

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار- عنابة

Faculté des sciences de la Terre
Département de Géologie

Année 2008

Thèse

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en sciences

Option

Hydrogéologie

Par

GOUAIDIA Layachi

(Ingénieur d'Etat en Hydrogéologie. Magister en Chimie et environnement)

**INFLUENCE DE LA LITHOLOGIE ET DES CONDITIONS
CLIMATIQUES SUR LA VARIATION DES PARAMETRES
PHYSICO –CHIMIQUES DES EAUX D'UNE NAPPE EN
ZONE SEMI ARIDE, CAS DE LA NAPPE DE MESKIANA
NORD-EST ALGERIEN.**

DEVANT LE JURY

PRESIDENT :
RAPPORTEUR :

Pr DJABRI L.
Pr BOUDOUKHA A.

Université de Annaba
Université de Batna

EXAMINATEURS :

Pr HANI A.
Dr CHAFAAI H.
Dr HEMILA M.L.
Dr CHABOUR N.

Université de Annaba
Université de Annaba
C.Univ. de Tébessa
Université de Constantine

RESUME :

La plaine de Meskiana possède actuellement des ressources hydriques relativement limitées, à savoir uniquement les eaux souterraines de la nappe Mio-Plio-Quaternaire. Ces dernières années, un essor économique, particulièrement agricole, a eu lieu, ce qui a entraîné, d'une part, l'accroissement des besoins en eaux et a provoqué, d'autre part, la dégradation de la qualité des eaux.

Le choix de ce thème de recherche a été guidé par le souci de mieux comprendre les mécanismes de fonctionnement de cette nappe, depuis ses conditions aux limites jusqu'à ses caractéristiques hydrodynamiques et physico-chimiques, ainsi que les questions d'ordre environnemental, à savoir la présence de polluants et leurs origines.

Suite à l'analyse de la situation actuelle de la nappe et de son environnement, un programme d'action a été conçu pour mener un suivi des variations, en fonction de la lithologie et des facteurs climatiques. Nous avons ainsi pu étudier l'évolution des paramètres hydrodynamiques et physico-chimiques au cours de plusieurs campagnes (depuis mars 2002 jusqu'à novembre 2005).

Le traitement et la représentation des données ont fait appel à l'usage d'outils modernes : analyse statistique (ACP), cartographie et graphisme automatique, ainsi que la géostatistique.

L'interprétation de ces données a révélé ce qui suit :

- La nappe alluviale de Meskiana est constituée par des alluvions sableuses, gréseuses et conglomératiques, avec des passages argileux. Ses limites nord-orientales chevauchent des formations diapiriques. Elle est alimentée principalement à partir des formations carbonatées de bordures.
- La qualité chimique de l'eau est médiocre, résultant d'une forte salinité influencée par la lithologie de la nappe et les facteurs climatiques (les précipitations et les températures). On note la présence de quelques polluants, tirant leurs origines des activités agricoles et des rejets urbains

In fine, les résultats issus de cette étude concordent donc parfaitement avec les questions évoquées dans la problématique de départ.

ABSTRACT:

Meskiana plain, whose current hydrous resources are relatively limited consist of underground water of the Mio-Plio-Quaternary aquifer. In recent years a high level of water demand was felt due to remarkable increase water for agriculture use. On one hand, this has induced a shortage of water and a deterioration of its quality on the other.

This research project comes to shed more light on the way the aquifer system works, i.e its boundary conditions, influence of the lithological parameters and the hydrodynamic and physico-chemical parameters. This has been carried out through several field excursions between Mars 2002 and November 2005.

Data analysis and graphical representation were done using statistical methods such as principal component analysis by way of modern statistical softwares (WATEC, Diagrams and Surfur version 8).

Data interpretation and analysis has revealed the following:

- Meskiana alluvial aquifer is mainly composed of sandy, sandstone and conglomeratic materials with some passages of relatively thin clay layers. It is limited to the north east by diapiric formations. The most important part of it's recharge comes from the carbonate formations of the borders.
- The chemical quality of water is poor resulting from the strong salinity influenced by the lithology of the aquifer and the climatic factors (precipitations and the temperatures). Pollutants originating from agricultural activities and urban wastes are also present.

The results obtained from this study agree perfectly with the questions raised in the proposal.

ملخص:

عرف سهل مسكيانة خلال السنوات الأخيرة نموا اقتصاديا ملحوظا، خاصة في قطاع الفلاحة، إلا أن مصادر المياه الحالية و المتمثلة في المياه الجوفية تعتبر جد محدودة و ذلك راجع لتزايد الطلب على هذه المادة الحيوية كما أن هذه النشاطات الفلاحية ساهمت بقدر كبير في تدني نوعية هذه المياه.

إن الاختيار لموضوع البحث هذا كان من أجل توضيح آليات اشتغال مائدة المياه الجوفية لسهل مسكيانة منذ حدودها إلى خصائصها الهيدروديناميكية و الفيزيوكيميائية الناتجة عن العوامل المناخية و نوعية التربة. كما تمت دراسة الجانب البيئي المتمثل في درجة تلوث تلك المياه و الكشف عن مصادر هذا التلوث.

بعد معاينة و تحليل الحالة الحالية للمياه الجوفية وكذا درجة تلوثها تم تحديد برنامج عمل من أجل متابعة و مراقبة تغيرات الخصائص الهيدروديناميكية و الفيزيوكيميائية. تلك المتابعة استمرت من شهر مارس 2002 إلى غاية شهر نوفمبر 2005. إن معالجة و تمثيل المعطيات تطلب استعمال وسائل و برامج معلوماتية حديثة مثل التحليل الإحصائي و الرسم الآلي للخرائط و الأشكال حيث أظهرت نتائج تحليل تلك المعطيات ما يلي:

- إن وجود الصخور الكلسية الغنية بالمياه على حافة سهل مسكيانة يساهم بقسط كبير في تغذية المياه الجوفية.
 - تتكون مائدة المياه الجوفية لسهل مسكيانة من الطمي الرملي الحصى مع بعض الطبقات الصلصالية، حدودها الشمالية الشرقية تتوضع بجانب بعض الصخور الغنية بالملح مما يؤثر على نوعية المياه.
 - إن نوعية المياه رديئة جدا وذلك لكثرة ملوحتها الناتجة من جهة عن نوعية الصخور وكذا لعوامل المناخية (التبخر و التساقط). كما نذكر بوجود بعض الملوثات التي نتجت عن النشاطات الفلاحية خاصة النترات التي تفوق تراكيزها 100مغ/ل في بغض الأحيان و كذا مصبات المياه المستعملة.
- كما نذكر أن هذه النتائج جاءت متوافقة مع إشكالية موضوع البحث.

REMERCIEMENTS

L'élaboration de cette thèse de doctorat est le fruit de six ans de recherches, alternés avec mes activités pédagogiques d'enseignement au Centre Universitaire de Tébessa. Son achèvement n'aurait pu voir le jour sans la collaboration de nombreuses personnes qu'il m'est agréable de remercier.

Je tiens dans un premier temps à remercier le Pr BOUDOUKHA Abderahmane, qui a accepté de diriger ce travail et a veillé au bon déroulement de ces années, en m'apportant des critiques constructives et des conseils pertinents, et ce suite à l'intérêt qu'il a accordé à mes travaux de recherches.

Toute ma reconnaissance va également à DJABRI Larbi, Professeur au département de Géologie de l'Université de Annaba, qui m'a prodigué encouragements et conseils, tout en me permettant de profiter de ses connaissances. Il a toujours manifesté intérêt et appui à mes travaux.

Je remercie le Dr Salim Hamid, enseignant au département de géologie de l'Université de Damas (Syrie), qui s'est joint au Pr BOUDOUKHA pour encadrer une partie de ce travail. Je lui adresse de sincères remerciements pour son implication dans mes recherches et son aide très précieuse.

Mes vifs remerciements sont adressés au Dr François M., directeur du laboratoire central de chimie à l'Université de Damas pour son bon accueil et les multiples analyses qu'il m'a faites.

Mes remerciements s'adressent au Pr BEN MAMMOU A., Directeur du Laboratoire des ressources minérales et de l'environnement au Département de Géologie de la Faculté des Sciences de Tunis, qui m'a bien accueilli dans son laboratoire et m'a permis de contacter des professeurs de géologie, tels que Mrs BOUHELEL S, TRIKI M. et bien d'autres, avec qui j'ai eu des échanges scientifiques fructueux. Qu'ils soient assurés de ma sincère reconnaissance.

J'ai l'agréable tâche de témoigner ma grande reconnaissance aux différents services techniques auprès desquels j'ai bénéficié d'un aimable appui, notamment ceux qui m'ont facilité l'accès aux données de mesures et à la documentation, en particulier :

- l'antenne de l'A.N.R.H. de Tébessa (particulièrement Mr AGGOUNE Derradji) ;
- la Direction de l'Hydraulique de la Wilaya d'Oum El Bouaghi ;
- la Direction des Services Agricoles de la Wilaya d'Oum El Bouaghi ;
- l'Office National de la Météorologie (station de Tébessa) ;
- la Direction de CERAD (filiale de l'entreprise Ferphos) ;

Mes sincères remerciements s'adressent aux membres du jury qui ont accepté de lire et juger ce travail. Le Pr DJABRI Larbi, qui a bien voulu m'honorer en présidant ce jury, malgré ses énormes préoccupations, de même que le Pr HANI Azzeddine, les Dr HEMILA Mohamed Laid, CHAFFAAI Hichem et CHABOUR Nabil, qui ont bien voulu juger ce travail et enrichir le débat aux côtés du professeur BOUDOUKHA, mon directeur de thèse.

Un grand merci à Mme DJERRAB pour la correction orthographique, qui a permis de faciliter la lecture et l'exploitation de cette thèse.

Je témoigne mon amitié à tous mes collègues de l'Institut des Sciences de la Terre de Tébessa pour les bons moments passés ensemble et les échanges scientifiques.

Avant de terminer, je dois remercier ma famille pour son encouragement, son soutien et sa patience.

Liste des Tableaux

| | | |
|----|---|-----|
| 01 | Caractéristiques morphométriques du bassin versant d'oued Meskiana..... | 03 |
| 02 | Description hydrogéologiques et géophysiques des formations..... | 17 |
| 03 | Inventaire des stations pluviométriques du bassin de Meskiana..... | 20 |
| 04 | Estimation du coefficient mensuel de correction des précipitations..... | 21 |
| 05 | Variation des précipitations au niveau de la station de Meskiana..... | 21 |
| 06 | Indices d'aridité mensuels à la station de Meskiana..... | 24 |
| 07 | Valeurs de l'ETP estimées par la méthode de Turc..... | 30 |
| 08 | Valeurs de l'ETP estimées par la formule de Thornthwaite..... | 31 |
| 09 | Bilan hydrologique moyen à la station de Meskiana, par la méthode de Thornthwaite (1971/1972-2004/2005)..... | 32 |
| 10 | Bilan hydrologique de l'année la plus humide (2002/2003) à la station de .Meskiana, par la méthode de Thornthwaite | 33 |
| 11 | Bilan hydrologique de l'année la plus sèche (1993/1994) à la station de Meskiana, par la méthode de Thornthwaite | 33 |
| 12 | Répartition des précipitations à la station de Meskiana..... | 34 |
| 13 | Estimation des débits instantanés en (m ³ /s) de Oued Meskiana | 35 |
| 14 | Détermination des paramètres hydrodynamiques..... | 47 |
| 15 | Les campagnes d'échantillonnage effectuées durant l'étude | 51 |
| 16 | Variation des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines..... | 52 |
| 17 | Faciès chimiques des eaux souterraines de l'aquifère de Meskiana | 55 |
| 18 | Indices de saturation des minéraux de l'année 2002..... | 86 |
| 19 | Matrice de corrélation entre les variables de l'ACP globale..... | 87 |
| 20 | Evolution des classes d'irrigation selon la méthode de Richards..... | 93 |
| 21 | Evolution des classes d'irrigation selon la méthode de Wilcox..... | 95 |
| 22 | Résultats d'analyse des éléments de la pollution dans la plaine de Meskiana pour les différentes campagnes..... | 99 |
| 23 | Estimation de l'apport annuel en azote à partir de l'élevage..... | 101 |
| 24 | Evolution du nombre de puits dont la teneur en nitrates dépasse la norme de potabilité de l'OMS..... | 102 |
| 25 | Estimation de l'apport annuel en nitrates à partir des eaux usées domestiques | 108 |
| 26 | Classes et notes des sept paramètres DRASTIC | 117 |
| 27 | Poids et propriétés des paramètres DRASTIC..... | 118 |
| 28 | Notation et pondération du paramètre de la profondeur..... | 119 |
| 29 | Notation et pondération du paramètre de la recharge..... | 120 |
| 30 | Notation et pondération du matériau aquifère..... | 121 |
| 31 | Notation et pondération de la nature du sol..... | 121 |
| 32 | Notation et pondération du facteur de la pente..... | 122 |
| 33 | Notation et pondération de la couche vadose..... | 123 |
| 34 | Classes et notations retenues pour la perméabilité..... | 124 |

Liste des Figures

| | | |
|-----|---|----|
| 01 | Situation géographique de la plaine de Meskiana..... | 04 |
| 02 | Carte géologique schématique du bassin d'Oued Meskiana | 06 |
| 03 | Coupes géologiques dans le bassin de Meskiana | 07 |
| 04 | Schéma lithostratigraphique du bassin de Meskiana..... | 11 |
| 05 | Esquisse tectonique de la région de Meskiana..... | 12 |
| 06 | Carte de position des sondages électriques verticaux et des profils | 14 |
| 07a | Coupe géoélectrique du profil B | 16 |
| 07b | Coupes géoélectriques des profils E et H | 16 |
| 08 | Carte isopaque de la nappe de Meskiana..... | 18 |
| 09 | Carte du substratum de la nappe de Meskiana..... | 18 |
| 10 | Application de la loi de double cumul après correction des erreurs..... | 21 |
| 11 | Carte des précipitations annuelles moyennes de l'Est algérien..... | 22 |
| 12 | Courbe ombrothermique de la station de Meskiana..... | 23 |
| 13 | Abaque de l'indice d'aridité annuel de De Martonne | 24 |
| 14 | Abaque de l'Indice d'aridité mensuel de De Martonne | 25 |
| 15 | Climagramme d'Emberger de la station de Meskiana..... | 26 |
| 16 | Carte simplifiée des zones bioclimatiques de l'Est algérien..... | 27 |
| 17 | Evolution de la température moyenne annuelle à la station de Meskiana | 28 |
| 18 | Variation de la température moyenne mensuelle à la station de Meskiana | 28 |
| 19 | Evolution des précipitations annuelles à la station de Meskiana | 29 |
| 20 | Variation des précipitations moyennes mensuelles à la station de Meskiana..... | 29 |
| 21 | L'ETP estimée par différentes méthodes | 31 |
| 22 | Bilan hydrologique moyen à la station de Meskiana, par la méthode de Thorthwaite..... | 34 |
| 23 | Réseau hydrométrique dans le bassin de oued Mellègue..... | 36 |
| 24 | Evolution des débits instantanés de Oued Meskiana | 36 |
| 25 | Evolution des débits instantanés, de Oued Meskiana, en fonction des précipitations..... | 37 |
| 26 | Evolution du coefficient mensuel de débit (CMD) de Oued Meskiana..... | 37 |
| 27 | Carte d'inventaire des points d'eau de la nappe de Meskiana..... | 39 |
| 28 | Carte piézométrique de la nappe de Meskiana, mars 2002..... | 40 |
| 29 | Carte piézométrique de la nappe de Meskiana, juillet 2002..... | 41 |
| 30 | Carte piézométrique de la nappe de Meskiana, mars 2003..... | 41 |
| 31 | Carte piézométrique de la nappe de Meskiana, juillet 2003..... | 42 |
| 32 | Carte piézométrique de la nappe de Meskiana, mars 2004..... | 43 |
| 33 | Carte piézométrique de la nappe de Meskiana, juillet 2004..... | 43 |
| 34 | Carte des conditions aux limites de la nappe de Meskiana..... | 44 |
| 35 | Carte de battement (en m) de la nappe de Meskiana 2002..... | 45 |
| 36 | Carte de battement (en m) de la nappe de Meskiana 2003..... | 46 |
| 37 | Carte de battement (en m) de la nappe de Meskiana 2004..... | 46 |
| 38 | Carte de répartition des perméabilités dans la nappe de Meskiana | 48 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 39 | Carte de répartition des transmissivités dans la nappe de Meskiana | 48 |
| 40 | Carte du réseau des puits échantillonnés..... | 50 |
| 41a | Diagramme de Piper, campagne mars 2002 (amont de la nappe)..... | 57 |
| 41b | Diagramme de Piper, campagne mars 2002 (aval de la nappe)..... | 57 |
| 42a | Diagramme de Piper, campagne juillet 2002 (amont de la nappe)..... | 58 |
| 42b | Diagramme de Piper, campagne juillet 2002 (aval de la nappe)..... | 58 |
| 43a | Diagramme de Piper, campagne mars 2003 (amont de la nappe)..... | 59 |
| 43b | Diagramme de Piper, campagne mars 2003 (aval de la nappe)..... | 59 |
| 44a | Diagramme de Piper, campagne juillet 2003 (amont de la nappe)..... | 61 |
| 44b | Diagramme de Piper, campagne juillet 2003 (aval de la nappe)..... | 61 |
| 45a | Diagramme de Piper, campagne mars 2004(amont de la nappe)..... | 62 |
| 45b | Diagramme de Piper, campagne mars 2004 (aval de la nappe)..... | 62 |
| 46a | Diagramme de Piper, campagne de juillet 2004 (amont de la nappe)..... | 63 |
| 46b | Diagramme de Piper, campagne de juillet 2004(aval de la nappe)..... | 63 |
| 47 | Diagramme de Schoëller- Berkaloff, mars 2002..... | 65 |
| 48 | Diagramme de Schoëller- Berkaloff, juillet 2002..... | 66 |
| 49 | Diagramme de Schoëller- Berkaloff, mars 2003..... | 67 |
| 50 | Diagramme de Schoëller- Berkaloff, juillet 2003..... | 69 |
| 51 | Diagramme de Schoëller- Berkaloff, mars 2004..... | 70 |
| 52 | Diagramme de Schoëller- Berkaloff, juillet 2004..... | 71 |
| 53 | Carte de répartition des faciès chimiques de la nappe de Meskiana..... | 72 |
| 54 | Carte des bicarbonates, mars 2002 (mg/l)..... | 74 |
| 55 | Carte des bicarbonates, juillet 2002 (mg/l)..... | 74 |
| 56 | Carte des chlorures, mars 2002 (mg/l)..... | 75 |
| 57 | Carte des chlorures, juillet 2002 (mg/l)..... | 75 |
| 58 | Carte des sulfates, mars 2002 (mg/l)..... | 76 |
| 59 | Carte des sulfates, juillet 2002 (mg/l)..... | 76 |
| 60 | Carte du calcium, mars 2002 (mg/l)..... | 78 |
| 61 | Carte du calcium, juillet 2002 (mg/l)..... | 78 |
| 62 | Carte du sodium, mars 2002 (mg/l)..... | 79 |
| 63 | Carte du sodium, juillet 2002 (mg/l)..... | 79 |
| 64 | Evolution et distribution des faciès chimiques..... | 80 |
| 65 | Détermination de l'origine du calcium..... | 81 |
| 66 | Détermination de l'origine du sodium..... | 82 |
| 67 | Evolution des anions en fonction de la conductivité électrique..... | 83 |
| 68 | Evolution des chlorures et des sulfates en fonction de la conductivité électrique..... | 84 |
| 69 | Variation de l'indice de saturation des minéraux, mars 2002..... | 85 |
| 70 | Variation de l'indice de saturation des minéraux, juillet..... | 85 |
| 71a | Espace des variables de l'ACP globale..... | 88 |
| 71b | Espace des individus de l'ACP globale..... | 89 |
| 72a | Diagrammes de Richards, 2002, 2003..... | 91 |
| 72b | Diagrammes de Richards, 2004..... | 92 |
| 73 | Carte d'aptitude des eaux à l'irrigation selon la classification de Richards.... | 93 |
| 74a | Diagrammes de Wilcox pour les années 2002 et 2003..... | 94 |
| 74b | Diagrammes de Wilcox pour l'année 2004..... | 95 |
| 75 | Carte d'aptitude des eaux à l'irrigation selon la classification de Wilcox..... | 96 |
| 76 | Inventaire des sources de pollution pour la période de mars 2002..... | 99 |
| 77 | Cycle de l'azote dans le sol, d'après Recous et al. (1997)..... | 100 |
| 78 | Carte des nitrates (mg/l), nappe de Meskiana novembre 2005 | 102 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 79 | Evolution des nitrates en fonction du temps dans la nappe de Meskiana | 103 |
| 80 | Corrélation de la concentration des nitrates avec l'azote du sol..... | 103 |
| 81 | Evolution des nitrates en fonction des nitrites pendant le mois de juillet 2004 | 104 |
| 82 | Evolution des nitrates en fonction de l'ammonium pendant le mois de juillet 2004..... | 104 |
| 83 | Evolution des nitrates en fonction de l'oxygène dissous pendant le mois de juillet 2004..... | 105 |
| 84 | Evolution des nitrates en fonction de la profondeur pendant le mois de juillet 2004..... | 105 |
| 85 | Corrélation de la teneur des nitrates avec celle des phosphates pour la période de décembre 2004..... | 106 |
| 86a | Carte des phosphates (mg/l) de la nappe de Meskiana pour la période de décembre 2004..... | 107 |
| 86b | Carte des phosphates (mg/l) de la nappe de Meskiana pour la période de novembre 2005..... | 107 |
| 87 | Processus de transformation des formes d'azote contenues dans les effluents et déchets, d'après NICOLARDOT.B et all. 2000..... | 109 |
| 88a | Corrélation entre les nitrates et les chlorures pour la période de mars 2002 | 109 |
| 88b | Corrélation entre les nitrates et les chlorures pour la période de juillet 2002 | 109 |
| 88c | Corrélation entre les nitrates et les chlorures pour la période de mars 2003 | 110 |
| 98d | Corrélation entre les nitrates et les chlorures pour la période de mars 2003 | 110 |
| 88e | Corrélation entre les nitrates et les chlorures pour la période de mars 2004 | 110 |
| 88f | Corrélation entre les nitrates et les chlorures pour la période de juillet 2004 | 111 |
| 89 | Carte de répartition du bore (mg/l) pour la période de juillet 2004 | 112 |
| 90a | Carte de répartition du Fer (mg/l) pour la période de juillet 2004 | 112 |
| 90b | Carte de répartition du Fer (mg/l) pour la période décembre 2004 | 113 |
| 91a | Variation du strontium (mg/l) pour la période de juillet 2004..... | 114 |
| 91b | Variation du strontium (mg/l) pour la période de décembre 2004..... | 114 |
| 92 | Relation de la teneur du Sr avec la conductivité juillet 2004 pendant le mois de juillet 2004..... | 115 |
| 93 | Carte de variation du rapport Sr^{2+}/Ca^{2+} pour la période de juillet 2004..... | 115 |
| 94 | Carte des indices de la profondeur de la nappe de Meskiana..... | 119 |
| 95 | Carte de la recharge efficace de la nappe de Meskiana..... | 120 |
| 96 | Carte des matériaux de l'aquifère de Meskiana..... | 121 |
| 97 | Carte des types de sols de la nappe de Meskiana..... | 122 |
| 98 | Carte des pentes topographiques de la nappe de Meskiana..... | 123 |
| 99 | Carte de l'impact de la couche vadose de la nappe de Meskiana..... | 124 |
| 100 | Carte des indices de perméabilités de la nappe de Meskiana..... | 125 |
| 101 | Carte de vulnérabilité à la pollution chimique des eaux souterraines de la nappe de Meskiana..... | 126 |

Table des matières

| | | |
|---------|---|----|
| | INTRODUCTION GENERALE | 01 |
| | Cadre physique du bassin | |
| 1 | Situation géographique..... | 03 |
| 2 | Réseau hydrographique | 03 |
| 3 | Paramètres morphométriques..... | 03 |
| 4 | Activités économiques | 03 |
| | Chapitre I : GEOLOGIE | |
| I.1 | Introduction | 05 |
| I.2 | Description lithostratigraphiques des formations | 05 |
| I.2.1 | TRIAS | 05 |
| I.2.2 | CRETACE | 08 |
| I.2.3 | PALEOGENE..... | 09 |
| I.2.4 | NEOGENE..... | 10 |
| I.2.5 | QUATERNAIRE | 10 |
| I.3 | Hydrogéologie et stratigraphie | 10 |
| I.3.1 | Formations perméables | 10 |
| I.3.2 | Formations imperméables | 10 |
| I.4 | Géomorphologie | 11 |
| I.5 | Aperçu tectonique | 11 |
| I.6 | Conclusion | 13 |
| | Chapitre II : GEOPHYSIQUE | |
| II.1 | Introduction | 14 |
| II.2 | Prospection électrique | 14 |
| II.2.1 | Interprétations des résultats de la prospection électrique..... | 15 |
| II.2.2 | Apport de la prospection électrique..... | 15 |
| II.3 | Apport des forages mécaniques | 15 |
| II.4 | Conclusion | 19 |
| | Chapitre III : HYDROCLIMATOLOGIE | |
| III.1 | Introduction | 20 |
| III.2 | Acquisition et correction des données | 20 |
| III.2.1 | Méthode des rapports | 20 |
| III.3 | Caractérisation du climat..... | 22 |
| III.3.1 | Diagramme ombrothermique | 22 |
| III.3.2 | Indice d'Emmanuel De Martonne..... | 23 |
| III.3.3 | Indice d'aridité mensuel..... | 24 |
| III.3.4 | Climagramme de Louis Emberger | 25 |
| III.3.5 | Indice de Paul Moral..... | 26 |
| III.3.6 | Comparaison des indices climatiques | 26 |
| III.4 | La température | 27 |
| III.4.1 | Variations des températures moyennes annuelles | 27 |
| III.4.2 | Variations de la température moyenne mensuelle..... | 27 |
| III.5 | La pluviométrie | 28 |
| III.5.1 | Variations interannuelles des précipitations..... | 28 |
| III.5.2 | Variations moyennes mensuelles des précipitations..... | 28 |

| | | |
|-----------|---|----|
| III.6 | Estimation de l'évapotranspiration | 29 |
| III.6.1 | Introduction | 29 |
| III.6.2 | Estimation de l'ETP..... | 29 |
| III.6.2.1 | Formule de L.Turc | 29 |
| III.6.2.2 | Formule de Thornthwaite | 30 |
| III.6.2.3 | Discussion des résultats..... | 31 |
| III.6.3 | Estimation de l'ETR..... | 31 |
| III.6.3.1 | Formule de L. Turc..... | 31 |
| III.6.3.2 | Formule de M. Coutagne..... | 32 |
| III.7 | Le bilan hydrologique | 32 |
| III.7.1 | Calcul du bilan hydrique par la méthode de Thornthwaite | 32 |
| III.7.2 | Interprétation du bilan hydrologique..... | 33 |
| III.7.3 | Répartition de l'excédent | 34 |
| III.7.4 | Commentaire sur le bilan hydrologique | 35 |
| III.8 | Les eaux de surface | 35 |
| III.8.1 | Estimation des eaux de surface | 35 |
| III.8.2 | Ecoulement de surface et régime hydrologique | 35 |
| III.9 | Conclusion | 37 |

Chapitre IV : HYDROGEOLOGIE

| | | |
|--------|--|----|
| IV.1 | Introduction | 38 |
| IV.2 | Géométrie de l'aquifère..... | 38 |
| IV.3 | Piézométrie | 38 |
| IV.3.1 | Inventaire des points d'eau | 38 |
| IV.3.2 | Evolution de la piézométrie | 38 |
| IV.3.3 | Carte piézométrique mars 2002 | 39 |
| IV.3.4 | Carte piézométrique juillet 2002..... | 40 |
| IV.3.5 | Carte piézométrique mars 2003..... | 40 |
| IV.3.6 | Carte piézométrique juillet 2003..... | 40 |
| IV.3.7 | Carte piézométrique mars 2004..... | 42 |
| IV.3.8 | Carte piézométrique juillet 2004..... | 42 |
| IV.4 | Les conditions aux limites | 44 |
| IV.5 | Battement de la nappe | 45 |
| IV.6 | Etude des paramètres hydrodynamiques | 45 |
| IV.6.1 | Détermination des paramètres hydrodynamiques de la nappe | 45 |
| IV.6.2 | Répartition spatiale de la perméabilité | 47 |
| IV.6.3 | Répartition spatiale de la transmissivité | 47 |
| IV.7 | Conclusion | 49 |

Chapitre V : HYDROCHIMIE

| | | |
|---------|--|----|
| V.1 | Introduction | 50 |
| V.2 | Echantillonnage et analyse hydrochimique..... | 50 |
| V.2.1 | Moyens et méthodes d'analyse..... | 51 |
| V.2.1.1 | Mesures in situ..... | 51 |
| V.2.1.2 | Analyses aux laboratoires..... | 51 |
| V.3 | Description sommaire des paramètres physico-chimiques | 52 |
| V.3.1 | Paramètres physiques..... | 52 |
| V.3.1.1 | Potentiel d'Hydrogène (pH) | 52 |
| V.3.1.2 | La conductivité électrique (CE) | 52 |
| V.3.2 | Les éléments majeurs..... | 53 |
| V.3.2.1 | Le calcium..... | 53 |
| V.3.2.2 | Le magnésium..... | 53 |

| | | |
|-----------|--|----|
| V.3.2.3 | Le sodium..... | 53 |
| V.3.2.4 | Potassium..... | 53 |
| V.3.2.5 | Les chlorures..... | 54 |
| V.3.2.6 | Les sulfates..... | 54 |
| V.3.2.7 | Les bicarbonates..... | 54 |
| V.4 | Détermination des principaux faciès chimiques..... | 54 |
| V.4.1 | Représentation graphique des faciès hydrochimiques | 55 |
| V.4.1.1 | Diagramme de PIPER..... | 55 |
| V.4.1.1.1 | Période de mars 2002..... | 56 |
| V.4.1.1.2 | Période de juillet 2002..... | 56 |
| V.4.1.1.3 | Période de mars 2003..... | 56 |
| V.4.1.1.4 | Période de juillet 2003..... | 56 |
| V.4.1.1.5 | Période de mars 2004..... | 60 |
| V.4.1.1.6 | Période de juillet 2004..... | 60 |
| V.4.1.2 | Diagramme de SCHOELLER-BERKALOFF..... | 64 |
| V.4.1.2.1 | Période de mars 2002..... | 64 |
| V.4.1.2.2 | Période de juillet 2002..... | 64 |
| V.4.1.2.3 | Période de mars 2003..... | 64 |
| V.4.1.2.4 | Période de juillet 2003..... | 68 |
| V.4.1.2.5 | Période de mars 2004..... | 69 |
| V.4.1.2.6 | Période de juillet 2004..... | 68 |
| V.4.1.3 | Répartition des faciès chimiques..... | 68 |
| V.5 | Cartographie hydrochimique..... | 72 |
| V.5.1 | Cartes des Bicarbonates..... | 72 |
| V.5.2 | Cartes des chlorures..... | 73 |
| V.5.3 | Cartes des sulfates..... | 73 |
| V.5.4 | Cartes du calcium..... | 77 |
| V.5.5 | Cartes du sodium..... | 77 |
| V.6 | Etude de l'origine du chimisme des eaux souterraines | 78 |
| V.6.1 | Faciès caractéristiques | 80 |
| V.6.2 | Origine des éléments chimiques | 81 |
| V.6.2.1 | Les éléments $Ca^{2+} - HCO_3^- - SO_4^{2-}$ | 81 |
| V.6.2.2 | Les éléments $Na^+ - Cl^-$ | 82 |
| V.6.2.3 | Les éléments HCO_3^- , Cl^- et SO_4^{2-} | 83 |
| V.6.2.3 | Les éléments $Cl^- - SO_4^{2-}$ | 84 |
| V.6.3 | Etude de l'acquisition de la minéralisation | 84 |
| V.7.1 | Introduction | 87 |
| V.7.2 | Principe..... | 87 |
| V.7.3 | ACP globale..... | 87 |
| V.7.3.1 | Matrice de corrélation | 87 |
| V.7.3.2 | Analyse de l'espace des variables..... | 88 |
| V.7.3.3 | Analyse de l'espace des individus..... | 88 |
| V.8 | Aptitude des eaux à l'irrigation..... | 89 |
| V.8.1 | Introduction..... | 89 |
| V.8.2 | Caractérisation des eaux pour l'irrigation | 90 |
| V.8.2.1 | Classification des eaux par la méthode de Richards | 90 |
| V.8.2.1.1 | Cartographie d'aptitude des eaux à l'irrigation selon la classification de | |

| | | |
|----------|---|-----|
| | Richards..... | 93 |
| V.8.2.2 | Classification des eaux par la méthode de Wilcox | 94 |
| V.9 | Conclusion | 96 |
| | Chapitre VI : POLLUTION DES EAUX SOUTERRAINES | |
| VI.1 | Introduction | 98 |
| VI.2 | Les principales sources de pollution..... | 98 |
| VI.3 | Impact des activités agricoles | 100 |
| VI.3.1 | Production des nutriments..... | 100 |
| VI.3.1.1 | L'élevage | 100 |
| VI.3.1.2 | Les engrais azotés | 101 |
| VI.3.1.3 | Le fumier | 101 |
| VI.3.2.1 | Répartition spatiale des teneurs en nitrates..... | 101 |
| VI.3.2.2 | Evolution des nitrates dans le temps | 102 |
| VI.3.3 | Origine agricole des nitrates..... | 103 |
| VI.3.4 | Evolution des nitrates en fonction des paramètres physico-chimiques .. | 104 |
| VI.3.4.1 | Relation nitrate-nitrite | 104 |
| VI.3.4.2 | Relation nitrate-ammonium | 104 |
| VI.3.4.3 | Relation nitrate-Oxygène..... | 104 |
| VI.3.4.4 | Relation nitrate-profondeur | 105 |
| VI.3.5 | Les phosphates | 105 |
| VI.4 | L'influence des rejets urbains | 108 |
| VI.4.1 | Apport des nitrates..... | 108 |
| VI.4.2 | Le bore..... | 111 |
| VI.5 | Les métaux lourds | 111 |
| VI.5.1 | Le fer | 111 |
| VI.5.2 | Le strontium..... | 113 |
| VI.5.2.1 | Répartition du strontium | 114 |
| VI.5.2.2 | Le rapport caractéristique Sr^{2+}/Ca^{2+} | 115 |
| VI.6 | Etude de la vulnérabilité de la nappe de Meskiana | 116 |
| VI.6.1 | Introduction | 116 |
| VI.6.2 | Vulnérabilité à la pollution chimique des eaux souterraines | 116 |
| VI.6.3 | Présentation de la méthode DRASTIC..... | 116 |
| VI.6.4 | Validité de la méthode | 118 |
| VI.6.5 | Etablissement de la carte de vulnérabilité de la nappe de Meskiana | 118 |
| VI.6.5.1 | Profondeur de la nappe | 119 |
| VI.6.5.2 | La recharge efficace | 120 |
| VI.6.5.3 | Nature de la zone saturée | 120 |
| VI.6.5.4 | La nature du sol | 121 |
| VI.6.5.5 | La topographie | 122 |
| VI.6.5.6 | Nature de la zone non saturée | 123 |
| VI.6.5.7 | La perméabilité | 124 |
| VI.6.5.8 | Carte de synthèse | 125 |
| VI.6.6 | Conclusion | 127 |
| | CONCLUSION GENERALE et RECOMMANDATIONS | 128 |
| | REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 131 |
| | ANNEXES | |

Liste des abréviations et des paramètres

ALGEO : Algérie Géophysique
ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques
C.G.G : Compagnie Générale de Géophysique
CERAD : Centre des Etudes et de Recherches Appliquées et du Développement
DHW : Direction de l'Hydraulique de la Wilaya
DSA : Direction des Services Agricoles
ELATEX : Entreprise de Laines et de Textiles
INVA : Institut National de la Vulgarisation Agricole
ITGC : Institut Technique des Grandes Cultures
OMS : Organisation Mondiale de la Santé

ACP : Analyse en Composantes Principales
CE : Conductivité électrique ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)
CMD : Coefficient Mensuel de Débit (sans unité)
DA : Déficit Agricole (mm)
Da : Densité apparente du sol
ETP : Evapotranspiration potentielle (mm)
ETR : Evapotranspiration Réelle (mm)
EX : Excédent en eau du sol (mm)
He : Humidité équivalente du sol (%)
I : Infiltration de l'eau dans le sol (mm)
I : Indice d'aridité
I_g : Radiation solaire globale ($\text{cal}/\text{cm}^2/\text{jour}$)
I_{ga} : Radiation maximale théorique
IM: Indice de Moral
K: Perméabilité (m/s)
P : Profondeur de la couche traversée par les racines (cm)
P : Précipitations (mm)
Q₂ : Quotient pluviométrique
Q : Débit d'écoulement (l/s)
R : Distance entre le piézomètre et le forage en (m).
R : Ruissellement (mm)
RFU : Réserve Facilement Utilisable (mm)
S: Coefficient d'emmagasinement (sans unité)
s : Rabatements en (m)
SAR : Sodium Absorption Ratio
T : Transmissivité (m/s^2)
T : Température (°C)
t : Temps écoulé depuis le début du pompage en (secondes) .

INTRODUCTION GENERALE :

L'eau est un élément indispensable à la vie et revêt de l'importance pour d'innombrables activités humaines. L'eau peut être rare à certains endroits, comme les zones arides et semi-arides, ou tout simplement d'une qualité médiocre à d'autres endroits. Il est certain que l'augmentation de la demande en eau pour les activités humaines accentuera les contraintes sur cette ressource. En outre, les facteurs naturels, telle que la sécheresse ou les contraintes géologiques, ont un effet sur l'approvisionnement en eau potable et sa distribution. Il est donc essentiel de quantifier et d'analyser la quantité et la qualité des réserves en eau et de trouver le moyen de gérer cette ressource pour en assurer la durabilité.

Dans ce contexte, la présente étude s'ajoute à de plus anciens travaux de recherche, et ce pour donner un aperçu scientifique sur l'état actuel de la nappe de Meskiana, du point de vue qualitatif et quantitatif. La qualité des eaux de cette région a subi ces dernières années une certaine détérioration, à cause de rejets urbains non contrôlés, de l'utilisation intensive d'engrais chimiques et de fertilisants dans l'agriculture ainsi que de son exploitation désordonnée. Ces éléments modifient le chimisme de l'eau et la rendent impropre aux usages souhaités.

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

C'est dans ce cadre que cette étude a été menée, afin d'analyser la qualité des eaux au niveau de la dite nappe.

Quelques études, déjà réalisées sur la plaine de Meskiana (mémoires d'ingénieur, de Magister et une thèse de Doctorat), ont signalé l'influence de la nature lithologique sur la minéralisation des eaux souterraines. Les facteurs climatiques ont également contribué à la variation de cette minéralisation.

Dans cette étude, nous allons essayer de mieux comprendre l'impact des paramètres climatiques et lithologiques sur la qualité de cette ressource souterraine et d'optimiser l'interprétation des analyses physico-chimiques en utilisant des moyens plus adéquats.

Le programme d'action pour la réalisation de ce travail doit répondre aux préoccupations suivantes :

- Quel est l'état actuel de la qualité chimique des eaux souterraines de la nappe?
- Quels sont les mécanismes physico-chimiques régissant l'évolution des éléments chimiques dans le temps et dans l'espace (influence de la lithologie et des facteurs climatiques sur le chimisme de la nappe)?
- Quels sont les différents polluants chimiques existant dans l'eau ainsi que leurs origines ?

Afin de répondre à ces préoccupations, nous allons adopter la méthodologie suivante :

- Etude du cadre naturel et hydrodynamique en relation avec la qualité chimique.
- Etude des paramètres physiques et chimiques de l'eau.
- Etude des dépendances et relations entre les divers paramètres physico-chimiques de l'eau.
- Etude des mécanismes d'acquisition de la minéralisation des eaux souterraines.
- Etude des polluants et de leurs origines.

