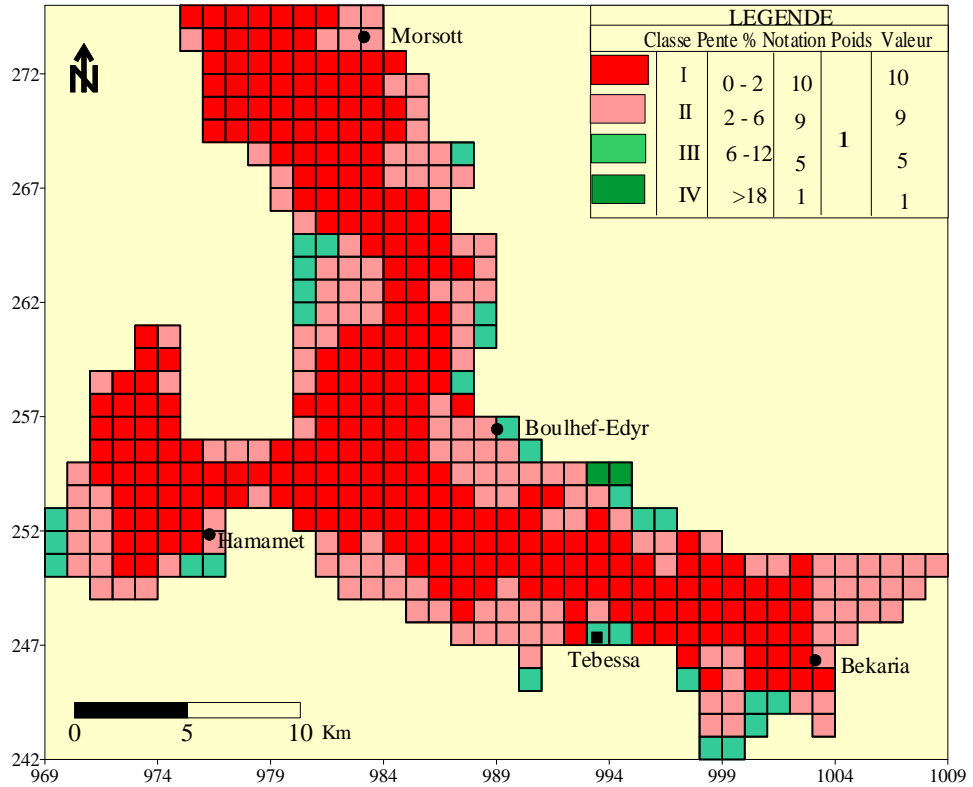


Fig.82. Carte de vulnérabilité de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott relative à la topographie

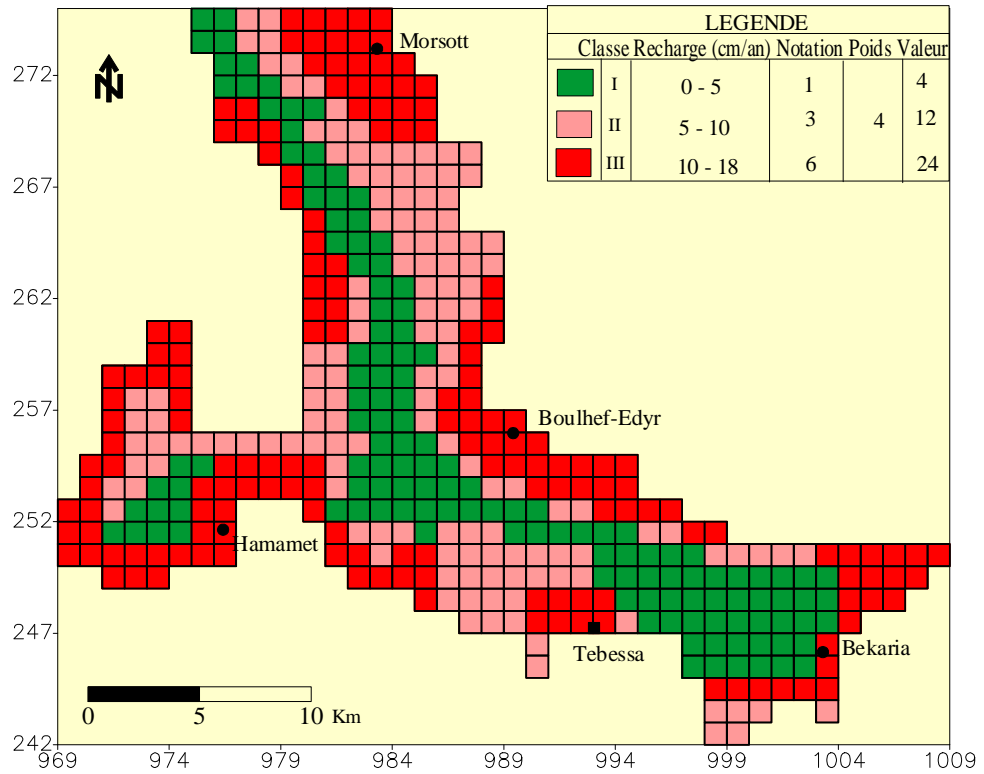


Fig.83. Carte de vulnérabilité de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott relative à la recharge.

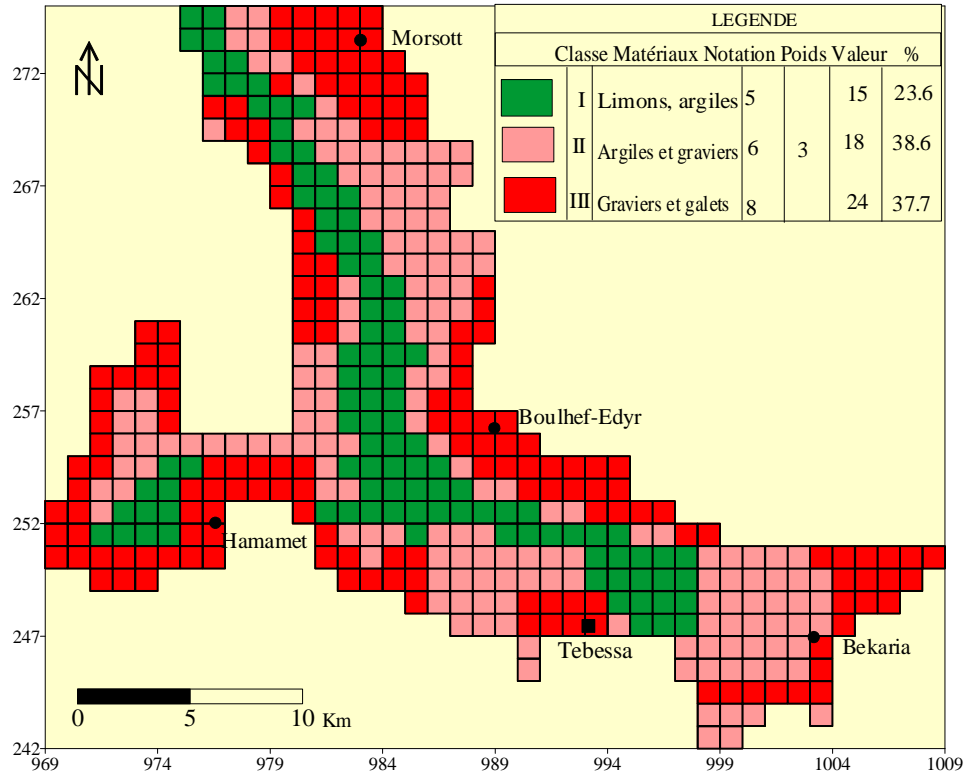


Fig.84. Carte de vulnérabilité de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott relative à la nature lithologique de l'aquifère

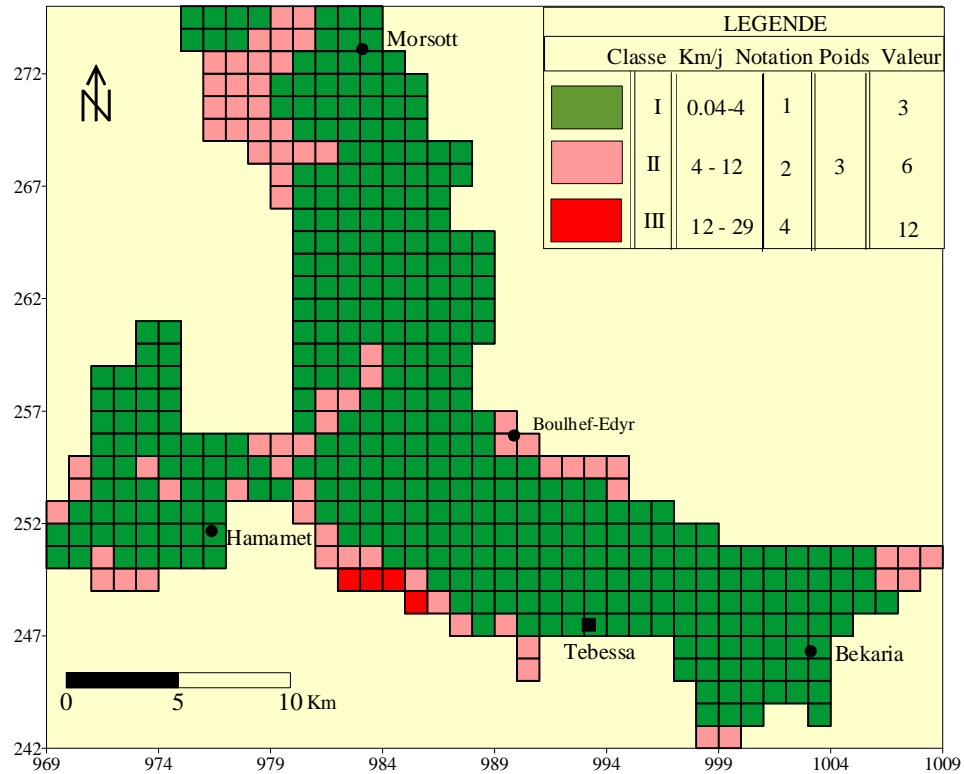


Fig.85. Carte de vulnérabilité de la nappe alluviale de Tebessa- Morsott relative à la perméabilité