Pour concrétiser ce programme de travail, un suivi saisonnier (basses et hautes eaux) de la qualité physico-chimique et piézométrique des eaux souterraines a été réalisé. Ainsi, huit campagnes (depuis mars 2002 jusqu'au mois de novembre 2005) ont été entreprises. Plusieurs outils (géologique, hydrodynamique, chimique, statistique et informatique) ont été utilisés afin de mieux interpréter les données acquises.

Les explications des phénomènes et le détail des résultats seront présentés dans les chapitres qui constituent cette thèse.

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

Le premier expose les caractéristiques physico-géologiques de la plaine.

Le deuxième détaille la géométrie de l'aquifère basée sur la prospection électrique. L'élaboration de cette étude confirmera la disposition des formations géologiques et leur susceptibilité en tant qu'aquifère. A la fin de ce chapitre, on a pu acquérir une vision plus précise sur la géométrie et l'extension des couches qui pourraient être aquifères ainsi que sur leur composition lithologique (qui influe sur le chimisme de la nappe).

Le troisième chapitre regroupe enfin une étude des différents paramètres climatiques, tels que le type de climat, l'évolution des précipitations, l'évolution des températures, l'estimation de l'évaporation et le calcul du bilan hydrologique par la méthode de G.W.Thornthwaite. L'estimation des écoulements de surface de l'Oued Meskiana a également été abordée au cours de ce chapitre.

La seconde partie a été consacrée aux caractéristiques hydrogéologiques (conditions aux limites, piézométrie et paramètres hydrodynamiques de la nappe), à l'évolution et à la répartition des éléments chimiques, ainsi qu'à la détermination des différents polluants qui existent dans les eaux souterraines. Cette partie a été développée dans trois chapitres.

Le quatrième traite de l'hydrogéologie de la nappe, où nous avons abordé les conditions aux limites, la piézométrie, les paramètres hydrodynamiques (Transmissivité, perméabilité).

Le cinquième présente l'évolution des paramètres chimiques dans le temps et dans l'espace en abordant les mécanismes de l'acquisition de la minéralisation des eaux souterraines.

Le sixième concerne l'étude de l'aspect environnemental de la nappe de Meskiana, au niveau de laquelle les différents polluants dégradant la qualité des eaux souterraines ont été déterminés, ainsi que leurs origines. Les mécanismes de leur évolution ont également été abordés. La région d'étude étant à vocation agricole, le cycle de l'azote a été également abordé.

I.CADRE GENERAL

I.1-Situation géographique :

Le bassin de Meskiana s'étend sur une superficie de 1680 km² et se localise au Nord-Est du territoire Algérien, à 80 km de la frontière Algéro-Tunisienne et à 250 km au Sud de la ville de Annaba. Autrement dit, il se situe à mi-chemin entre la mer Méditerranée et le Sahara algérien (figure 01) et fait partie du bassin de l'Oued Mellègue. Plusieurs agglomérations y siègent, à savoir Bellala, Dalâa, Meskiana, Rehia et Zebar, comptant plus de 37000 habitants selon un recensement fait en 1998. Cette population serait estimée à 48000 en 2004.

Les limites géographiques du bassin de Meskiana sont présentées comme suit :

- Limite Nord : Djebel Mesloula, Argoub El Mnachir et Djebel Khannaga ;
- Limite Nord-Ouest : Djebel Chettaya, Djebel Bou Thokhma, et Djebel Ahmar ;
- Limite Nord-Est : Djebel Belkfif ;
- Limite Sud-Est : Djebel Gouriguer, Djebel Es Stih, et Djebel Khemalal ;
- Limite Sud-Ouest : Djebel Boutoukhma et Chott Esbikha.

I.2-Réseau hydrographique :

Le bassin versant de Meskiana est traversé par un seul cours d'eau principal, qui est l'Oued Meskiana. Il est considéré comme un collecteur des eaux de ruissellement qui affluent sur ses deux rives.

Sur la rive droite, les principaux affluents (temporaires) prenant naissance à partir des montagnes et se déversant dans l'Oued Meskiana sont : l'Oued Rbâa, l'Oued Hmadjra, l'Oued Smar El Houd et l'Oued El Mallah.

Sur la rive gauche, on compte l'Oued Djidida et l'Oued Ain Sedjra.

I.3-Paramètres morphométriques :

En se basant sur l'assemblage des cartes topographiques au 1/50000 (Dalâa feuille n°204, Meskiana feuille n°177, El Aouinet feuille n°150, Youkous Les Bains feuille n°205, F'kirina feuille n°176 et Ain Beida feuille n°149), on a pu délimiter le bassin versant de l'Oued Meskiana, dont les caractéristiques morphométriques se résument dans le tableau 1.

Tableau 01 : Caractéristiques morphométriques du bassin versant de l'Oued Meskiana.

| Superficie (km ²) | Périmètre (km) | Indice de compacité | Dénivelé global (m) | Indice de pente de Roche | Longueur du rectangle équivalent (km) | largeur du rectangle équivalent (km) |
|-------------------------------|----------------|---------------------|---------------------|--------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| 1680 | 217.25 | 1.48 | 440 | 0.08 | 89.4 | 18.85 |

I.4-Activités économiques :

La plaine de Meskiana appartient à un domaine sub-saharien, qui bénéficie d'un climat semi-aride à faibles précipitations et par conséquent le développement du couvert végétal est limité. Les agglomérations n'ont été dotées d'aucune infrastructure industrielle, à l'exception d'une usine de laines et textiles actuellement à l'arrêt, alors que l'agriculture et l'élevage se sont bien développés.

En effet, cette région appartient, agro-écologiquement, aux hautes plaines intérieures orientales céréalières, qui ont des microclimats généralement contraignants (hiver froid à très froid, été chaud à très chaud et sec). La pluviosité est généralement limitée et l'eau constitue l'élément clé du système de culture mis en place. Durant les années pluvieuses où l'eau d'irrigation est disponible, on rencontre les cultures maraîchères, les cultures fourragères et les céréales avec un assolement biennal et parfois triennal, alors que durant les années de sécheresse, les cultures maraîchères et fourragères seront réduites et on se contente des céréales pour seulement équilibrer les revenus des agriculteurs.

Ces dernières années, le secteur de l'agriculture et de l'élevage a connu un épanouissement important suite au lancement des programmes de PNDA en 2000 et celui du FNRDA en 2001. Ces programmes ont provoqué l'extension des terres irriguées et multiplié les cycles cultureux.

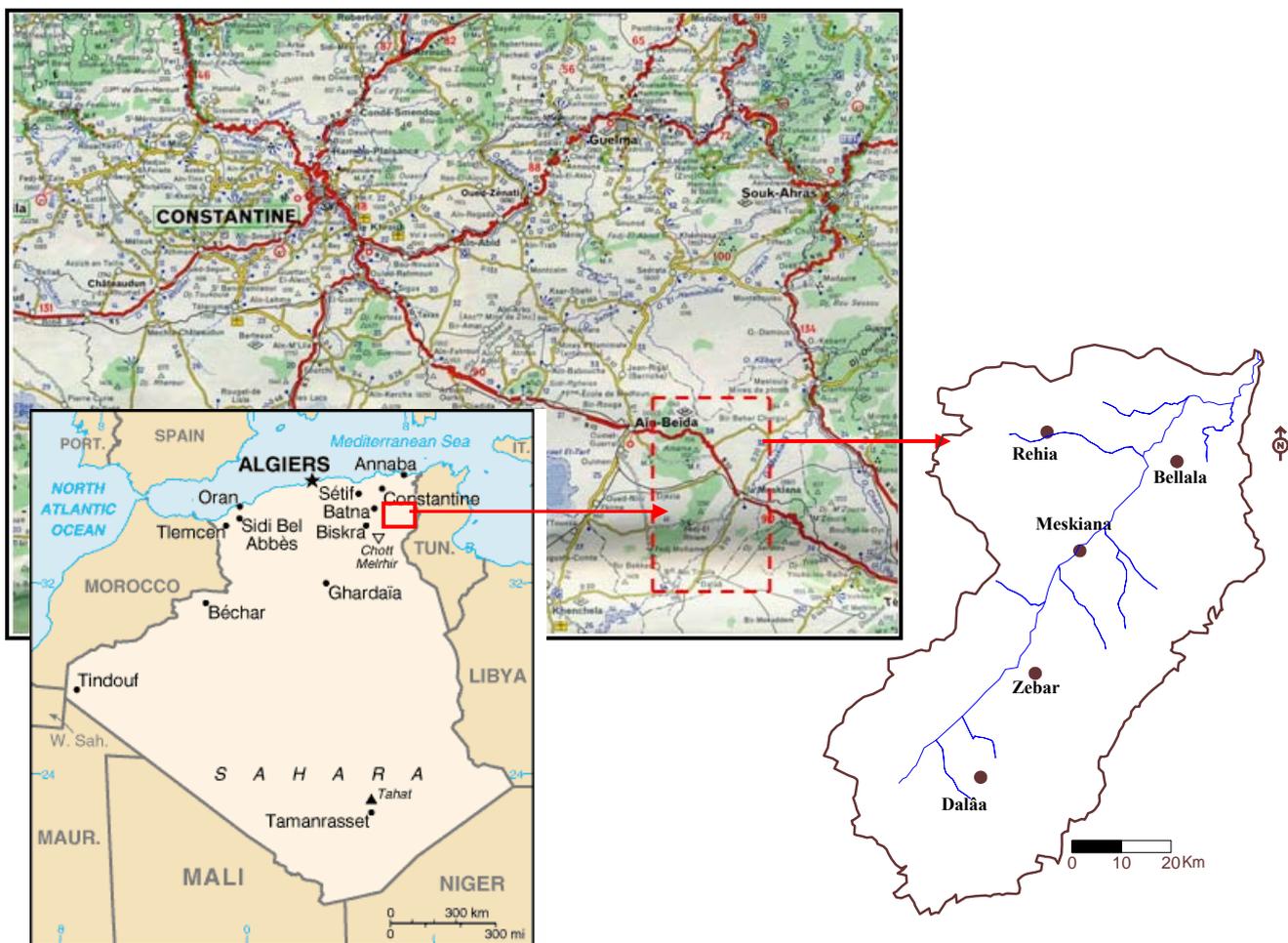


Figure 01 : Situation géographique de la plaine de Meskiana.

Chapitre I :
GEOLOGIE

I.1. INTRODUCTION :

La géologie du bassin de Meskiana a été étudiée en se référant aux anciens travaux géologiques, réalisés par de nombreux géologues chercheurs tels que : M.G.BETIER *et al.* (1951), qui ont réalisé la carte géologique de l'Algérie au 1/500.000.00, J.M. VILA (1977) qui a réalisé la carte de Dalâa, la carte de F'Kirina, la carte d'Ain Beida au 1/50000, D. KUSCER *et al.* (1985), qui ont réalisé la carte de Meskiana au 1/50000 et S.DOZET (1985), qui a réalisé la carte d'El Aouinet au 1/50000. La zone Nord-Est, qui fait partie de la carte de Youks-Les Bains, a été cartographiée par W.M. KOWALSKI (2002).

Ces travaux sur le bassin de Meskiana ont montré qu'il s'agit des terrains sédimentaires autochtones Nord-Aurésiens (J.M. VILA, 1980) qui se trouvent dans la partie orientale des hautes plaines constantinoises. Ces formations sont constituées de :

- Terrains anciens représentés par le Trias à faciès lagunaire, apparaissant en diapirs ;
- Très importantes assises d'âge créacé (Aptien et Maestrichtien) formées de marnes et de calcaires ;
- Des grès et des calcaires gréseux marins formant la base du Miocène ;
- Divers recouvrements continentaux représentant le Mio-Plio-Quaternaire.

I.2 DESCRIPTION LITHOLOGIQUE DES FORMATIONS :

Deux grands ensembles représentent la lithostratigraphie du bassin de Meskiana :

-Le premier est constitué essentiellement par les formations créacées et tertiaires qui affleurent dans les bordures ;

-Le second est formé, en général, par un recouvrement Mio-Plio-Quaternaire qui se dépose dans la plaine (figure 02).

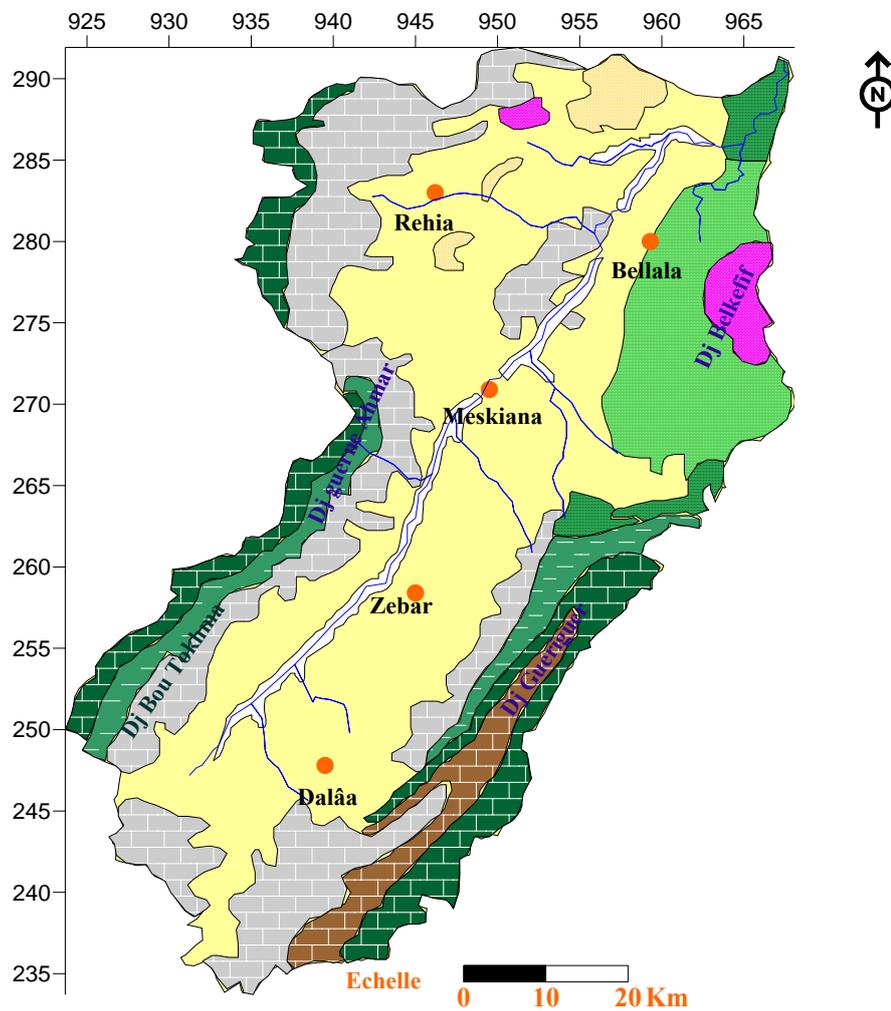
Ces deux ensembles constituent une série stratigraphique complète que nous allons décrire ci- après :

I.2.1 TRIAS :

Le Trias est représenté par des masses chaotiques sans stratification (J.M. VILA, 1977), dans lesquelles divers éléments sont reconnaissables tels que des cargneules jaunâtres, des dolomies noires, des calcaires, des gypses marneux et fibreux. Tous ces éléments sont couverts par des argilites vertes, marquant ainsi le Trias du constantinois. Ces roches triasiques forment des diapirs, qui sont partout en contact anormal avec les couches plus récentes. :

-Au Nord, à proximité d'El Aouinet, au niveau de Mesloulâ, Argoub Ez Zitoun et Argoub El Houra, le Trias se trouve en contact anormal avec les récifs albo-aptiens.

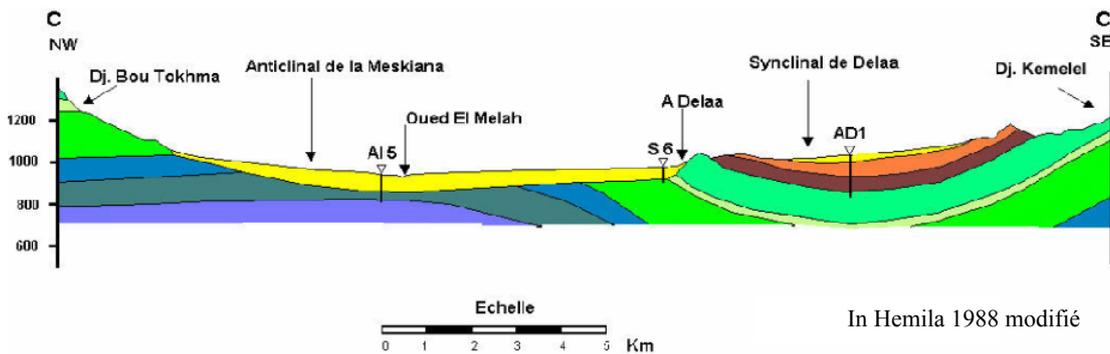
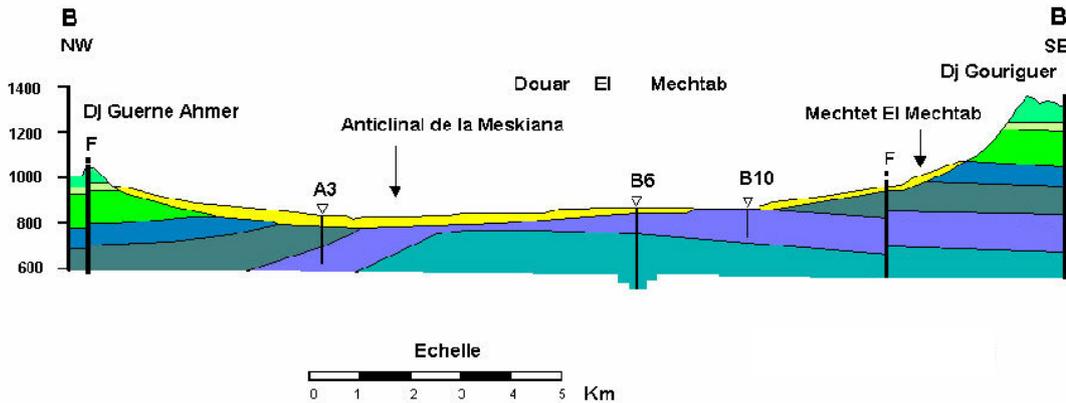
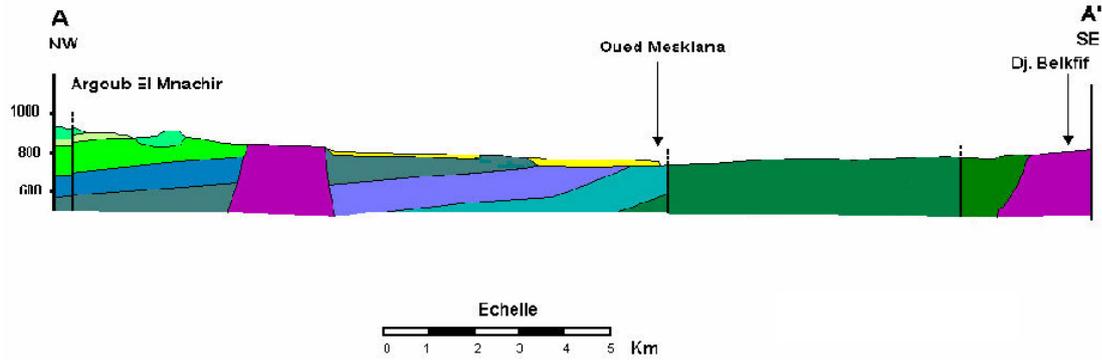
-Au Nord-Est (Djebel Belkefif), le Trias est en contact anormal avec les mêmes récifs et également avec le Cénomaniens et le Turonien (figure 03, coupe AA).



Légende

- Alluvions actuelles : Gravier et limon gris fin.
- Glacis polygéniques : Croûte rosâtre feuilletée.
- Villafranchien : Croûte calcaire blanchâtre.
- Miocène inf. Grès blanc grossier riche en quartz.
- Yéprésien-Thanétiens-Montien : Micrite, biomicrite et marne verdâtre.

Figure 02: Carte géologique schématique du bassin de l'Oued Meskiana.



In Hemila 1988 modifié

Légende:

- Quaternaire** : Alluvions actuelles et récentes.
- Miocène** : Grès blancs grossiers à quartz.
- Thanétien-Yprésien** : Alternance de micrite et de biomicrite blanchâtres.
- Maestrichtien sup** : Calcaire noduleux à Inocérame.
- Maestrichtien inf** : Marne grise à beige
- Campanien** : Marnes argileuses surmontant des marno-calcaires.
- Santonien** : Marnes grises à rare intercalation de marno-calcaires.

- Forage hydraulique
- Faille
- Contact stratigraphique
- Coniacien** : Marnes grises et alternance de marnes beiges avec des calcaires.
- Turonien moy** : Marnes argileuses et calcaire.
- Turonien inf** : Marnes grises et marno-calcaire.
- Cénomanién** : Marnes argileuses et calcaire.
- Aptien** : Marno-calcaires et marnes argileuses
- Trias** : Cargneule, gypse marneux, dolomie et grès.

Figure 03 : Coupes géologiques dans le bassin de Meskiana.

I.2.2 CRETACE :

I.2.2.1 Aptien :

Il s'agit de formations de dimensions assez réduites affleurant au Nord, qui sont en contact anormal avec des pointements triasiques, au niveau de Mesloula, Djebel Belkefif, Argoub Ez Zitoun et Kodiat El Hadjel. Ces formations sont représentées par des assises carbonatées qui sont recouvertes par le Miocène (figure 3, coupe AA').

Les formations aptiennes comprennent deux faciès, le premier marno-calcaro-gréseux et le second à calcaires récifaux (DOZET, 1985). Dans le premier faciès, on rencontre des marnes jaunâtres et verdâtres, des calcaires gris à orbitolines et des grès quartzeux jaunes. On distingue la partie sous récifale qui se dispose au dessous des calcaires récifaux et la partie post-récifale qui se trouve au dessus des calcaires récifaux. Les couches de l'Aptien sous récifal ne sont nulle part entièrement exposées. Les couches de l'Aptien post récifal de Mzouzia ont une puissance de 55 m.

Le faciès des calcaires récifaux comprend des calcaires gris à grains fins, des calcaires à Huîtres, des calcaires à orbitolines, des calcaires coralliaires, des calcaires bréchiques, des calcaires oolithiques et des dolomies. La puissance des calcaires récifaux est de 10 m à 180 m.

Les fossiles les plus rencontrés dans l'Aptien sont les huîtres, divers lamellibranches, des gastéropodes, des ammonites et des coraux

I.2.2.2 Albien et Cénomaniens inférieurs :

Ces formations sont observées au Djebel Belkefif et à Mesloula avec des épaisseurs très réduites, n'excédant pas 100 m. Ces formations sont représentées par des calcaires noirs en plaquettes renfermant de nombreuses bélemnites et des intercalations de marnes argileuses gris foncées à noires (DOZET, 1985).

I.2.2.3 Cénomaniens moyens et supérieurs :

Cet étage se présente à la limite Nord-Est de la plaine (région de Bellala), sous forme d'une série très puissante dont l'épaisseur varie de 600 m à 1000 m. Cette série est formée de marnes argileuses gris verdâtres et jaunâtres à plaquettes de calcite fibreuse. Elle comprend également des intercalations de marnes grises et gris claires et des marno-calcaires. Les plaquettes de calcite ont des empreintes d'oursins, et d'inocérames à leur surface.

La présence des foraminifères caractérise le Cénomaniens inférieurs. La partie supérieure des couches cénomaniennes renferme des lumachelles, des huîtres, des lamellibranches, des gastéropodes, des oursins et des ammonites.

I.2.2.4 Turonien :

Il est observé au Nord-Est à Douar El Machtab et il est représenté par :

-Turonien basal : est formé d'une série épaisse de marnes grises, des marnes calcaires en plaquettes, des marno-calcaires, des calcaires marneux brunâtres avec une épaisseur pouvant atteindre 270 m (figure 3, coupe BB'). Dans les marnes calcaires et les calcaires marneux, de nombreuses empreintes d'inocérames ont été déterminées. Les marnes argileuses renferment de grosses globigérines.

-Turonien moyen et supérieur: sont représentés par des marnes beiges à grises, qui alternent avec des calcaires zoogènes noduleux.

I.2.2.5 Emschérien (Coniacien – Santonien) :

Le long des bordures Est et Ouest, l'Emschérien se présente sous forme d'une épaisse assise de marnes argileuses verdâtres à calcite fibreuse et des intercalations de marnes grises et de calcaires marneux. Nous constatons que les couches du Coniacien, du Santonien et de la

partie basale du Campanien représentent du point de vue lithologique un complexe homogène sans repères.

- Le Coniacien est formé par des alternances de marnes beiges ou grises et des calcaires gris biodétritiques et grumeleux. L'épaisseur du Coniacien est de 90 m (figure3, coupe CC').

- Le Santonien se compose de marnes grises et de calcaires marneux à inocérames, avec une épaisseur d'environ 100 m.

I.2.2.6 Campanien :

Il affleure sur les deux bordures occidentale, à Djebel Bou Thokma, et orientale, à Djebel Gourigueur.

- Le Campanien inférieur : à sa base, on rencontre une unité lithologique de couches marneuses composées essentiellement de marnes argileuses. Cette dernière est d'une puissance de 100 m. Le sommet du Campanien inférieur est représenté par une unité lithologique la plus caractéristique et la plus marquante du Campanien, qui se compose de calcaires crayeux gris et biomicrites, bien stratifiée avec de nombreuses intercalations de marnes. Des empreintes d'inocérames sont renfermées dans ces calcaires et ces marnes. Les couches constituant le sommet du Campanien inférieur ont une épaisseur qui varie entre 45 m et 100 m.

- Le Campanien supérieur : dans la partie inférieure, sur une puissance de 25 m, alternent des couches de marnes calcaires et de marnes. Ces dernières sont surmontées par une série d'environ 130 m d'épaisseur constituée de marnes argileuses gris verdâtres

I.2.2.7 Maestrichtien :

Les calcaires maestrichtiens forment les monts du Djebel Gourigueur, Djebel Bou Tokhma et Djebel Garne Lahmar. Ces calcaires sont gris clairs, crayeux, stratifiés et contiennent assez souvent des rognons et des intercalations de silex.

- Le Maestrichtien inférieur est marqué par une dominance marneuse : Ce sont des marnes gris-beiges, suivies de marnes beiges et de biomicrites argileuses, en bancs décimétriques. La série ne dépasse pas 40 m d'épaisseur.

- Le Maestrichtien supérieur est représenté par une formation calcaire de 40 m de biomicrosparites grises surmontée par 40 m de biomicrites. Signalons que l'épaisseur du Maestrichtien à Djebel Gourigueur est de l'ordre de 460 m.

I.2.3 PALEOGENE

I.2.3.1 Paléocène :

Il est observé seulement à la limite orientale, entre Djebel Guerigueur et Djebel Serdies. Il est représenté par une série de 50 m de puissance, constituée de marnes gris foncées qui sont parfois argileuses.

I.2.3.2 Eocène :

Il a été reconnu sur les flancs Est et Ouest du vaste anticlinal de Meskiana, notamment à Djebel Gourigueur et au synclinal de Ain Dalâa. Il est caractérisé par :

-des formations montiennes, constituant la base de l'Eocène, se composant de marnes gris verdâtres ;

- des formations thanétio-yprésiennes qui se disposent au dessus des formations précédentes. Elles se composent d'alternances de marnes gris beiges et de biomicrites finement gréseuses et noduleuses et en bancs décimétriques. Ces dernières sont surmontées par des alternances de micrites blanchâtres à nodules phosphatés et de biomicrites interclastiques en bancs métriques ou décimétriques à grains phosphatés et renferment des gastéropodes et des lumachelles. L'épaisseur des couches thanétio-yprésiennes est d'environ 200 m.

I.2.4 NEOGENE :

I.2.4.1 Miocène :

Les affleurements du Miocène sont de dimensions réduites et se répartissent dans la partie Nord de la plaine surtout à Mesloulâ, Argoub El Manchar, Argoub Ez Zitoun, Kodiat El Agab, Kodiat Rehia et Kodiat Naga.

-Le Miocène inférieur est représenté par des conglomérats avec des galets de calcaires maestrichtiens à ciment sableux. Dans ce ciment, il y a de nombreuses coquilles d'huîtres.

-Le Miocène supérieur est représenté par le Tortonien qui affleure particulièrement à Kodiat Mami. Il est marqué par une série de couches épaisses, constituées de grès quartzeux mal cimenté à grains grossiers. Ces dernières se trouvent en discordance avec les couches santoniennes, campaniennes et maestrichtiennes.

I.2.5 QUATERNAIRE :

I.2.5.1 Villafranchien :

L'aspect le plus fréquemment rencontré est celui des croûtes calcaires massives et blanches. Ces formations perchées par rapport aux surfaces précédentes sont faciles à repérer, probablement karstifiées ou dissoutes. Ces faciès représentent habituellement le Villafranchien.

I.2.5.2 Glacis polygéniques nappant les reliefs:

Ces glacis s'étendent sur de grandes surfaces de la plaine en pente douce, ils recouvrent le cycle antérieur de glacis, qui est facile à reconnaître car il est constitué de croûtes calcaires massives.

I.2.5.3 Alluvions actuelles et récentes:

Ces alluvions ont une extension limitée à la vallée de Meskiana. Elles sont constituées de limons fins, de sables fins, de graviers et d'alluvions argileuses qui se déposent des deux côtés de l'Oued Meskiana.

Les différentes formations géologiques du bassin de Meskiana se résument dans la figure 04.

I.3 HYDROGEOLOGIE ET STRATIGRAPHIE

L'examen de la série lithostratigraphique décrite plus haut permet d'identifier quelques formations perméables susceptibles d'être aquifères, présentant un intérêt hydrogéologique, et d'autres imperméables pouvant jouer le rôle de substratum imperméable :

I.3.1 Formations perméables :

On peut citer :

- Les calcaires turoniens ;
- Les calcaires du Maestrichtien supérieur ;
- Les calcaires de l'Eocène, qui constituent le synclinal perché de Zoui- Ain Dalâa ;
- les formations plio-quadernaires qui sont très perméables et se rapprochent progressivement de la surface du sol du Sud-Ouest au Nord-Est, suite à la remontée du substratum.

I.3.2 Formations imperméables :

On peut citer :

- Les marnes aptiennes-albiennes ;
- Les marnes cénomaniennes ;
- Les marnes emscheriennes ;
- Les marnes campaniennes ;
- Les marnes du Maestrichtien inférieur ;
- Les marnes montiennes.

| | Etage | Epaisseur (m) | Lithostratigraphie | Lithologie |
|-------------|---------------------------|---------------|--------------------|--|
| QUATERNAIRE | Quaternaire | ? | | Limon gris et des graviers ; Croûtes rosâtres feuilletées ; Croûtes calcaires blanches . |
| | | | | |
| NEOGENE | Tortonien- Langhien | 60 | | Grès blancs grossiers à quartz |
| PALEOCENE | Thanétien-Yeprésien | 200 | | Alternance de micrite décimétrique gris-blanchâtre et biomicrite décimétriques ou métriques blanchâtre. |
| | Montien | 70 | | Marnes grises verdâtres |
| CRETACE | Maestrichtien sup | 150 | | Calcaires noduleux ocres avec quelques nodules de silex, de couleur blanchâtre. |
| | Maestrichtien inf | 50 | | Marnes gris-beiges. |
| | Campanien | 230 | | Marnes noires Marnes et micrites |
| | Santonien | 100 | | Marnes grises ou beiges à rares intercalations marno-calcaires. |
| | Coniacien | 150 | | Marne grises et alternance de marne beige et calcaire gris. |
| | Turonien moy et sup | 150 | | Alternance de marne grise à beige et calcaire zoogène noduleux. |
| | Turonien inf | 200 | | Marne grise ou noire avec une intercalation de marno-calcaire blanchâtre. |
| | Cénomaniens sup et moy | 800 | | Marne argileuse à plaquette de calcite et rare intercalation de marne, de marno-calcaire et de calcaire. |
| | Albien et Cénomaniens inf | 55 | | Calcaires et marnes argileuses noires |
| | Aptien | 10 | | Marnes grises, biomicrite et dolomie. |
| TRIAS | Trias | ? | | Cargneule jaunâtre, dolomie noire, grès, gypse marneux et gypse fibreux. |

Figure 04: Schéma lithostratigraphique des formations géologiques du bassin de Meskiana.

I.4 GEOMORPHOLOGIE :

La géomorphologie est caractérisée par l'existence :

- des massifs de bordures limitant la plaine ;
- d'une vallée se situant en bordure Nord d'un anticlinal crétacé, dont le cœur est constitué de calcaires aptiens. Au Nord-Est de la dite vallée, le Trias apparaît en diapirs, en recoupant les marnes cénomaniennes et les marno-calcaires turoniens. Un recouvrement alluvial s'étale au niveau de l'axe de l'anticlinal, alors que les éboulis recouvrent les superficies aux pieds des reliefs.

I.5 APERCU TECTONIQUE

La plaine de Meskiana appartient à l'Atlas saharien (J.M. VILA, 1980). Elle est caractérisée par des éléments tectoniques simples, tels que les plis de direction NE-SW et les dislocations qui ont souvent un cours transversal à la direction de ces plis. On rencontre également des structures particulières, qui se sont survenues sous l'influence de la tectonique diapirique. La période crétacée a été, du point de vue tectonique, assez calme (DOZET, 1985). Des grandes activités qui se sont déroulées durant cette période, on cite une subsidence continue au Sud du bassin et les soulèvements relatifs de quelques parties septentrionales de ce dernier (figure 05).

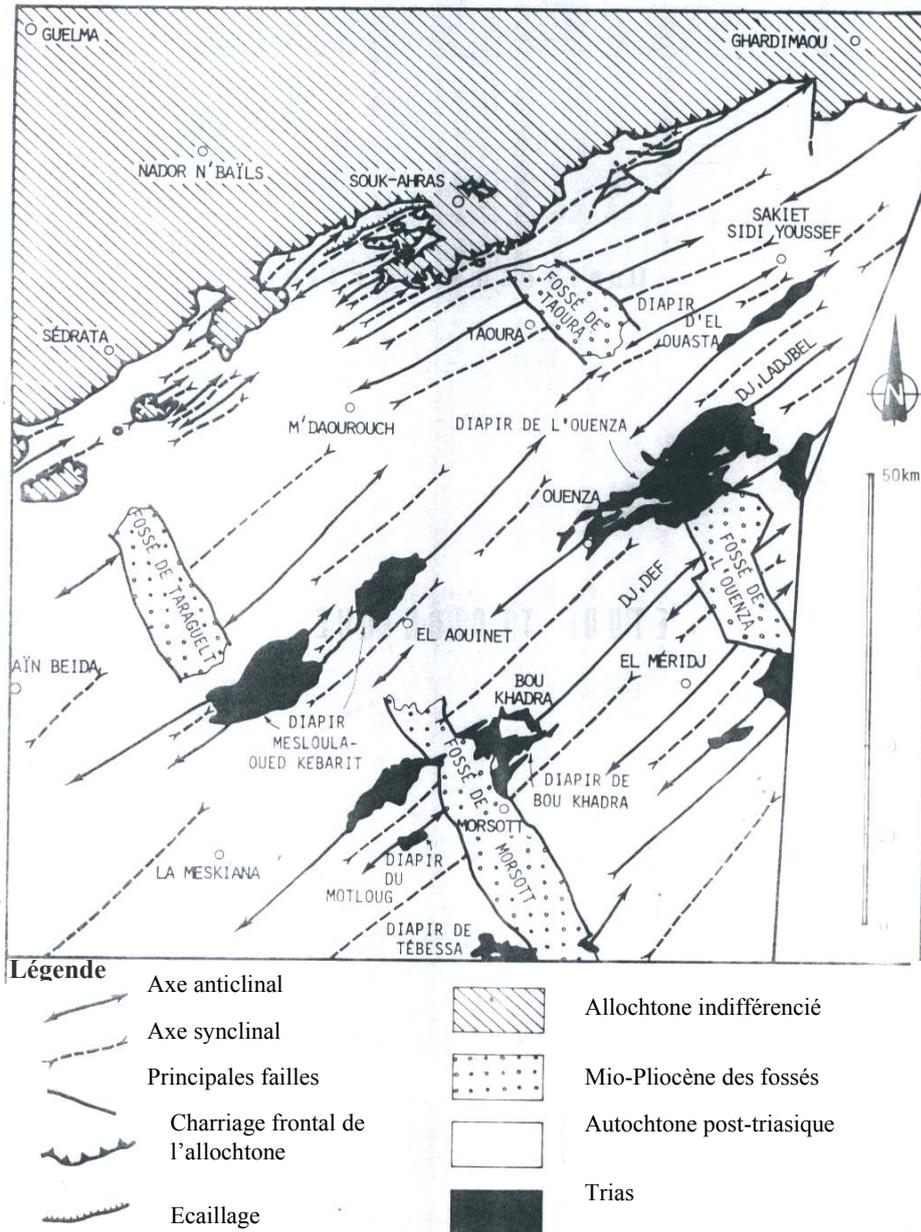


Figure 05 : Esquisse tectonique de la région de Meskiana, J.M.VILA (1980).

Entre le Crétacé et le Miocène, deux principales phases tectoniques ont eu lieu pour former de nombreuses structures. Durant la première phase, de vastes plissements se sont produits en donnant naissance aux anticlinaux et synclinaux suivants : les plis de l'Oued Smara, El Houd, le synclinal de Djebel Belkefif, le synclinal de Kodiat Zennbaï, le synclinal de Reguibet El Assel, le synclinal de Djebel Gourigueur et l'anticlinal de Kessar El Tir. La phase des plissements fut suivie de la phase de la tectonique cassante où de nombreuses fortes failles et dislocations longitudinales et transversales sont survenues, telles que celle de Djebel Gourigueur Ain Dalâa, dont le rôle du point de vue hydrogéologique semble très important.

Le fossé tectonique de Morsott est d'âge post-Miocène, il a un cours perpendiculaire à la direction des plis.

Les diapirs forment les noyaux des anticlinaux et peuvent également remplir les fractures les plus importantes. Ils ont été en action au Crétacé, au Miocène, au Pliocène et probablement au Quaternaire ancien.

I.6 CONCLUSION :

L'étude géologique du bassin de Meskiana nous a permis de dégager les constatations suivantes :

* La région fait partie de l'Atlas Saharien et se localise dans la partie orientale des hautes plaines constantinoises. Elle est constituée de deux grands ensembles :

- Les affleurements de bordure d'âge Crétacé ;
- Les formations d'âge Plio-Quaternaire qui se répartissent en totalité dans la plaine.

* Les activités tectoniques ont produit des plis de direction NE-SW, accompagnés d'une série de failles de direction orthogonale affectant les formations crétacées.

* Du point de vue hydrogéologique, les calcaires d'âge Crétacé bordant la plaine, pourraient jouer le rôle d'importants aquifères d'eau. Les fractures pourraient constituer au sein de ces assises des réseaux prêts à emmagasiner ou faire circuler d'importantes quantités d'eau. Les assises marneuses constitueraient un substratum imperméable, que ce soit au niveau des bordures ou au centre de la plaine.

A l'intérieur de la plaine, on a des formations alluvionnaires qui se composent de galets, de cailloutis, de graviers, de sables et de limons, qui pourraient avoir une porosité primaire et former des nappes alluviales.

* A partir de la lithologie des formations géologiques, on peut avoir une idée sur la minéralisation des eaux souterraines. Ainsi,

- Les calcaires donnent un faciès généralement bicarbonaté calcique ou magnésique ;
- Les marnes sont à l'origine des faciès sulfatés ;
- Les alluvions donnent plusieurs faciès non salés.

On note que la présence du Trias peut provoquer la salure des eaux souterraines.

Chapitre II :
GÉOPHYSIQUE

II.1 INTRODUCTION :

L'exploration et l'exploitation des couches aquifères d'une formation géologique donnée sont étroitement liées à la connaissance de la nature lithologique de cette formation. L'identification de la géométrie de ces couches aquifères nécessite des moyens de reconnaissance, tels que la prospection électrique et les forages mécaniques à titre d'exemple. L'utilisation de ces moyens de reconnaissance va permettre la connaissance des dimensions de ces aquifères, et par conséquent aider à la bonne gestion de ces ressources hydriques.