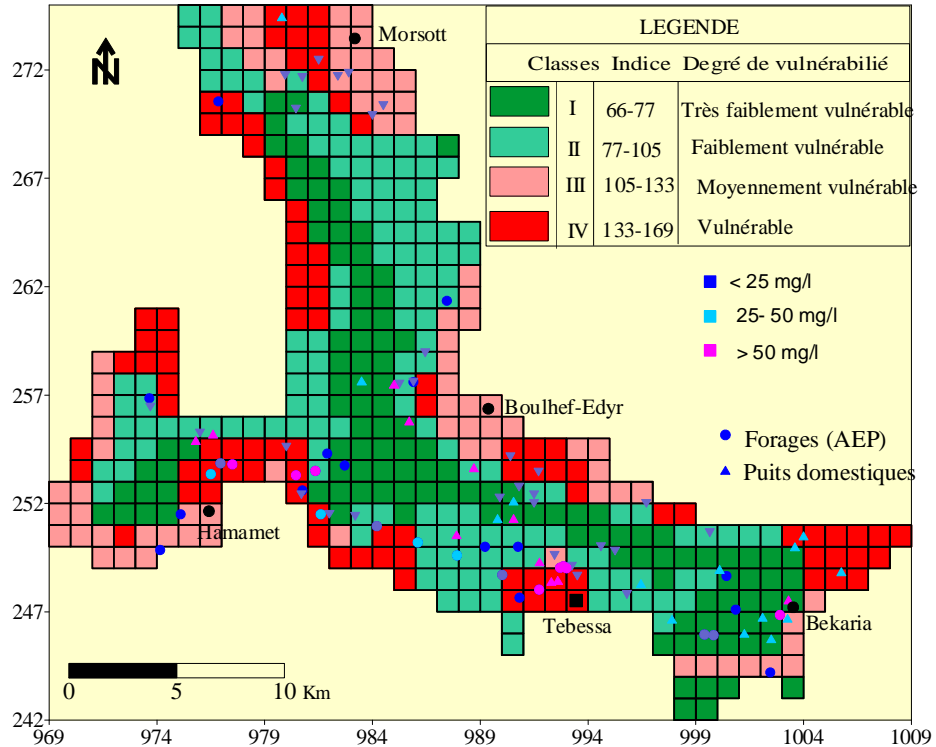


Fig.86. Carte de vulnérabilité de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott relative à l'indice DRASTIC et distribution des nitrates. forage (1977-80), puits (mai,1998)

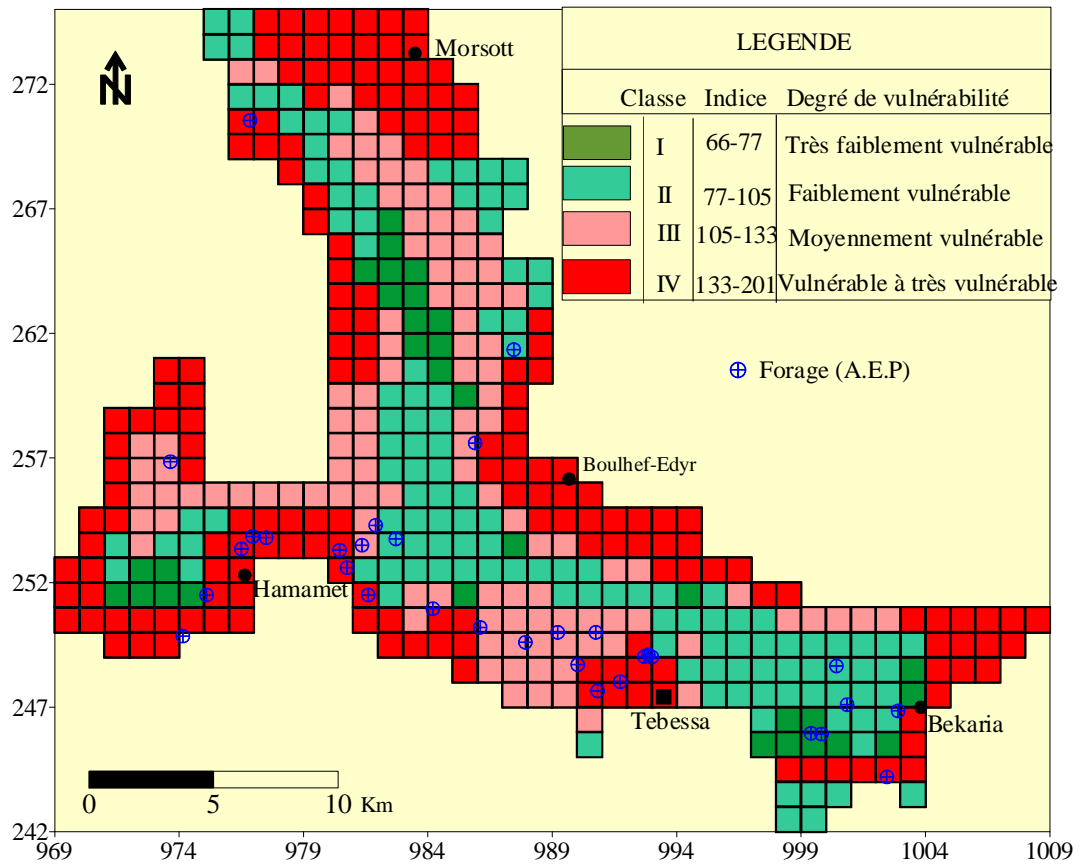


Fig.87. Carte de vulnérabilité de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott relative aux pesticides

Chap.VII. Périmètres de protection des ouvrages de captage

1- Introduction:

La lutte contre la pollution des ressources en eau souterraines constitue un des moyens les plus faciles et les moins coûteux pour atténuer les conséquences de cette rareté. Cette protection devra se faire à travers l'élaboration des cartes de vulnérabilité à la pollution des ressources en eau superficielles et souterraines et par la protection des captages d'eau potable (barrages, forages, puits, sources, ...etc.) par des périmètres de protection.

La nouvelle loi en Algérie du septembre 2005 (Journal Officiel n°60, Chap.3, Art.38-41) sur l'eau impose la mise en œuvre de périmètres de protection autour des captages d'eau potable. Cependant, à ce jour aucun des captages d'eau potable n'est réellement protégé par ces zones de protection (en dehors des clôtures et des locaux techniques abritant le captage lui même et le matériel annexe de pompage).

Après un diagnostic général sur la qualité bactériologique et chimique des eaux souterraines de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott, et qui a montré une mauvaise qualité des eaux souterraines en particulier celle de la nappe superficielle. L'étude de vulnérabilité de la nappe montre que la majorité des forages sont placés dans un contexte de forte vulnérabilité de l'aquifère du fait de la quasi-absence de formation superficielle semi-perméable permettant d'assurer une certaine protection des eaux souterraines.

C'est pourquoi, il est essentiel de protéger les ouvrages de captages contre toute sorte de pollution, en déterminant autour de ceux-ci, des périmètres de protection dans lesquels certaines activités peuvent être interdites ou réglementées.

2- Objectif de la protection du champ captant:

Les ressources en eau potable exploitées par la direction de l'hydraulique dans la nappe alluviale de Tebessa-Morostt, sont menacées par la pollution engendrée par le développement urbain, agricole et industriel, notamment, les eaux usées des agglomérations avoisinantes qui ne disposent pas de système d'assainissement, des ordures ménagères, du réseau routier et des activités agricoles. Certains ouvrages de captage municipaux dans la zone d'El-Merdja ont même dû être abandonnés suite à de telles contaminations.

A cet effet, il fallait prendre toutes les mesures susceptibles de garantir la qualité des eaux de ces ressources et la sécurité de l'approvisionnement en eau potable. Ce qui nous a conduits à établir la mise en place de zones de protection des ouvrages de captages.

La gestion des sources potentielles de contamination contenues à l'intérieur de périmètres de protection déterminés autour des ouvrages de captage constitue une solution efficace de préservation de la qualité de l'eau souterraine alimentant un ouvrage de captage.

Le contenu de ce chapitre porte sur la proposition des périmètres de protection en vue de la protection des eaux souterraines de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott.

3- Détermination des périmètres de protection en milieu granulaire:

3.1- Méthodologie:

Cette partie est consacrée à la présentation de la plupart des méthodes de délimitation des périmètres de protection des captages d'eau citées dans la littérature internationale:

- des contextes de leur utilisation;
- des données qu'elles utilisent;
- des avantages et inconvénients de chacune d'elles.

3.1.1- Approche cartographique:

Cette approche qualitative est basée sur l'analyse des faciès lithologiques des terrains de la couverture (sol et zone non saturée), de la forme de la surface piézométrique de la nappe, des conditions aux limites naturelles de l'aquifère capté (zones de recharge, limites d'alimentation, limites étanches, exutoires, etc.) pour la délimitation des zones de protection du captage, notamment sa zone d'alimentation. Les secteurs à protéger sont constitués en priorité par les zones principales de recharge de la nappe.

3.1.2- Approche empirique:

3.1.2.1- Méthode de Rehse:

Cette méthode consiste à estimer le pouvoir épurateur de la couverture (sol et zone non saturée) et celui de la zone saturée (la nappe) vis-à-vis d'une pollution lors de son transfert depuis la surface du sol jusqu'au captage à protéger. Cette capacité de filtration (atténuation de la concentration de la pollution) dépend du faciès lithologique et de l'épaisseur des terrains de la couverture, des caractéristiques de la zone saturée (lithologie et texture) et de la longueur du trajet empreinté par la pollution dans la nappe.

La méthode définit, pour chaque type de faciès rencontré par le polluant, un index (I) qui dépend de son pouvoir épurateur (vis-à-vis de cette pollution):

$I = 1/H$ (H= longueur du trajet vertical dans la zone non saturée nécessaire pour avoir une épuration totale).

$I = 1/L$ (L= longueur du trajet horizontal dans la zone saturée, nécessaire pour compléter l'épuration des formations de la couverture de la nappe).

Le pouvoir épurateur de l'ensemble des formations (Mx) traversées par le polluant correspond à la somme du pouvoir épurateur de la couverture (Md) et celui de la zone saturée (Mr) :

$$M_x = M_d + M_r.$$

L'épuration est considérée totale lorsque Mx devient supérieure ou égale à 1.

Dans le cas contraire (épuration incomplète), Mx est inférieure à 1.

3.1.2.2- Méthode géométrique:

Cette méthode consiste à délimiter (pour chacune des zones de protection) un rayon fixe autour du captage à protéger quelque soit la nature lithologique de l'aquifère et le contexte hydrogéologique dans lequel se trouve le captage. Ce rayon est généralement de quelques dizaines de mètres pour le périmètre de protection immédiate (PPI), de quelques centaines de mètres pour le périmètre de protection rapprochée (PPR) et de quelques kilomètres pour le périmètre de protection éloignée (PPE).

3.1.3- Approche graphique (méthode d'Albinet et al, 1972):

Cette méthode simple consiste à tracer la carte de la surface dynamique de la nappe, obtenue lors du pompage d'essai pratiqué dans le captage à protéger. Le tracé des lignes de courant permet de délimiter les zones d'appel et d'alimentation de ce captage.

3.1.4- Approche hydrodynamique:

3.1.4.1- Méthodes volumiques

- Méthode de l'Infiltration:

Cette méthode consiste à établir un bilan de masse entre le volume d'eau prélevé par an, au niveau du captage, et le volume d'eau s'infiltrant (recharge moyenne annuelle) dans la zone d'alimentation du captage à protéger. Dans le cas d'un puits unique, la zone d'infiltration (ou de recharge) est assimilée à un cercle de superficie (A) et de rayon r, dont les dimensions sont données par les relations suivantes :

$$A = \frac{Q}{i}$$

ou,

$$r = \sqrt{\frac{Q}{\pi \times i}}$$

Avec :

A = Superficie de la zone d'alimentation du captage (m²)

r = Rayon de l'aire de recharge de la nappe équilibrant le débit prélevé (m)

Q = Débit maximum prélevé dans le captage (m³/an)

i = Recharge de la nappe (m/an) équilibrant le débit (Q) prélevé dans le captage.

- Méthode du Cylindre:

Cette méthode consiste à établir le bilan de masse entre le volume d'eau extrait du captage pendant la durée de pompage (t) et le volume d'eau contenu dans un cylindre traversant la nappe captée. Le rayon du cylindre est assimilé à celui du PP rapprochée et il est évalué par la relation suivante:

$$r = \sqrt{\frac{Q_t}{\pi \cdot e \cdot n_e}}$$

Avec :

r = rayon du cylindre (m), dont le volume permet d'équilibrer le débit prélevé dans le captage.
 Q_t = volume d'eau (m³) prélevé pendant la durée t de pompage (t est généralement de 50 jours).
e = épaisseur de la nappe (m).
 n_e = porosité efficace de la nappe (sans dimension).

3.1.4.2- Méthodes analytiques:

- Méthodes de Bear et Jacobs

Cette méthode est basée sur une résolution analytique de l'équation de l'écoulement de l'eau (en milieu poreux) dans le temps et dans l'espace. Elle permet de délimiter (dans le cas de milieux homogènes et isotropes) avec précision les périmètres de protection rapprochée et éloignée des captages d'eau potable.

- Caractéristiques de la zone d'alimentation du captage:

L'équation de la zone d'alimentation du captage en régime permanent s'écrit comme ci-dessous :

$$-\frac{Y}{X} = \tan g \left[\frac{2\pi \cdot K \cdot e \cdot i}{Q} Y \right]$$

Avec :

Y = Largeur de la zone d'alimentation (m) à la distance x (m) du captage ;
X = distance au captage (m) ;
K = coefficient de perméabilité de la nappe (m/s) ;
e = épaisseur initiale de la nappe (m) ;
i = gradient hydraulique naturel de la nappe au voisinage du captage ;
Q = débit prélevé dans le captage (m³/s).

La résolution analytique de l'équation est difficile à obtenir, car elle contient deux inconnus (X et Y). La solution est obtenue par des méthodes graphiques. La largeur de la zone d'alimentation (Y) prend sa valeur maximale (B) lorsque X (distance amont du captage) tend vers l'infini (B).

$$B = \frac{Q}{K \cdot e \cdot i}$$

- Caractéristiques de la zone de protection rapprochée du captage:

La détermination de l'isochrone (correspondant à la zone de protection rapprochée du captage) se fait à partir de la résolution de l'équation de l'écoulement en régime transitoire. Elle s'écrit comme ci-dessous :

$$t = \frac{(x - x_w)n_c}{v} - \frac{Qn_c}{2\pi \cdot e \cdot (v)^2} \times \text{Ln} \left(\frac{\sin [2\pi \cdot e \cdot v \times (y - y_w) / (Q + \theta)]}{\sin \theta} \right)$$

$$\theta = \text{Arc tan} \left(\frac{y - y_w}{x - x_w} \right)$$

$$v = Ki$$

Avec :

t : temps de transfert de la pollution (secondes) entre un point de la nappe et le captage (généralement égal à 50 jours) ;

x_w et y_w : coordonnées du captage à protéger ;

x et y : coordonnées d'un point de la nappe ;

n_c : porosité cinématique de la nappe (sans dimension) ;

e : épaisseur saturée de la nappe au voisinage du captage (m) ;

Q : débit de pompage (m^3/s) ;

v : vitesse de Darcy = $K \times i$ (m/s) ;

K : coefficient de perméabilité de la nappe (m/s) ;

i : gradient hydraulique de la nappe au voisinage du captage, dans les conditions de pompage.

La résolution analytique de l'équation ci-dessus est difficile à obtenir. La solution approximative est obtenue par des méthodes itératives.

3.1.4.3- Méthode de Wyssling:

Cette méthode dérive de celle de Bear & Jacobs et permet de calculer les caractéristiques de la zone d'alimentation et celles du périmètre de protection rapprochée en quelques points particuliers de la nappe, entourant le captage à protéger.

- *Caractéristiques de la zone d'alimentation de l'ouvrage*

- Largeur maximale de la zone d'alimentation (B): Cette largeur est identique à celle définie par la méthode de Bear & Jacobs.
- Largeur de la zone d'alimentation à la hauteur du captage (B"). Elle est considérée égale à la moitié de la largeur maximale de la zone d'alimentation (B):

$$B'' = \frac{B}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{Q}{K \cdot e \cdot i} \right)$$

La limite aval de la zone d'alimentation du captage (point de stagnation, X_0) est déterminée à partir de la relation suivante:

$$X_0 = \frac{Q}{2\pi \cdot K \cdot e \cdot i}$$

- *Caractéristiques du périmètre de protection rapprochée*

Pour un temps t de transfert de la pollution donné (isochrone), la méthode de Wyssling permet de calculer les distances amont et aval du polluant (limites du périmètre de protection rapprochée) selon l'axe principal de l'écoulement de l'eau dans la nappe, avec les équations suivantes:

$$D_m = \frac{l + \sqrt{l(l + 8X_0)}}{2}$$
$$D_v = \frac{-l + \sqrt{l(l + 8X_0)}}{2}$$

Avec :

D_m : distance amont du périmètre de protection rapprochée sur l'axe principal de l'écoulement, correspondant au temps de transfert t de la pollution dans la nappe (généralement de 50 jours) ;

D_v : distance aval du périmètre de protection rapprochée sur l'axe principal de l'écoulement, correspondant au temps t de transfert de la pollution dans la nappe;

l (m) = $Ve \cdot t$ (l = longueur parcourue par un polluant dans la nappe pendant la durée t , avec la vitesse Ve) ;

$Ve = (K \cdot i) / ne$ (K = coefficient de perméabilité (m/s), i = gradient hydraulique et ne = porosité efficace de la nappe).