II.2. Prospection électrique

Une campagne de prospection électrique, couvrant une grande partie de la plaine de Meskiana, a été réalisée par la Compagnie Générale de Géophysique (C.G.G.) en 1974, au profit de Direction de l'Hydraulique de la Wilaya de Constantine. Une deuxième campagne a été effectuée en 1980 au Sud de Ain Dalâa et elle a été réalisée par la Compagnie ALGEO figure 06.

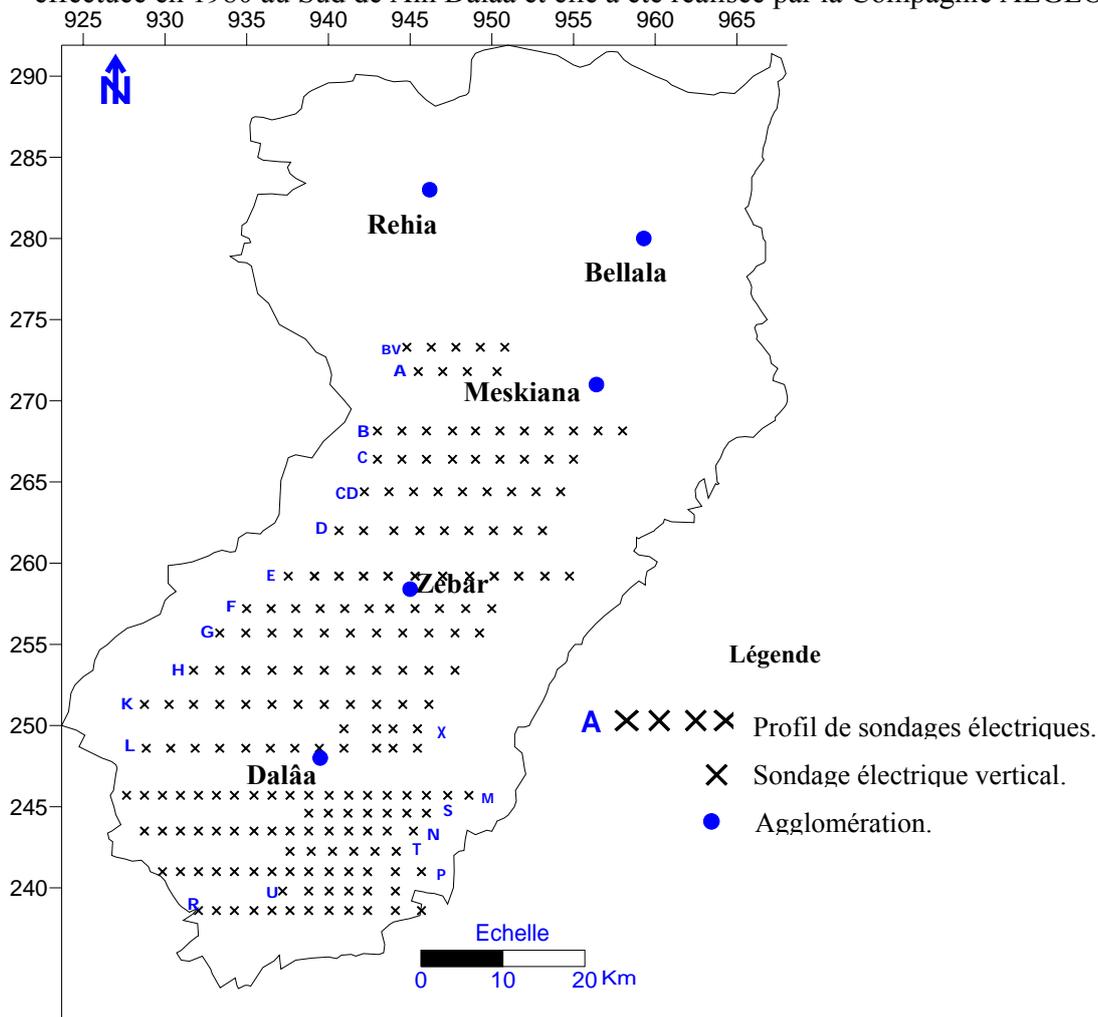


Figure 06: Carte de position des sondages électriques verticaux et des profils.

II.2.1 Interprétations des résultats de la prospection électrique

Ces deux campagnes géoélectriques, basées sur 25 profils de différentes longueurs AB (4000 m, 3000 m, 2000 m, 600 m et 100 m), visaient à atteindre les objectifs suivants :

- Reconnaître la profondeur d'un éventuel substratum calcaire résistant du Crétacé inférieur sous le recouvrement marneux et marno-calcaire du Cénomanien ;
- Identifier la géométrie du remplissage alluvial et déterminer les zones de meilleures transmissivités dans ce dernier ;
- Reconnaître l'allure de l'anticlinal crétacé de Meskiana et celle du synclinal éocène perché de Dalâa.

L'examen des coupes géoélectriques (figure 07a et 07b) confirme la structure anticlinale dans la vallée de Meskiana. En effet, cette structure a été mise en évidence à partir des profils G, H et K (leurs coupes géoélectriques sont en annexeI), où on observe la forme de plis pincés d'axe orienté vers le Sud-Est de la plaine. A partir du profil L, cette structure est perturbée par la présence d'une couche très conductrice (résistivité inférieure à 2 Ω .m). Sous le recouvrement Mio-Plio-Quaternaire, la structure anticlinale se caractérise par la présence de faciès conducteurs très épais, qui s'intercalent avec des niveaux résistants de fortes résistivités (70 à 300 Ω .m).

Les faciès conducteurs représentent des formations marneuses et argileuses dont l'âge s'étale du Cénomanien jusqu'au Campanien. Les niveaux résistants représentent probablement des calcaires et calcaires marneux du Turonien inférieur et supérieur, et des calcaires du Coniacien qui affleurent en bordures et se prolongent sous le recouvrement alluvial (Rapport C.G.G, 1974).

Le synclinal perché de Dalâa est présenté par deux niveaux très résistants, dont la résistivité dépasse les 300 Ω .m, et qui sont séparés par un niveau conducteur, de 4 à 20 Ω .m. Le premier niveau conducteur est très épais (environ 350 m) et se prolonge sous le recouvrement alluvial, on pense qu'il est constitué par des calcaires thanétiens-yprésiens. Le second niveau résistant représente les calcaires maestrichtiens. Le niveau conducteur marneux, qui sépare ces derniers, serait d'âge Dano-Montien, son épaisseur est de l'ordre de 100 m (Rapport C.G.G, 1974).

II.2.2 Apport de la prospection électrique :

La confrontation des données résultant de la prospection électrique et celles présentées par les forages mécaniques a permis d'identifier le remplissage alluvial de la plaine de Meskiana. Ce dernier se caractérise par :

- Des épaisseurs variables, allant de 5 m en bordures à 155 m au centre de la plaine ;
- Des résistivités variables de 3 à 150 Ω .m ;
- Une lithologie très hétérogène.

Les coupes géoélectriques ont permis d'identifier deux niveaux résistants, dont la résistivité varie de 30 à 100 Ω .m et ayant une épaisseur de 5 à 40 m. On note que le premier niveau se présente avec une certaine discontinuité, probablement due à l'érosion.

II.3 APPORT DES FORAGES MECANIQUES:

Plusieurs forages ont été réalisés au niveau de la plaine de Meskiana, et leur interprétation a permis de préciser la lithologie et la géométrie des dépôts du Mio-Plio-Quaternaire. Il s'agit des forages et des piézomètres qui ont été réalisés par Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH), les forages d'exploitation programmés par la Direction de l'Hydraulique de la Wilaya (DHW) de Oum El Bouaghi, ainsi que le forage de reconnaissance MKN-1 réalisé par la SONATRACH (d'une profondeur totale de 3100 m).

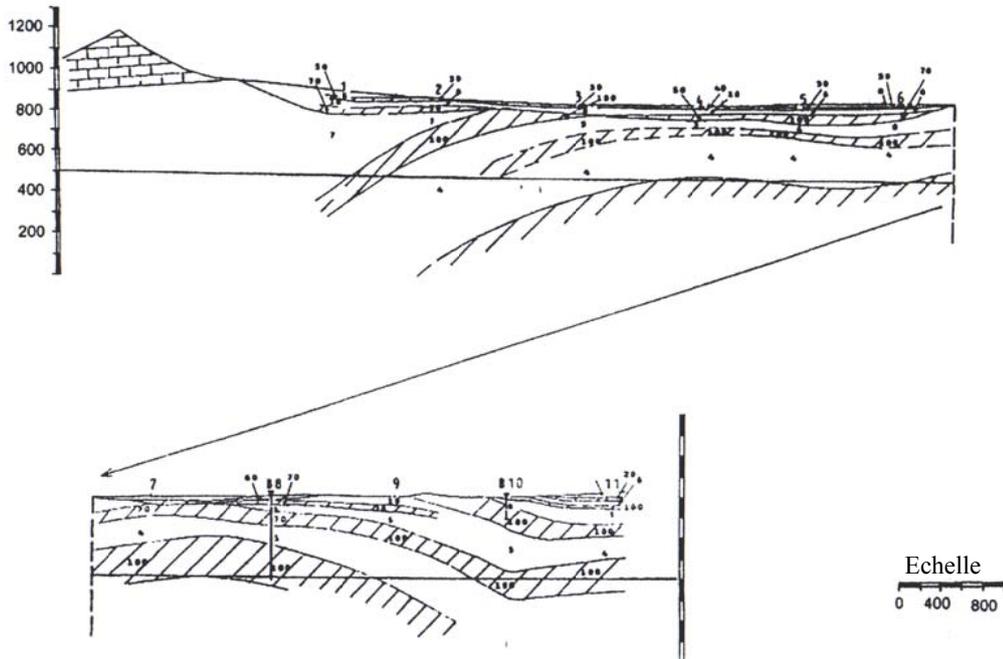


Figure 07a : Coupe géoélectrique du profil B.

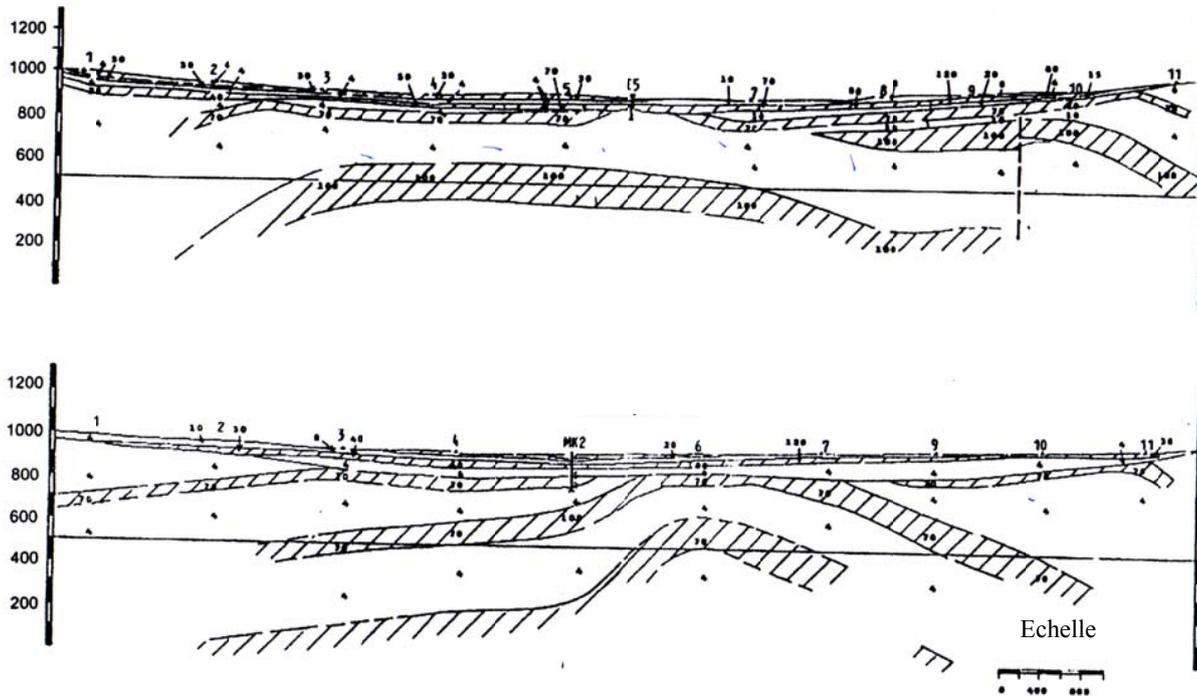
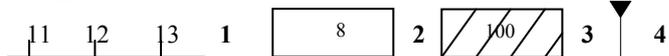


Figure 07b : Coupes géoélectriques des profils E et H.

Légende



- | | | | |
|---|----------------------|---|-----------------------|
| 1 | Sondages électriques | 2 | Formation conductrice |
| 3 | Formation résistante | 4 | Forage hydraulique |

En effet, la comparaison des résultats des sondages électriques et de la lithologie déduite des forages a permis de caler les données géophysiques sur la lithologie. Ainsi, les couches résistantes du remplissage, qui présentent un potentiel aquifère considérable, sont constituées de sables, de gravier, de cailloutis et de galets, par contre celles qui sont conductrices sont constituées par des limons et des argiles.

La comparaison des données nous a permis de caractériser les formations hydrogéologiques.

Tableau 02: Caractéristiques hydrogéologiques et géophysiques des formations.

| Formation | Age | Epaisseur (m) | Résistivité ($\Omega.m$) | Intérêt hydrogéologique |
|--------------------------------|-------------------------|---------------|----------------------------|-------------------------|
| Sables, graviers et cailloutis | Plio-Quaternaire | 5 - 145 | 30 - 150 | perméable |
| Limons et argiles | Plio-Quaternaire | 5 - 30 | 3 - 5 | imperméable |
| Calcaires | Eocène | 100 | 70 - 300 | perméable |
| Marnes | Montien | 70 | 2 - 5 | imperméable |
| Calcaires | Maestrichtien sup | 460 | 70 - 300 | perméable |
| Marnes | Maestrichtien inférieur | 40 - 50 | 5 - 20 | imperméable |
| Marnes | Campanien | 200 | 2 - 5 | imperméable |
| Marnes | Emschérien | 90 - 100 | 2 - 5 | imperméable |
| Calcaires | Turonien | 200 - 270 | 70 - 300 | perméable |
| Marnes argileuses | Cénomanién | 600 - 1000 | 2 - 5 | imperméable |

L'exploitation de ces données a permis également d'établir la carte isopaque, dont l'interprétation fait ressortir la répartition spatiale des épaisseurs des alluvions.

- La zone de Dalâa-Ain Touila se caractérise par une dépression alluvionnaire importante, où le substratum possède une profondeur pouvant atteindre 155 m (figure 08).

- La zone de Dalâa –Meskiana se caractérise par de petites dépressions, où le substratum marneux connaît une certaine élévation et se localise à une profondeur de 95 m environ pour remonter en surface au nord de la plaine (figure 09).

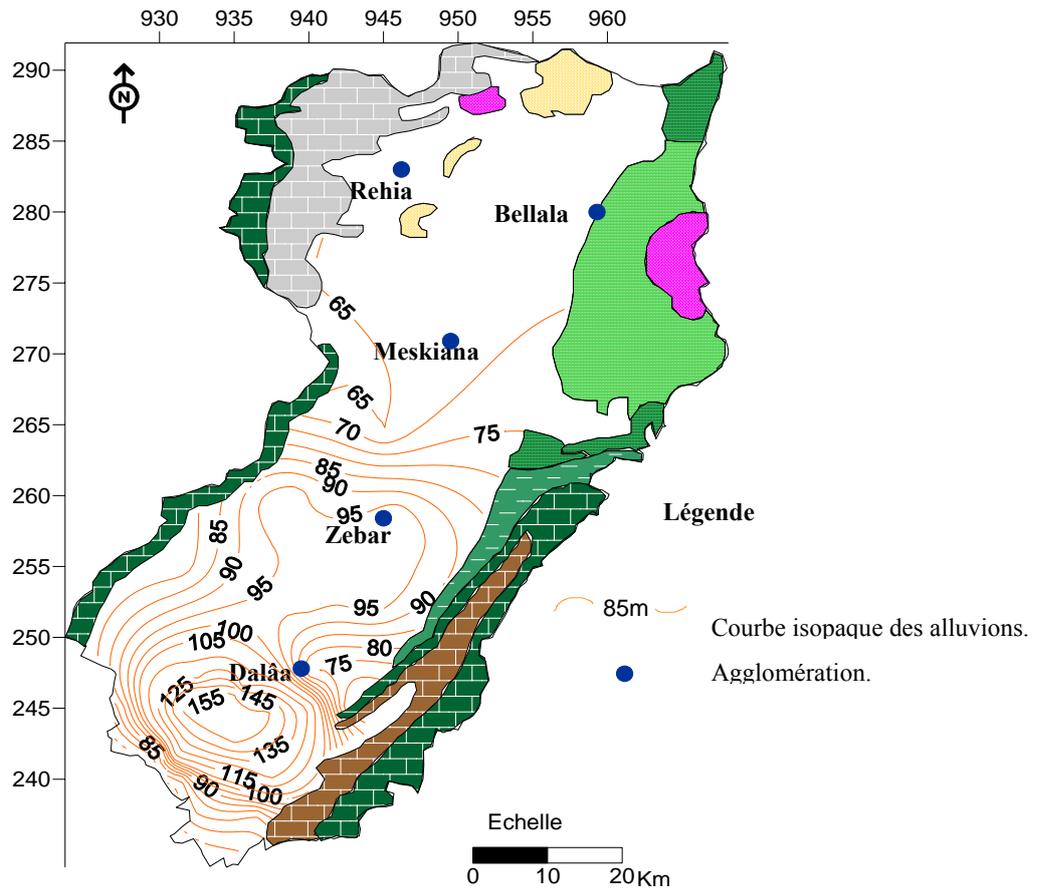


Figure 08 : Carte isopaque de la nappe alluviale de la plaine de Meskiana.

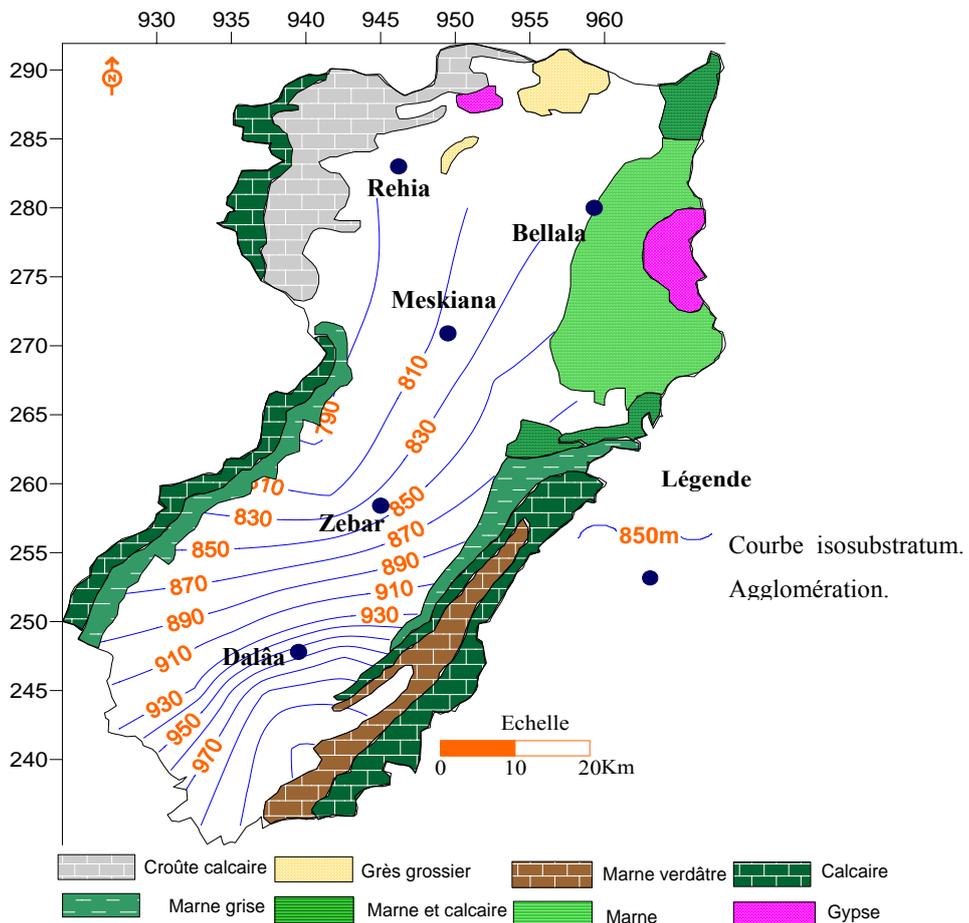


Figure 09 : Carte du substratum de la nappe alluviale de la plaine de Meskiana.

-CONCLUSION :

Les résultats de la prospection électrique et les informations tirées à partir des forages mécaniques ont permis d'aboutir aux constatations suivantes :

- les dépôts du remplissage Mio-Plio-Quaternaire sont très hétérogènes. Ils sont représentés d'une part par des couches conductrices constituées par des marnes et des argiles, et d'autre part par des couches résistantes formées de sables, de graviers, de galets et de cailloutis. Ces dernières couches constituent la nappe phréatique du remplissage alluvial de la plaine de Meskiana.
- une structure anticlinale se manifeste au niveau de la zone de Meskiana. Elle est constituée par des formations marneuses et marno-calcaires attribués au Cénomaniens jusqu'au Campanien. Le cœur de cet anticlinal est d'âge Turonien.
- une structure synclinale, qui se manifeste au niveau de la zone de Dalâa, est constituée par des formations résistantes de calcaires et de calcaire marneux du Maestrichtien et de l'Eocène. L'épaisseur de ces formations est importante et peut atteindre 155 m. On pense que ces formations constituent de bons réservoirs aquifères.

Chapitre III :
HYDROCLIMATOLOGIE

III.1 INTRODUCTION :

Le bassin de Meskiana se situe au Nord-Est du territoire algérien, se localisant à mi-chemin entre la Méditerranée et le début du domaine saharien, ce qui lui confère un climat se caractérisant par un régime climatique aride et semi aride.

Le comportement des nappes aquifères et la variation du niveau piézométrique dépendent étroitement des précipitations et des prélèvements. Il est important de signaler à cet effet que l'alimentation est régie par la fraction de pluie qui s'infiltré vers la zone saturée, constituant à moyen terme la véritable ressource mobilisable.

III.2 ACQUISITION ET CORRECTION DES DONNÉES CLIMATIQUES :

L'étude des paramètres hydrodynamiques nécessite un traitement détaillé des observations hydroclimatologiques. A cet effet, il s'avère nécessaire, dans ce chapitre, de quantifier et d'analyser les principaux apports d'eau du bassin. Pour ce faire, nous disposons d'un certain nombre de stations pluviométriques. Tableau n° 03.

Tableau. 03:Inventaire des stations pluviométriques du bassin de Meskiana.

| Stations | Coordonnées Lambert | | Altitude (m) | Année de la mise en service |
|-------------|---------------------|---------|--------------|-----------------------------|
| | X | Y | | |
| Meskiana | 950.050 | 270.750 | 850 | 1904 |
| Dalâa | 940.250 | 248.000 | 964 | 1970 |
| Rehia | 943.250 | 279.750 | 906 | 1973 |
| Ain Sedjera | 940.700 | 284.900 | 1085 | 1970 |

En raison de l'importance des précipitations dans les études hydroclimatologiques, la plaine de Meskiana a été dotée de quatre (04), stations pluviométriques implantées à Meskiana, Dalâa, Rehia et Ain Sedjera. Ces stations sont réparties selon des altitudes qui varient entre 860 à 1085m .Malheureusement, la majorité des stations comporte des lacunes dans les séries d'observation. Une vérification systématique a été effectuée sur les fichiers de valeurs brutes de précipitations mensuelles de l'ensemble des stations.

La station de Meskiana a été retenue, car elle possède une série d'observations plus longue et contient peu de lacunes. C'est pourquoi on s'est intéressé aux données fournies par cette station et celles-ci ont fait l'objet d'ajustement, pour la période (1983/1984- 2004/2005). Dans cette optique, nous avons utilisé la méthode des rapports comme moyen de correction.

III.2.1 Méthode des rapports :

Cette méthode utilise le rapport entre les moyennes de précipitations de deux séries concomitantes comme facteur multiplicateur de la série disponible qu'on veut corriger. Dans notre cas, on a pris la station de Tébessa comme station de référence. Celle-ci est distante de 50 km à l'Est de la station de Meskiana et se situe dans le bassin versant de l'Oued Mellègue.

Si l'on désigne par Y les précipitations moyennes mensuelles à la station à ajuster (Meskiana) et X la valeur correspondante à la station de comparaison (Tébessa).

$$Y = b.X \rightarrow X = b.Y \quad (1)$$

b : Constante d'ajustement estimée par l'équation suivante:

$$b = V/U$$

V : Moyenne des précipitations mensuelles de la station de comparaison (Tébessa) pour la période (1972/1973 – 1982/1983),

U : Moyenne des précipitations mensuelles de la station à ajuster (Meskiana) pour la période (1972/1973 – 1982/1983), où elle possède une série complète et un écart type relativement faible.

La procédure consiste à estimer le rapport b à partir des données homogènes d'une même période, puis à appliquer l'équation (1) à la période à vérifier (1983/1984- 2004/2005). L'estimation du coefficient de correction est consignée dans le tableau 04 :

Tableau 04: Estimation du coefficient mensuel de correction des précipitations.

| | Sept | Oct | Nov | Déc | Jan | Fév | Mar | Avr | Mai | Juin | Juil | Août |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| V (mm) | 32,01 | 29,07 | 33,34 | 22,40 | 18,77 | 39,73 | 52,19 | 34,50 | 36,15 | 27,05 | 7,158 | 21,88 |
| U (mm) | 29,79 | 28,84 | 31,74 | 22,18 | 18,48 | 38,04 | 50,01 | 31,98 | 34,61 | 25,22 | 7,125 | 20,8 |
| b | 1,07 | 1 | 1,06 | 1 | 1,01 | 1,03 | 1,04 | 1,07 | 1,04 | 1,07 | 1 | 1,04 |

Afin de vérifier la correction apportée à la série de la station de Meskiana, on a appliqué la loi de double cumul qui montre l'homogénéité de la dite série, en se référant à celle de Tébessa (figure 10).

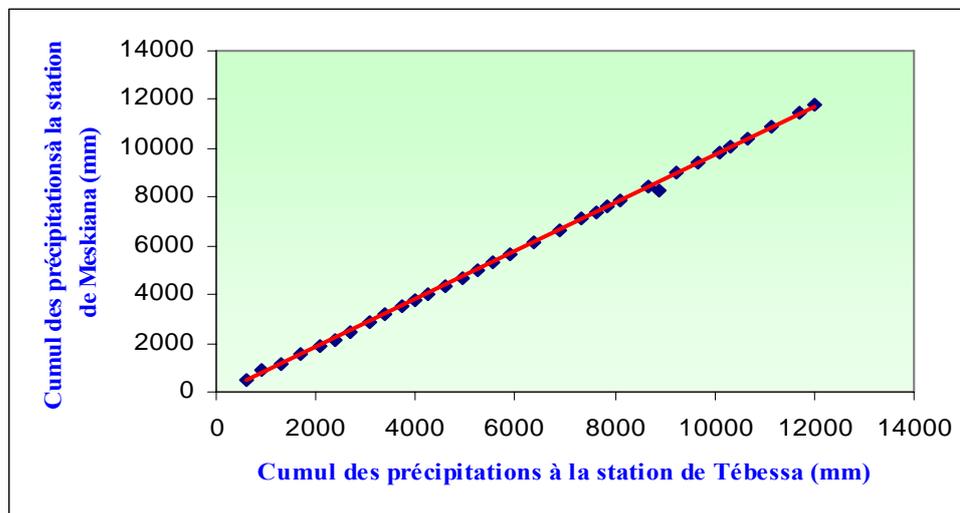


Figure 10 : Application de la loi de double cumul après correction des erreurs.

Les calculs statistiques donnent les caractéristiques de la série de Meskiana, qui sont illustrées dans le tableau 05.

Tableau 05: Variation des précipitations au niveau de la station de Meskiana.

| | Sept | Oct | Nov | Déc | Jan | Fév | Mar | Avr | Mai | Juin | Juil | Août | Total |
|------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|-------|-------|-------|------|-------|--------|
| Moy | 38.86 | 28.21 | 31.88 | 25.86 | 26.02 | 24.96 | 39.35 | 28.6 | 35.48 | 25.15 | 9.81 | 26.81 | 340.99 |
| Max | 117.8 | 93.3 | 119.5 | 122.5 | 88 | 60.9 | 122.1 | 64.5 | 83.7 | 95.1 | 36.5 | 115 | |
| Min | 7 | 3.3 | 4.24 | 3.6 | 3.9 | 2 | 5.5 | 2.5 | 11.44 | 0 | 0 | 2.5 | |
| Ecart type | 26.64 | 20.14 | 24.53 | 23.06 | 18.12 | 15.41 | 24.48 | 16.02 | 19.58 | 18.50 | 8.10 | 26.13 | |
| Saisons | Automne | | | Hiver | | | Printemps | | | Eté | | | |
| | 98.95 | | | 76.84 | | | 103.43 | | | 61.77 | | | |

Les calculs statistiques montrent que la précipitation moyenne annuelle est de 341 mm. Ceci est vérifié en se référant à la carte des précipitations moyennes annuelles, établie par

l'ANRH sur une période de 60 ans (figure 11). La précipitation maximale est enregistrée aux mois de décembre et mars. La précipitation minimale est enregistrée aux mois de juin et juillet. La saison printanière est la plus pluvieuse avec 103 mm suivie par la saison automnale avec une moyenne de 99 mm.

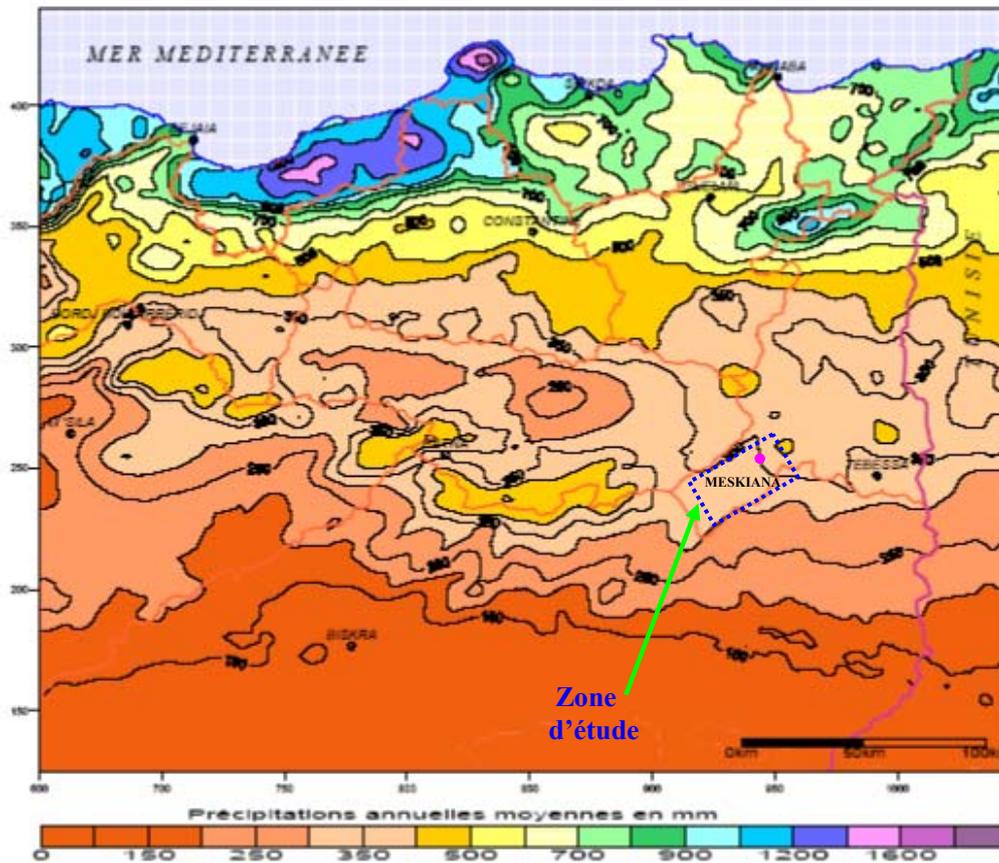


Figure 11: Carte des précipitations annuelles moyennes de l'Est algérien (A.N.R.H., 1993 : données moyennes de 60 ans, périodes du 1er septembre 1921 au 31 août 1960 et du 1er septembre 1968 au 31 août 1989).

III.3 CARACTÉRISATION DU CLIMAT :

La caractérisation du climat d'une zone donnée à l'aide d'indices ou de diagrammes permet de comparer les climats d'une région à l'autre. Ils prennent généralement en compte l'offre pluviométrique, la demande évaporative et les températures. Ceux qui sont les plus couramment utilisés sont les suivants :

III.3.1 Diagramme ombrothermique :

Un mois sec se définit, selon (**Bagnouls et Gaussen, 1953, 1957**) comme celui ayant un total pluviométrique (moyenne en millimètres) égal ou inférieur au double de la température ($P \leq 2T^\circ$). Ainsi, on constate que la saison sèche est formée par plusieurs mois secs consécutifs. Le diagramme de **Gaussen** (figure 12) permet de mettre en évidence une saison humide débutant au mois de novembre qui se termine au mois de mai, et une saison sèche qui s'étale du mois de juin jusqu'au mois d'octobre.

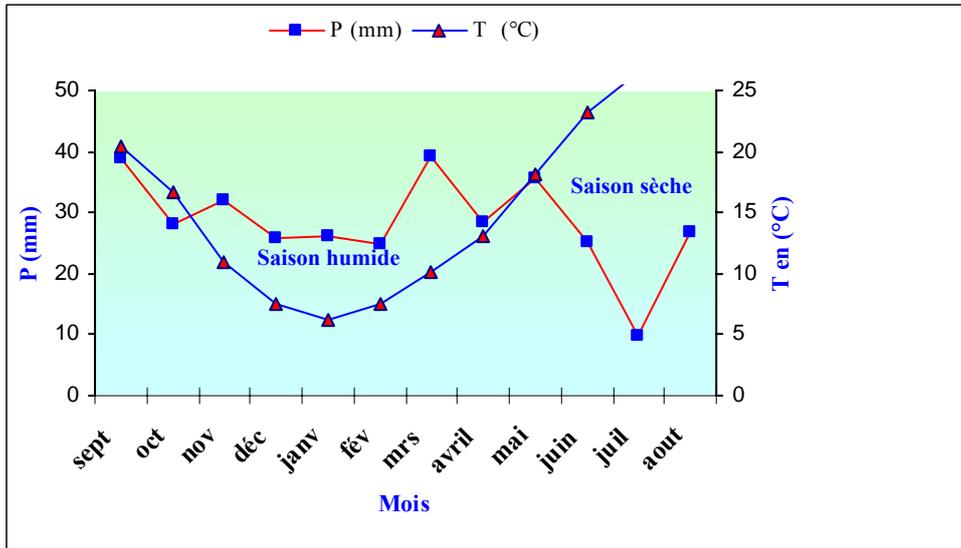


Figure 12 : Courbe ombrothermique de la station de Meskiana.

III.3.2 Indice de De Martonne:

Cet indice est fonction des températures et des précipitations ; il est calculé par la relation

suivante :

$$I = \frac{P}{T + 10} \quad (2) \quad \text{où}$$

I : indice d'aridité

P : précipitations moyennes annuelles en mm.

T : températures moyennes annuelles en °C

Application :

$$P = 340.99 \text{ mm}$$

$$T = 15.58 \text{ °C}$$

Ce qui donne :

$$I = 13.33$$

Suivant les valeurs de (I), **De Martonne** a établi 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.

La station de Meskiana bénéficie d'un climat semi-aride. Figure 13.

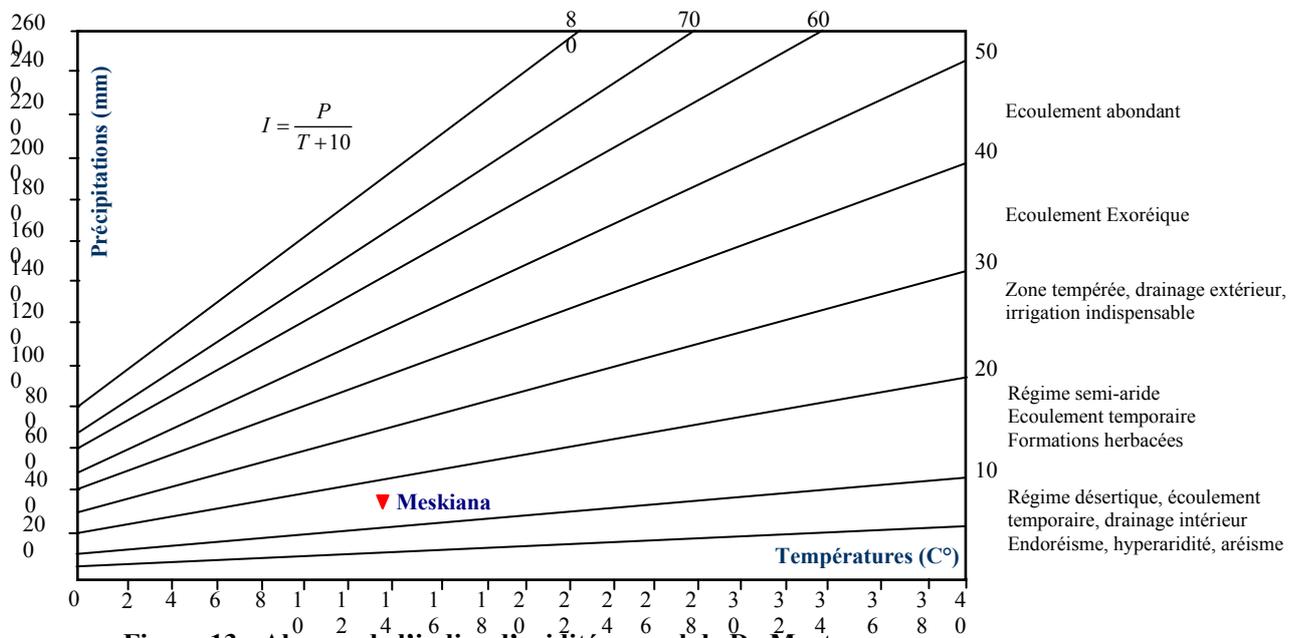


Figure 13 : Abaque de l'indice d'aridité annuel de De Martonne.

III.3.3 Indice d'aridité mensuel:

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

$$I = \frac{12.P}{T^{\circ} + 10} \quad (3) \quad \text{où}$$

I : Indice d'aridité mensuel

P : Précipitations moyennes mensuelles en mm

T° : Température moyenne mensuelle en °C.

L'application de la formule (3) a permis de dresser le tableau

Tableau 06: Indices d'aridité mensuels (I) à la station de Meskiana.

| Mois | I | Étage bioclimatique |
|-----------|-------|---------------------|
| Septembre | 14.81 | semi-aride |
| Octobre | 12.70 | semi-aride |
| Novembre | 18.28 | semi-aride |
| Décembre | 17.68 | semi-aride |
| Janvier | 19.2 | semi-aride |
| Février | 17.07 | semi-aride |
| Mars | 23.53 | tempéré |
| Avril | 14.91 | semi-aride |
| Mai | 15.1 | semi-aride |
| Juin | 9.10 | semi-aride |
| Juillet | 3.22 | hyperaride |
| Août | 9.01 | steppique |

Selon la classification précédente par **De Martonne**, les mois de septembre, octobre, novembre, décembre, janvier, février et avril présentent un climat semi-aride. Le mois de mars a un climat tempéré. Les mois de juin, et août sont caractérisés par un climat steppique, alors que le mois de juillet devient hyperaride.