3.1.4.4- Méthodes numériques:

Les modèles mathématiques permettent d'approximer la résolution exacte de l'équation de l'écoulement par des méthodes numériques de différences finies ou d'éléments finis. Cette résolution revient à approximer la distribution spatiale et l'évolution temporelle des charges hydrauliques dans la nappe.

La résolution, par différences finies, de l'équation de l'écoulement en régime permanent permet de calculer la charge hydraulique au centre de chaque maille du modèle :

En régime permanent, la somme des débits entrants est égale à celle des débits sortants ; c'est-à-dire que la variation du stock d'eau dans chaque maille du modèle est nulle, ce qui s'écrit sous la forme:

$$S \cdot \frac{\partial H}{\partial t} = 0$$

L'équation de Darcy en régime permanent s'écrit sous la forme :

$$\frac{\partial}{\partial x} \cdot T \cdot \frac{\partial H}{\partial x} = 0$$

La résolution de cette équation (en régime permanent) au niveau de chaque maille du modèle, avec la méthode des différences finies, s'écrit :

$$\sum_i T_i [H_c - H_i] + Q = 0$$

La charge hydraulique au centre de chaque maille du modèle est approximée par la relation suivante :

$$H_c = \frac{\sum (T_i + H_i) + Q}{\sum T_i}$$

H_c = Charge hydraulique moyenne au centre de la maille (m)

T_i = Transmissivité moyenne au niveau de chaque maille (m^2/s) entourant la maille centrale

Q = Prélèvement ou recharge effectuée au niveau de chaque maille (m^3/s) du modèle de la nappe.

- *Délimitation des périmètres de protection au moyen des modèles numériques:*

Cette délimitation se fait à partir du calcul du champ de vitesse dans la nappe et du tracé des trajectoires d'eau souterraine. Les vitesses de l'écoulement de l'eau selon l'axe X (ou Y ou Z) sont calculées par la relation ci-dessous:

$$V_x = \frac{K_x}{n_c} \cdot \frac{\partial H}{\partial x}$$

K_x = perméabilité de la nappe selon l'axe principal des écoulements (m/s)

n_c = porosité cinématique de la nappe (sans dimension)

La vitesse de l'écoulement de l'eau est définie également par la relation ci-dessous :

$$V_x = \frac{\partial x}{\partial t}$$

Les coordonnées d'une particule d'eau en écoulement après un instant dt (entre t et $t+dt$) sont données par la relation ci-dessous :

$$X_{(t+dt)} = X_t + V_x \cdot dt$$

Le suivi des particules dans la nappe, se fait à travers le calcul des coordonnées successives empreintées par l'écoulement de l'eau. L'ensemble des lignes de courant, aboutissant au captage, permet de délimiter sa zone d'alimentation.

Le périmètre de protection rapprochée d'un captage est délimité à partir du calcul des isochrones dans la nappe. Ces dernières sont des courbes joignant l'ensemble des particules qui ont mis le même temps pour parcourir la même distance en partant de la même maille du modèle.

3.1.5- Approche mixte:

3.1.5.1- Méthode 3A2E:

Cette méthode développée par D. Paradis en 2000 à l'INRS-Eau du Canada, permet de calculer les dimensions du périmètre de protection éloignée et rapprochée d'un captage d'eau souterraine en milieu poreux, par la combinaison des trois approches suivantes: cartographie hydrogéologique,

empirique (cylindre et recharge) et hydrodynamique. Son nom 3A2E est un acronyme, constitué des initiales des cinq étapes (suivantes):

Etape 1 : consiste en la détermination des limites *avales* de la zone d'alimentation et celles du périmètre de protection rapprochée et éloignée du captage. Ces limites peuvent être calculées à partir des équations de Bear & Jacobs, ou celles de Wyssling (combinée avec les méthodes de l'Infiltration et du Cylindre) ou à partir de la cartographie hydrogéologique.

Etape 2 : consiste en la détermination des limites *amont* de la zone d'alimentation et du périmètre de protection rapprochée et éloignée du captage. Ces limites peuvent être calculées à partir des équations de Bear & Jacobs, ou celles de Wyssling (combinée avec les méthodes du Cylindre et de l'Infiltration de la nappe) ou à partir de la cartographie hydrogéologique.

Etape 3 : consiste à calculer *les aires totales* des zones de recharge et du périmètre de protection rapprochée du captage. Les équations de l'Infiltration et du Cylindre sont utilisées respectivement pour le calcul de ces superficies.

Etape 4 : consiste en la détermination de la direction principale de *l'écoulement régional* de l'eau souterraine, à partir de la carte piézométrique de la nappe.

Etape 5 : consiste à tracer une *ellipse* pour chacune des zones à délimiter (périmètres de protection rapprochée et éloignée du captage), dont les superficies sont calculées dans l'étape 3 de la méthode. Les axes principaux de ces deux ellipses coïncident avec le sens de l'écoulement principal de la nappe (déterminé à l'étape 4). Les extrémités de ces zones correspondent aux limites avale et amont calculées respectivement dans les étapes 1 et 2.

3.2- Les périmètres de protection:

3.2.1- Définition:

Les périmètres de protection sont associés à la surface de terrain à travers laquelle des contaminants sont susceptibles de migrer en direction de systèmes de captage et font l'objet de surveillance afin d'assurer la qualité de l'eau souterraine.

En matière de protection des ressources en eau, il y a lieu de définir plusieurs zones de protection selon la réglementation en vigueur dans chaque pays). Dans le cas de l'Algérie, il s'agit de 3 zones : immédiate, rapprochée et éloignée.

3.2.1.1- Périmètre de protection immédiate:

Le périmètre de protection immédiate correspond à une distance minimale de 30 mètres ceinturant la prise d'eau. Cette distance est indépendante des conditions hydrogéologiques et géologiques présentes à l'emplacement du puits. Le périmètre de protection immédiate se délimite au moyen d'une clôture cadenassée d'une hauteur minimale de 1,80 mètre.

L'aire de protection immédiate vise à protéger le puits et ses installations connexes. Aucune activité autre que le pompage n'est tolérée à l'intérieur de ce périmètre.

3.2.1.2- Périmètre de protection rapproché:

Le périmètre de protection rapproché doit protéger efficacement le captage vis-à-vis de la migration souterraine des substances polluantes. Sa surface dépend des caractéristiques de l'aquifère, des débits de pompage, de la vulnérabilité de la nappe. Généralement, le temps de transfert entre la source de pollution et le captage retenu est d'environ 50 jours, ce qui représente suivant les terrains une surface comprise entre 1 et 10 hectares. Peuvent être interdits ou réglementés toutes les activités, installations et dépôts susceptibles de nuire directement ou indirectement à la qualité des eaux.

Sont généralement interdits dans ce périmètre :

- le forage et puits autres que ceux nécessaires à l'extension du champ captant et à la surveillance de sa qualité ;
- l'exploitation des carrières à ciel ouvert, l'ouverture et le remblaiement d'excavations à ciel ouvert ;
- le dépôt d'ordures ménagères, immondices, détritiques et produits radioactifs et de tous produits et matières susceptibles d'altérer la qualité des eaux ;
- l'installation de canalisations, réservoirs ou dépôts d'hydrocarbures liquides ou gazeux, de produits chimiques et d'eaux usées domestiques ou industrielles ;
- l'épandage ou l'infiltration des lisiers et d'eaux usées d'origine domestique ou industrielle.

Son étendue est déterminée en prenant notamment en compte :

- les caractéristiques physiques de l'aquifère et de l'écoulement souterrain ;
- le débit maximal de pompage ;
- la vulnérabilité ;
- l'origine et la nature des pollutions contre lesquelles il est nécessaire de protéger les eaux souterraines.

Les notions de base à retenir pour délimiter ce périmètre sont :

- la durée et la vitesse de transfert de l'eau entre les points d'émission de pollutions possibles et le point de prélèvement dans la nappe ;
- le pouvoir de fixation et de dégradation du sol et du sous-sol vis-à-vis des polluants ;
- le pouvoir de dispersion des eaux souterraines.

3.2.1.3- Le périmètre de protection éloigné :

Ce périmètre est facultatif, il correspond à la zone d'alimentation du point d'eau, voire à l'ensemble du bassin versant. Il prolonge éventuellement le précédent pour renforcer la protection contre les pollutions permanentes ou diffuses. Il sera créé dans le cas où certaines activités peuvent être à l'origine de pollutions importantes et lorsque la nature de terrain traversé paraissent incapables de réduire significativement les risques, malgré l'éloignement du point de prélèvement.

3.2.2- Délimitation des périmètres de protection:

3.2.2.1- Choix des méthodes:

La détermination de l'air d'alimentation et des aires de protection comporte toujours une part d'incertitude étant donné que la précision de l'information requise n'est jamais absolue et que le niveau des connaissances hydrogéologiques sur un système aquifère évolue avec le temps à mesure que des données supplémentaires deviennent disponibles.

Par ailleurs, le degré de précision varie d'une méthode à l'autre, pour cela, la combinaison de plusieurs méthodes doit être privilégiée. A l'absence de logiciels adaptés pour certaines méthodes, les méthodes retenues pour le calcul des périmètres de protection sont: Rehse, Infiltration, Cylindre, Wyssling et 3A2E.

3.2.2.2- Périmètre de protection immédiat:

Dans la plaine de Tebessa-Morsott, tous les forages sont clôturés dans une enceinte ayant une superficie au plus large de 16 m² dont le but principal est de protéger l'équipement de l'ouvrage de captage. Les dimensions de ce périmètre doivent normalement varier de 10 à 20 m autour des captages d'eau souterraine.

3.2.2.3- Périmètre de protection rapproché:

Cette zone de protection est établie pour une protection bactériologique et donner une marge de sécurité pour une intervention en cas de pollution chimique ou accidentelle. La délimitation de cette zone dépend surtout du contexte géologique et hydrogéologique. Elle se trouve en général sur l'isochrone 50 jours (zone correspondant à un temps de transfert de 50 jours, permettant la disparition des bactéries pathogènes).

Le pouvoir épurateur du sol+zone non saturée est calculé d'après la méthode de Rehse (Tab.20). Il est inférieur à 1 dans le sous bassin Hamamet-Chabro et concerne les forages Ys5, Ys4-5, Ys4, EF1, FG1 et KL3, d'où l'épuration n'est pas totale et le polluant doit se poursuivre dans la couche aquifère lors du transfert horizontal. Donc, il est important de calculer la distance du trajet horizontal dans la zone saturée, nécessaire pour compléter l'épuration de la zone non saturée. Cette distance, sera équivalente pour un temps de transfert de 50 jours (temps nécessaire pour l'atténuation des polluants) et varie de 10 à 60 m. Elle est minimale au niveau du forage QR5 et maximale au forage EF1.

- Méthode d'infiltration:

La surface de la zone d'alimentation de chaque forage ainsi que le rayon de l'aire de recharge de la nappe équilibrant et le débit prélevé, sont données dans le Tableau 21.

- Méthode de cylindre:

Le rayon du périmètre de protection rapproché est donné dans le Tableau 22.

- *Méthode de Wyssling:*

Les caractéristiques de la zone d'alimentation et des périmètres de protection rapprochée des forages sont résumées dans le Tableau 23.

- *Méthode 3A2E (fig.88):*

Elle consiste à tracer une ellipse pour chacune des zones à délimiter (périmètres de protection rapprochée et éloignée du forage) en utilisant leurs dimensions déjà déterminées par les méthodes ci-dessus.

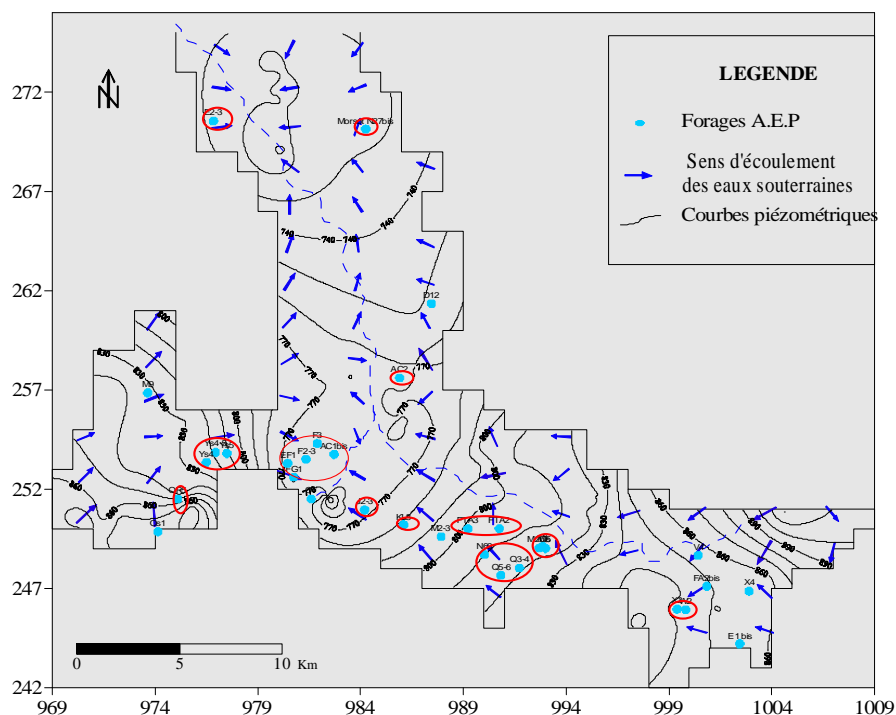


Fig.88. Délimitation des périmètres de protection rapprochés (méthode 3A2E)

3.2.3.4- *Périmètre de protection éloigné:*

La zone de protection éloignée permet d'assurer la protection des ressources en eau vis-à-vis des polluants à long terme, notamment vis-à-vis des pollutions peu dégradables (pollutions chimiques et radioactives). Cette zone se trouve entre la limite de la zone de protection rapprochée et la limite de l'aire d'alimentation de la nappe aquifère.

- *Limite avale:* Nous recommandons d'utiliser la limite avale de la zone d'alimentation du captage à protéger (X_0).

- *Limite amont:* Le périmètre de protection éloignée devra s'étendre entre les limites extérieures du périmètre de protection rapproché et les limites naturelles de la nappe contenues dans la zone d'alimentation du forage à protéger.

Tab.20. Pouvoir épurateur dans la couverture (sol+zone non saturée) au niveau des forages
(Méthode de Rehse)

Forage	Description du matériau (sol+zone non saturée)	h (m)	I	Md = hi.Ii	$Md = \sum h_i I_i$
FG1	Graviers grossiers et cailloutis	24.5	0.03	0.73	0.73
N69	Graviers grossiers et cailloutis	8	0.03	0.24	0.24
M2bis	Argiles	5	0.5	2.5	3.28
	Graviers avec argiles	6	0.13	0.78	
J2-3	Argiles	8	0.5	4	5.77
	Graviers à matrice argilo sableuse	12	0.13	1.56	
	Graviers grossiers	7	0.03	0.21	
D12	Argiles	20	0.5	10	10
X2	Argiles	10	0.5	5	9.2
	Sables argileux, graviers fins	10	0.17	1.7	
	Argiles	5	0.5	2.5	
W2	Argiles	2.5	0.5	1.25	6.9
	Graviers à matrice argilo sableuse	3	0.13	0.39	
	Argiles	7	0.5	3.5	
	Graviers à matrice argilo sableuse	2	0.13	0.26	
	Argiles	3	0.5	1.5	
Q3-4	Graviers fins à moyens	13	0.04	0.52	3.77
	Graviers riches en argiles	25	0.13	3.25	

X4	Argiles et limons	4	0.5	2	3.83
	Sables argileux, graviers fins	4	0.33	1.32	
	Sables fins	3	0.17	0.51	
F3	Argiles avec peu de graviers	2	0.5	1	1.54
	Graviers moyens à grossiers	20	0.03	0.54	
YS5	Galets	60	0.02	1.2	1.2
YS4-5	Galets	58	0.02	1.16	1.16
Ys4	Galets	56	0.02	1.12	1.12

M2-3	Limons et argiles	3	0.5	1.5	2.61
	Graviers fins avec argiles	3	0.13	0.39	
	Graviers moyens à grossiers	24	0.03	0.72	
F2-3	Limons	5.5	0.5	2.75	3.35
	Graviers moyens à grossiers	20	0.03	0.6	
EF1	Graviers fins avec argiles	3	0.13	0.39	1.39
	Graviers fins à moyens	10	0.04	0.40	
	Graviers moyens à grossiers	20	0.03	0.6	
KL3	Graviers riches en sables et argiles	16	0.04	0.64	0.88
	Graviers moyens à grossiers	8	0.03	0.24	
V4	Argiles	4	0.5	2	5.54
	Graviers riches en argiles	5	0.13	0.65	
	Argiles	5	0.5	2.5	
	Graviers riches en argiles	3	0.13	0.39	

Sur le trajet vertical, le pouvoir épurateur est égale : $Md = h1I1 + h2I2 + h3I3 + \dots$

$h1, h2, h3$ = épaisseur des différents terrains rencontrés (sol + zone non saturée)

$I1, I2, I3$ = Index correspondant aux matériaux (Rehse, 1977)

Si $Md \geq 1$ l'épuration est totale dans les couches de couvertures

Si $Md \leq 1$ la dépollution n'est pas totale, elle doit se poursuivre dans la couche aquifère lors du transfert horizontal.