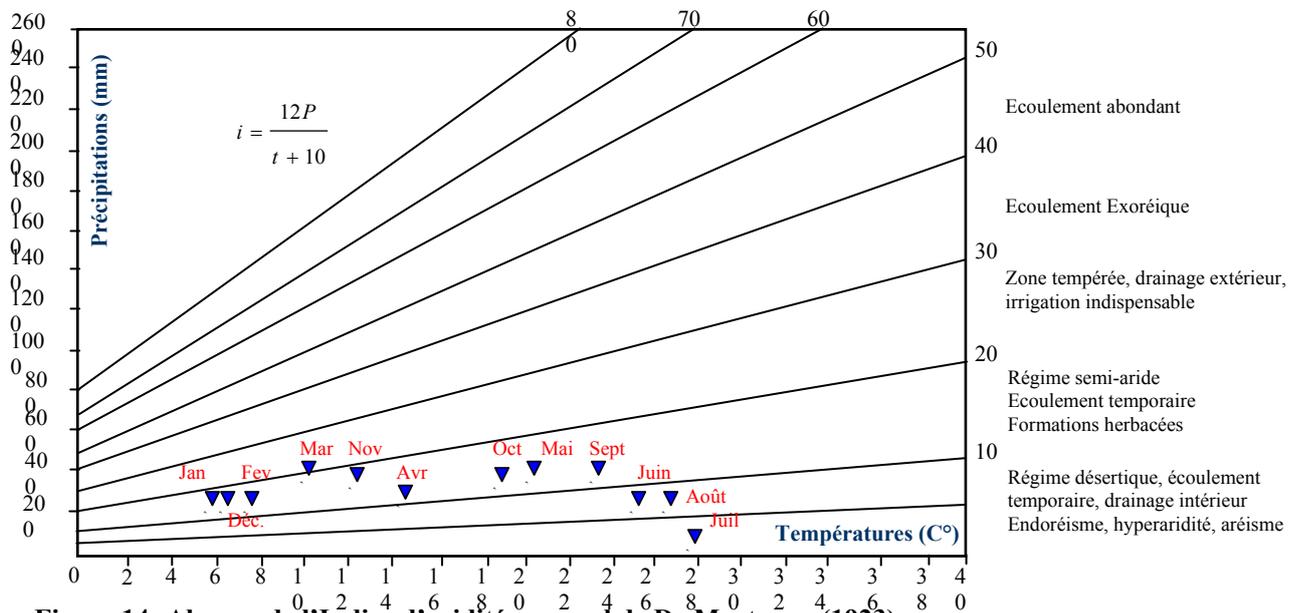


Figure 14: Abaque de l'Indice d'aridité mensuel de De Martonne (1923).

III.3.4 Climagramme de Louis Emberger :

Pour déterminer les climats de la zone méditerranéenne, **L. Emberger** a proposé la détermination d'un quotient pluviométrique Q_2 , qui dépend des précipitations moyennes annuelles et des moyennes de températures minima et maxima, respectivement des mois le plus froid et le plus chaud. Il propose donc la formule suivante :

$$Q_2 = \frac{P}{\frac{(M + m)(M - m)}{2}} \cdot 1000 \quad (4) \quad \text{où}$$

P : précipitation moyenne annuelle (mm)

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

m : moyenne des minima du mois le plus froid (degrés/Kelvin)

L'application numérique donne les résultats suivants :

$$P = 340,99 \text{ mm}$$

$$M = 306,51 \text{ °K}$$

$$m = 273,94 \text{ °K}$$

Ce qui donne :

$$Q_2 = 36,07$$

Le report de notre station sur la figure 15 permet de dire que le climat de la plaine de Meskiana est de type semi-aride. Figure 15.

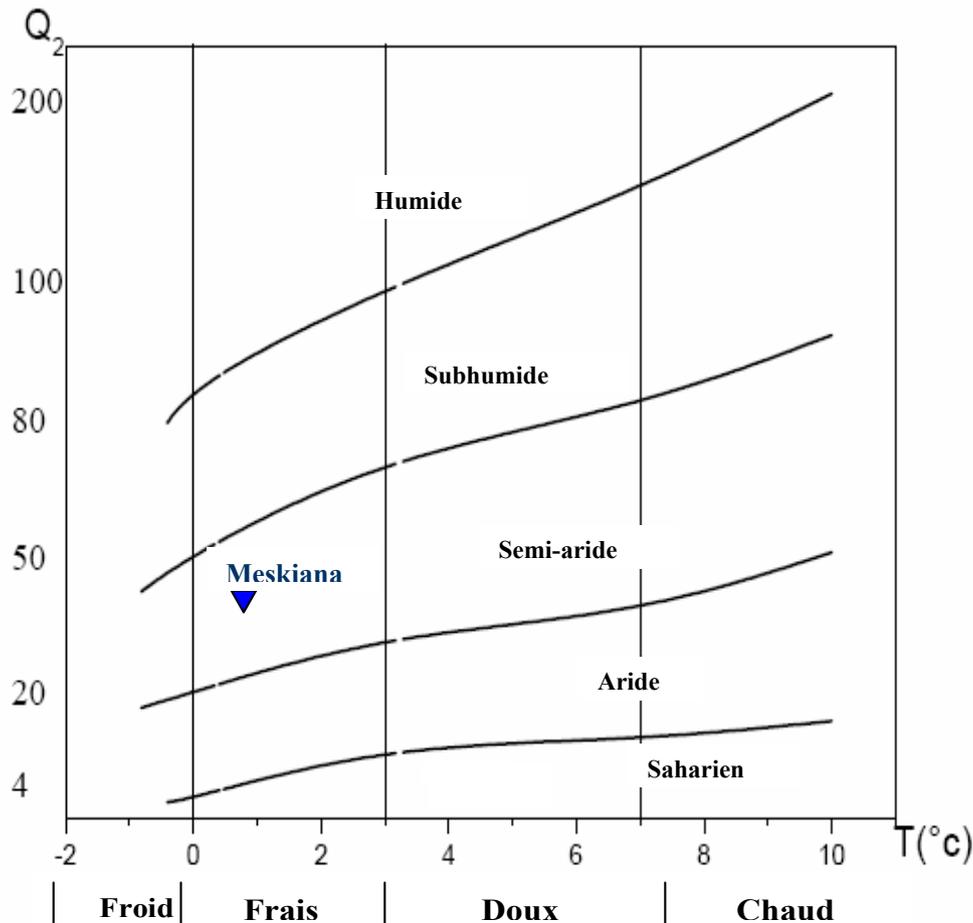


Figure 15 : Climagramme d'Emberger de la station de Meskiana.

III.3.5 Indice de Paul Moral :

Les résultats précédents sont confirmés par l'indice pluviométrique de Moral (IM), qui utilise aussi la hauteur annuelle des précipitations (en mm) et les températures moyennes annuelles en °C. Cet indice permet de dire :

Si $IM < 1$ on a climat sec et si $IM > 1$ on a climat humide.

$$IM = \frac{P}{(T^2 - 10T + 200)} \quad (5)$$

Pour

$P = 341$ mm

$T = 15.58$ °C

Ce qui donne

$IM = 1.16$

On peut dire que le climat de la plaine de Meskiana est à la limite sec-humide, c'est-à-dire qu'il peut être qualifié de semi-aride.

III.3.6 Comparaison des indices climatiques :

Sachant que les éléments climatiques les plus importants pour caractériser un climat sont les précipitations, les températures et l'évaporation ; les méthodes combinant ces éléments sont plus intéressantes que celles qui incluent un seul élément. Toutes ces méthodes ont qualifié le climat de la plaine de Meskiana comme étant semi-aride, ce qui est en conformité avec la carte des étages bioclimatiques, établie par M. Côte en 1998 (figure16).

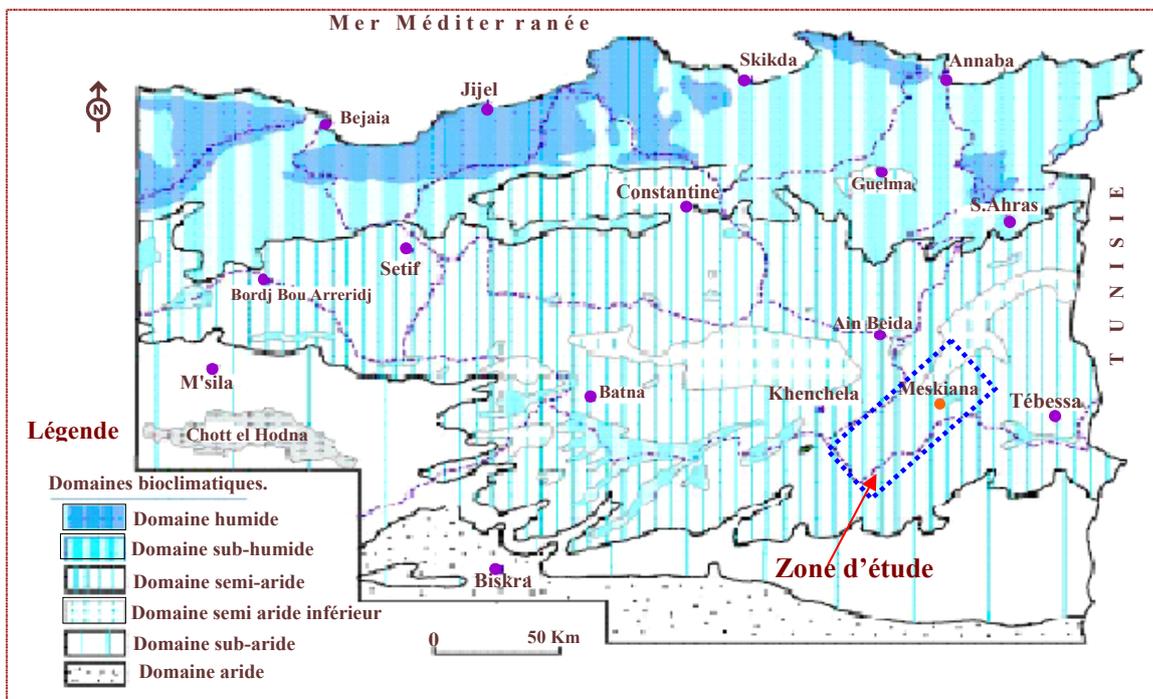


Figure 16: Carte simplifiée des zones bioclimatiques de l'Est algérien Côte M., 1998).

ETUDE DES FACTEURS CLIMATIQUES.

III.4 LA TEMPERATURE :

La température est un élément fondamental du climat. Elle est liée à la radiation solaire. Sa variation influe sur la transformation des eaux en vapeur, que ce soit à la surface ou dans le sous-sol. De ce fait, elle influe sur le degré d'évapotranspiration et par conséquent elle agit sur le taux de salinité des eaux. Toutefois, la température a un rôle important dans la variation des composantes du bilan hydrologique.

III.4.1 Variations des températures moyennes annuelles :

Les histogrammes représentant la variation annuelle de la température, sur une période de 33 ans (72/73-2004/2005), montre que l'année la plus chaude est l'année 2000/2001 avec une moyenne de 17,08°C, et l'année la plus froide est l'année 1974/75, avec une moyenne de 13,97°C. Signalons que la température moyenne inter-annuelle est de l'ordre de 15,58 °C. Figure 17.

III.4.2 Variations de la température moyenne mensuelle :

L'analyse de la courbe de variation de la température moyenne mensuelle, sur une période de 33 ans (72/73-2004/2005), montre que les valeurs les plus élevées sont observées pendant l'été (juin- septembre) avec des températures allant de 23,16 à 26,45°C. Les valeurs les plus basses, qui varient de 6, 27 à 10,06°C, sont observées durant la période hivernale (décembre – mars), avec un minimum pendant le mois de janvier (6, 27°C). L'influence de la température sur la qualité chimique se fait sentir pendant la période d'été, où on a une concentration des éléments par évaporation

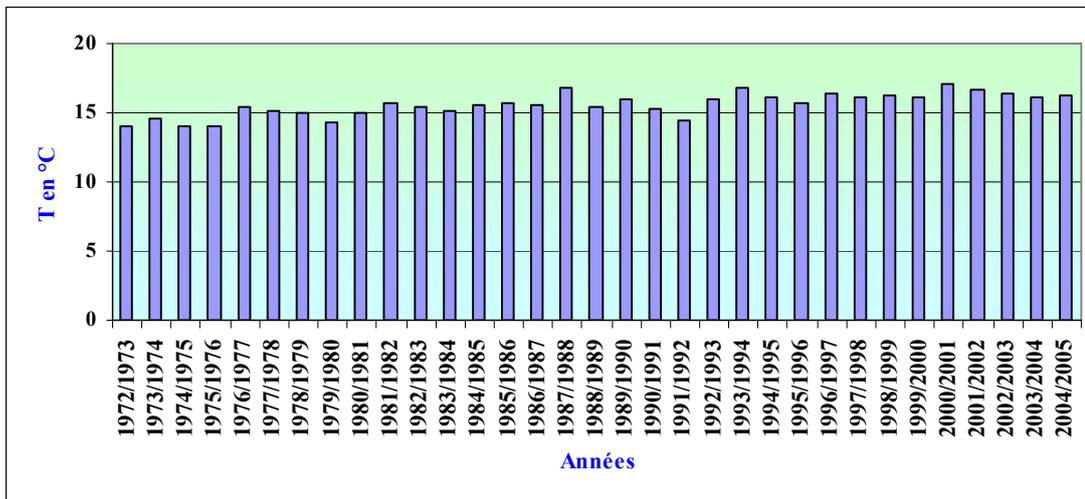


Figure 17 : Evolution de la température moyenne annuelle à la station de Meskiana pour la période (1972/1973-2004/2005).

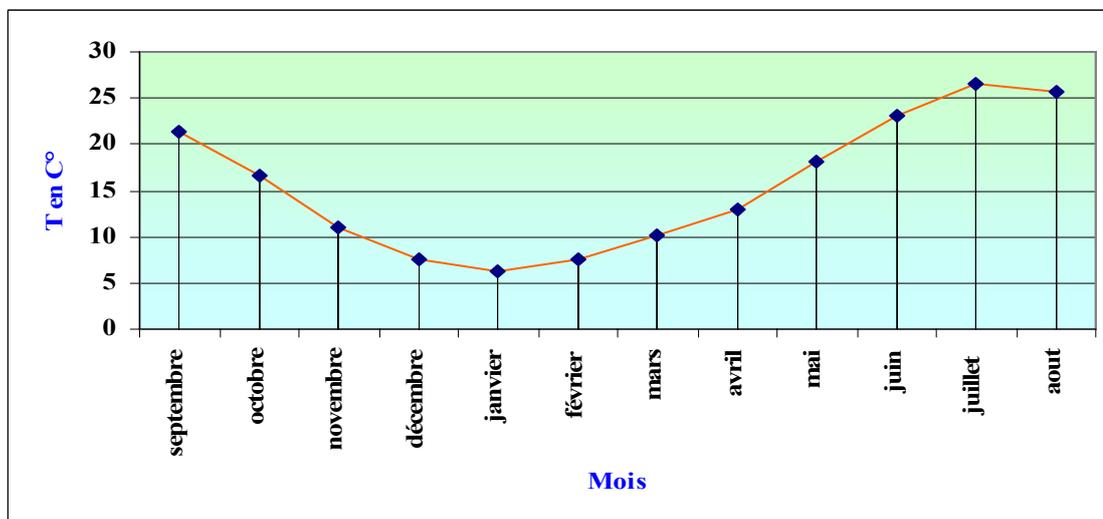


Figure 18 : Variation de la température moyenne mensuelle à la station de Meskiana pour la période (1972/1973-2004/2005).

III.5 LA PLUVIOMETRIE :

L'étude pluviométrique présente un intérêt considérable en hydroclimatologie, car elle permet de décrire le régime d'écoulement.

III.5.1 Variations interannuelles des précipitations :

L'analyse de la courbe des variations inter-annuelles des précipitations, sur une période de 33 ans (72/73-2004/2005), montre que l'année 2002/2003 est la plus arrosée avec 577 mm et l'année 1993/94 est la plus sèche avec 265 mm. Notons que les précipitations moyennes inter-annuelles s'évaluent à 341 mm. Figure 19.

III.5.2 Variations moyennes mensuelles des précipitations :

La courbe des variations des moyennes mensuelles des précipitations, sur une période de 33 ans (72/73-2004/2005), montre que le mois de mars est le plus pluvieux, avec 39 mm, alors que le mois de juillet est le plus sec, avec 10 mm. Figure 20.

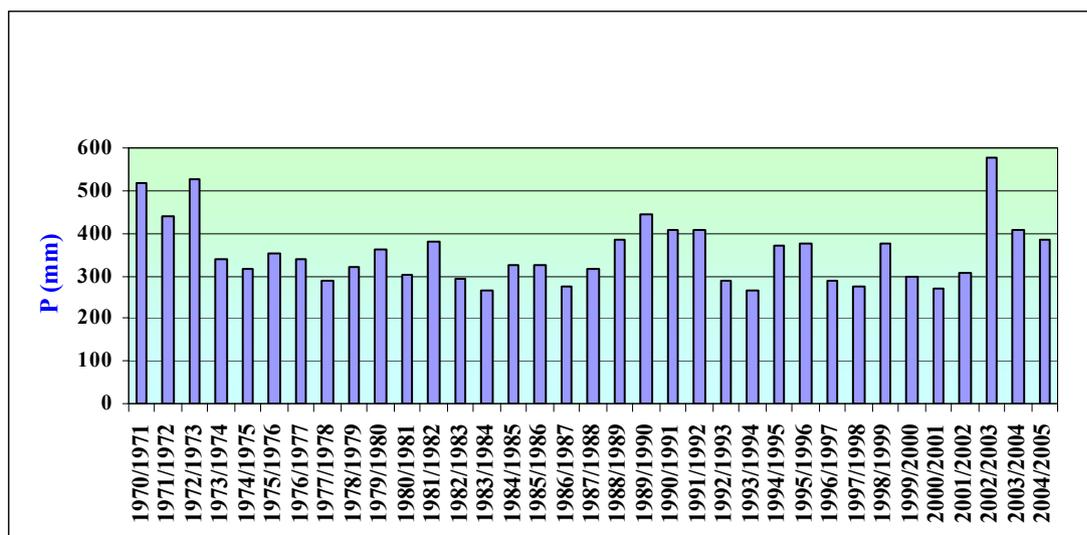


Figure 19 : Evolution des précipitations annuelles à la station de Meskiana pour la période (1972/1973-2004/2005).

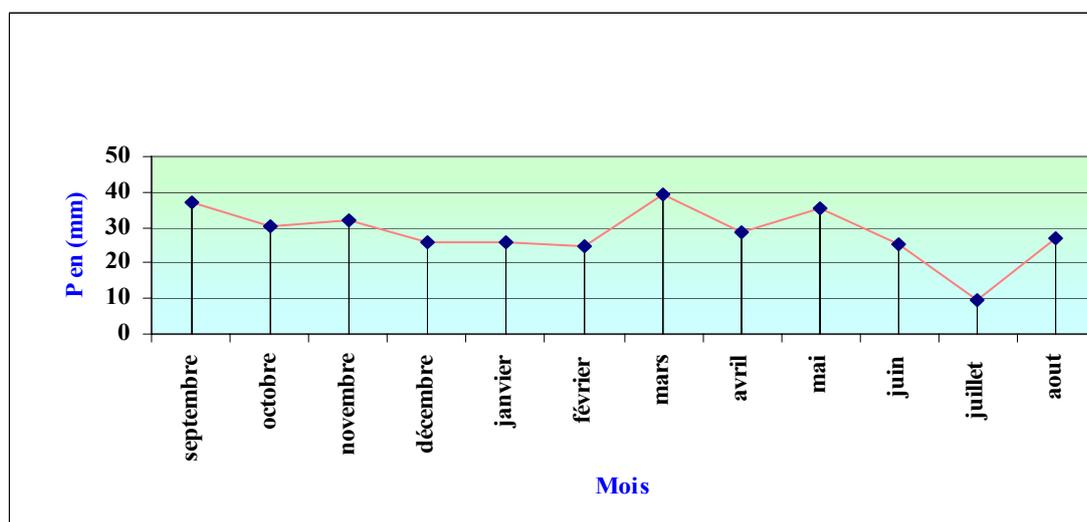


Figure 20 : Variation des précipitations moyennes mensuelles à la station de Meskiana pour la période (1972/1973-2004/2005).

III.6 ESTIMATION DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION :

III.6.1 Introduction :

L'évaporation représente le processus au cours duquel l'eau se transforme en vapeur. L'ensemble des processus d'évaporation et de transpiration est connu sous le nom d'évapotranspiration. Cette dernière est l'une des composantes fondamentales du cycle hydrologique. La précision avec laquelle elle est estimée est essentielle pour le calcul du bilan d'eau, du calcul de l'irrigation, de la gestion des ressources hydriques et également pour le dimensionnement des ouvrages d'aménagement.

L'estimation de ce paramètre a été fait à l'aide de la formule de G.W.Thornthwaite.

III.6.2 Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP) :

III.6.2.1 Formule de L.Turc :

Suite à ses expériences faites sur des cuves lysimétriques à Versailles, Rothamsted et Groningen, L. Turc a publié une gamme de formules permettant le calcul de l'ETP. En 1962, il ajouta à sa formule de calcul de l'ETR, le bilan radiatif et introduisit l'humidité relative. En gardant la simplicité et la disponibilité des données météorologiques, la formule de Turc s'écrit ainsi :

$$ETP_{\text{mm/mois}} = 0.40[T/T + 15](I_g + 50) \quad (6)$$

Dans laquelle on a

T : température moyenne mensuelle en °C, mesurée sous abri,

I_g : radiation solaire globale exprimée en cal/cm²/jour.

I_g = I_{ga} (0.18 + 0.62 h/H).

I_{ga} : radiation maximale théorique tirée des abaques (voir annexes).

La constante 0.4 est remplacé par 0.39 pour les mois de 30 jours et par 0.37 pour le mois de février.

H : durée astronomique du jour, définie à partir des abaques (voir annexes).

h : durée d'insolation effective mesurée par l'héliographe.

Quand l'humidité relative mensuelle de l'atmosphère est inférieure à 50%, on multiplie la valeur de l'ETP par le coefficient de correction suivant :

$k = 1 + [(50 - hr)/70]$ avec

hr : humidité relative de l'air durant le mois en question.

Les résultats de l'application de cette formule sur la plaine de Meskiana sont présentés dans le tableau 07.

Tableau 07: Valeurs de l'ETP estimées par la méthode de Turc.

| | Sept | Oct | Nov | déc | Jan | Fév | Mar | Avr | Mai | Juin | Juil | Août | Année |
|-----------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| T (°C) | 21.47 | 16.65 | 10.92 | 7.55 | 6.27 | 7.54 | 10.06 | 13.04 | 18.19 | 23.16 | 26.45 | 25.7 | |
| I _{ga} | 630 | 593 | 456 | 393 | 430 | 556.2 | 714.5 | 852.6 | 943.7 | 973.5 | 955.5 | 864.6 | |
| H en heures | 372 | 352.3 | 334.4 | 304.2 | 315.3 | 308.4 | 373.3 | 390.4 | 432 | 432.2 | 442.3 | 416 | |
| h en heures | 256 | 215 | 172 | 138 | 136.1 | 136.7 | 169.3 | 204 | 285.7 | 277.3 | 333.2 | 305.5 | |
| I _g | 342.8 | 329 | 196.1 | 181.3 | 192.4 | 253 | 329.1 | 429.6 | 556.6 | 562.5 | 618.3 | 549.3 | |
| Hr | 50 | 56.4 | 65.7 | 67.5 | 65.3 | 67.8 | 56.7 | 45.8 | 49.5 | 41.2 | 35.6 | 39.5 | |
| ETP en mm | 101.68 | 79.75 | 41.46 | 30.9 | 28.5 | 37.5 | 60.8 | 89.2 | 132.7 | 148.2 | 170.6 | 151.3 | 1064.68 |

III.6.2.2 Formule de Thornthwaite :

L'agronome américain G.W. Thornthwaite proposa en 1948 une expression pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle en tenant compte seulement de la température mensuelle. Le développement de cette expression donne la formule suivante :

$$ETP = 16(10T/I)^a \quad (7) \quad \text{où}$$

ETP : évapotranspiration potentielle en (mm)

T : température moyenne du mois en (°C)

$$I = \sum i \quad \text{et} \quad i = (t/5)^{1.514}$$

$$a = (1.6.I/100) + 0.5 \quad (\text{D'après Serra L. 1954})$$

Les valeurs obtenues sont corrigées par un coefficient de correction k qui dépend de la latitude du bassin. Tableau 08.

Tableau 08 : Valeurs de l'ETP estimées par la formule de Thornthwaite.

| | Sept | Oct | Nov | Déc | Jan | Fév | Mar | Avr | Mai | Juin | Juil | Août | Total |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| T (°C) | 21.47 | 16.65 | 10.92 | 7.55 | 6.27 | 7.54 | 10.06 | 13.04 | 18.19 | 23.16 | 26.45 | 25.69 | |
| ETP _{nc} (mm) | 96.21 | 63.2 | 31.52 | 17.95 | 12.67 | 17.26 | 27.47 | 41.81 | 73.30 | 108.2 | 134.7 | 129.3 | |
| K | 1.03 | 0.97 | 0.85 | 0.83 | 0.86 | 0.84 | 1.03 | 1.1 | 1.21 | 1.22 | 1.24 | 1.16 | |
| ETP _c (mm) | 99.1 | 61.3 | 26.8 | 14.9 | 10.9 | 14.5 | 28.3 | 46 | 88.7 | 132 | 167 | 150 | 839.5 |

ETP_{nc} : ETP non corrigée ETP_c : ETP corrigée

III.6.2.3 Discussion des résultats.

Il est utile de comparer les résultats obtenus par les des deux méthodes utilisées afin de connaître celle qui s'adapte le mieux à la région. Le graphe relatif (figure 21) à la station de Meskiana a permis de conclure que les résultats auxquels nous avons aboutis sont relativement égaux. Pour notre région, nous allons appliquer la méthode de Thornthwaite, qui est universellement appliquée pour le calcul des bilans hydrologiques.

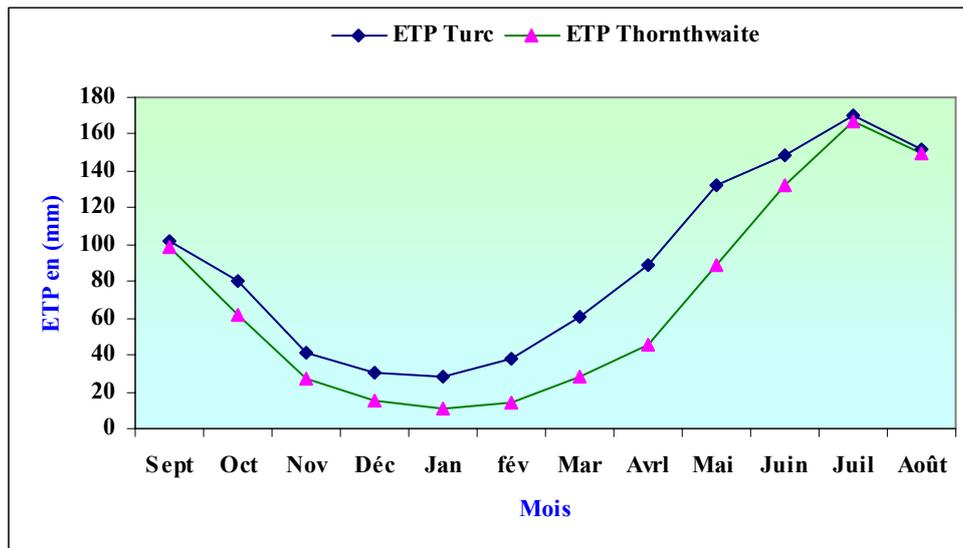


Figure 21 :L'ETP estimée par différentes méthodes.

III.6.3 Estimation de l'évapotranspiration réelle(ETR) :

Elle peut se faire à l'aide de deux formules parmi tant d'autres.

-Formule de L. Turc (1954) qui s'écrit de la manière suivante :

$$ETR = P / (0.9 + p^2 / L^2)^{1/2} \quad (8) \quad \text{où}$$

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

T : température moyenne annuelle de l'air en (°C),

P :précipitation moyenne annuelle en (mm)

Soit ETR = 334 mm

-Formule de M. Coutagne qui s'écrit de la manière suivante :

$$ETR = P - \lambda P^2 \quad (9) \quad \text{avec}$$

$$\lambda = 1 / (0.8 + 0.14T)$$

P :précipitation moyenne annuelle en (m).

L'application de cette formule est conditionnée par la relation suivante :

$$1/8\lambda \leq 1/2\lambda$$

Soit ETR = 303 mm

III.7 LE BILAN HYDROLOGIQUE :

III.7.1 Calcul du bilan hydrologique par la méthode de Thornthwaite :

Cette méthode est utilisée pour les climats sub-humide et semi-aride, ce qui convient à la région de Meskiana, vu les caractéristiques de son climat. Elle est basée sur la notion de réserve d'eau facilement utilisable (RFU). L'estimation de ce paramètre a été faite par l'application de la formule de Hallaire 1960 (cité par J.Ricard1979).

$$RFU = \frac{1}{3} . Da . He . P \quad (10) \quad \text{où}$$

Da : densité apparente du sol, pour la plaine de Meskiana Da = 1.4

He : humidité équivalente en %, estimée à 25 %.

P : profondeur de la couche traversée par les racines, estimée à 22 cm

RFU = 26 mm

L'application de la méthode de Thornthwaite pour l' année moyenne, l'année la plus humide et l'année la plus sèche a donné les résultats qui sont consignés dans les tableaux 9 à 11.

Tableau 09: Bilan hydrologique moyen (1971/1972-2004/2005) à la station de Meskiana, par la méthode de Thornthwaite.

| | Sept | Oct | Nov | Dec | Jan | Fév | Mar | Avr | Mai | Juin | Juil | Août | Total |
|----------------------------------|------------|------------|---------|--------|------------|----------------|----------------|-----------|------------|---------|---------|---------|--------|
| P(mm) | 38.86 | 28.21 | 31.88 | 25.86 | 26.02 | 24.9 6 | 39.3 5 | 28.6 | 35.48 | 25.15 | 9.81 | 26.81 | 340.99 |
| T(C°) | 21.47 | 16.65 | 10.92 | 7.55 | 6.27 | 7.54 | 10.0 6 | 13.0 4 | 18.19 | 23.16 | 26.45 | 25.69 | |
| ETP(mm) | 99.1 | 61.3 | 26.8 | 14.9 | 10.9 | 14.5 | 28.3 | 46 | 88.7 | 132 | 167 | 150 | 839.5 |
| P-ETP | - 60.24 | - 33.09 | + 05.08 | + 10.9 | + 15.12 | + 10.4 6 | + 11.0 5 | - 17.4 | - 53.22 | -106.85 | -157.19 | -123.19 | |
| RFU₂₆(m m) | 00 | 00 | 5.08 | 16.04 | 26 | 26 | 26 | 8.6 | 00 | 00 | 00 | 00 | |
| ETR(mm) | 38.86 | 28.21 | 26.88 | 14.9 | 10.9 | 14.5 | 28.3 | 46 | 44.08 | 25.15 | 9.81 | 26.81 | 314.32 |
| EX(mm) | 00 | 00 | 00 | 00 | 5.16 | 10.4 6 | 11.0 5 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 26.67 |
| DA(mm) | 60.24 | 33.09 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 44.62 | 106.85 | 157.19 | 123.19 | 525.18 |

Tableau 10: Bilan hydrologique pour l'année la plus humide à la station de Meskiana, par la méthode de Thornthwaite (2002/2003).

| | Sept | Oct | Nov | Dec | Jan | Fév | Mar | Avr | Mai | Juin | Juil | Août | Total |
|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|---------|---------|--------|
| P(mm) | 32.6 | 77.9 | 59.3 | 36.5 | 53.5 | 25.5 | 31 | 64.1 | 83.7 | 30.9 | 16.2 | 36.8 | 548 |
| T(C°) | 21.6 | 17.2 | 11.2 | 8.4 | 6.4 | | 6.2 | 10.6 | 14.1 | 18.5 | 24.4 | 27.6 | |
| ETP(mm) | 100.81 | 63.24 | 31.64 | 18.04 | 11.32 | 10.92 | 28.19 | 47.79 | 74.72 | 124.8 | 177.06 | 150.48 | 839.01 |
| P-ETP | -68.21 | +14.66 | +27.66 | +18.46 | +42.18 | +14.58 | +2.81 | +16.31 | +08.98 | -93.90 | -160.86 | -113.68 | |
| RFU₂₆(mm) | 00 | 14.66 | 26 | 26 | 26 | 26 | 26 | 26 | 26 | 00 | 00 | 00 | |
| ETR(mm) | 32.6 | 63.24 | 31.64 | 18.04 | 11.32 | 10.92 | 28.19 | 47.79 | 74.72 | 56.9 | 16.2 | 36.8 | 428.36 |
| EX(mm) | 00 | 00 | 16.32 | 18.46 | 42.18 | 14.58 | 2.81 | 16.31 | 8.98 | 00 | 00 | 00 | 119.64 |
| DA(mm) | 68.21 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 67.9 | 160.86 | 113.68 | 410.65 |

Tableau 11: Bilan hydrologique pour l'année la plus sèche à la station de Meskiana, par la méthode de Thornthwaite (1993/1994).

| | Sept | Oct | Nov | Dec | Jan | Fév | Mar | Avr | Mai | Juin | Juil | Août | Total |
|-----------------------------|--------|--------|--------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|--------|
| P(mm) | 16.05 | 26.2 | 9.9 | 19.5 | 44.2 | 20.9 | 9.4 | 13.3 | 31.7 | 50.6 | 14.5 | 6.7 | 262.95 |
| T(C°) | 22.3 | 19.1 | 11.1 | 7.7 | 7.5 | 8.9 | 11.9 | 11.8 | 21.9 | 24.2 | 27 | 28.6 | |
| ETP(mm) | 105.61 | 74.69 | 29.80 | 14.55 | 14.02 | 19.08 | 33.12 | 33.58 | 99.36 | 122.36 | 139.26 | 160.65 | 846.08 |
| P-ETP | -89.56 | -48.49 | -19.90 | +4.95 | +30.18 | +1.82 | -23.72 | -20.28 | -67.66 | -71.76 | -124.76 | -153.95 | |
| RFU₂₆(mm) | 00 | 00 | 00 | 4.95 | 26 | 26 | 2.28 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | |
| ETR(mm) | 16.05 | 26.2 | 9.9 | 14.55 | 14.02 | 19.08 | 33.12 | 15.58 | 31.7 | 50.6 | 14.5 | 6.7 | 252 |
| EX(mm) | 00 | 00 | 00 | 00 | 9.13 | 1.82 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 10.95 |
| DA(mm) | 89.56 | 48.49 | 19.9 | 00 | 00 | 00 | 00 | 18 | 67.66 | 71.76 | 124.76 | 153.95 | 594.08 |

III.7.2 Interprétation du bilan hydrologique.

L'observation du graphe du bilan hydrologique nous amène à dire que l'ETP est importante du mois d'avril jusqu'au mois d'octobre, avec des valeurs atteignant les 160 mm au mois d'août (1993/1994), rendant ainsi nécessaire l'irrigation. A partir du mois de novembre, on assiste à une reconstitution du stock qui s'accompagne d'une augmentation de la RFU, qui atteint son maximum entre les mois de janvier et mars. Au-delà de cette période, on assiste à une baisse de la RFU, traduisant un épuisement du stock. Tableau 9 et figure 22.

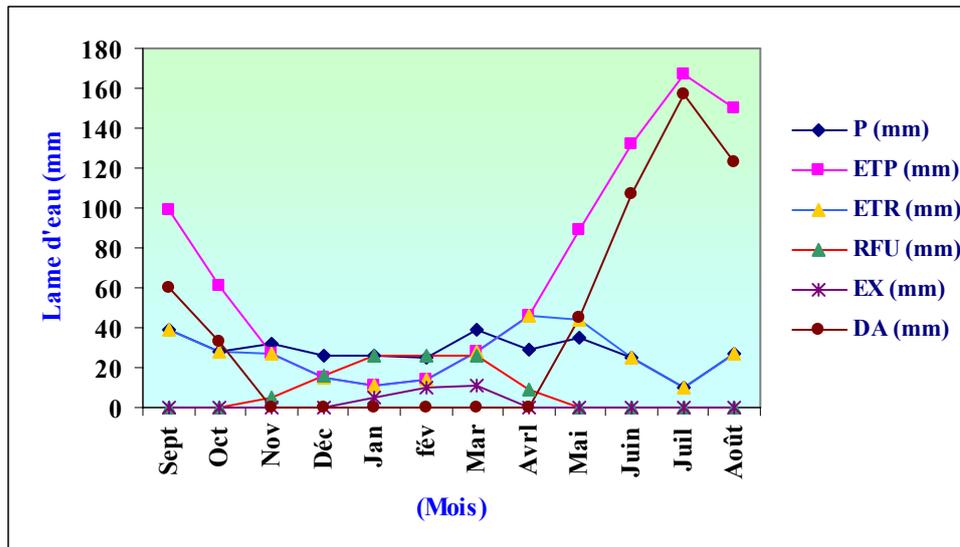


Figure 22: Bilan hydrologique à la station de Meskiana, par la méthode de Thornthwaite pour la période (1971/1972 -2004/2005).

III.7.3 Répartition de l'excédent :

L'application de la formule de Tixeront-Berkaloff pour une année moyenne donne le résultat suivant :

$$R = P^3/3.ETP^2 \quad (11) \quad \text{où}$$

R : Ruissellement (m).

P : Précipitations moyennes mensuelles (m).

ETP : Evapotranspiration potentielle (m).

L'application numérique donne

$$R = 22 \text{ mm}$$

l'infiltration (I) :

$$I = EX - R \quad (12) \quad \text{où}$$

$$I = 5 \text{ mm}$$

Il est à noter que cette valeur ne représente pas réellement l'infiltration dans tout le bassin, car son estimation est basée sur les données d'une seule station pluviométrique, qui est celle de Meskiana. Les mesures d'infiltration in situ, réparties sur toute superficie de la plaine, pourrait nous donner une approche fiable de ce paramètre.

Tableau 12: Répartition des précipitations à la station de Meskiana.

| Précipitation (P) | | Evapotranspiration réelle (ETR) | | Ruissellement (R) | | Infiltration (I) | |
|-------------------|-----|---------------------------------|-----|-------------------|------|------------------|------|
| (mm) | (%) | (mm) | (%) | (mm) | (%) | (mm) | (%) |
| 341 | 100 | 314,30 | 92 | 22 | 6.45 | 5 | 1.55 |

III.7.4 Commentaire sur le bilan hydrologique :

Le calcul du bilan hydrologique permet de faire les constatations suivantes :

-La pluie ne permet pas un stockage permanent de l'eau dans le sol, ce qui induit un déficit agricole plus ou moins long. Ainsi, la saturation de la RFU, pour une année moyenne, ne dure que 03 mois de janvier à mars. Cette saturation ne dure que 02 mois pour une année sèche et peut atteindre 07 mois pour une année humide. Cette situation induit un déficit agricole pendant 06 mois (de mai à octobre). Pour l'année la plus sèche, le déficit agricole est enregistré pendant 07 mois (de mai à novembre). Les sols agricoles demandent donc une irrigation par les eaux de surface, qui vont produire une recharge supplémentaire de la nappe et une modification de la composition chimique des eaux.

L'enregistrement de ce déficit agricole coïncide avec la période sèche.

-L'ETR ne couvre que 37% de l'ETP. Elle consomme 92% des précipitations. Ceci induit un faible excédent et par conséquent la recharge de la nappe est très limitée.

III.8 LES EAUX DE SURFACE

III.8.1 Estimation des eaux de surface :

Le bassin de Meskiana, d'une superficie de 1680 km², est drainé par l'Oued Meskiana et ses affluents. Ce dernier s'écoule du Sud vers le Nord et traverse ainsi la totalité de la plaine. La confluence, au Sud d'El Aouinet, de l'Oued Meskiana et de l'Oued Ksoub constitue l'Oued Mellègue. Il faut signaler que l'Oued Meskiana prend naissance au Sud d'Ain Dalâa et est alimenté, principalement, par plusieurs sources émergeant des calcaires de bordures telles que Ain Sedjera et Ain Bedjene. Le régime d'écoulement est semi-permanent, en relation avec le climat de la région.

Malheureusement, ce cours d'eau n'est doté d'aucune station hydrométrique qui permet de suivre son régime d'écoulement. L'estimation de l'écoulement s'est basée sur les deux stations hydrométriques d'El Aouinet et celle de Morsott par différence de débit (figure 23).

III.8.2 Ecoulement de surface et régime hydrologique :

En se basant sur les données illustrées dans le tableau 13, nous avons réalisé la courbe d'évolution des débits instantanés (figure 24). L'interprétation de la dite courbe montre que les fortes valeurs sont enregistrées pendant la période des hautes eaux (0.529 m³/s au mois de novembre, 0.479 m³/s au mois d'avril) et les plus faibles valeurs marquent la période des basses eaux avec 0.208 m³/s au mois de juin et 0.186 m³/s au mois de juillet.

Tableau 13: Estimation des débits instantanés en (m³/s) de l'Oued Meskiana pour la période (2000/2001-2004/2005).

| | Sept | Oct | Nov | Déc | Jan | Fév | Mar | Avr | Mai | Juin | Juil | Août | Total |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 00/01 | 0.462 | 0.454 | 0.296 | 0.315 | 0.383 | 0.335 | 0.325 | 0.234 | 0.423 | 0.123 | 0.036 | 0.041 | 3.427 |
| 01/02 | 0.474 | 0.045 | 0.520 | 0.158 | 0.305 | 0.341 | 0.463 | 0.415 | 0.224 | 0.048 | 0.32 | 0.245 | 3.558 |
| 02/03 | 0.441 | 0.910 | 0.875 | 0.467 | 0.653 | 0.403 | 0.440 | 0.880 | 0.934 | 0.435 | 0.30 | 0.381 | 7.127 |
| 03/04 | 0.545 | 0.471 | 0.922 | 1.126 | 0.302 | 0.290 | 0.495 | 0.335 | 0.378 | 0.037 | 0.04 | 0.292 | 5.234 |
| 04/05 | 0.425 | 0.450 | 0.032 | 0.430 | 0.446 | 0.333 | 0.453 | 0.531 | 0.393 | 0.372 | 0.22 | 0.731 | 4.821 |
| Moy | 0.469 | 0.466 | 0.529 | 0.499 | 0.418 | 0.340 | 0.435 | 0.479 | 0.470 | 0.203 | 0.18 | 0.338 | |

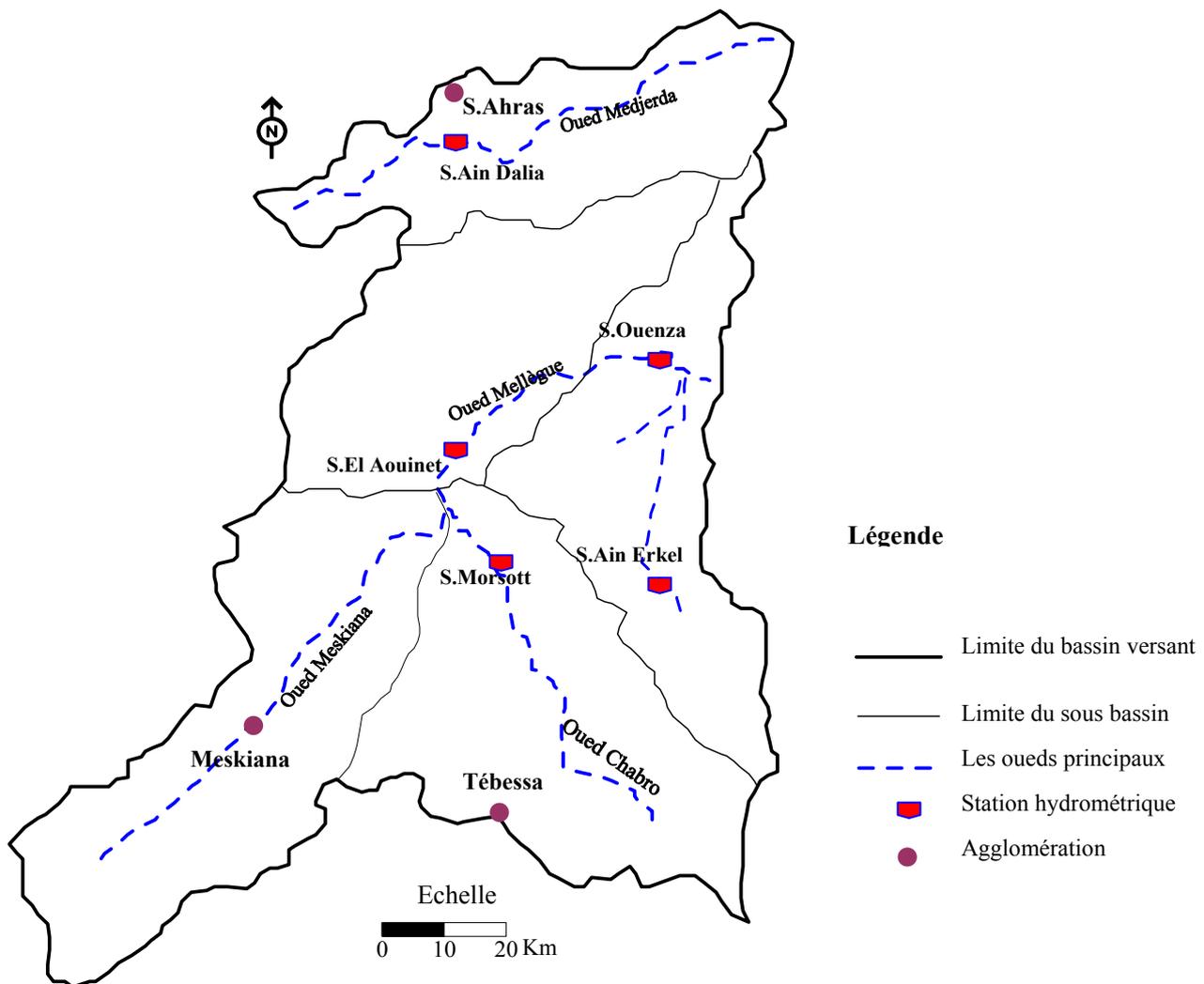


Figure23: Réseau hydrométrique dans le bassin de l'Oued Mellègue.

On note que l'évolution des débits montre un certain parallélisme avec celle des précipitations (figure 25), ceci montre l'influence de ces dernières sur les écoulements de surface. En se basant sur l'évolution du coefficient mensuel de débit, on remarque que la période des hautes eaux s'étale du mois de septembre jusqu'au mois de mai et celle des basses eaux commence au mois de juin et se termine au mois d'août (figure 26).

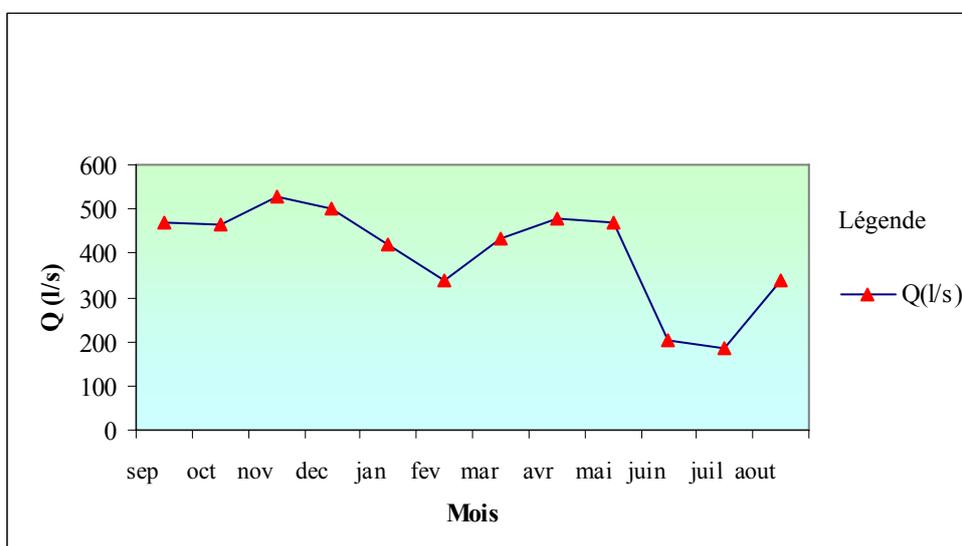


Figure 24 : Evolution des débits instantanés de l'Oued Meskiana pour la période 2000/2001- 2004/2005).

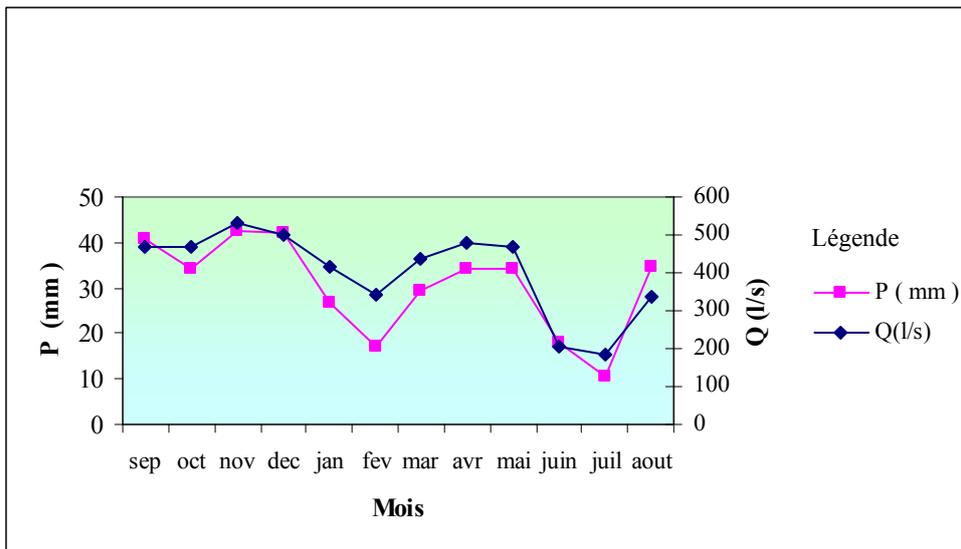


Figure 25 : Evolution des débits instantanés de l'Oued Meskiana en fonction des précipitations pour la période 2000/2001- 2004/2005).

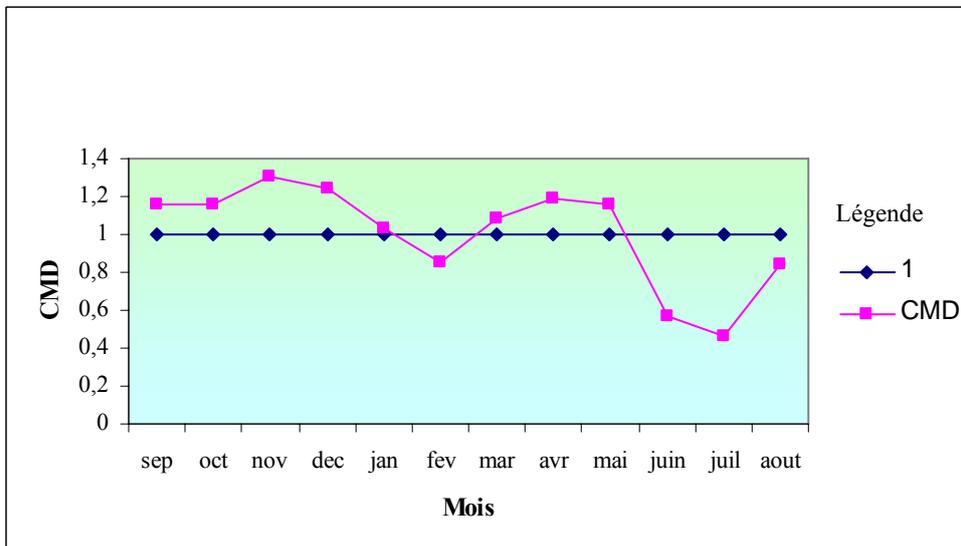


Figure 26 : Evolution du coefficient mensuel de débit de l'Oued Meskiana en pour la période 2000/2001- 2004/2005).

III.9 CONCLUSION

La plaine de Meskiana possède un climat méditerranéen de type semi-aride, avec un hiver froid et pluvieux, et un été chaud et sec, influencé par des facteurs géographiques (éloignement de la mer, altitude et orientation des reliefs). La répartition des précipitations et des températures influe sur la chimie des eaux par dilution pendant la période pluvieuse, ou concentration lors de l'évaporation durant la période sèche.

La température moyenne annuelle qui y règne est de 15,58°C.

Les précipitations moyennes annuelles, sur une période de 33 ans (72/73 – 2004/2005), sont estimées à 341 mm. L'évapotranspiration réelle est estimée à 314 mm, mobilisant 92 % des précipitations.

Le ruissellement ne représente que 6.45 % des précipitations, ce qui représente 22 mm.

L'infiltration ne laisse percoler que 5 mm, ce qui ne représente que 1.55% des précipitations.

Ceci laisse penser que l'alimentation de la nappe ne se fait pas exclusivement à l'aide de l'infiltration efficace, mais aussi sur les calcaires fissurés qui bordent la nappe.

Le régime des écoulements de l'Oued Meskiana dépend de celui des précipitations.

Chapitre IV :
HYDROGEOLOGIE

IV.1 INTRODUCTION:

Les formations aquifères, tant par leur nature lithologique que par leur extension dans l'espace, occupent une place importante dans notre présente étude, car elles influent sur le fonctionnement hydrogéologique de celles-ci. Ainsi, ce travail a pour but de comprendre l'impact des variations climatiques, dans le temps, et la variation de la lithologie dans l'espace, sur le comportement hydrodynamique de la nappe alluviale de Meskiana.

Les relevés piézométriques, effectués pendant 06 campagnes (03 en basses eaux et 03 en hautes eaux) et la détermination des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère (la transmissivité et la perméabilité) renseignent sur les caractéristiques de l'écoulement et le comportement de la nappe, permettent de cerner le risque de pollution et de protéger la nappe aquifère.

IV.2 GEOMETRIE DE L'AQUIFERE :

L'interprétation des résultats de la prospection électrique (CGG, 1974) et des données acquises suite aux sondages mécaniques a permis de visualiser la répartition du matériel du remplissage dans la nappe alluviale de Meskiana :

La zone de Dalâa est en réalité une dépression alluvionnaire, où l'épaisseur des alluvions peut atteindre 155 m. Dans la zone de Zebar, qui se situe entre Dalâa et Meskiana, les dépôts du remplissage ne dépassent pas 100 m d'épaisseur.

Il faut signaler que ces alluvions reposent sur un substratum marneux qui remonte en surface au Nord de la plaine.

IV.3 PIEZOMETRIE :

IV.3.1 Inventaire des points d'eau :

Dans la présente étude, seuls les ouvrages captant la nappe du remplissage alluvial nous ont intéressés, et plus de 180 puits et 17 forages ont été recensés. La plupart des puits, de faible profondeur mais de grand diamètre, ont été creusés mécaniquement, seuls quelques autres, situés à proximité des bordures, sont profonds.

On note que certains puits sont abandonnés et pourraient constituer des sources de pollution de la nappe. Deux forages sont également non exploités à cause de la forte salinité de leurs eaux.

Pour la réalisation de la cartographie piézométrique et hydrogéochimique, on a choisi un réseau représentatif de toute la nappe (figure 27), malheureusement, durant les campagnes piézométriques, quelques puits n'ont pas fait l'objet de relevés pour diverses raisons qui sont indépendantes de notre volonté. Nous signalons que les mesures ont été faites en utilisant une sonde piézométrique de 100 m à double signalisation (sonore et lumineuse).

IV.3.2 Evolution de la piézométrie :

Le suivi de l'évolution piézométrique de la nappe dans le temps et dans l'espace permet de reconnaître d'une part, la direction générale de l'écoulement et d'autre part d'identifier quelques paramètres hydrodynamiques (gradient hydraulique et vitesse d'écoulement). Ces derniers nous renseignent sur le temps de séjour des eaux d'infiltration dans la couche aquifère et par conséquent nous informe sur le degré des échanges géochimiques entre l'eau et la roche.

Comme les eaux souterraines représentent le moyen de transport des substances minérales et organiques, la détermination de leur itinéraire renseigne sur leur minéralisation et l'origine de leur pollution. La cartographie piézométrique a été illustrée à la base des relevés piézométriques des différentes campagnes, par interpolation triangulaire, en utilisant le logiciel Surfer 8 (Golden software, 2002).

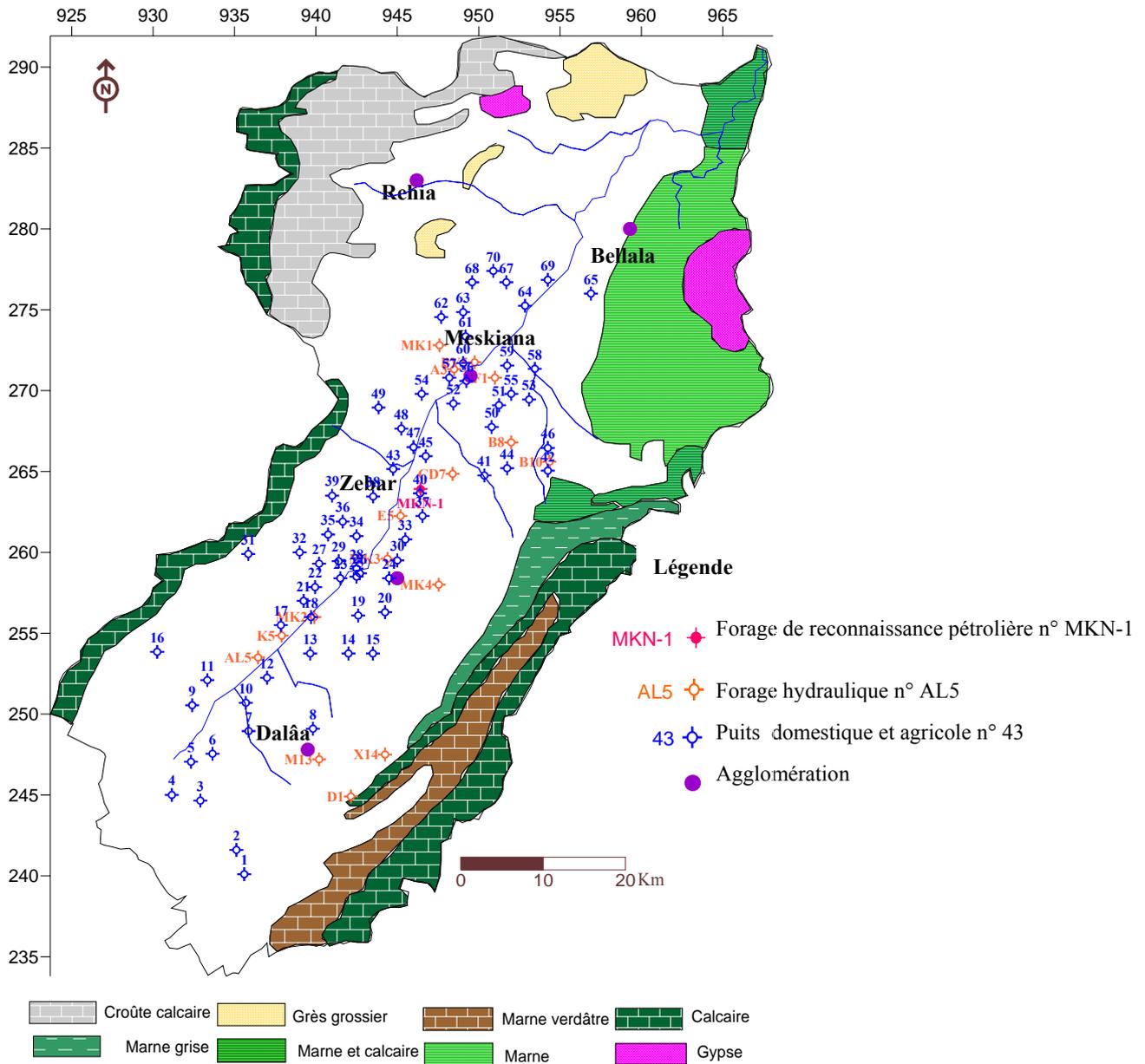


Figure 27: Carte d'inventaire des points d'eau de la nappe de la plaine de Meskiana.

IV.3.3 Carte piézométrique mars 2002 :

L'observation de la morphologie de la carte piézométrique des hautes eaux (mars 2002) permet de constater que l'écoulement souterrain se fait, en général, suivant une direction du Sud-Ouest vers le Nord-Est (figure 28). L'axe de drainage des eaux souterraines coïncide sensiblement avec le parcours de l'Oued Meskiana qui draine les eaux de surface. Dans la zone méridionale de la nappe, les courbes isopièzes sont resserrées, indiquant un gradient hydraulique important, de l'ordre de 0.007.

Dans la zone centrale, les courbes se trouvent espacées suite à un gradient hydraulique faible, de l'ordre de 0.002. Au Nord de Meskiana, les courbes deviennent plus espacées car c'est la zone d'accumulation des eaux souterraines. On pense que la variation du gradient hydraulique est due, essentiellement, à l'hétérogénéité de la lithologie

On note que la surface piézométrique met en évidence une nappe convergente. Son alimentation se fait à partir des bordures calcaires de Dj Guerigueur à l'Est, et Dj Bou Tokhma et Guern Ahmar à l'Ouest.

Il est à signaler qu'au Nord-Est l'assise marneuse d'âge Cénomaniens constitue une limite à flux nul et à l'extrême Nord l'élévation du substratum marneux jusqu'à la surface du sol

constitue également une limite imperméable, car les courbes piézométriques sont perpendiculaires aux bordures.

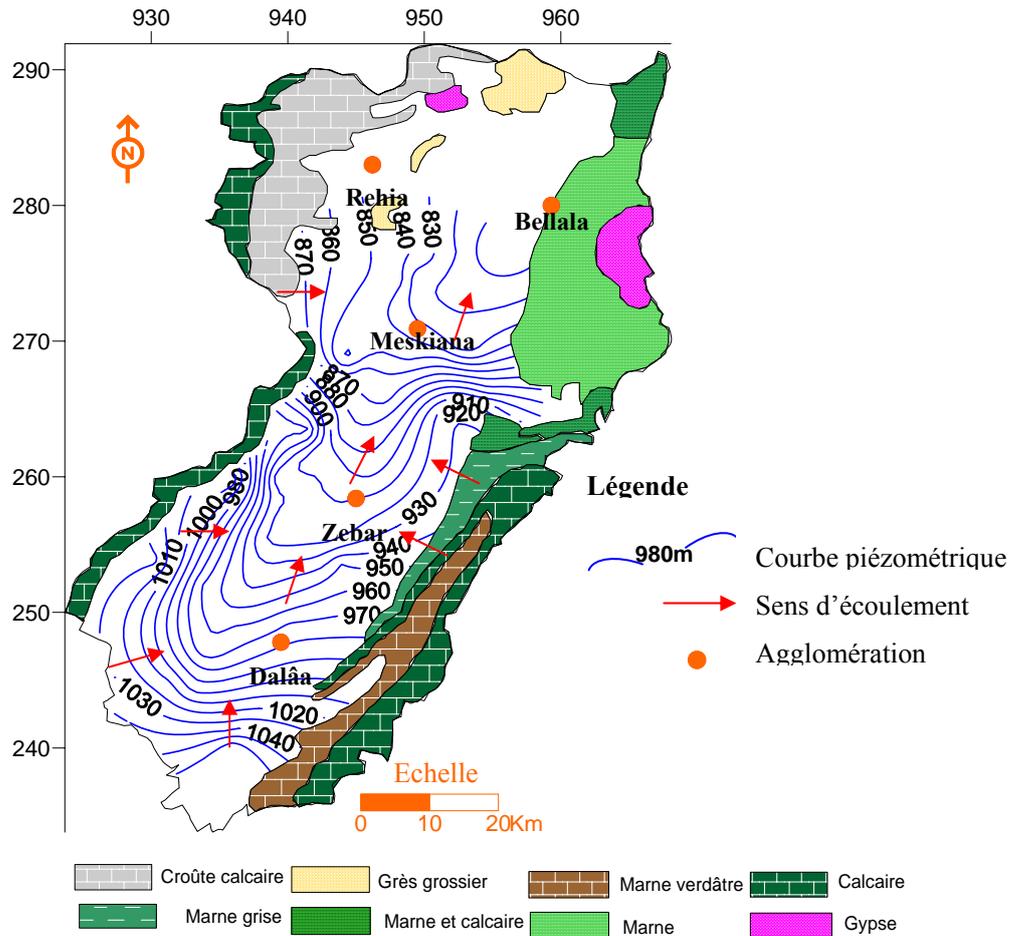


Figure 28 : Carte piézométrique de la nappe de Meskiana, mars 2002.

IV.3.4 Carte piézométrique juillet 2002:

Cette carte piézométrique correspond à la période des basses eaux (figure 29). Elle possède la même morphologie piézométrique que la carte précédente ; ceci est dû à la faible recharge qui n'arrive pas à combler l'exhaure de la nappe.

Néanmoins, on remarque une certaine fluctuation de la surface piézométrique au centre de la nappe et quelques perturbations dues au pompage.

IV.3.5 Carte piézométrique mars 2003 :

L'analyse de cette carte révèle la même morphologie de la carte piézométrique (mars 2002), mais avec des fluctuations plus importantes qui sont dues une forte recharge, car l'année 2003 a été la plus arrosée, avec une hauteur pluviométrique de 548 mm (figure 30).

IV.3.6 Carte piézométrique juillet 2003 :

L'examen de cette carte conduit aux mêmes constatations que celles signalées dans les cartes précédentes de la même période (basses eaux), avec une certaine augmentation du niveau piézométrique due à la forte pluviométrie annuelle. On remarque une certaine perturbation locale au niveau de la zone d'accumulation, due à la surexploitation de la nappe pour assurer l'irrigation (figure 31).

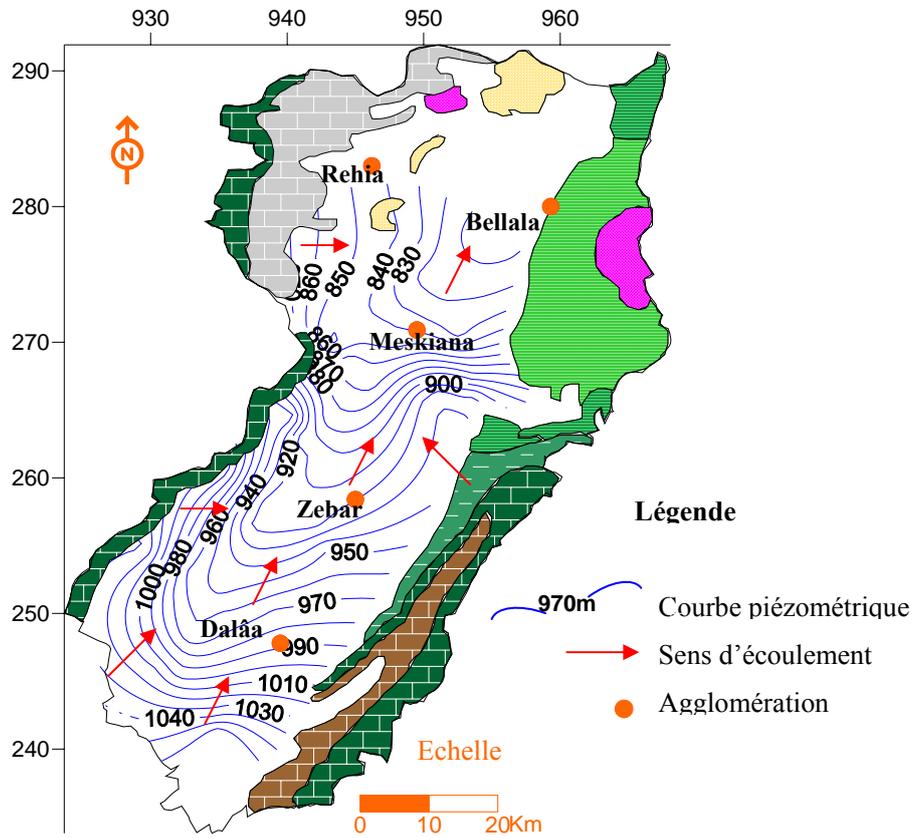


Figure 29: Carte piézométrique de la nappe de Meskiana, juillet 2002.

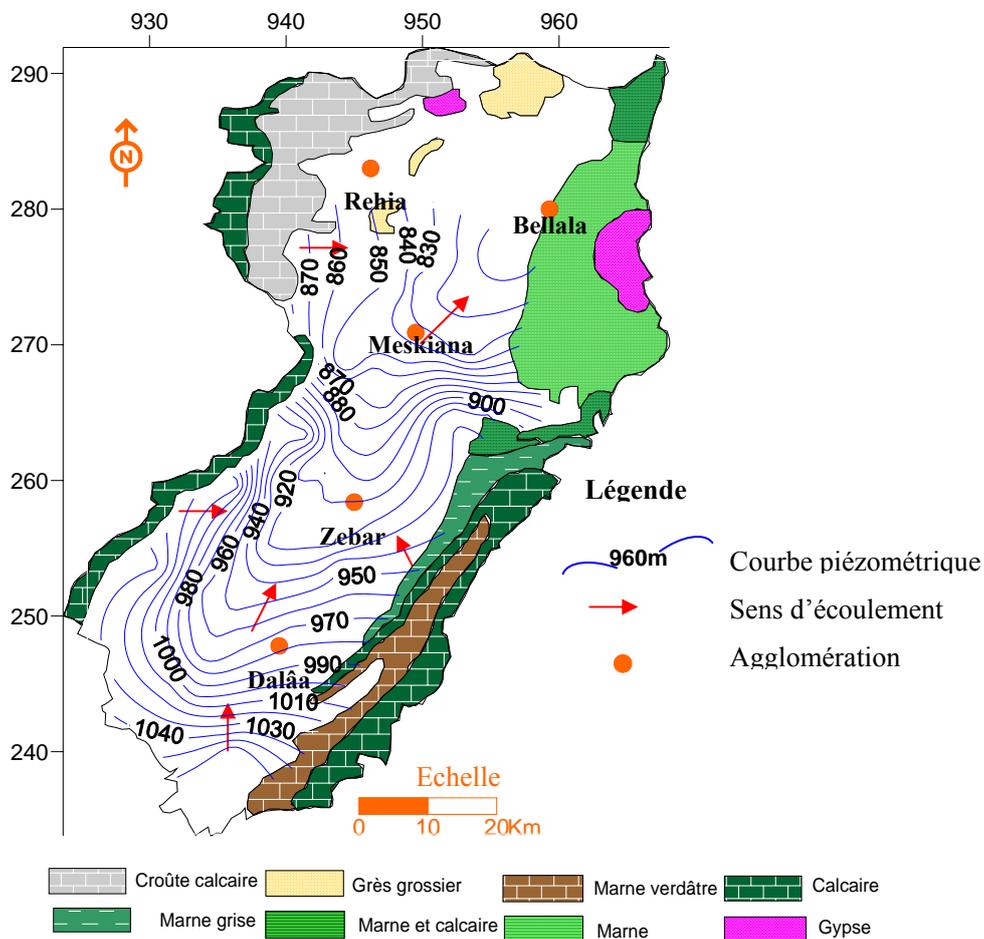


Figure 30 : Carte piézométrique de la nappe de Meskiana, mars 2003.

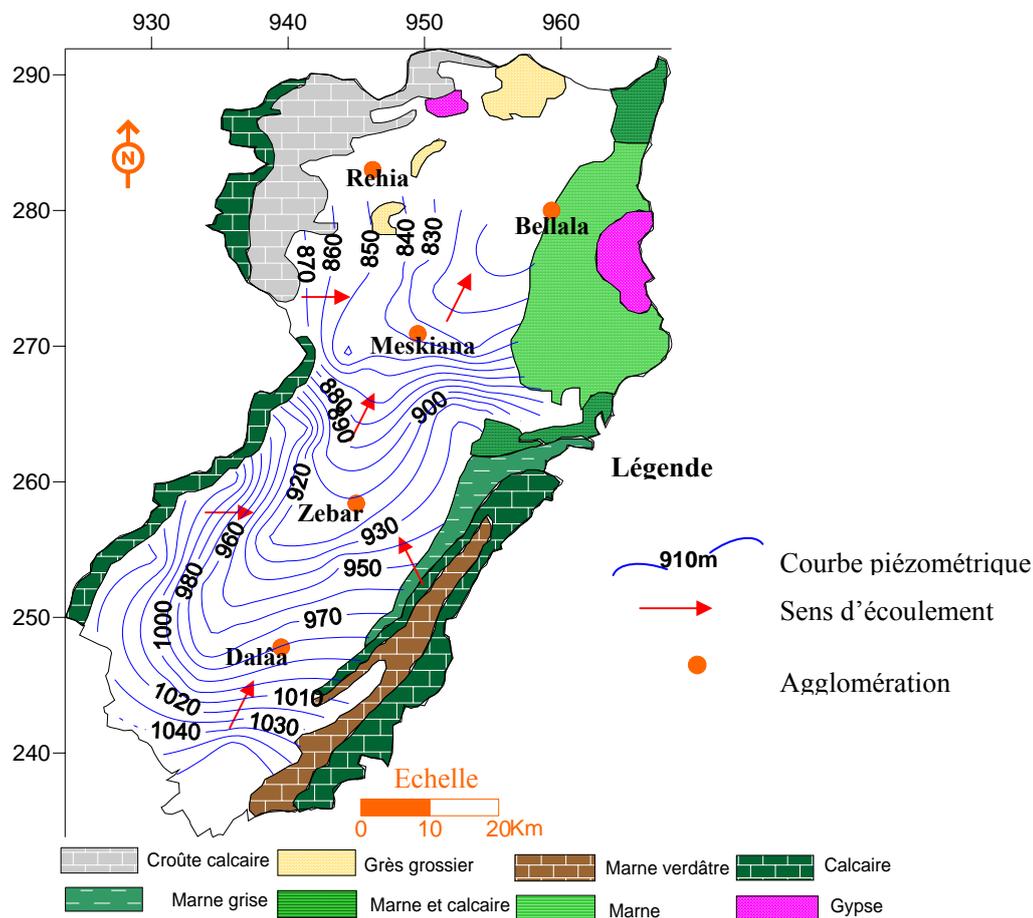


Figure 31: Carte piézométrique de la nappe de Meskiana, juillet 2003.

IV.3.7 Carte piézométrique mars 2004:

Les courbes piézométriques montrent une même morphologie que dans les cartes précédentes, ce qui traduit le même régime d'écoulement. Cependant, on note une diminution des cotes piézométriques des puits par rapport aux périodes précédentes, due à la faible recharge de la nappe suite à la faible pluviométrie annuelle qui n'excède pas 325 mm (figure 32).

IV.3.8 Carte piézométrique juillet 2004 :

L'examen de la carte piézométrique ne révèle aucun changement que ce soit de la morphologie ou de l'allure des courbes piézométriques, traduisant ainsi le même régime d'écoulement (figure 33). Il faut signaler que l'écoulement des eaux souterraines présente une certaine convergence vers le centre de la plaine pour coïncider avec le tracé de l'oued principal, ce qui justifie le renforcement de l'alimentation des eaux de surface.

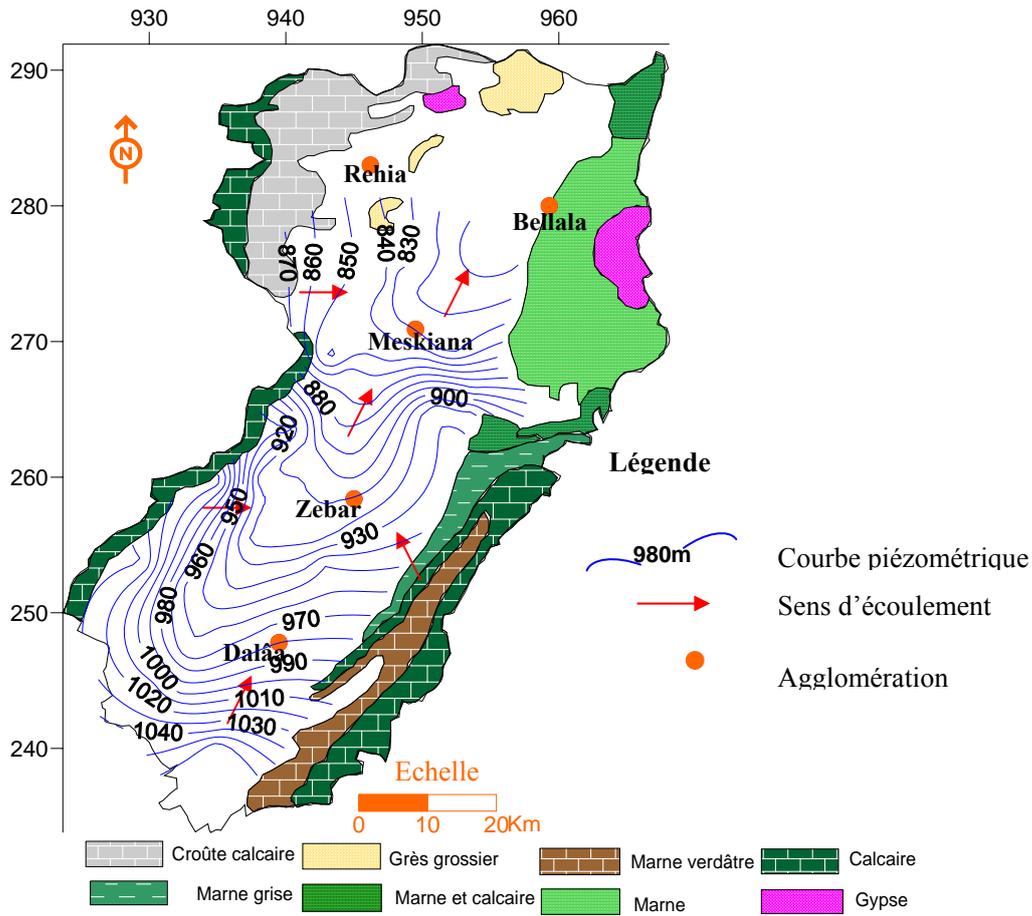


Figure 32: Carte piézométrique de la nappe de Meskiana, mars 2004.

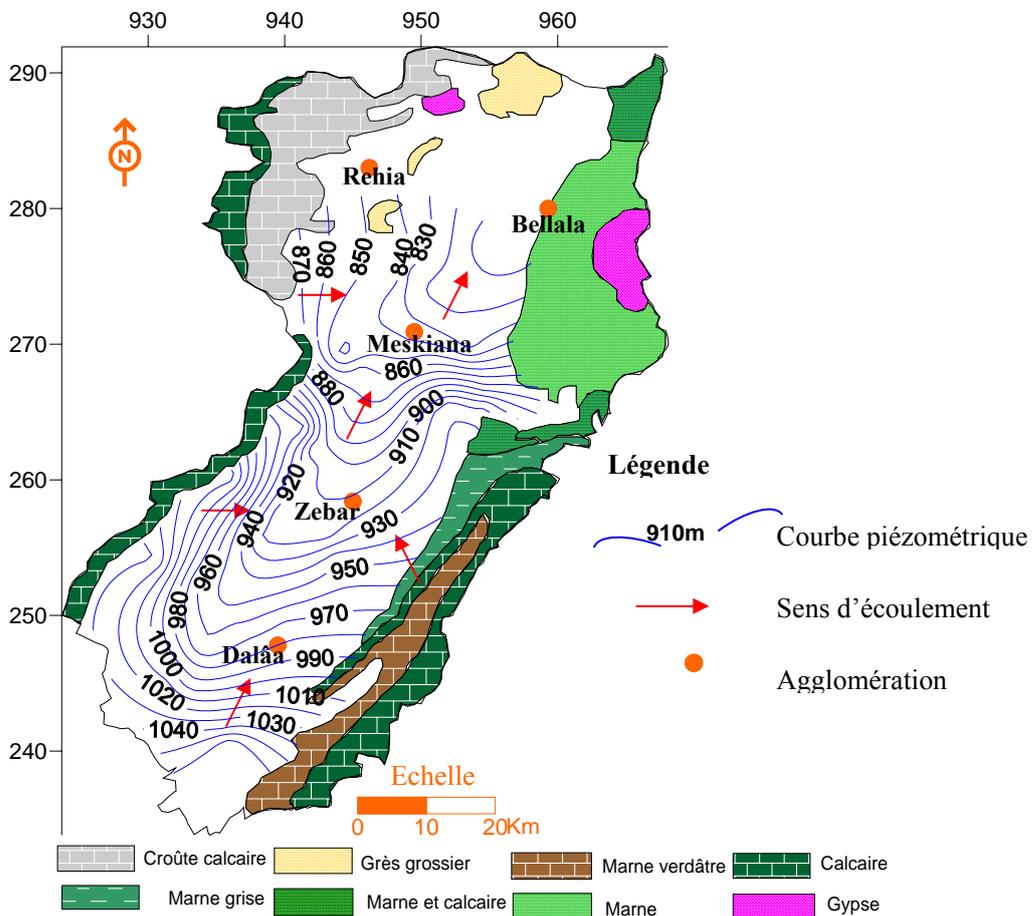


Figure 33: Carte piézométrique de la nappe de Meskiana, juillet 2004.