Tab.21. Zone d'alimentation et aire de recharge des forages à protéger (méthode d'infiltration)

Forages	Q (m ³ /an)	Recharge (m/an)	A (m ²)	r (m)
FG1	883008	0.18	4905600	1249.91
X4	220752	0.05	4415040	1185.77
F2-3	1072224	0.1	10722240	1847.89
F3	630720	0.1	6307200	1417.27
EF1	788400	0.18	4380000	1181.06
KL3	473040	0.18	2628000	914.84
W2	630720	0.05	12614400	2004.32
V4	409968	0.05	8199360	1615.93
N69	788400	0.1	7884000	1584.55
M2-3	189216	0.1	1892160	776.27
X2	126144	0.05	2522880	896.36
M2bis	189216	0.1	1892160	776.27
J2-3	504576	0.18	2803200	944.84
AC1bis	630720	0.05	12614400	2004.32
Q3-4	441504	0.18	2452800	883.82
M1	189216	0.05	3784320	1097.81
E2-3	189216	0.18	1051200	578.60
Q5	473040	0.1	4730400	1227.39
Ys4-5	315360	0.18	1752000	746.96
QR5	189216	0.18	1051200	578.60
FA2bis	315360	0.1	3153600	1002.16
FTA2	315360	0.1	3153600	1002.16
CT	315360	0.18	1752000	746.96
Ys5	315360	0.18	1752000	746.96
Q5-6	473040	0.18	2628000	914.84
Ys4	315360	0.18	1752000	746.96
AC2	378432	0.1	3784320	1097.81
FTA3	252288	0.1	2522880	896.36

A = surface de la zone d'alimentation du forage (m²)

r = rayon de l'aire de recharge de la nappe équilibrant le débit prélevé (m).

Tab.22. Rayon du périmètre de protection rapprochée (méthode du cylindre)

Forages	V (m ³)	e (m)	nc	r (m)
FG1	120960	77	0.5	31.63
X4	30240	247	0.21	13.61
F2-3	146880	176	0.23	34.00
F3	86400	200	0.47	17.10
EF1	108000	58	0.2	54.18
KL3	64800	250	0.35	15.35
W2	86400	144	0.25	27.62
V4	56160	216	0.29	16.89
N69	108000	320	0.42	15.99
M2-3	25920	142	0.43	11.60
X2	17280	144	0.18	14.55
M2bis	25920	204	0.26	12.46
J2-3	69120	130	0.15	33.64
AC1bis	86400	164	0.33	22.54
Q3-4	60480	212	0.25	19.05
M1	25920	204	0.2	14.21
E2-3	25920	65	0.36	18.78
Q5	64800	204	0.15	25.94
Ys4-5	43200	180	0.22	18.63
QR5	25920	330	0.36	8.33
FA2bis	43200	229	0.37	12.72
FTA2	43200	150	0.26	18.78
CT	43200	155	0.18	22.20
Ys5	43200	95	0.2	26.90
Q5-6	64800	114	0.34	23.07
Ys4	43200	171	0.2	20.01
M9	12960	39	0.1	32.49
AC2	51840	83	0.36	23.54
FTA3	34560	200	0.39	11.87

V = Volume d'eau prélevé pendant 50 jours (m³)

e = Epaisseur mouillée (m)

r = rayon du périmètre de protection rapproché (m)

nc = porosité efficace

Tab.23. Caractéristiques de la zone d'alimentation et du périmètre de protection rapprochée (méthode de Wyssling)

Forages	Q	K	e	h ₁	h ₂	B	B'	X ₀	n _e	t (jrs)	V _e	D _m	D _v	D _m + D _v
FG1	28	0.083	77	765	762	628	314	50	0.45	50	2.60E-07	32	30	62
X4	7	0.010	247	862	855	362	181	57	0.21	50	3.72E-07	15	13	27
F2-3	34	0.021	176	768	764	1901	950	303	0.23	50	4.42E-07	35	33	68
F3	20	0.010	200	771	766	1465	732	233	0.47	50	1.45E-07	18	17	34
EF1	25	0.033	58	781	764	916	458	146	0.2	50	2.33E-06	59	49	109
KL3	15	0.044	250	792	777	194	97	31	0.35	50	8.80E-07	17	14	31
V4	13	0.017	216	858	843	1000	500	159	0.29	50	2.07E-07	17	16	34
N69	25	0.042	320	807	798	368	184	58	0.42	50	5.05E-07	17	15	32
M2-3	6	0.002	142	797	787	8029	4014	1278	0.43	50	1.22E-08	12	12	23
X2	4	0.002	144	850	841	1634	817	260	0.18	50	9.43E-08	15	14	29
M2bis	6	0.001	204	817	810	5786	2893	921	0.26	50	1.95E-08	13	12	25
J2-3	16	0.020	129	777	770	649	324	103	0.15	50	1.27E-06	36	31	67
AC1bis	20	0.010	164	767	763	2020	1010	321	0.33	50	1.83E-07	23	22	45
Q3-4	14	0.023	212	819	806	360	180	57	0.25	50	7.31E-07	21	18	38
E2-3	6	0.009	65	733	729	2051	1025	326	0.36	50	1.25E-07	19	18	37
Ys4-5	10	0.017	180	821	797	1094	547	174	0.22	50	2.31E-07	19	18	37
QR5	6	0.009	329	844	837	1013	506	161	0.36	50	4.99E-08	8	8	17
FA2bis	10	0.027	229	855	843	230	115	36	0.37	50	5.11E-07	14	12	25
FTA2	10	0.013	150	810	802	1282	641	204	0.26	50	2.00E-07	19	18	37
CT	10	0.017	155	774	768	1277	638	203	0.18	50	2.81E-07	23	22	44
Ys5	10	0.023	95	815	812	286	143	45	0.22	50	1.67e-06	29	22	51
Q5-6	15	0.012	114	811	804	2172	1086	346	0.34	50	1.78E-07	23	21	46
Ys4	10	0.010	171	833	808	685	342	109	0.22	50	8.50E-08	11	10	21
AC2	12	0.018	82.	773	768	1663	831	265	0.36	50	2.42E-07	24	23	47
FTA3	8	0.009	200	806	797	1024	512	163	0.39	50	1.00E-07	12	10	24

Q = débit prélevé au niveau du forage (l/s)

K= perméabilité ($\times 10^{-3}$ m/s) au niveau du forage

e = épaisseur de la zone saturée (m)

h₁ = charge hydraulique amont (m)

h₂ = charge hydraulique aval (m)

B = largeur maximale de la zone d'alimentation (m)

B' = largeur de la zone d'alimentation à la hauteur du forage (m)

X₀ = limite avale de la zone d'alimentation du forage (m)

n_e = porosité effective

t = temps d'atténuation du polluant (jours)

V_e = vitesse effective (m/s)

D_m = limite amont du périmètre de protection rapprochée (m)

D_v = limite avale du périmètre de protection rapprochée (m)

- Conclusion :

La délimitation des zones de protection rapprochée et éloignée pour les différents champs captant dans la nappe alluviale de Tebessa-Morsott en se basant sur plusieurs méthodes, constitue l'unique moyen pour la sauvegarde de la qualité naturelle de l'eau produite.

Qu'elle que soit la méthode utilisée et les résultats obtenus, une distance minimale de 100 m devra séparer les périmètres de protection rapprochée des forages exploitant les zones vulnérables à la pollution. Ceci, afin d'assurer une protection maximale de ces captages contre la pollution.

Conclusion générale et perspectives

1. Conclusions générales:

Ce travail a été réalisé en zone semi-aride et concerne la nappe alluviale de Tebessa-Morsott (extrême Nord-Est Algérien).

L'étude géologique de la plaine consiste en une synthèse des travaux déjà réalisés. La structure faillée confirmée par la géophysique et les logs stratigraphiques des forages, montre que les bordures sont affectées par une série de failles importantes provoquant l'affaissement de toute la plaine créant ainsi un véritable fossé d'effondrement.

Les formations de calcaires d'âge crétacé constituent les bordures et les formations meubles (argiles, sables et graviers) d'âge Mio-plio-quaternaire siègent au centre et constituent les dépôts de remplissage du bassin d'effondrement.

Une carte regroupant les principaux faciès géologique du bassin d'effondrement de Tebessa-Morsott a été produite à partir des cartes géologiques de Tebessa, Morsott et Meskiana.

L'étude hydroclimatologique a révélé que le climat est de type semi-aride. Le bilan hydrique établi par la méthode de Thornthwaite, a montré que le bilan est déficitaire dans son ensemble, mais il est excédentaire aux mois de janvier, février et mars. L'infiltration ne laisse percoler que 1% des précipitations, ce qui laisse admettre d'autres sources d'alimentation indirecte de la nappe à travers les bordures.

L'étude hydrogéologique et à travers la géophysique a montré que les sédiments détritiques d'âge Mio-plio-quaternaire sont formés de couches perméables séparées par des écrans étanches. Ainsi est réalisé un complexe aquifère à nappes empilées. Ces sédiments présentent des variations du faciès des bordures vers le centre de la plaine. Ce grano-classement latérale des sédiments constitue un véritable barrage souterrain naturel (seuil hydraulique) pour les eaux en provenance des bordures d'où le comportement artésien de la nappe.

En profondeur, le terrain est conducteur de résistivité 1.5 Ohm.m. La présence de ce terrain pose un problème d'interprétation: s'agit-il d'un terrain réellement conducteur ou d'un niveau résistant dont l'eau est très minéralisée? Il sera résolu que par la réalisation des forages profonds.

La structure onduleuse du substratum a généré quatre fossés au sein même du grand fossé de Tebessa-Morsott: fossé El-Hamamet, Tebessa ville, Bekaria et Morsott dont les caractéristiques hydrodynamiques sont différentes.

La carte piézométrique relative à plusieurs compagnes montre un écoulement compartimenté (d'un fossé à un autre) des eaux souterraines suivant une direction générale Sud-Est/Nord-Ouest.

Des cartes des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère (T, K et porosité totale) sont établies à partir de l'élaboration du modèle de transmissivité. Ce modèle peut être rigoureux pour l'estimation théorique de ces paramètres.

Enfin, pour une étude hydrogéologique détaillée, il faut bien distinguer entre l'hydrogéologie des bordures et du centre de la plaine.

L'étude hydrochimique des eaux des forages, montre que dans le système aquifère d'El-Hamamet, le faciès est sulfaté calcique et magnésique en amont et devient bicarbonaté sodique et calcique à l'exutoire confirmant les apports latéraux à travers les calcaires à ce niveau. Le faciès sulfaté calcique et chloruré sodique caractérise les autres systèmes traduisant l'influence des dépôts alluvionnaires. En se référant aux normes internationales, les eaux captées par les forages sont impropres à la consommation.

Quant aux eaux des puits, la minéralisation de la nappe en éléments majeurs montre que c'est en bordure que les teneurs en Ca, Na et HCO_3 sont les plus élevées et au centre pour les sulfates, les chlorures et les nitrates. La plupart des puits examinés sont caractérisés par une eau du type bicarbonatée calcique ou chloruré calcique. Le faciès bicarbonaté calcique caractérise les eaux des systèmes aquifères de Bakaria et Tebessa confirmant l'influence des apports latéraux à travers les calcaires, et les faciès chlorurés calciques ou sodiques concernent le système aquifère d'El-Hamamet-Ain Chabro et Morsott Ouest.

L'étude de l'origine des fortes teneurs en NO_3^- , F et NH_4 , basée sur l'échantillonnage des puits suggère a priori que la contamination résulte essentiellement de l'épandage des engrais et aux rejets qui sont déversés dans la nappe sans traitement au préalable. Ainsi que, la bonne corrélation linéaire obtenue entre les Cl⁻ et les NO_3^- des eaux des puits semble indiquer une même source de contamination et celle-ci provient de la matière organique d'origine anthropique.

La pollution bactériologique par les coliformes fécaux et totaux du niveau superficiel (eau des puits) de la nappe est très inquiétante et impose une réaction urgente pour rechercher et appliquer les solutions adéquates afin de stériliser les eaux de puits utilisées directement comme eau de boisson par les paysans.

Il existe différentes façons de déterminer la vulnérabilité d'un aquifère, des méthodes indicielles les plus simples aux méthodes plus complexes de modélisation des écoulements souterrains.

L'application de la méthode DRASTIC avec une amélioration dans l'établissement des cartes thématiques, basée sur le principe de discrétisation de la nappe en mailles carrées et régulières, a permis d'identifier les zones à haut risque de contamination et d'aboutir à une cartographie très détaillée du degré de vulnérabilité à la pollution de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott. Deux cartes de vulnérabilité ont été établies, l'une relative aux polluants d'ordre générale et l'autre relative aux pesticides.

Les zones à moyenne et forte vulnérabilité couvrent 39.5% et sont localisées aux bordures et au niveau des zones urbaines de Tebessa ville, Hamamet, Morsott et Boulhef-edyr. Dans ces zones est concentré un très grand nombre de forages de la Direction de l'Hydraulique d'où provient 70% de l'eau potable de Tebessa.

Un échantillonnage d'eau dans ces zones a démontré que la contamination par les nitrates se produit surtout dans les puits de surface, mais aussi dans certains puits profonds, formant des « points chauds » dans l'aquifère. Dans ce sens, ces zones, dès à présent doit être soumise un à contrôle rigoureux pour définir et réaliser les mesures de protection adéquates.

A cet effet, la délimitation des périmètres de protection des captages d'eau souterraine destinés à l'alimentation en eau potable, constitue l'unique moyen pour la sauvegarde de la qualité naturelle de l'eau produite. Les dimensions des périmètres de protection immédiates, rappro-

chées et éloignées des ouvrages de captages ont été déterminées par la combinaison de plusieurs méthodes.

Qu'elle que soit les méthodes utilisées et les résultats obtenus, une distance minimale de 100 m devra séparer les périmètres de protection rapprochée des forages d'A.E.P exploitant les zones vulnérables à la pollution. Ceci, afin d'assurer une protection maximale de ces forages contre la pollution.

A la lumière des résultats obtenus au sujet de la qualité des eaux souterraines de la plaine, nous pouvons dire que les eaux des forages (eaux profondes) sont chimiquement polluées, alors que les eaux des puits (eaux de surfaces) présentent une pollution bactériologique et chimique. Cette pollution est liée au non-respect des conditions d'hygiène publique (collective et industrielle).

Enfin, l'étude que nous avons menée ici, constitue une première base de travail dans un objectif de prendre en charge les actions anthropiques sur la qualité de nos ressources d'approvisionnement en eaux souterraines.

Les deux cartes de vulnérabilité établies, premières du genre, au niveau de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott, ne seront pas seulement utiles pour identifier et délimiter les zones où le risque de contamination est élevé mais aussi pour l'aménagement du territoire et l'examen préliminaire des nouveaux projets à incidence environnementale que le gestionnaire de la ressource en eau pourra consulter en tant qu'outil d'aide à la décision.

2. Perspectives:

Après ce diagnostic concernant les grands problèmes d'hydrogéologie de la plaine de Tebessa-Morsott et dont l'objectif de préserver nos ressources en quantité et qualité, nous allons mettre en relief les propositions suivantes:

- ✚ Il est important d'entreprendre la géologie et l'hydrogéologie de chaque sous bassin et faire une différence nette entre l'hydrogéologie des bordures et du centre de la plaine.
- ✚ Il est important d'entreprendre le bilan hydrique de cette région à fin d'éviter dans le futur un déséquilibre accentué entre les débits sortant et entrant. Cette opération, bien entendu, doit être accompagnée de la réalisation des piézomètres pour un contrôle rigoureux et l'estimation des réserves de la nappe pour une meilleure gestion de notre ressource à moyen, court et long terme.
- ✚ Il est également possible de penser à l'alimentation artificielle à travers oued Bouakous pour aboutir à la restauration de la nappe.
- ✚ Il est important de réglementer, les rejets des eaux industrielles et domestiques, en réduisant les polluants à la source, et chercher une solution à l'aval par l'installation des stations d'épuration des eaux usées.
- ✚ Il est important d'épandre les engrais chimiques avec des doses réglementées de façon à diminuer la contamination des eaux souterraines par les eaux d'irrigation.
- ✚ Il est important de réglementer la décharge des déchets solides et liquides des agglomérations dans des terrains imperméables en tenant compte de l'épaisseur de ces dernières. Le choix de site de ces charges doit tenir compte de l'hydrodynamique de la nappe (sens d'écoulement, profondeur du niveau piézométriqueetc.)

- ✚ La prise au sérieux, le problème de rabattement de la nappe, par la mise en place des piézomètres de contrôle.
- ✚ Encouragée la récupération des déchets solides où leur réutilisation en réduisant ainsi la consommation en matière primaire.
- ✚ Application de modèles mathématiques pour la gestion pluriannuelle des réservoirs, qui permettent de déterminer les fréquences et l'importance des pénuries en fonction d'objectifs de régulation ;
- ✚ Localisation et cartographie informatisée des conduites d'eaux enterrées et des égouts;
- ✚ Recherche et assainissement des fuites d'eau occultes dans les réseaux d'adduction;
- ✚ Application de modèles mathématiques de simulation des réseaux d'eaux et d'égouts, comme outil de support pour la surveillance des fuites des réseaux d'eaux et pour projeter de nouveaux réseaux;
- ✚ Développement d'actions de faisabilité et de projets concernant les modalités de desserte en eau des quartiers périurbains défavorisés;
- ✚ Développement de scénarios et de projets pour une meilleure gestion de la demande en eau.
- ✚ Il est important de développer des approches qui peuvent intégrer l'ensemble des processus (physiques, chimiques, biologiques et hydrodynamiques) influençant la vulnérabilité de l'eau souterraine est souhaitable.
- ✚ Un programme d'Information, d'Education et de Communication en direction de la population pour lui faire acquérir des comportements favorables à la préservation, à la potabilité de l'eau depuis la source d'approvisionnement jusqu'à la consommation de l'eau devient une priorité.
- ✚ Nous recommandons de réserver un poste sur le site Web du Centre Universitaire de Tebessa relatif au suivi de la qualité des eaux souterraines de la plaine.
- ✚ Nous souhaitons, dans l'avenir que toutes les méthodes de vulnérabilités et en particulier celles les plus utilisées seront disponibles sous forme d'un logiciel ce qui facilite leur utilisation et de les faire comparer.

Bibliographie

Dubourdiou G, Durozoy G. (1950) Observations tectoniques dans les environs de Tebessa et d'Ouenza (Algérie). Bull. S.G.F., Paris, (5), XX, 9, p.257-266.

Durozoy G. (1956) Carte géologique au 1/50 000 de Tebessa feuille 206.

Schoeller H. (1962) Les eaux souterraines. Hydrologie dynamique et chimique. Recherche, exploitation et évaluation des ressources. Masson et Cie. Editions, 642p.

Castany G. (1963) Traité pratique des eaux souterraines. Dunod Edit. Paris, 641p.

Poirier (1967) Sondage de reconnaissances, subdivision de Tebessa. Rapport interne, 20p

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.