IV.4 CONDITIONS AUX LIMITES :

Dans le but de mieux comprendre le fonctionnement hydraulique de la nappe, on a établi la carte des conditions aux limites de la nappe aquifère de Meskiana (figure 34). Cette carte a été établie en se basant sur les caractéristiques lithologiques des formations géologiques, les propriétés géophysiques de celles-ci et les relevés piézométriques.

La bordure orientale de Dj Guerigueur, formée essentiellement par des calcaires fracturés d'âge Maestrichtien, constitue une limite perméable, car elle alimente latéralement la nappe alluviale. La bordure occidentale de Dj Bou Tokhma et Dj Guern Ahmar, formée de calcaires perméables d'âge Maestrichtien, constitue une limite à flux entrant. Vu leur nature lithologique, les marnes cénomaniennes, affleurant au Nord-Est de la plaine, forment une limite étanche.

Les marnes et les argiles emscheriennes constituent le substratum imperméable, empêchant ainsi les eaux d'infiltration de pénétrer en profondeur. Ces dernières s'écoulent gravitairement vers l'aval. Au Nord, le substratum imperméable surgit en surface, ce qui rend la quasi-totalité de cette limite imperméable, avec une zone centrale à flux imposé sortant. L'Oued Meskiana draine la nappe alluviale en période des basses eaux, comme il peut l'alimenter en période de hautes eaux, et correspond par conséquent à une limite à potentiel imposé. Les pluies efficaces sont pratiquement nulles, comme on l'a vu lors de l'étude du bilan hydrologique.

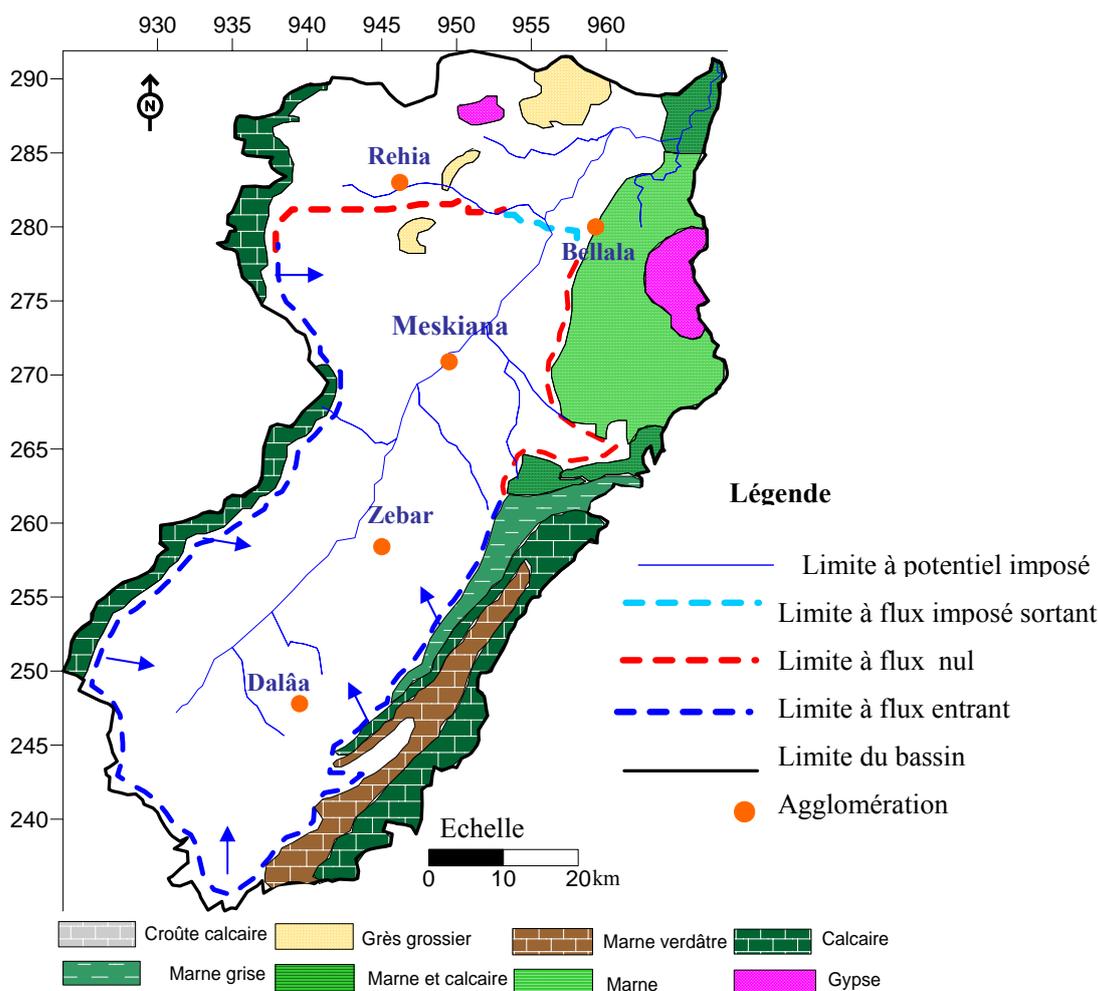


Figure 34: Carte des conditions aux limites de la nappe de la plaine de Meskiana.

IV.5 Battement de la nappe:

La comparaison de la piézométrie entre la période de basses eaux et celle de hautes eaux a permis de dresser une carte de battement de la nappe pour les années 2002, 2003 et 2004. (Figures 35 à 37).

Cette opération a montré que les fluctuations les plus importantes se manifestent en bordures de nappe et peuvent atteindre 0.7 m. Au centre de la nappe, celles-ci varient entre 0 et 0.4 m

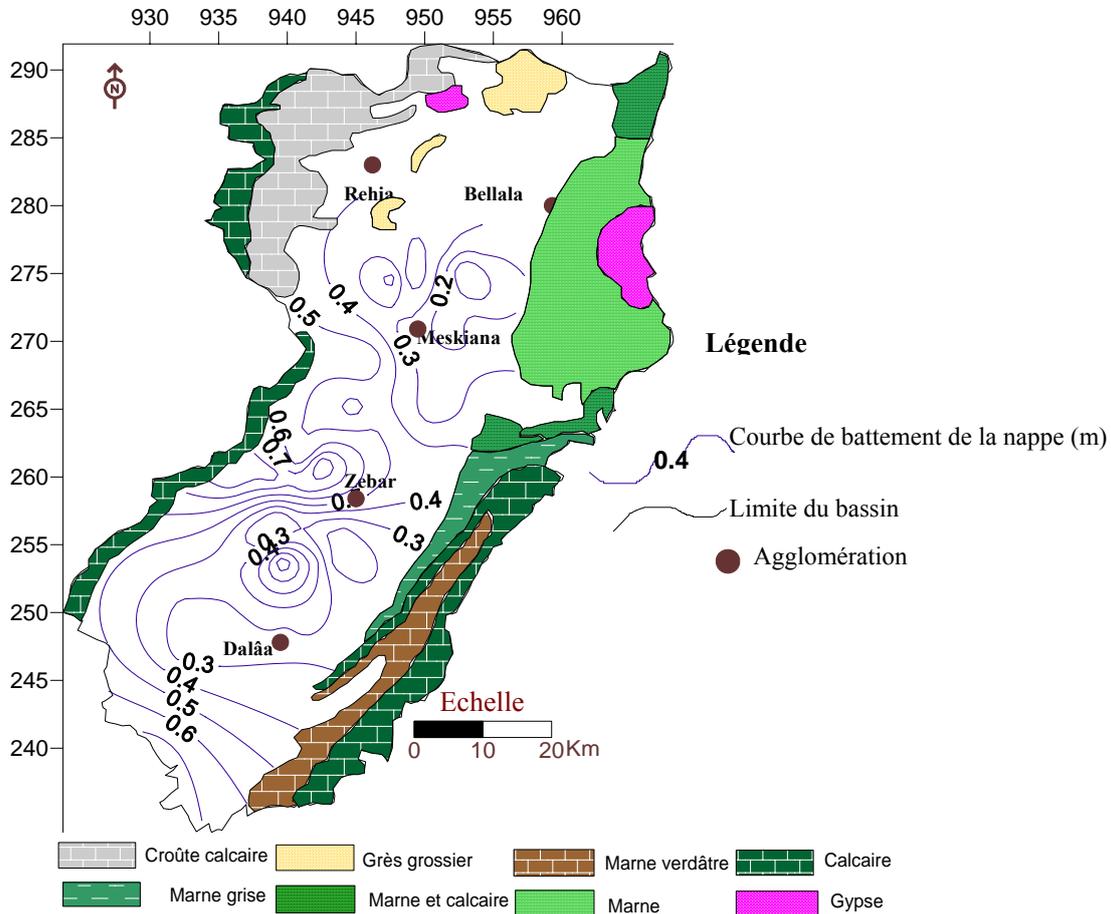


Figure 35: Carte de battement de la nappe de Meskiana en (m) durant l'année 2002.

IV.6 ETUDE DES PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES

IV.6.1 Détermination des paramètres hydrodynamiques de la nappe :

Dans le but de déterminer la transmissivité et la perméabilité, nous avons utilisé les résultats des essais de débits de 22 puits. Leur interprétation graphique est basée sur l'expression de l'approximation logarithmique de **C.E.Jacob** (1950).

$$s = \frac{0.183.Q}{T} \log \frac{2.25T.t}{R^2.S} \quad (13) \quad \text{où :}$$

s: rabattements en (m) ;

T : transmissivité en (m²/s) ;

Q : débit de pompage en (m³/s) ;

S : coefficient d'emmagasinement ;

t : temps écoulé depuis le début du pompage en (secondes) ;

R : distance entre le piézomètre et le forage en (m).

Les graphes de cette interprétation, sont représentés en annexe III.

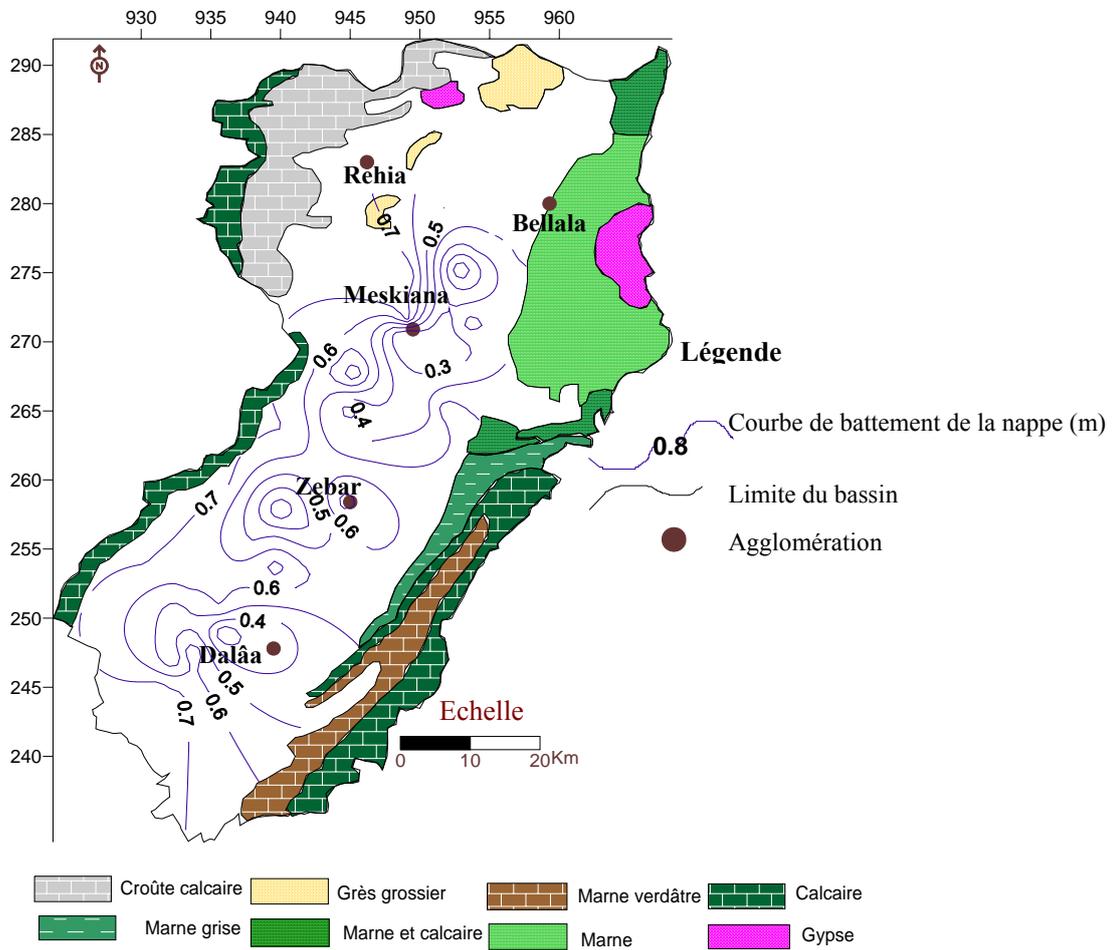


Figure 36: Carte de battement de la nappe de Meskiana en (m) durant l'année 2003.

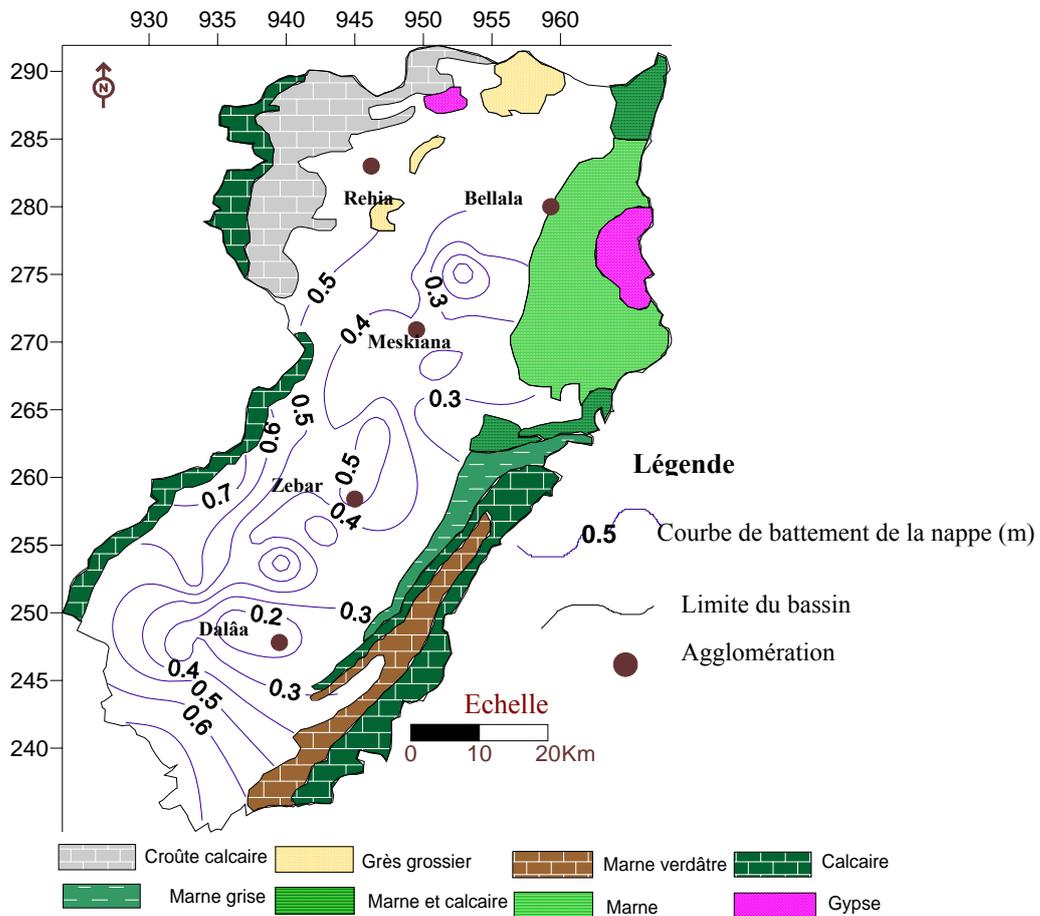


Figure 37 : Carte de battement de la nappe de Meskiana en (m) durant l'année 2004.

La détermination de la perméabilité a été faite en se basant sur la transmissivité et l'épaisseur de la couche mouillée de l'aquifère. Cette dernière a été estimée en se basant sur les profils géoélectriques et les colonnes lithostratigraphiques des forages. L'application de la relation suivante a permis la détermination de la perméabilité, dont les résultats sont consignés dans le tableau 14.

$$K = \frac{T}{e} \quad (14) \quad \text{où}$$

K : perméabilité (m/s) ;

T : transmissivité (m²/s) ;

e : épaisseur de la couche mouillée aquifère (m).

Tableau 14: Détermination des paramètres hydrodynamiques.

| Puits | Q (l/s) | Δ (m) | T (m ² /s). 10 ⁻³ | K (m/s) .10 ⁻⁴ |
|-------|---------|-------|---|---------------------------|
| 1 | 4 | 1.2 | 0.53 | 0.05 |
| 3 | 5 | 0.5 | 0.54 | 0.05 |
| 6 | 5 | 0.5 | 0.63 | 0.056 |
| 9 | 4 | 0.95 | 1.13 | 0.26 |
| 11 | 4 | 0.9 | 1.15 | 0.14 |
| 12 | 5 | 0.4 | 1.45 | 0.11 |
| 32 | 10 | 1.5 | 1.47 | 0.16 |
| 33 | 5 | 0.5 | 3.31 | 0.27 |
| 34 | 15 | 1 | 1.66 | 0.64 |
| 35 | 5 | 1.5 | 1.45 | 0.37 |
| 38 | 10 | 0.44 | 4.4 | 0.25 |
| 40 | 15 | 0.7 | 5.4 | 0.64 |
| 45 | 8 | 3.5 | 3.1 | 0.74 |
| 47 | 5.5 | 0.6 | 3.3 | 0.75 |
| 50 | 5 | 1.6 | 1.6 | 0.65 |
| 51 | 5 | 1.5 | 1.3 | 0.32 |
| 52 | 6 | 1 | 1.2 | 0.29 |
| 54 | 5 | 0.36 | 0.94 | 0.27 |
| 55 | 3 | 0.4 | 0.93 | 0.25 |
| 57 | 5 | 1.6 | 0.95 | 0.26 |
| 64 | 2.5 | 1.3 | 0.92 | 0.26 |
| 68 | 3 | 2.6 | 0.92 | 0.26 |

IV.6.2 Répartition spatiale de la perméabilité :

L'examen de la carte de perméabilité (figure 38) montre que les valeurs les plus importantes se localisent au centre de la plaine et les plus faibles sur les bordures.

Ainsi, dans la zone de Dalâa, on enregistre des valeurs allant de 0.05.10⁻⁴ à 0.13.10⁻⁴ m/s, ce qui justifie les fortes valeurs du gradient hydraulique. A Meskiana, on a enregistré un maximum de 0.77. 10⁻⁴ m/s, ce qui explique les faibles valeurs du gradient hydraulique.

IV.6.3 Répartition spatiale de la transmissivité :

L'interprétation de la carte de transmissivité (figure 39) montre que les valeurs les plus importantes se localisent au centre de la plaine.

Dans la zone de Dalâa, on a enregistré des valeurs de l'ordre de 1.45 .10⁻³ m²/s au puits (P12). A Meskiana, les transmissivités enregistrées sont de l'ordre de 4.4. 10⁻³ m²/s, ce qui justifie la présence du plus grand nombre de puits dans cette zone, alors qu'en bordure les valeurs deviennent plus faibles. Cette répartition de la transmissivité coïncide avec les débits d'exploitation des forages : Dans la zone de Meskiana le forage E5 produit 15 (l/s) et MK2 donne 22 (l/s). Dans la zone de Dalâa, les forages AL5 et K5 débitent, respectivement, 4 (l/s) et 3 (l/s).

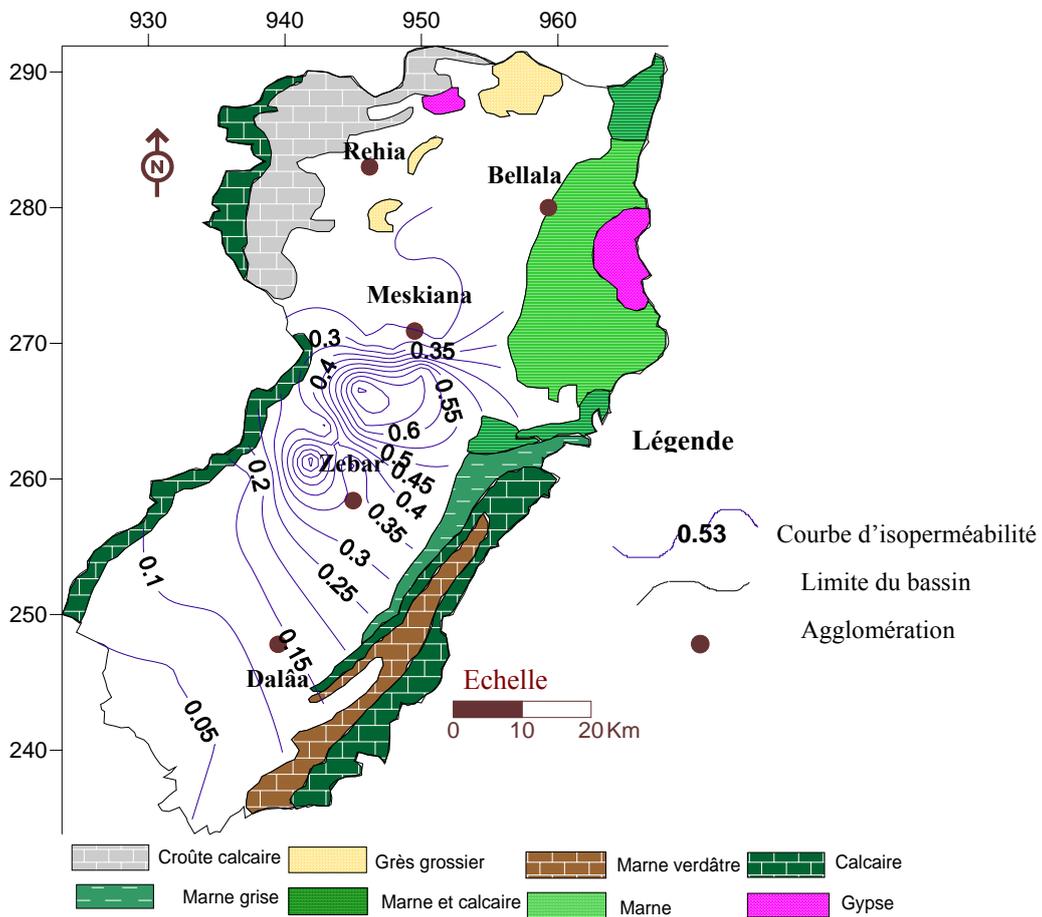


Figure 38 : Carte de répartition de la perméabilité de la nappe de Meskiana en (10^{-4}) m/s.

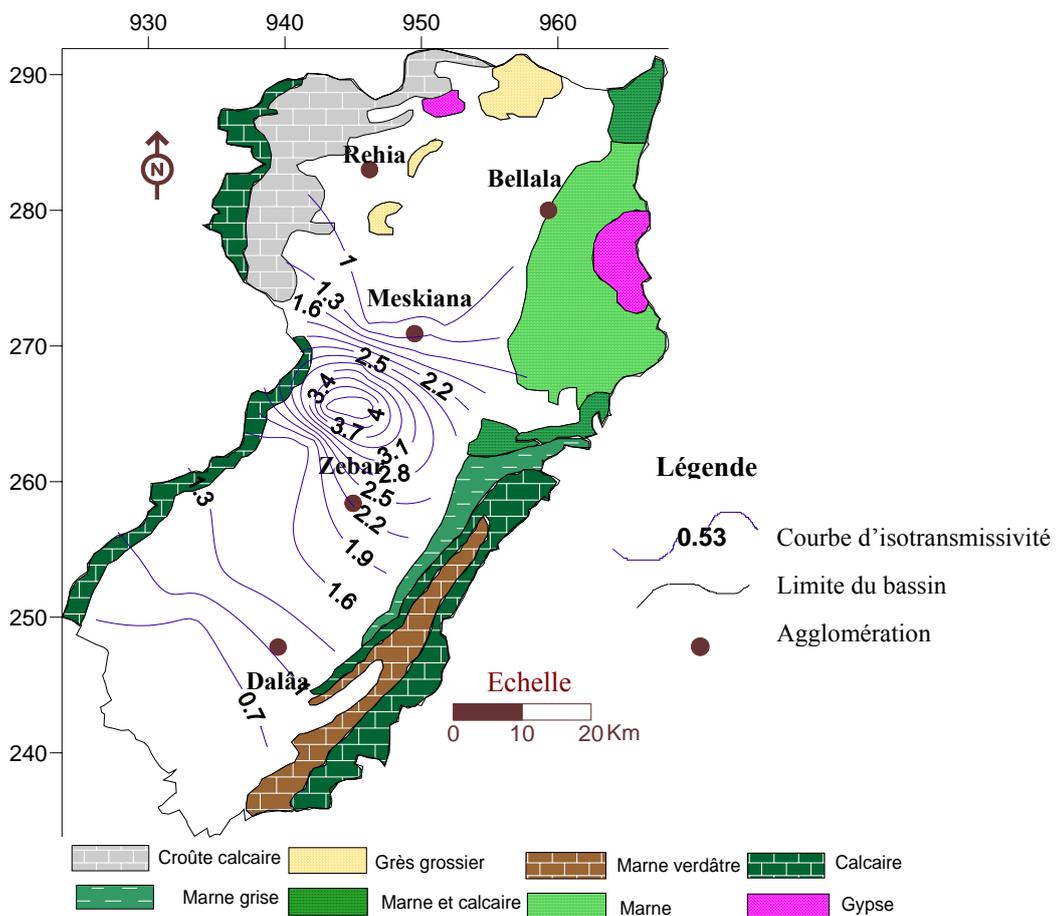


Figure 39 : Carte de répartition de la transmissivité de la nappe de Meskiana en (10^{-3}) m²/s.

IV.7 CONCLUSION :

Au terme de ce chapitre nous pouvons dire que :

- L'écoulement souterrain se fait, en général, selon une direction Sud-Ouest - Nord-Est, avec un axe de drainage qui coïncide sensiblement avec le parcours de l'Oued Meskiana.
- L'allure générale des courbes piézométriques est restée constante lors des 06 campagnes d'observations.
- L'évolution de la piézométrie dépend des conditions climatiques, qui influent sur le battement de la nappe par la recharge durant la période de hautes eaux et l'évaporation pendant la période des basses eaux. La lithologie de la nappe régit l'écoulement, et ce en influant sur la vitesse de circulation.
- Le niveau piézométrique présente une évolution régulière, caractérisée par une baisse durant la période des basses eaux sous l'effet de l'évaporation, et une remontée pendant la période de hautes eaux, suite à la recharge de la nappe. On signale l'évolution irrégulière de quelques puits, qui sont surexploités à des fins d'irrigation.
- L'alimentation se fait à partir des bordures calcaires de Dj Guerigueur à l'Est, et Dj Bou Tokhma et Guern Ahmar à l'Ouest.
- Les fluctuations saisonnières de la surface piézométrique connaissent une augmentation aux bordures pour atteindre 0.7 m. Au centre, elles oscillent entre 0.2 et 0.4 m, et sont parfois nulles. Ces fluctuations sont soumises aux caractéristiques climatiques de la région : faible pluviométrie d'une part et forte évaporation d'autre part.
- Les valeurs les plus importantes de la perméabilité et de la transmissivité se localisent au centre de la plaine et les plus faibles en bordures. Cette répartition est confirmée par les débits de forages.
- Pendant la période des basses eaux, l'écoulement des eaux souterraines présente une certaine convergence vers le centre de la plaine pour coïncider avec le tracé de l'oued principal, ce qui justifie le renforcement de l'alimentation des eaux de surface par les eaux souterraines. Au même endroit, pendant la période des hautes eaux, la surface piézométrique devient peu profonde et se rapproche de la surface du sol, ce qui met en contact les eaux de surface avec les eaux souterraines. Ce contact hydraulique favorise la contamination des eaux souterraines.

Chapitre V :
HYDROCHIMIE

V.1 INTRODUCTION :

Il est évident que le chimisme des eaux souterraines dépend, principalement, de la composition lithologique des couches traversées et du temps de séjour des eaux. Cette interaction influe sur la teneur des éléments majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- ). Les concentrations de ces éléments naturels sont conditionnées par divers facteurs tels que les paramètres climatiques, l'activité anthropique, les échanges entre aquifères et les eaux de surface

Les activités anthropiques ont une influence non négligeable sur la qualité physico-chimique des eaux souterraines. On observe principalement deux types d'influence:

- En agriculture : apports de K^+ , Ca^{2+} , NO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ et PO_4^{3-} .
- Rejets des eaux usées : apports de Na^+ , K^+ , NO_3^- , Cl^- et quelques métaux lourds.

Le présent chapitre traite du chimisme des eaux souterraines, et nous permettra d'essayer tentons d'expliquer le comportement, l'origine et l'évolution des éléments chimiques décrits pour expliquer le fonctionnement hydraulique du système aquifère.

L'étude se base principalement sur les informations de six campagnes de prélèvement à partir de 60 points d'eau, répartis sur le terrain. Comme la plaine de Meskiana est à vocation agricole, un intérêt particulier sera accordé à cet effet.

V.2 ECHANTILLONNAGE ET ANALYSE HYDROCHIMIQUE:

Un réseau d'échantillonnage a été choisi pour permettre d'acquérir des données représentatives sur la variabilité spatiale et temporelle de la qualité des eaux souterraines de la nappe étudiée. Ce réseau se compose de quatre ensembles de points d'eau (figure 40) et couvre la totalité de la plaine de l'amont vers l'aval:

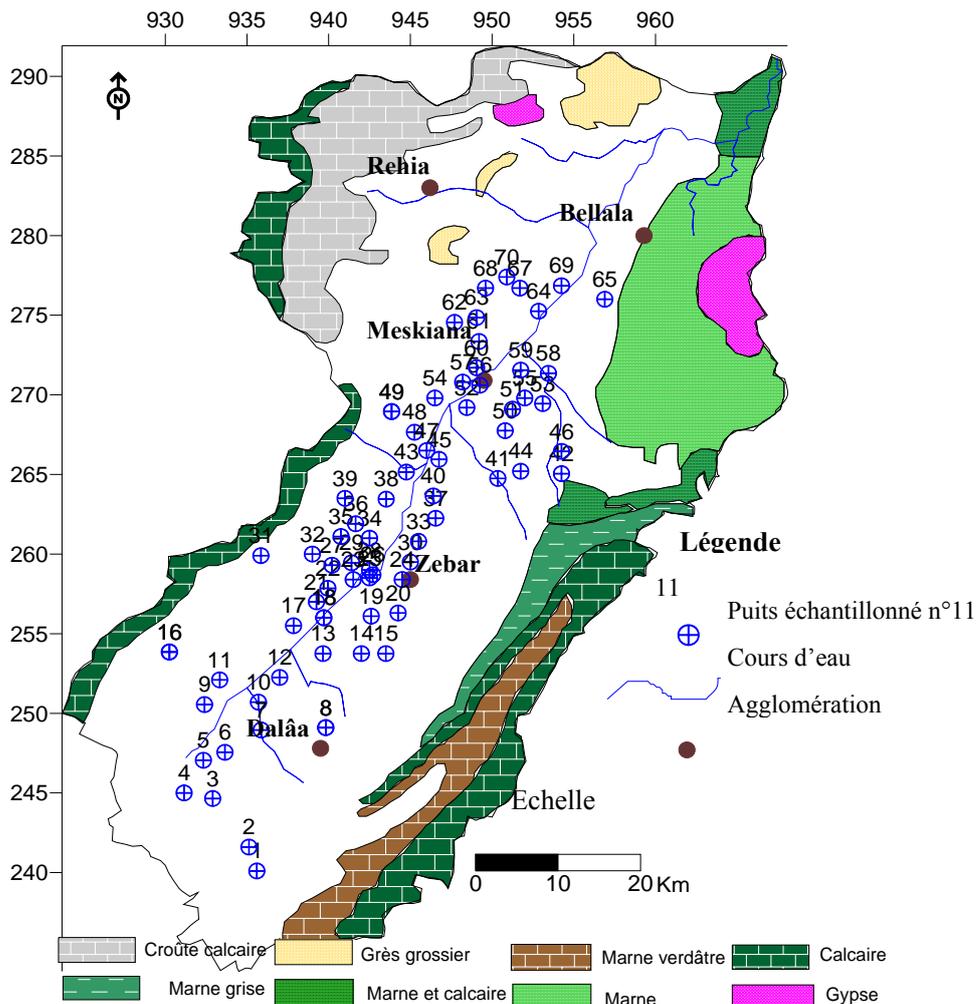


Figure 40 : Carte du réseau des puits échantillonnés.

- Puits proches des bordures calcaires ;
- Puits proches des cours d'eau (pour révéler les échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines) ;
- Puits se répartissant dans les sédiments mio-plio-quadernaires ;
- Puits se répartissant dans les terrains cultivés ;
- Points de prélèvement à proximité de l'Oued Meskiana.

Les prélèvements ont été effectués selon une fréquence saisonnière, pendant six campagnes où des analyses complètes ont été effectuées. Deux campagnes ont été réalisées respectivement en décembre 2004 et novembre 2005 pour analyser les métaux lourds. Tableau 15.

Tableau 15: Les campagnes d'échantillonnage effectuées durant l'étude.

| Campagne | Période | Nombre d'échantillons | Éléments dosés | Laboratoire d'analyse |
|----------|---------------|-----------------------|---|---|
| 1 | Mars 2002 | 43 | Éléments majeurs, NO ₃ ⁻ | CERAD,S.N Ferphos de Tébéssa |
| 2 | Juillet 2002 | 39 | Éléments majeurs,NO ₃ ⁻ | CERAD,S.N Ferphos de Tébéssa |
| 3 | Mars 2003 | 39 | Éléments majeurs,NO ₃ ⁻ | CERAD,S.N Ferphos de Tébéssa. |
| 4 | Juillet 2003 | 39 | Éléments majeurs,NO ₃ ⁻ | CERAD,S.N Ferphos de Tébéssa |
| 5 | Mars 2004 | 31 | Éléments majeurs,NO ₃ ⁻ | CERAD,S.N Ferphos de Tébéssa |
| 6 | Juillet 2004 | 33 | Éléments majeurs,NO ₃ ⁻ ,B, Sr ²⁺ ,NH ₄ ⁺ | CERAD,S.N Ferphos de Tébéssa |
| 7 | Décembre 2004 | 30 | NO ₃ ⁻ ,NO ₂ ⁻ ,O ₂ ⁻ , PO ₄ ³⁻ , fer, Sr ²⁺ | Laboratoire central,Univ de Damas (Syrie) |
| 8 | Novembre 2005 | 30 | NO ₃ ⁻ , PO ₄ ³⁻ , fer | Laboratoire central,Univ de Damas (Syrie) |

V.2.1 Moyens et méthodes d'analyse :

V.2.1.1 Mesures *in situ* :

Quatre paramètres physico-chimiques (pH, conductivité électrique et oxygène dissous) ont été mesurés *in situ*, immédiatement après le prélèvement de l'échantillon à l'aide d'une valise multiparamètre de terrain de marque Multi340i (WTW).

V.2.1.2 Analyses aux laboratoires :

On a procédé à une analyse complète de tous les éléments majeurs (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Cl⁻, SO₄²⁻ et HCO₃⁻). Les métaux lourds en traces (Fe³⁺, Mn²⁺, Al³⁺, Zn²⁺, B, Sr²⁺, Zn²⁺, Cd²⁺ et Cu²⁺) ont fait l'objet d'analyse pour quelques campagnes seulement. Les polluants résultants des activités agricoles ont été l'objet d'un suivi particulier (NO₃⁻, NO₂⁻, NH₄⁺ et PO₄³⁻).

Les méthodes analytiques utilisées sont :

-Méthode colorimétrique pour les éléments (Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, NO₃⁻, NO₂⁻, NH₄⁺, PO₄³⁻, F et Fe total).

-Méthode de spectrophotométrie d'absorption atomique : (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Sr²⁺, Mn²⁺, Al³⁺, Zn²⁺, Cd²⁺ et Cu²⁺). On signale que l'analyse spectrophotométrique a été faite en utilisant un spectrophotomètre DR 2000 (HACH), aux laboratoires du Centre des Etudes et de Recherches Appliquées et du Développement (CERAD), filiale de l'Entreprise Nationale du Fer et du Phosphate.

Pour la fiabilité des résultats d'analyse, on a procédé à l'application de la méthode de la balance ionique et une erreur de 10 % a été acceptée.

V.3 DESCRIPTION SOMMAIRE DES PARAMETRES PHYSICO-CIMIQUES :

Les résultats d'analyse physico-chimique des eaux de la nappe de Meskiana, pendant la période d'observation, ont été consignés dans le tableau 16.

Tableau 16 : Variation des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines.

| Eléments | Norme OMS | Période des hautes eaux | | | | Période des basses eaux | | | |
|--------------------------------------|------------|-------------------------|-----|--------|------------|-------------------------|-----|--------|------------|
| | | Max | Min | Moy | Ecart-type | Max | Min | Moy | Ecart-type |
| HCO ₃ ⁻ (mg/l) | 250 | 263 | 102 | 185.6 | 39.96 | 260 | 88 | 168.85 | 39.49 |
| SO ₄ ²⁻ (mg/l) | 250 | 1098 | 75 | 463.6 | 278.12 | 1151 | 95 | 472.1 | 267.1 |
| Cl ⁻ (mg/l) | 250 | 933 | 38 | 448 | 263.75 | 949 | 47 | 456.8 | 265.94 |
| Ca ²⁺ (mg/l) | 100 | 805 | 76 | 267.2 | 157.6 | 845 | 70 | 280.42 | 154.4 |
| Mg ²⁺ (mg/l) | 50 | 73 | 10 | 34.15 | 18.45 | 61 | 8 | 26.93 | 14.28 |
| Na ⁺ (mg/l) | 150 | 425 | 23 | 235.1 | 121.1 | 506 | 32 | 253.24 | 129.73 |
| K ⁺ (mg/l) | 12 | 18 | 06 | 12.35 | 3.47 | 21 | 7 | 13.44 | 2.95 |
| NO ₃ ⁻ (mg/l) | 50 | 91 | 20 | 56.9 | 20.8 | 125 | 24 | 60.97 | 21.42 |
| pH | 6.5<pH<9.5 | 8.7 | 7.4 | 8.3 | 0.38 | 8.7 | 7.3 | 8.34 | 0.34 |
| Cond (µS.cm ⁻¹) | 2500 | 5050 | 380 | 2571.4 | 1171.1 | 5230 | 460 | 2616.5 | 1173.9 |

V.3.1 Paramètres physiques :

V.3.1.1 Potentiel d'Hydrogène (pH) :

C'est un paramètre physique qui détermine l'acidité ou l'alcalinité. Les mesures du pH montrent que tous les puits se trouvent dans l'intervalle de norme de potabilité. Pendant la période des hautes eaux le pH varie entre 7.4 et 8.8, alors qu'en période des basses eaux les valeurs oscillent entre 7.3 et 8.7, ceci indique que les valeurs varient peu et sont proches des valeurs naturelles.

V.3.1.2 La conductivité électrique (CE):

Elle dépend de la présence des espèces ioniques contenues dans l'eau. Les valeurs mesurées ont été ramenées à 25°C, à l'aide de la relation suivante :

$$CE_{25} = CE_{Tmes} * \frac{1}{(1 - 0.022)(25 - Tmes)} \quad (15) \text{ avec}$$

Tmes : Température de mesure (°C) ;

CE₂₅ : Conductivité électrique (µS.cm⁻¹) corrigée à 25°C

Les valeurs de la conductivité électrique montrent que la plupart des puits dépassent la norme recommandée relative à la potabilité des eaux, surtout pendant la période des basses eaux. Les valeurs minimales sont enregistrées à l'amont de la nappe.

Les valeurs maximales sont de l'ordre de 5230 (µS.cm⁻¹), on les rencontre dans la zone d'accumulation des eaux souterraines, au Nord-Est de la nappe, elles sont dues aux dépôts évaporitiques issus de Djebel Belkefif.

V.3.2 Les éléments majeurs :

V.3.2.1 Le calcium (Ca^{2+}) :

La plupart des puits (92.85 %) présentent des teneurs supérieures à la norme de potabilité des eaux. Les valeurs les plus élevées avec un maximum de 845 mg/l sont observées au Nord-Est de la nappe pendant la période des basses eaux. Les valeurs les plus faibles avec un minimum de 47 mg/l sont observées à l'amont de la nappe et concernent les puits limitrophes des bordures calcaires. Pendant la période des hautes eaux, on enregistre une certaine dilution, avec une moyenne de 267.2 mg/l, alors qu'en période des basses eaux la moyenne enregistrée est de 280.42 mg/l.

Les valeurs de l'écart-type sont relativement importantes, ce qui traduit une grande variation des teneurs, car l'ion Ca^{2+} provient de deux origines naturelles différentes qui sont : la dissolution des formations carbonatées et la dissolution des formations gypseuses.

V.3.2.2 Le magnésium (Mg^{2+}) :

Les ions (Mg^{2+}) proviennent, comme les ions calcium, de la dissolution des formations carbonatées riches en magnésium (dolomite).

La moyenne enregistrée pendant la période des hautes eaux (34.15 mg/l) est supérieure à celle des basses eaux (26.93 mg/l), ceci montre l'importance de la dilution par rapport à la concentration pour l'acquisition de cet élément. Les variations de concentration sont très faibles, les valeurs de l'écart type le confirment (14.28 mg/l). L'évolution du magnésium est très différente par rapport à celle du (Ca^{2+}), car ce dernier possède de très fortes teneurs provenant de deux origines qui sont mentionnées plus haut.

V.3.2.3 Le sodium (Na^+) :

Les marnes emschériennes gypsifères, qui constituent le substratum, ainsi que les dépôts évaporitiques qui se localisent au Nord-Est de la nappe donnent des concentrations élevées en ions sodium et ceci par des phénomènes de lessivage, d'évaporation et par échange de base.

L'écoulement a favorisé l'acquisition de ces teneurs, car les eaux souterraines, qui s'écoulent suivant la direction SW-NE, se chargent progressivement au fur et à mesure que l'on se déplace vers la zone d'accumulation. Ceci explique les fortes concentrations, qui dépassent 500 mg/l, et qui sont signalées dans cette zone.

Les plus faibles valeurs, de l'ordre de 25 mg/l, sont enregistrées en amont de la nappe, pendant la période des hautes eaux. Les concentrations varient beaucoup, à cause de leurs différentes origines (écart type : 129.73 mg/l). On signale que 73 % des puits dépassent les normes de potabilité.

V.3.2.4 Le potassium (K^+) :

Le potassium résulte de l'altération des argiles potassiques et de la dissolution des engrais chimiques (NPK) qui sont utilisés massivement par les agriculteurs. La présence de cet élément peut être également liée au déversement des eaux usées domestiques dans la plaine.

Les valeurs les plus élevées sont observées pendant la période des basses eaux avec une moyenne de 13,44 mg/l. et un maximum de 21 mg/l.

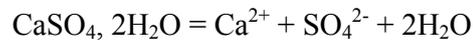
V.3.2.5 Les chlorures (Cl⁻) :

L'ion chlorure possède des caractéristiques différentes de celles des autres éléments, il n'est pas adsorbé par les formations géologiques, ne se combine pas facilement avec les éléments chimiques et reste très mobile. Il constitue un bon indicateur de la pollution. Les teneurs enregistrées, pendant toute la période d'observation, montrent des valeurs importantes qui dépassent la norme de potabilité de l'OMS fixée à 250 mg/l. On signale que 74 % des puits dépassent cette norme. Les chlorures peuvent avoir plusieurs origines (écart type 265.94: mg/l) :

- Les argiles sableuses gypsifères du Mio-Plio-Quaternaire qui couvrent la totalité du bassin ;
- Les dépôts évaporitiques provenant de Dj Belkefif ;
- Le déversement des eaux usées dans la plaine ;
- Les marnes emschériennes formant le substratum.

V.3.2.6 Les sulfates (SO₄²⁻) :

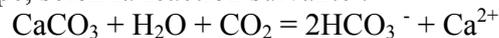
La présence des sulfates dans l'eau est liée à la dissolution du gypse contenu dans les marnes emschériennes et au lessivage des dépôts évaporitiques issus de Djebel Belkefif, selon la relation :



Les plus fortes valeurs sont enregistrées pendant la période des basses eaux, avec une moyenne de 472 mg/l, suite au phénomène d'évaporation. En effet, 83.5 % des puits dépassent la norme (250 mg/l) de potabilité. Les plus faibles valeurs sont enregistrées à l'amont et à proximité des bordures, là où les marnes gypseuses sont absentes (elles n'apparaissent qu'au centre et au Nord-Est de la nappe). Les teneurs en sulfates varient énormément durant la période des hautes eaux (écart type : 278.12 mg/l).

V.3.2.7 Les bicarbonates (HCO₃⁻) :

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



Les fortes teneurs sont enregistrées pendant la période des hautes eaux avec une moyenne de 185.6 mg/l et un maximum de 263 mg/l, suite à la dissolution des calcaires. Les concentrations varient faiblement (écart type : 39.49 mg/l).

V.4 DETERMINATION DES PRINCIPAUX FACIES HYDROCHIMIQUES :

Les faciès hydrochimiques, d'après Jaekli (1970), sont fréquemment utilisés en hydrogéologie pour décrire grossièrement la composition des eaux naturelles. On les détermine par le calcul des quantités en réaction (conversion des concentration en méq/l), et en tenant compte de la classification des ions (formule ionique).

Les principaux faciès hydrochimiques déterminés dans les eaux souterraines de la nappe de Meskiana sont présentés dans le tableau 17.

Sur toute la période d'observation, on a remarqué que la répartition des différents faciès dépendait de la lithologie et de l'hydrodynamisme de la nappe aquifère. Le faciès bicarbonaté-calcique se localise à l'amont et tire son origine des formations carbonatées bordant la nappe. Le faciès chloruré-calcique est important et se répand à l'intérieur de la nappe. Il s'explique par la présence des formations alluvionnaires salées du Mio-Plio-Quaternaire et des marnes gypsifères d'âge Emschérien.

Tableau 17: Faciès chimiques des eaux souterraines de l'aquifère de Meskiana.

| Campagnes | Faciès chimiques | | | |
|--------------|--------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| | Bicarbonaté calcique (%) | Chloruré calcique (%) | Chloruré sodique (%) | Sulfaté calcique (%) |
| Mars 2002 | 11.94 | 47.61 | 21.42 | 19.01 |
| Juillet 2002 | 12.8 | 48.71 | 23.07 | 15.58 |
| Mars 2003 | 10.25 | 48.71 | 20.51 | 20.51 |
| Juillet 2003 | 10.25 | 51.28 | 20.51 | 17.94 |
| Mars 2004 | 12.90 | 41.93 | 22.58 | 22.58 |
| Juillet 2004 | 12.12 | 51.51 | 15.15 | 21.21 |

Le faciès chloruré-sodique se développe au centre de la nappe. Son apparition coïncide avec une formation très conductrice (résistivité inférieure à 2 Ω .m), vraisemblablement les argiles gypsifères triasiques (Hemila 1988). On le rencontre également à l'aval de la nappe, ceci est dû probablement aux apports latéraux venant de Djebel Belkefif, qui est constitué de formations évaporitiques, et à la présence des marnes emschériennes et cénomaniennes. Le faciès sulfaté-calcique n'apparaît qu'au Nord-Est de la nappe, à proximité du Djebel Belkefif : les formations évaporitiques qui y sont présentes doivent donc être à l'origine de ce faciès.

V.4.1 Représentation graphique des faciès hydrochimiques :

Dans le but de bien identifier les faciès hydrochimiques et d'avoir une indication sur l'aspect qualitatif des eaux souterraines, la représentation graphique des résultats d'analyses s'avère un outil inévitable. Pour atteindre cet objectif, on a eu recours au diagramme de Piper et à celui de Schoeller-Berkaloff. La réalisation de ces diagrammes a été faite en utilisant le logiciel **Diagrammes**, conçu par Roland Simler (Laboratoire d'hydrogéologie, Université d'Avignon, 2004).

V.4.1.1 Diagramme de PIPER :

Ce type de diagramme permet de représenter plusieurs échantillons d'eau simultanément. Il est composé de deux triangles, permettant de représenter le faciès cationique et le faciès anionique, et d'un losange synthétisant le faciès global.

Les nuages de points concentrés dans un pôle représentent pour les différents échantillons la combinaison des éléments cationiques et anioniques.

Le diagramme de Piper est particulièrement adapté à l'étude de l'évolution des faciès des eaux lorsque la minéralisation augmente, ou bien pour comparer des groupes d'échantillons entre eux et indiquer les types de cations et anions dominants.

L'interprétation des résultats d'analyses hydrochimiques pour toutes les périodes d'observation a permis d'avoir une idée sur les faciès chimiques des eaux souterraines de la nappe alluviale de Meskiana et leur évolution dans le temps, ainsi que sur les conditions naturelles à l'origine de ces faciès.

V.4.1.1.1 Période de mars 2002 (fig. 41a et fig. 41b) :

A l'amont de la nappe aquifère, l'ensemble des nuages de points ne présente pas de dominance anionique ou cationique. On signale cependant la présence d'un faciès chloruré calcique, relativement dominant, et un faible pourcentage (15%) de puits ayant acquis un faciès bicarbonaté calcique dû à l'alimentation par les bordures. La présence de quelques cations sodiques s'explique par les marnes emschériennes gypsifères qui constituent le substratum de la nappe.

On note que les ions ne connaissent pas encore une certaine stabilité à cet endroit, vu les conditions hydrodynamiques de la nappe, et ont une tendance à se concentrer.

Les puits qui se situent à l'aval présentent un état différent, avec des anions chlorurés et sulfatés dominants, alors que les cations calciques marquent la totalité des échantillons et sont secondés par les cations sodiques. Ceci révèle la dominance de trois faciès hydrochimiques : chloruré-calcique, chloruré-sodique et sulfaté-calcique, avec l'absence du faciès bicarbonaté calcique.

Le diagramme global confirme la présence des faciès signalés. Les conditions climatiques (les précipitations), la lithologie et les conditions hydrodynamiques (vitesse d'écoulement) ont favorisé le lessivage des couches traversées, ce qui a engendré ces faciès.

V.4.1.1.2 Période de juillet 2002 (fig. 42a et fig. 42b) :

A l'amont de la nappe, les nuages de points montrent une dominance cationique calcique et quelques points sodiques. Le diagramme global met en relief trois faciès dominants, qui sont le chloruré calcique, chloruré sodique et sulfaté calcique. Le faciès bicarbonaté calcique apparaît avec un faible pourcentage. Comme on l'a signalé plus haut, la lithologie et les conditions hydrodynamiques de la nappe, ainsi que l'évaporation qui régnaient pendant cette période, ont contribué à l'acquisition de ces faciès.

A l'aval de la nappe, le pôle cationique garde le même aspect, par contre le pôle anionique montre une dominance chloruré-sulfaté. Nous observons donc des faciès chloruré calcique, chloruré sodique et sulfaté calcique. Les alluvions du remplissage et les marnes emschériennes du substratum sont à l'origine de ces faciès.

V.4.1.1.3 Période de mars 2003 (fig.43a et fig.43b) :

A l'amont de la nappe, on ne rencontre pas d'anions dominants mais on signale la tendance vers une dominance chlorurée et la présence d'un très faible nombre d'anions carbonatés. Quant aux cations, on remarque la présence d'un pôle calcique dominant accompagné de quelques cations sodiques. La combinaison des différents cations et anions donne naissance à quatre faciès dominants qui sont : le chloruré calcique, le chloruré sodique, le sulfaté calcique et le bicarbonaté calcique.

A l'aval de la nappe, les eaux souterraines connaissent un enrichissement en ions, et on note une certaine dominance que ce soit au niveau du pôle anionique ou celui cationique. En effet, les nuages de points gravitent autour d'un pôle cationique calcique et un pôle anionique chloruré. On signale l'absence du faciès bicarbonaté calcique, car on est loin de la zone d'alimentation de la nappe.

L'observation des deux diagrammes, en amont et en aval indique, la présence d'une situation identique à celle de la campagne de mars 2002.

V.4.1.1.4 Période de juillet 2003 (fig.44a et fig.44b) :

Les puits qui se situent au Sud de la nappe montrent une dominance de Ca^{2+} et de Na^+ , alors que les anions ne montrent qu'une faible dominance chlorurée. Le diagramme global fait ressortir les faciès suivants : le chloruré calcique, le chloruré sodique et le sulfaté calcique.

Diagramme de Piper

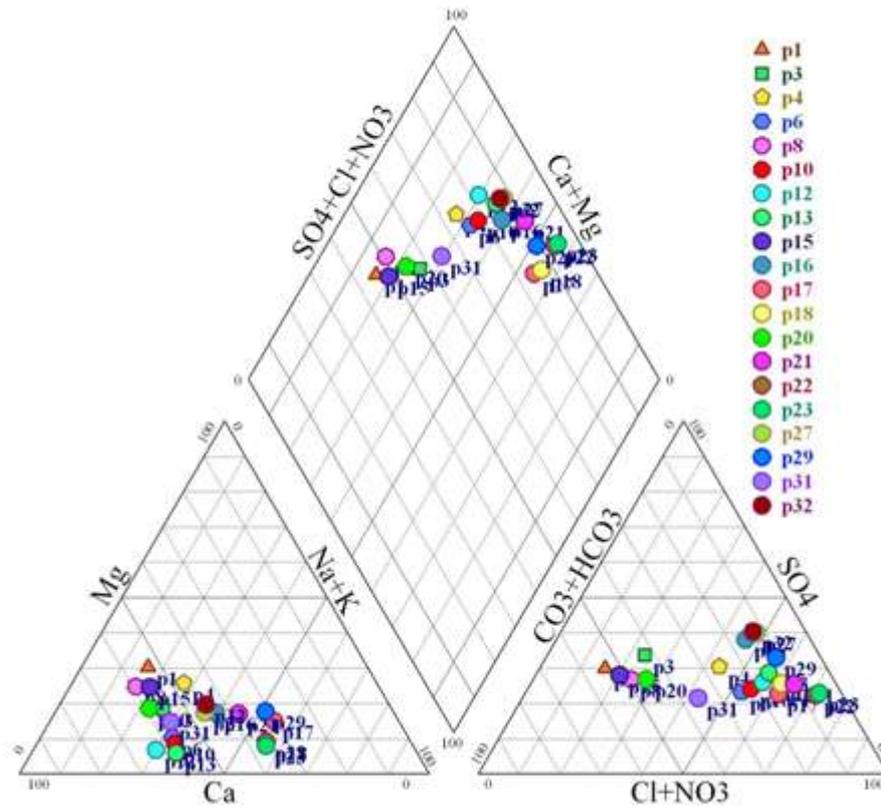


Figure 41a: Diagramme de Piper, campagne mars 2002 (amont de la nappe).

Diagramme de Piper

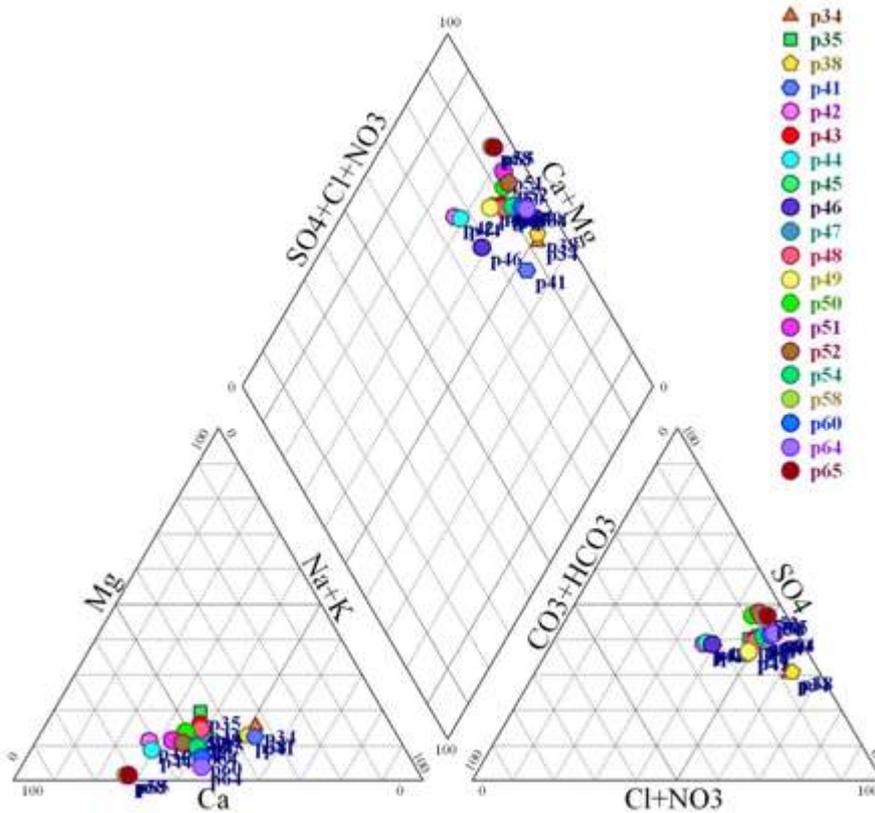


Figure 41b: Diagramme de Piper, campagne mars 2002 (aval de la nappe).

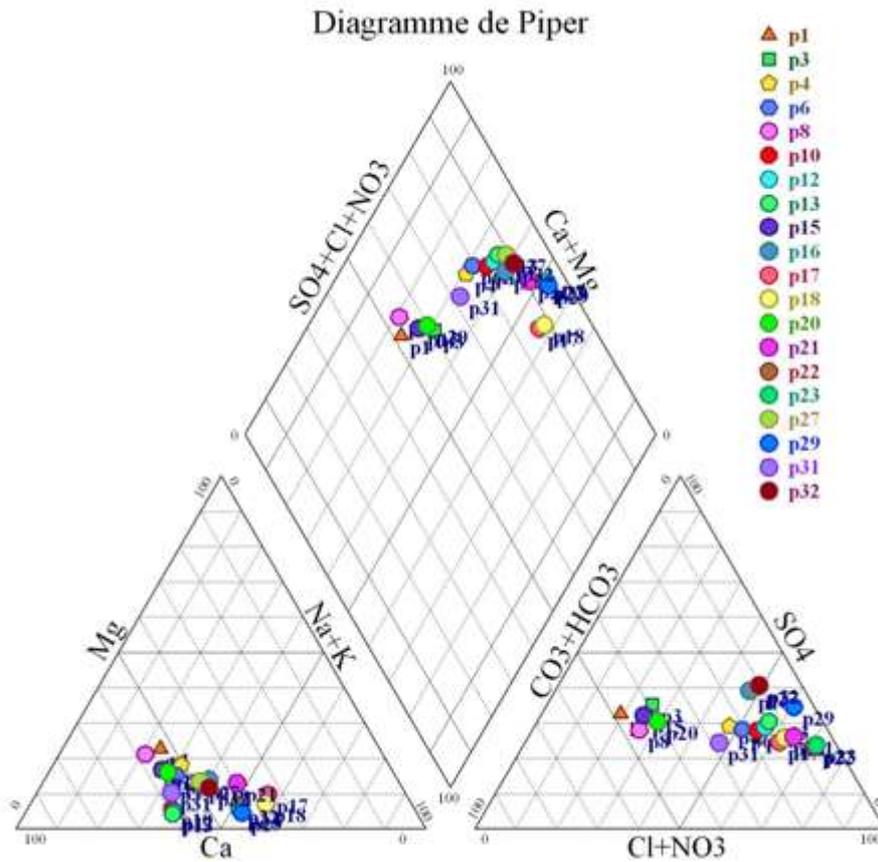


Figure 42a : Diagramme de Piper, campagne juillet 2002 (amont de la nappe).

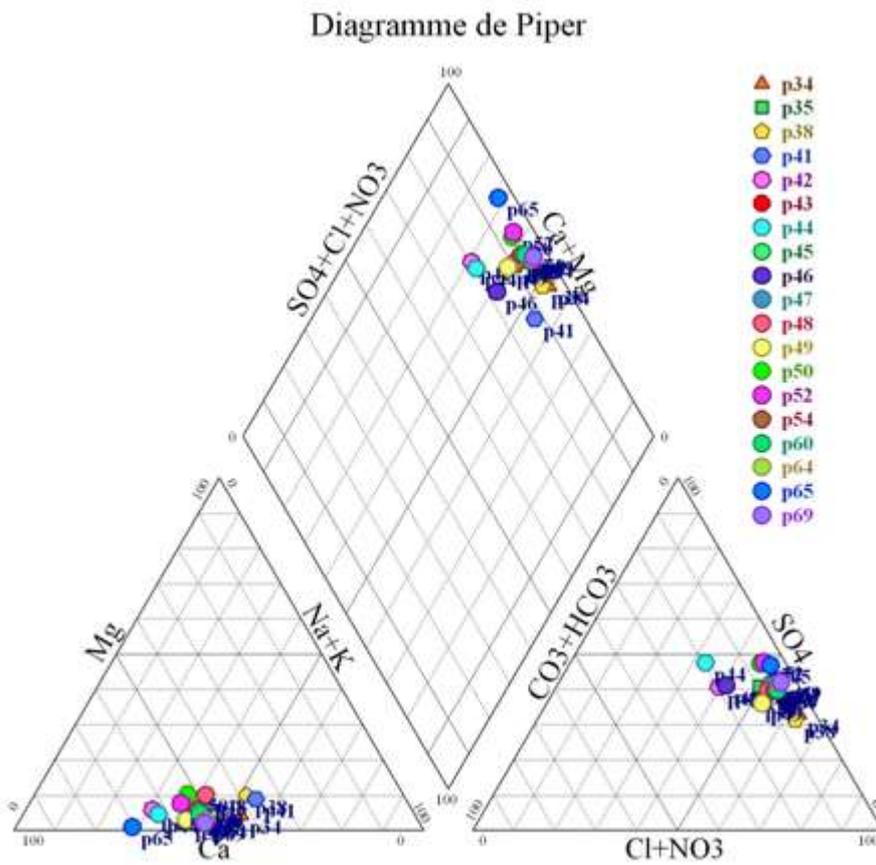


Figure 42b: Diagramme de Piper, campagne juillet 2002 (aval de la nappe).

Diagramme de Piper

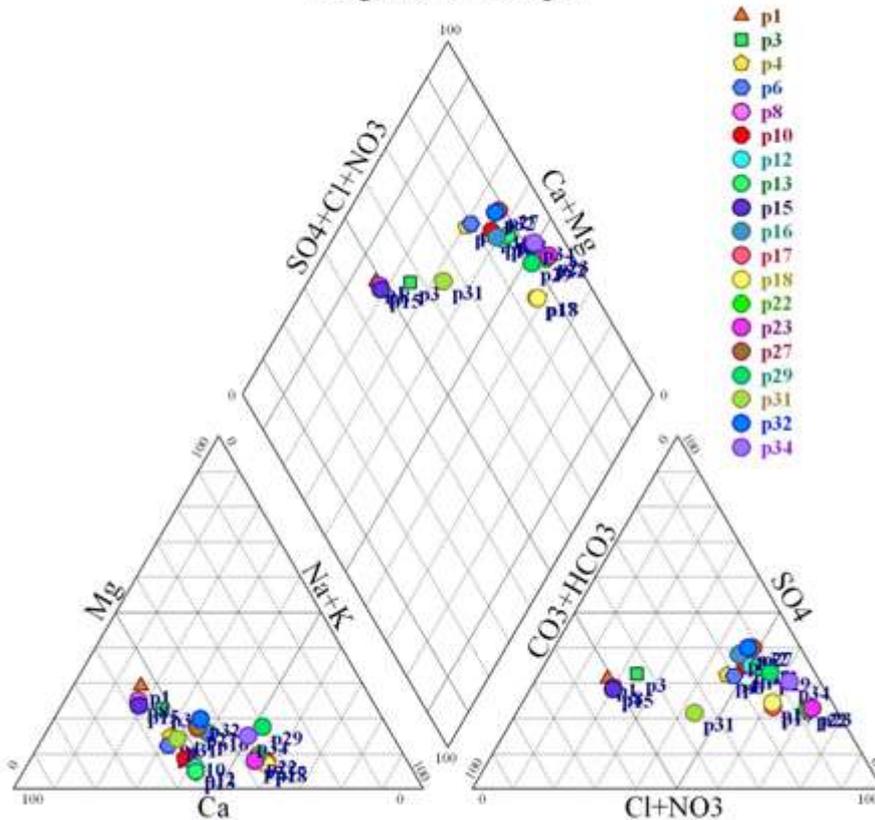


Figure 43a: Diagramme de Piper, campagne mars 2003 (amont de la nappe).

Diagramme de Piper

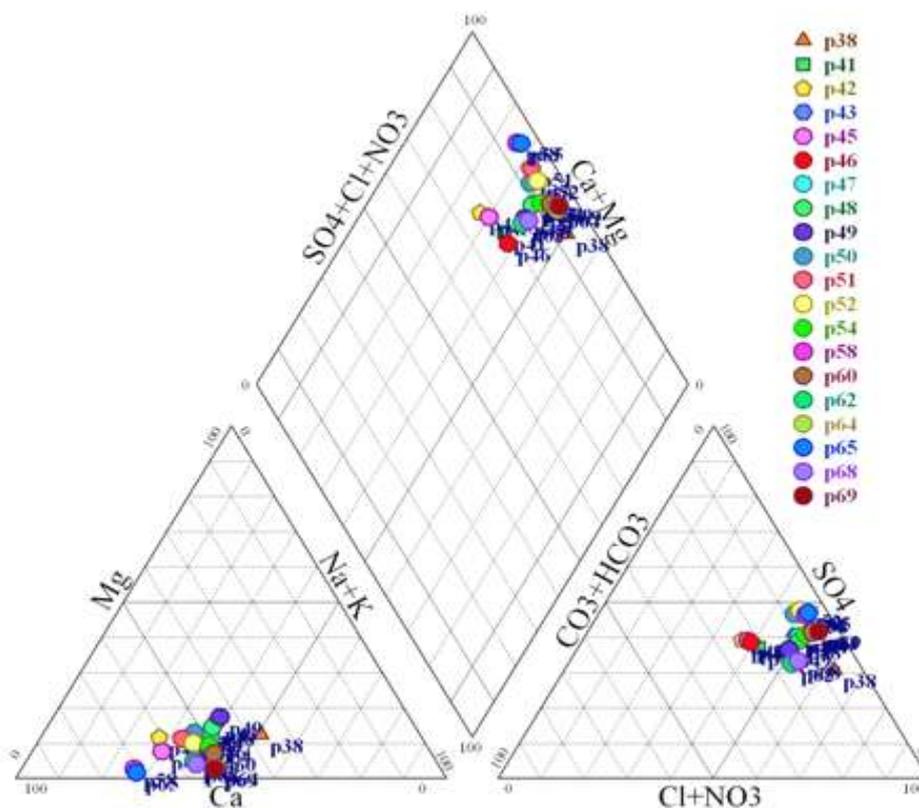


Figure 43b: Diagramme de Piper, campagne mars 2003 (aval de la nappe).

A l'aval de la nappe, les puits qui se trouvent à proximité des bordures calcaires (P3, P8 et P15) ont perdu leur faciès bicarbonaté calcique, les nuages de points se concentrent autour de deux pôles : le premier calcique et le second chloruré à sulfaté.

La combinaison de ces ions a donné naissance aux faciès chloruré calcique et sulfaté calcique. Comme on l'a signalé auparavant, la lithologie, les conditions hydrodynamiques de la nappe et l'évaporation sont à l'origine de ces faciès.

V.4.1.1.5 Période de mars 2004 (fig.45a et fig. 45b) :

Pour les puits qui se trouvent à l'amont de la nappe, la représentation sur le diagramme de Piper montre un nuage de points marquant un pôle cationique abondant en Ca^{2+} et Na^+ et un pôle anionique sans anions dominants. On note la présence de quelques puits marquant l'abondance de Cl^- et d'autres puits enrichis en HCO_3^- (P1, P8 et P15). Ces derniers se localisent à proximité des bordures calcaires. Le diagramme global donne quatre faciès : le chloruré calcique, le chloruré sodique, le sulfaté calcique et le bicarbonaté calcique.

A partir du centre jusqu'à l'exutoire de la nappe, les eaux souterraines deviennent plus minéralisées et s'enrichissent davantage en cations et en anions avec une diminution des ions de Mg^{2+} et HCO_3^- . Les nuages des points se concentrent autour d'un pôle cationique calcique et un pôle anionique sulfaté et chloruré, avec la disparition des points marquant l'anion bicarbonaté. La combinaison des ions abondants a donné naissance aux faciès chloruré calcique et sulfaté calcique, avec l'absence des faciès chloruré sodique et bicarbonaté calcique.

V.4.1.1.6 Période de juillet 2004 (fig.46a et fig.46b) :

A l'amont de la nappe, dans la zone d'alimentation, les eaux souterraines montrent une faible concentration en élément dissous et les ions ne connaissent pas encore une stabilité. C'est pourquoi, dans le pôle des anions, il n'y a aucun anion abondant. Au niveau des cations, on remarque une abondance des ions Ca^{2+} et Na^+ .

Le diagramme global fait ressortir quatre faciès qui sont : le chloruré calcique, le chloruré sodique, le sulfaté calcique et le bicarbonaté calcique. A l'aval, là où les conditions hydrodynamiques changent (vitesse d'écoulement et profondeur de la nappe) ainsi que la lithologie et sous l'effet de l'évaporation, les eaux souterraines deviennent plus minéralisées et acquièrent deux faciès principaux, qui sont le chloruré calcique et le sulfaté calcique.

Diagramme de Piper

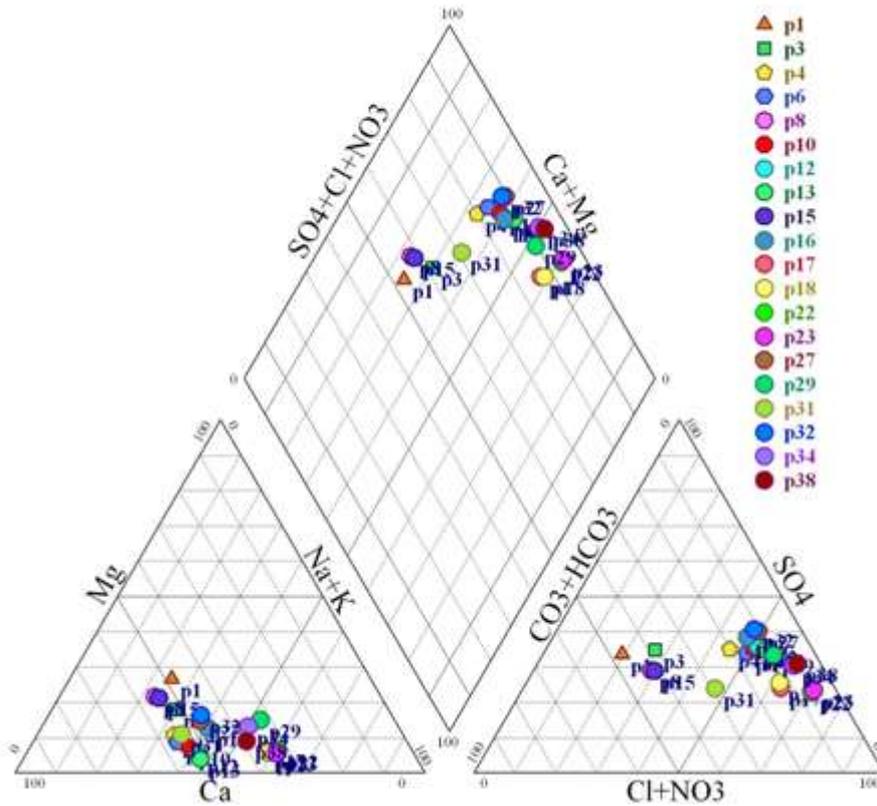


Figure 44a: Diagramme de Piper, campagne juillet 2003 (amont de la nappe).

Diagramme de Piper

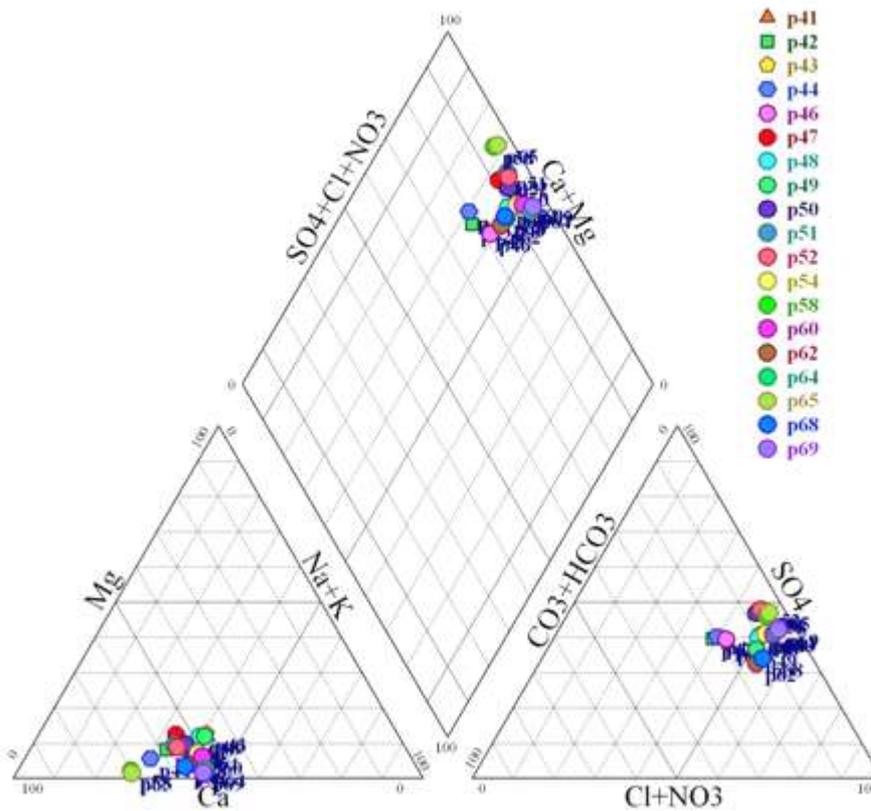


Figure 44b: Diagramme de Piper, campagne juillet 2003 (aval de la nappe).

Diagramme de Piper

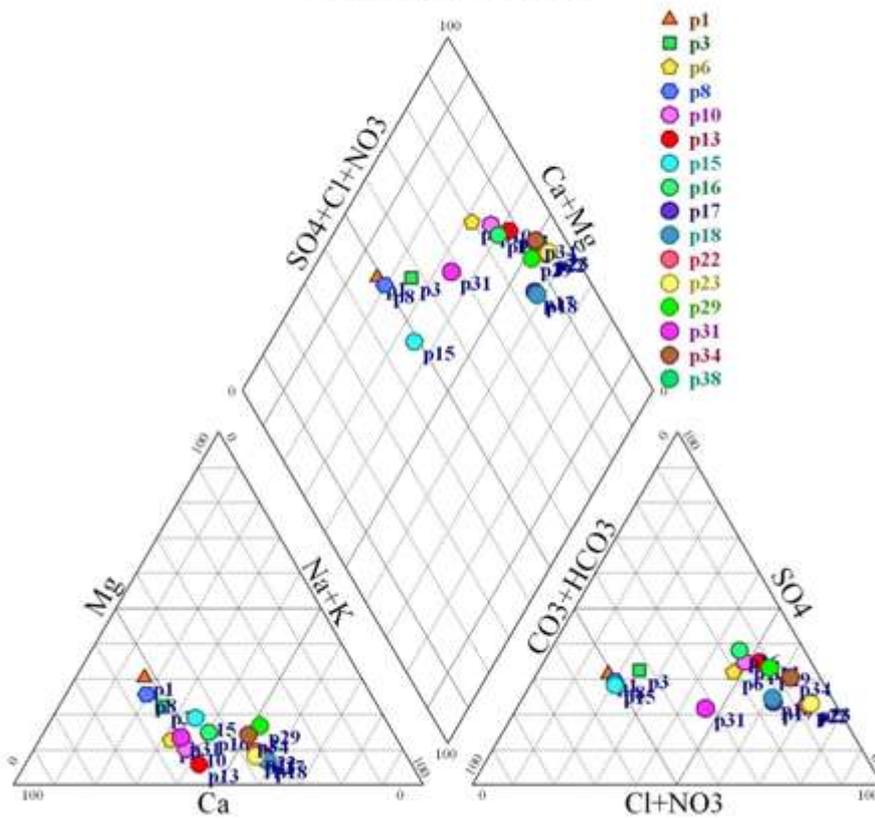


Figure 45a: Diagramme de Piper, campagne mars 2004 (amont de la nappe).

Diagramme de Piper

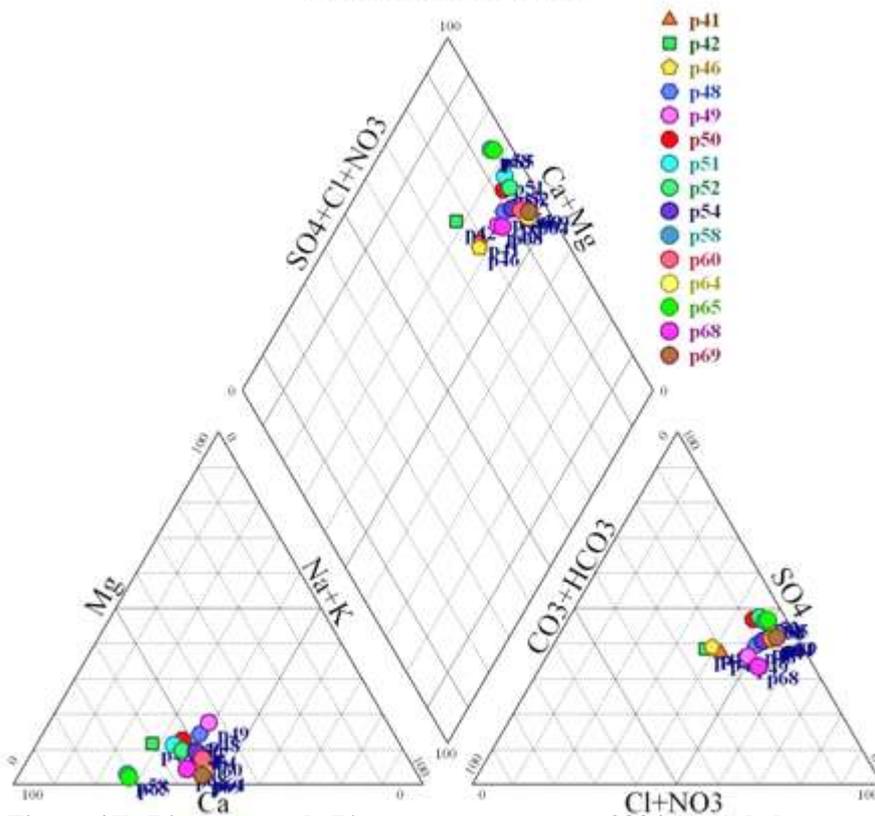


Figure 45b: Diagramme de Piper, campagne mars 2004 (aval de la nappe).