BRGM (1974) Essai de classification et de cartographie de la qualité chimique des eaux souterraines. Dépt. Orléans, 37p

Cabinet Lepetit (1974) Etude de la mise en valeur de la plaine de Tebessa et de la vallée de l'oued Ksob, 45 p.

Castany G. (1974) Essai de classification et de cartographie de la qualité chimique des eaux souterraines. Dépt. Hydrogéol. Orléans, 50p.

Ricard J. (1975) Recueil des mesures piézométriques sur les points d'eau du système aquifère de Tebessa-Morsott pour les années 1973-74-75, rapport interne.

Ricard J. (1975) Inventaire des points d'eau (puits, sources, forages) du système aquifère de Tebessa-Morsott. Direction d'hydraulique de la W de Tebessa.

Ricard J. (1975) Esquisse de synthèse géophysique, géologique et hydrogéologique de la région. Rapport interne.

Rodier J. (1978) Analyse de l'eau. Dunod Editions 430p.

Strojexport (1978) Prospection géophysique par la méthode électrique dans la plaine de Tebessa, Prague. Opération N° 5.391.1.129.00.01

BRGM (1975-1979) Cartes de vulnérabilité à la contamination des eaux souterraines (FF: 1/250 000). BRGM, Orléans.

Vila, J. M. (1980) La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro-Tunisiens. Thèse de Doctorat d'Etat, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, France, 665 p.

Castany G. (1982) Principes et méthodes d'Hydrogéologie. Dunod Edit. Paris, 334p.

Chihi, L., Dlala, M. and Ben Ayed, M. (1984) Manifestations tectoniques synsédimentaires et polyphasées d'âge Crétacé moyen dans l'Atlas Tunisien central (région de Kasserine). Comptes Rendues de l'Académie des Sciences, Paris, t. 298, Série II, N° 4, pp. 141-146.

Hemila M.L (1984) Etude des possibilités aquifères du bassin d'effondrement de Tebessa. Mémoire d'Ing, Université d'Annaba, 100p.

Kherici N. (1985) Aquifère sableux de bord de mer. Hydrochimie et Hydrodynamique. Exemple de la nappe de Bouteldja. Thèse Doctorat 3^{ème} Cycle.

Aller L, Truman B., Lehr J.H., Rebcca J.P. (1985) DRASTIC: A standardized system for evaluating pollution potential using Hydrogeologic Settings, EPA, 600/2/85/018, 227 p.

Kazi-Tani, N. (1986) Evolution géodynamique de la bordure nord-africaine: le domaine inter-plaque Nord-Algérien. Approche méga séquentielle. Thèse Doctorat ès Sciences, Université de Pau et des Pays de l'Adoure, 2 tomes.

Djabri L. (1987) Contribution à l'étude hydrogéologique de la nappe alluviale de la plaine d'effondrement de Tebessa – Essai de modélisation. Thèse de Doc. Ing., Université des Sciences et Technologie de Franche-Comté, Besonçon, France, 170p.

Zerdazi A. (1990) Etude gravimétrique de la mole d'Ain M' lila et de L'Atlas Saharien septentrional oriental (NE de l'Algérie). Thèse de Doctorat es Sciences. Univ.de Lausanne, 227 p.

Maalet T. (1991) Synthèse des données mensuelles de la nappe alluviale de la plaine d'effondrement de Tebessa. Mémoire d'Ing., Université d'Annaba, 77p.

Champagne L.R, Chapuis P. (1993)- Evaluation de la vulnérabilité à la pollution des formations aquifères de la MRC de MONTCALM selon la méthode DRASTIC. Rev.Sc. de Tech de l'eau. Vol.26 (3).

Kherici N. (1993) Vulnérabilité à la pollution chimique des eaux souterraines d'un système de nappes superposées en milieu industriel et agricole (Annaba-la Mafragh). Thèse doctorat d'Etat es science. Université d'Annaba.

Suais M.F., Dubar C. (1993) Carte de vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution et du risque de propagation de la pollution dans les nappes. Feuille de Lyon 1/50 000. Actualisation des données et cartographies multicritères. Rapport BRGM R37 929 SGR 94, Décembre 1993.

El Meslouhi et al (1994) Elaboration de la vulnérabilité moyennant la méthode DRASTIC et le système d'information géographique (SIG) (cas de la nappe de Sousse-Chtouka) Guide book on mapping Groundwater Vulnerability. Volume n°16 Ed. De l'IAH, PP. 94-99.

Vrba & zaporozec, Ed. (1995) Guidebook on mapping groundwater vulnerability. IAH, Int. Contrib.to hydrogeol., 19(1994), Heise, Hannover, 131 p.

Bouchagoura et al. (1996) Synthèse hydrogéologique du système alluviale Hamamet-Tebessa-Bekaria, mémoire d'Ing. Université d'Annaba, 84p.

Boufaa K. et al. (1996) Les sédiments Miocènes des environs de Tebessa (NE de l'Algérie) et leur relation avec la tectonique. *Bull Soc.Hist.Nat. Pays de Monbéliard France*.

Guefaifia O. (1996) Contribution à l'étude hydrogéologique de la nappe aquifère d'EL-Maalbiod. Thèse de Magistère. Univ. Annaba, 143p.

Houha B. (1996) Quantité et qualité des eaux souterraines de la région de Khenchela (Garet Traef). Thèse de Magister, Université d'Annaba, 114p.

BRGM (1997) Interprétation des pompages d'essai pour l'évaluation des paramètres des aquifères. Dépt. Hydrogéol. Orléans, 50p.

Djabri L. (1997) Synthèse des données géophysiques et hydrogéologiques de la nappe de Tebessa. Rapport interne.

Kowalski W.M. (1997) Les stades d'effondrement du graben de Tebessa (confins Algéro-Tunisien) et la tectonique pllicative plio-quaternaire. Bull. Soc. Hist. Nat. Pays de Monbéliard, France.

Abu-Jaber N. (1997) Geochemistry and pollution of shallow aquifers in the Mafraq area, North Jordan. *Environmental Geology* 37 (1-2) January 1999.

Lyakhloufi S, Er-Rouane S, Ouazzani N, El Hebil A (1999). Vulnérabilité et risque de pollution de la nappe phréatique du Haouz de Marrakech (Maroc). *Hydrogéologie*, N°3, pp. 43-52, 9 fig.

Yadav G. S., Abolfazli H., 1998. Geoelectrical soundings and their relationship to hydraulic parameters in semiarid regions of Jalore, Northwestern India. *J. of Applied Geoph.*, 39 (1), 35-51.

BRGM (2000) Gestion des sites (potentiellement pollués). Version 2. Edition BRGM

Gouaidia L. (2000) Approche hydrochimique d'une nappe en zone semi-aride. Cas de la nappe alluviale de Tebessa, extrême NE Algérien. Thèse de Magister, Université Badji Mokhtar Annaba, 88p.

Boutaleb S (2000) Impact de la géologie et du climat des bassins versants sur la qualité des eaux d'une grande nappe alluviale en climat semi-aride: application aux relations hydrogéologiques entre haut-atlas et la plaine de Sousse. Thèse de doctorat Université Ibnou Zohr Agadir, 146p.

Menani M.R (2001) Evaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution de l'aquifère alluvionnaire de la plaine d'El Madher, Nord-Est algérien, selon la méthode DRASTIC. *Science et changements planétaires / Sécheresse*. Vol. 12, Numéro 2, Juin 2001 : 95-101, Notes originales

Gramip (2002) Localisation des zones à risques vis-à-vis du transfert des substances phytosanitaires vers les eaux superficielles et souterraines en Midi-Pyrénées: Méthodologie de travail, 32p.

Surfer (2002) Surface mapping system. Version 8.01. Surface mapping system, Golden Software Inc.

Zabet T.A.I. (2002) Evaluation of aquifer vulnerability to contamination potential using the DRASTIC method. *Env. Geol* (2002) 43: 203-208, DOI: 10.1007/s00254-002-0645-5

BRGM (2003) Carte de vulnérabilité intrinsèque des nappes du département de l'Eure-et-Loir, échelle(1/100 000), 13p.

Djabri L. Hani A. Laouar R. (2004) The Effects of The Exceptional Heavy Rainfall on The Alluvial Nappe of Tebessa, NE Algeria. BALWOIS Ohrid, FY Republic of Macedonia.

Aptitude des eaux de la vallée de la Seybouse à l'irrigation (Nord-Est algérien) (Aptitude of the Seybouse river valley waters to irrigation (North-East Algeria))

Derradji Fadel; Kherici Nacer ; Romeo Michèle ; Caruba Raoul (2004) Aptitude des eaux de la vallée de la Seybouse à l'irrigation (Nord-Est algérien) (Aptitude of the Seybouse river valley waters to irrigation (North-East Algeria)). Sécheresse, vol. 15, n°4, pp. 353-360.

S. A. Mathias, A. P. Butler, T. C. Atkinson, S. Kachi, and R. S. Ward (2006) A parameter identifiability study of two chalk tracer tests. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 3, 2437–2471, 2006

Rouabhia A. (2006) Vulnérabilité et risques de pollution des eaux souterraines de la nappe des sables Miocènes de la plaine d'El ma El Abiod (Nord-Est Algérien). Thèse de doctorat, Université d'Annaba, 159p.