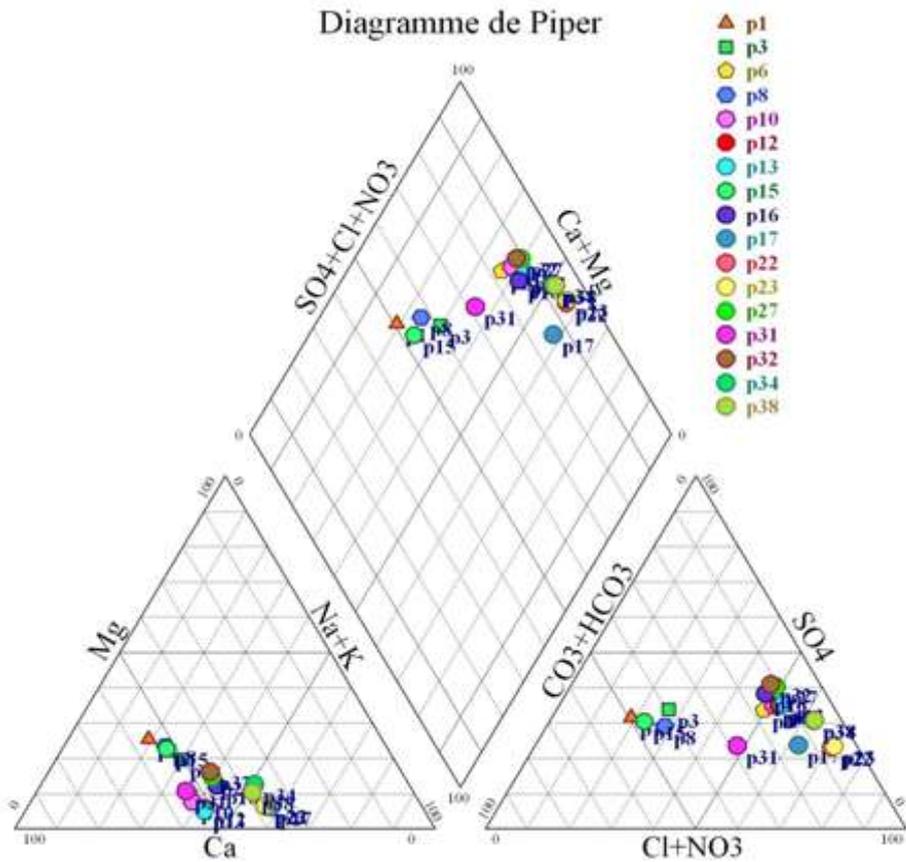


Figure 46a: Diagramme de Piper, campagne de juillet 2004 (amont de la nappe).

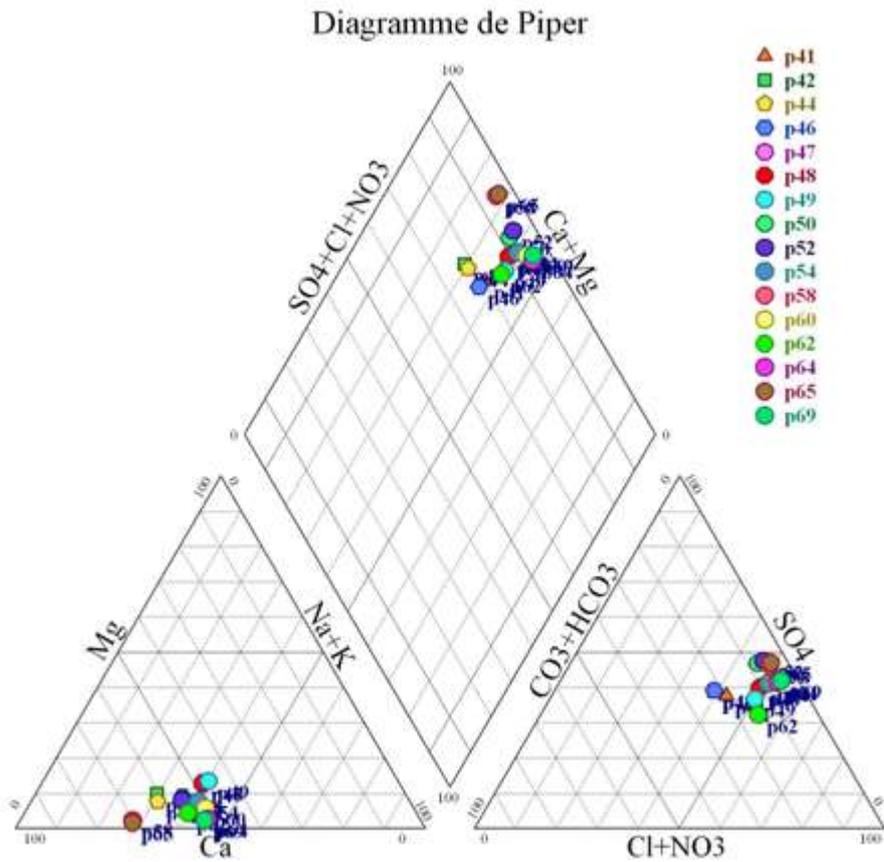


Figure 46b: Diagramme de Piper, campagne de juillet 2004 (aval de la nappe).

V.4.1.2 Diagramme de SCHOELLER-BERKALOFF:

Le diagramme de Schoëller- Berkaloff permet de représenter le faciès chimique de plusieurs échantillons d'eaux. Chaque échantillon est représenté par une ligne brisée. La concentration de chaque élément chimique est figurée par une ligne verticale en échelle logarithmique. La ligne brisée est formée en reliant tous les points qui représentent les différents éléments chimiques.

Un groupe d'eau de minéralisation variable mais dont les proportions sont les mêmes pour les éléments dissous, donnera une famille de lignes brisées parallèles entre elles. Lorsque les lignes se croisent, un changement de faciès chimique est mis en évidence.

V.4.1.2.1 Période de mars 2002 (fig.47) :

Le diagramme tracé pour la période de mars 2002 confirme la dominance du faciès chloruré calcique, permettant de dire que la minéralisation des eaux est liée aux ions Cl^- et Ca^{2+} . Secondairement, on observe deux faciès, le premier sulfaté calcique et le second chloruré sodique. A l'amont de la nappe, le faciès bicarbonaté calcique est très remarquable et disparaît en aval. La minéralisation des eaux souterraines est accentuée au niveau des puits qui se localisent au centre et à l'aval de la nappe, à l'exception de Mg^{2+} et HCO_3^- dont la concentration diminue.

L'acquisition de ces faciès a été signalée précédemment. Un certain parallélisme entre les lignes représentant la majorité des éléments majeurs a été observé, ce qui s'explique par une même évolution du chimisme. Au niveau de l'axe des nitrates, on remarque le croisement de ces lignes, ceci est dû aux activités anthropiques qui touchent les puits d'une manière sélective.

V.4.1.2.2 Période de juillet 2002 (fig.48) :

Les fortes concentrations de Cl^- et Ca^{2+} ont donné un faciès dominant qui est le chloruré calcique, suivi des faciès sulfaté calcique et chloruré sodique. Les calcaires de bordures qui alimentent la nappe sont à l'origine du faciès bicarbonaté calcique, qui ne se trouve qu'à l'amont de la nappe.

Au centre et au Nord de la nappe (zone de drainage), les profondeurs de la surface piézométrique sont faibles, ce qui intensifie l'effet de l'évaporation. De plus, la vitesse d'écoulement est faible, ce qui favorise l'interaction entre les eaux souterraines et les couches aquifères. Cette situation a engendré de fortes concentrations, plus importantes que celles rencontrées à l'amont de la nappe.

On signale que la teneur en bicarbonates est faible par rapport à celle des autres anions, ce qui explique l'absence du faciès bicarbonaté.

V.4.1.2.3 Période de mars 2003 (fig.49) :

La majorité des puits présente un faciès chloruré calcique. Quatre puits (P1, P3, P8 et P15) ont acquis le faciès bicarbonaté calcique car ils se situent près des bordures calcaires, qui, par dissolution, donnent les bicarbonates HCO_3^- et les alcalino-terreux (Ca^{2+} et Mg^{2+}). Les marnes emschériennes gypsifères, qui constituent le substratum, donnent, par le phénomène de lessivage, les ions Ca^{2+} , Na^+ et SO_4^{2-} .

Les ions chlorures peuvent tirer leur origine soit de la lithologie (les sédiments du Mio-Plio-Quaternaire) ou résulter des activités anthropiques. A l'aval de la nappe, les eaux souterraines deviennent plus minéralisées et tous les ions atteignent leurs fortes concentrations, à l'exception de Mg^{2+} et de HCO_3^- dont les concentrations diminuent avec le sens de l'écoulement.

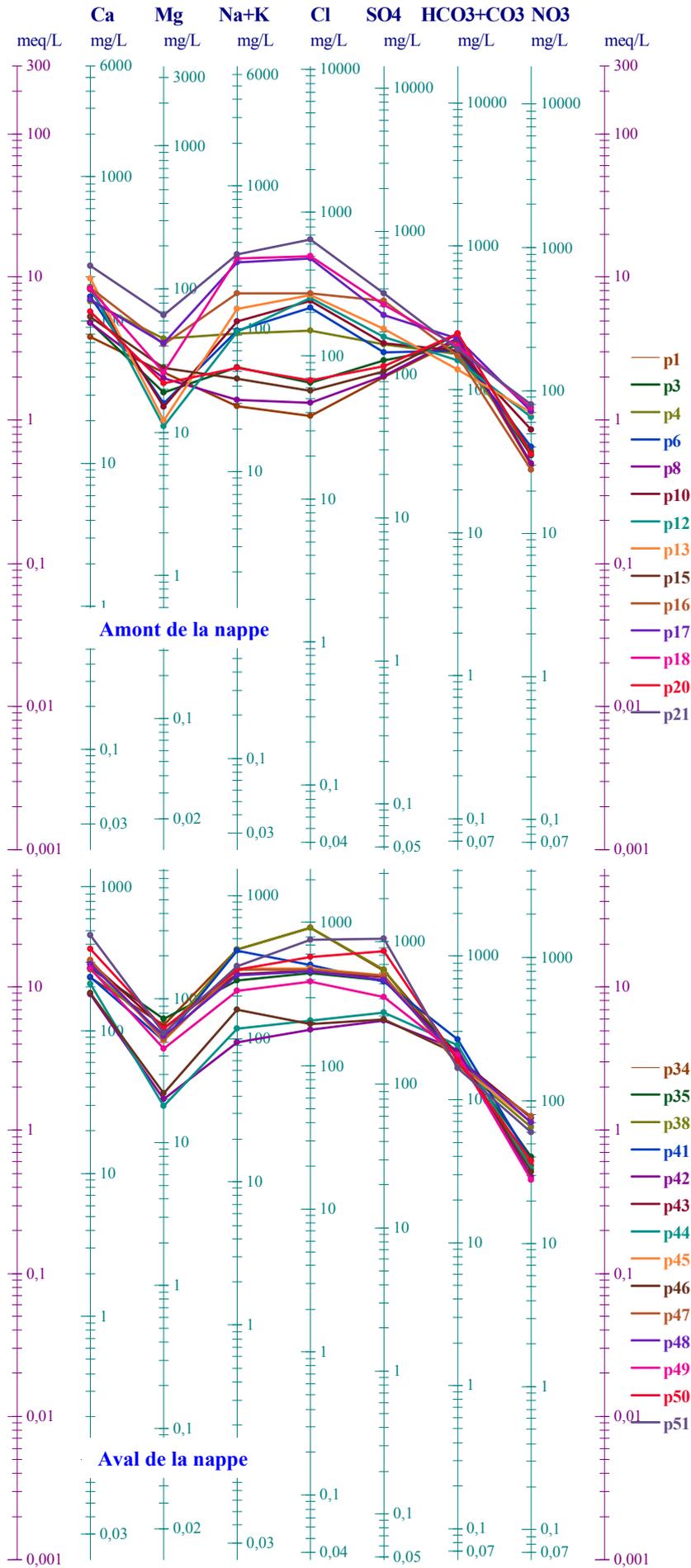


Figure 47 : Diagramme de Schoëller- Berkaloff, mars 2002.

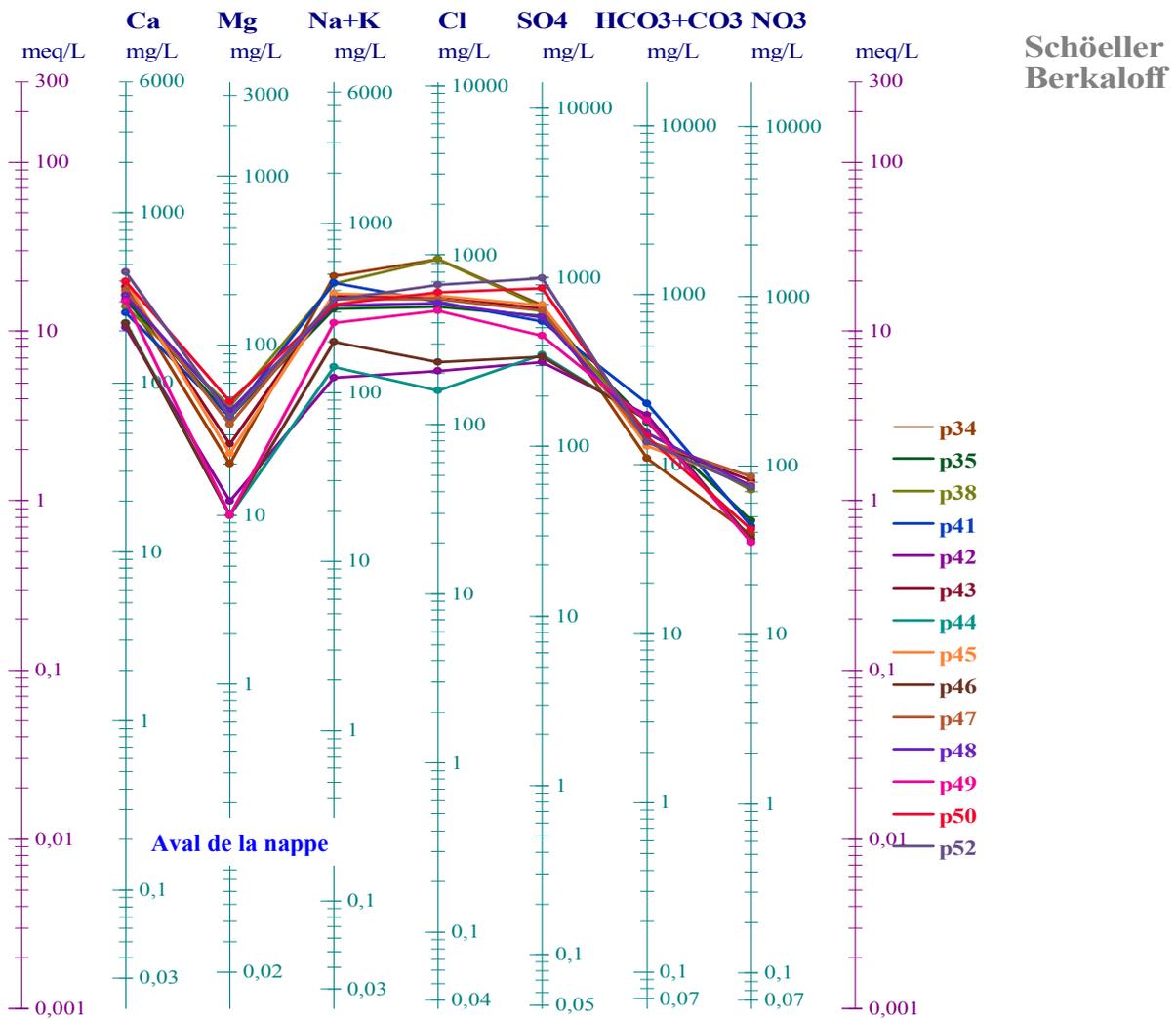
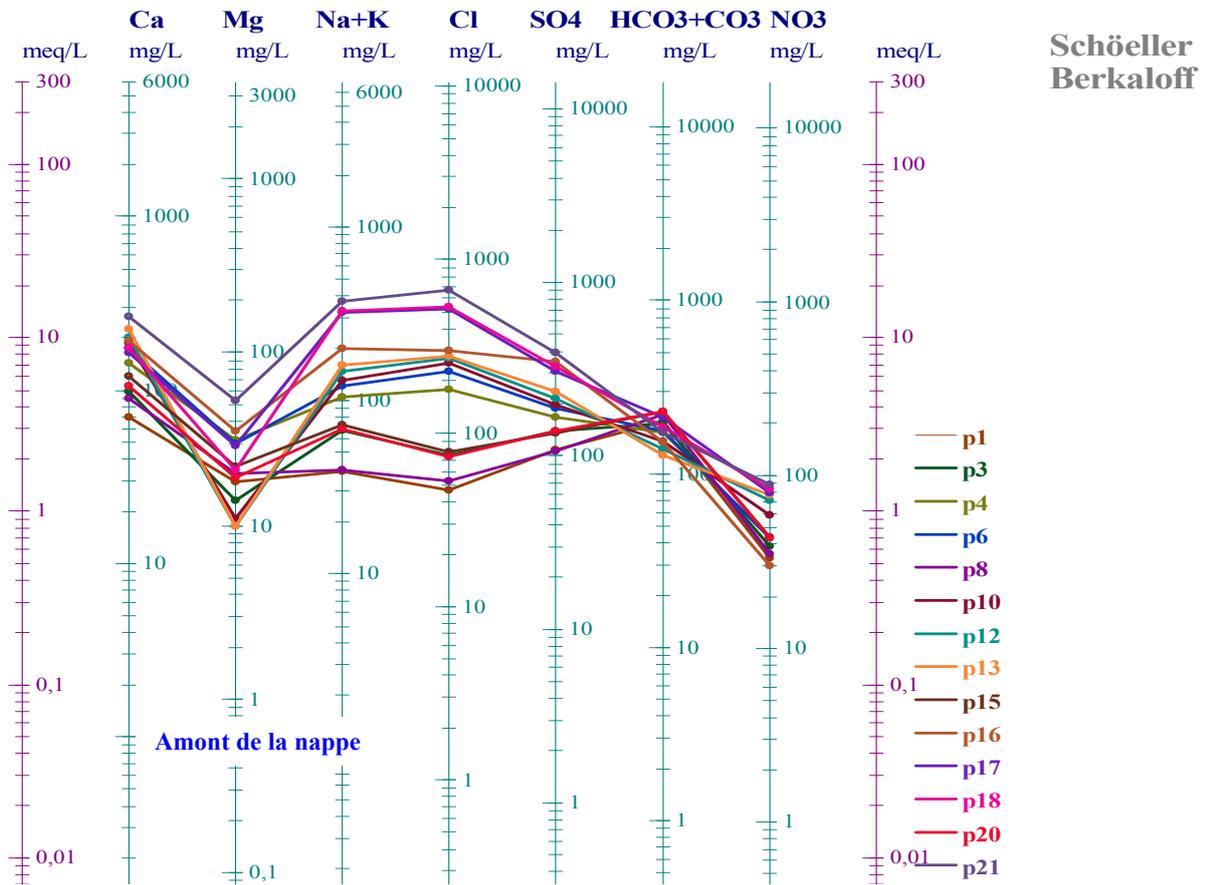


Figure 48: Diagramme de Schoeller-Berkaloff, juillet 2002.

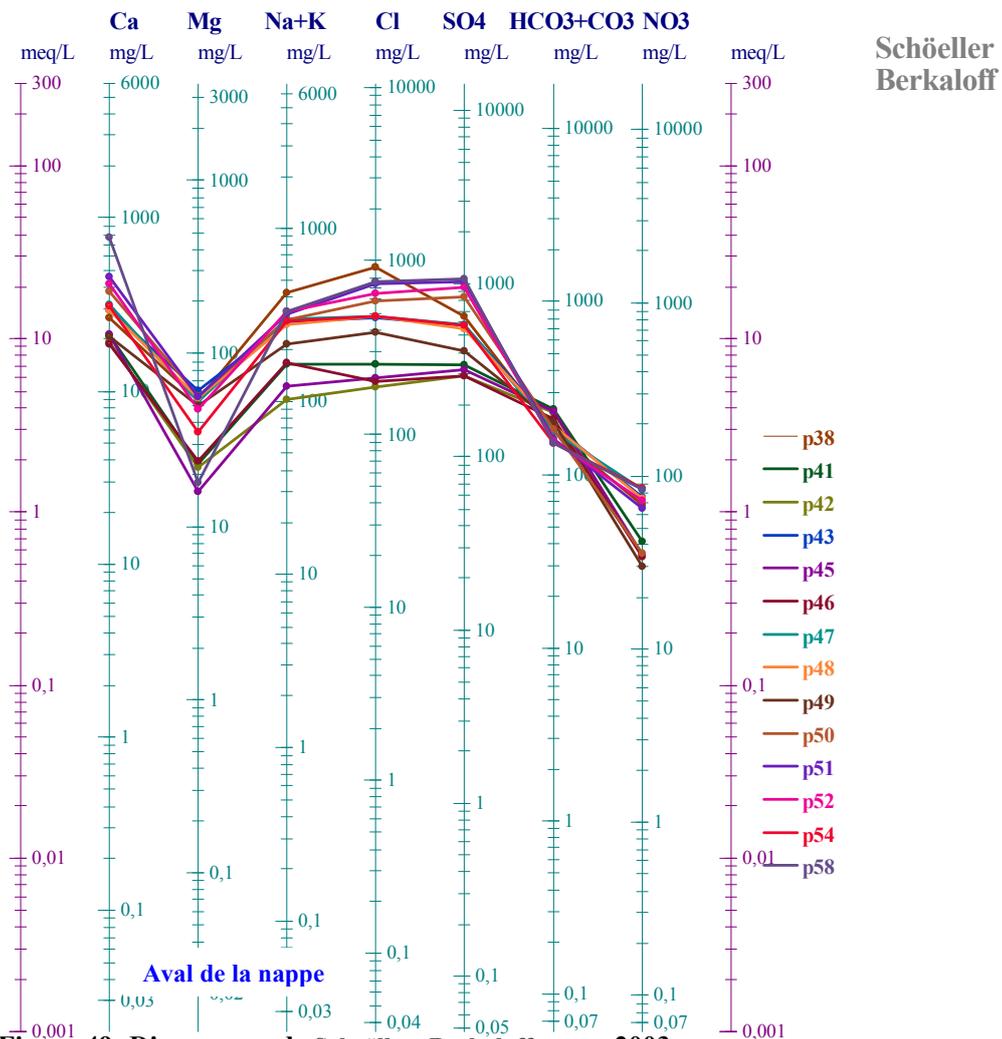
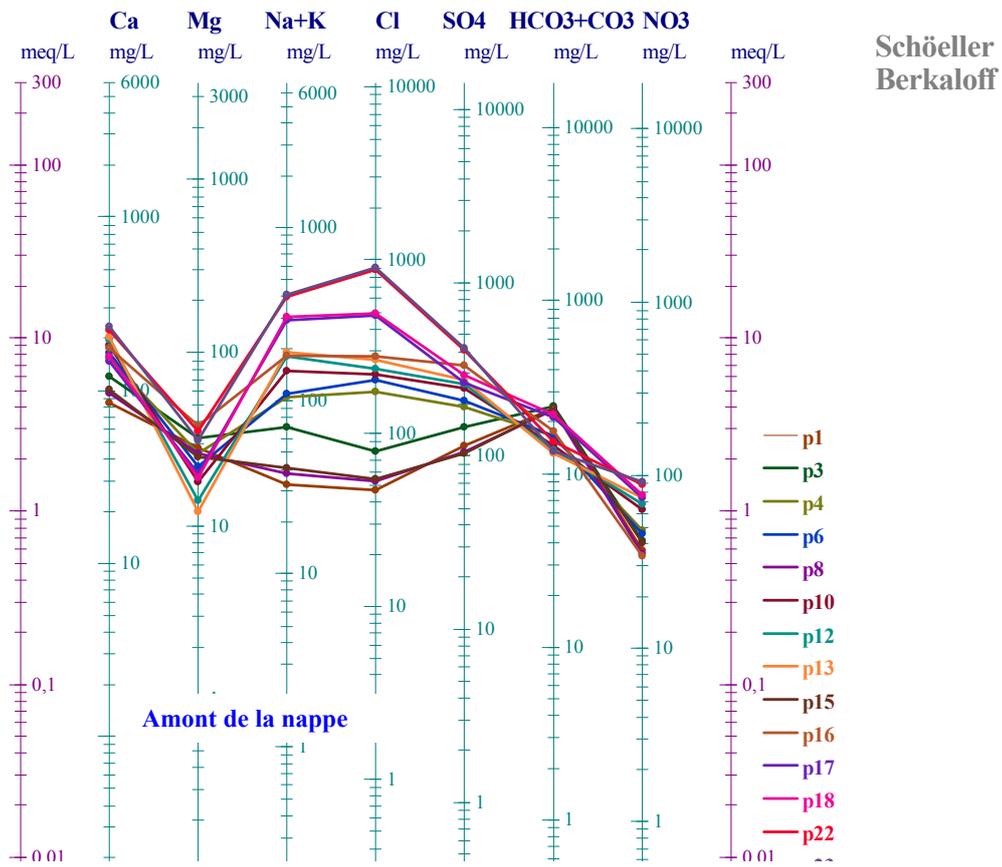


Figure 49: Diagramme de Schoeller- Berkaloff, mars 2003.

V.4.1.2.4 Période de juillet 2003 (fig.50) :

La plupart des puits ont acquis le faciès chloruré calcique, tandis que les quatre puits (P1, P3, P8 et P15) gardent toujours le faciès bicarbonaté calcique. Les concentrations sont relativement fortes par rapport aux campagnes précédentes.

Au centre et au Nord de la nappe, les teneurs deviennent plus importantes. Le puits P52, qui se situe au Nord de la ville de Meskiana, à proximité de l'oued, est fortement minéralisé et atteint les concentrations maximales. On pense que l'évaporation a causé l'augmentation de ces teneurs.

V.4.1.2.5 Période de mars 2004 (fig.51) :

L'examen de la figure 51 montre les eaux souterraines ont acquis plusieurs faciès chimiques. On rencontre le chloruré calcique, le chloruré sodique, le sulfaté calcique et le bicarbonaté calcique. Les puits possédant le faciès bicarbonaté calcique sont les moins minéralisés et ceux ayant acquis le chloruré calcique montrent d'importantes concentrations.

V.4.1.2.6 Période de juillet 2004 (fig.52) :

A l'amont de la nappe, on rencontre trois faciès, qui sont le chloruré calcique, le bicarbonaté calcique et le chloruré sodique. Le premier est dominant, avec des concentrations importantes de Ca^{2+} et Cl^- . Le faciès bicarbonaté calcique caractérise les puits qui se trouvent à proximité des bordures calcaires, et qui ont une faible minéralisation.

Au centre et en aval de la nappe, on assiste à un changement de la minéralisation, qui devient plus importante, et la combinaison des ions donne trois faciès qui sont : le chloruré calcique, le sulfaté calcique et le chloruré sodique.

V.4.1.3 Répartition des faciès chimiques :

L'examen de la carte de répartition des faciès des eaux souterraines de la nappe de Meskiana montre l'influence de la lithologie des formations sur les types de faciès (figure 53). En effet, les formations carbonatées du Crétacé bordant la nappe sont à l'origine du faciès bicarbonaté-calcique. Le faciès chloruré calcique tire son origine des marnes gypsifères emschériennes qui constituent le substratum. Le faciès chloruré sodique, qui se développe au centre de la nappe, provient des argiles gypsifères triasiques.

Quant au faciès sulfaté calcique, qui se développe au Nord-Est de la plaine, il provient des formations évaporitiques de Djebel Belkefif.

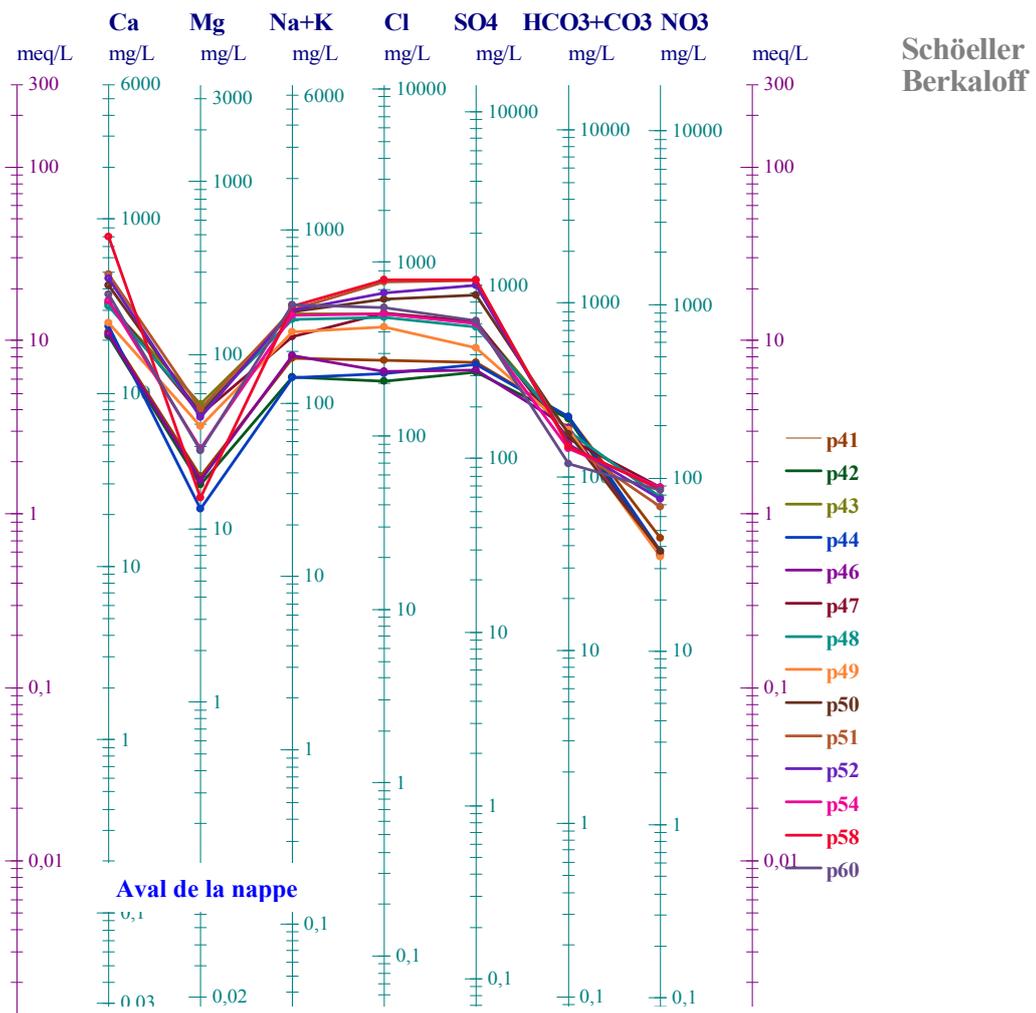
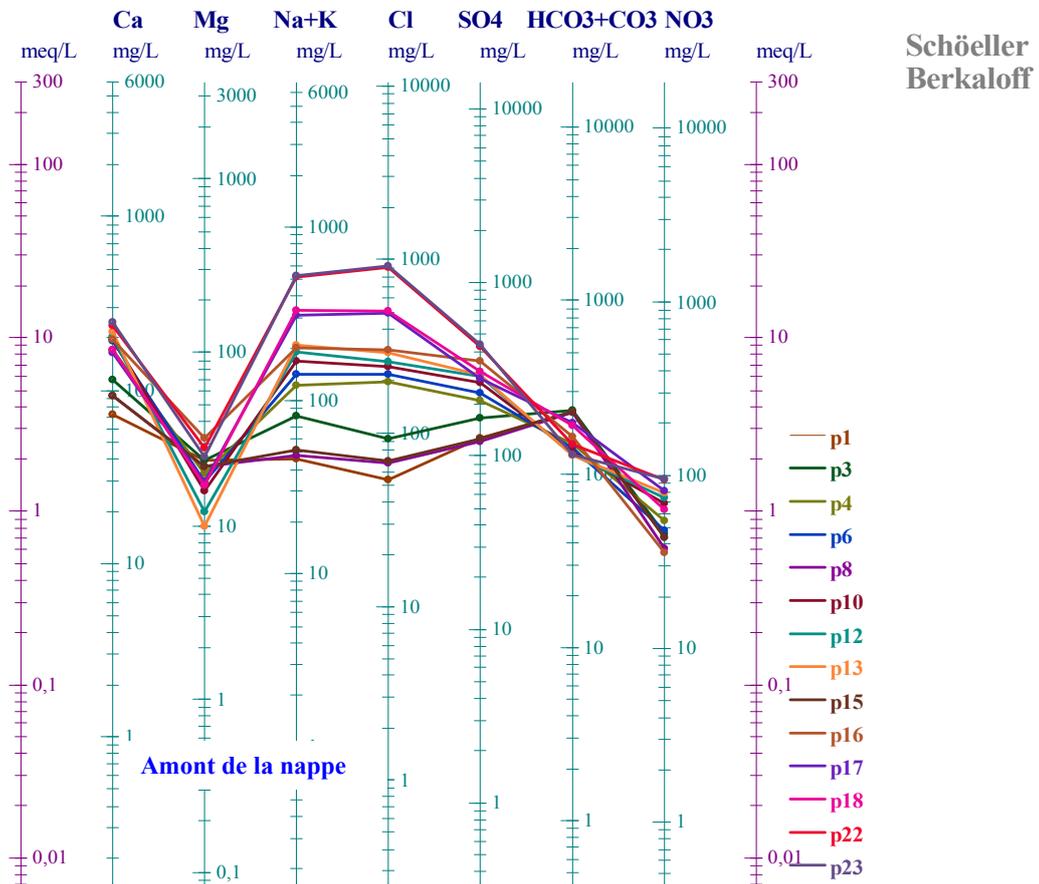


Figure 50: Diagramme de Schoeller-Berkaloff, juillet 2003.

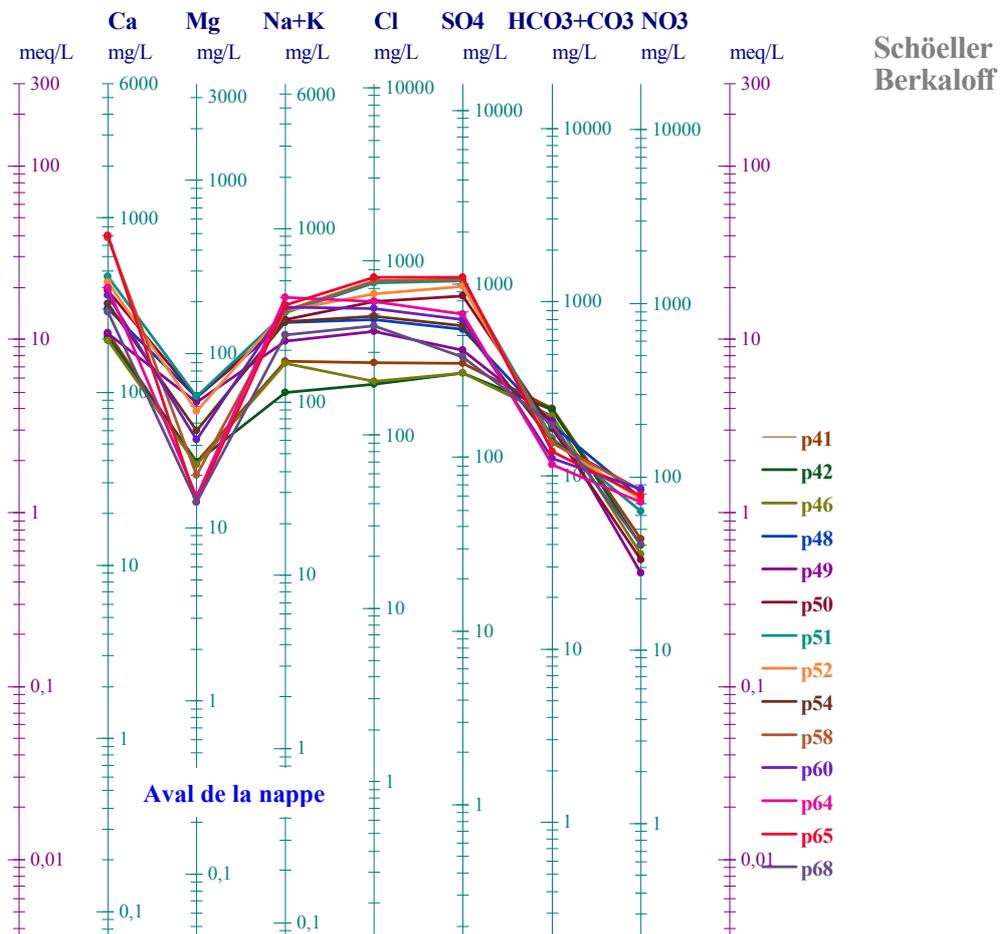
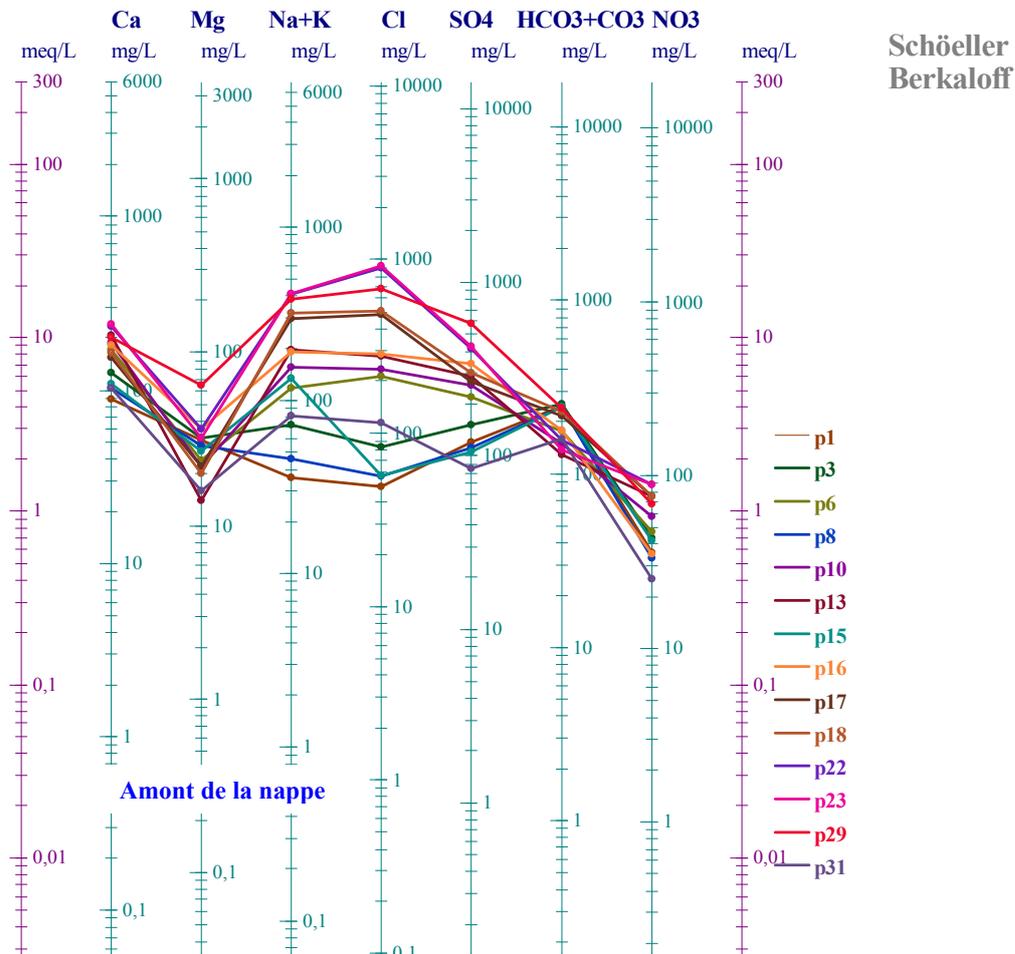


Figure 51: Diagramme de Schoeller-Berkaloff, mars 2004.

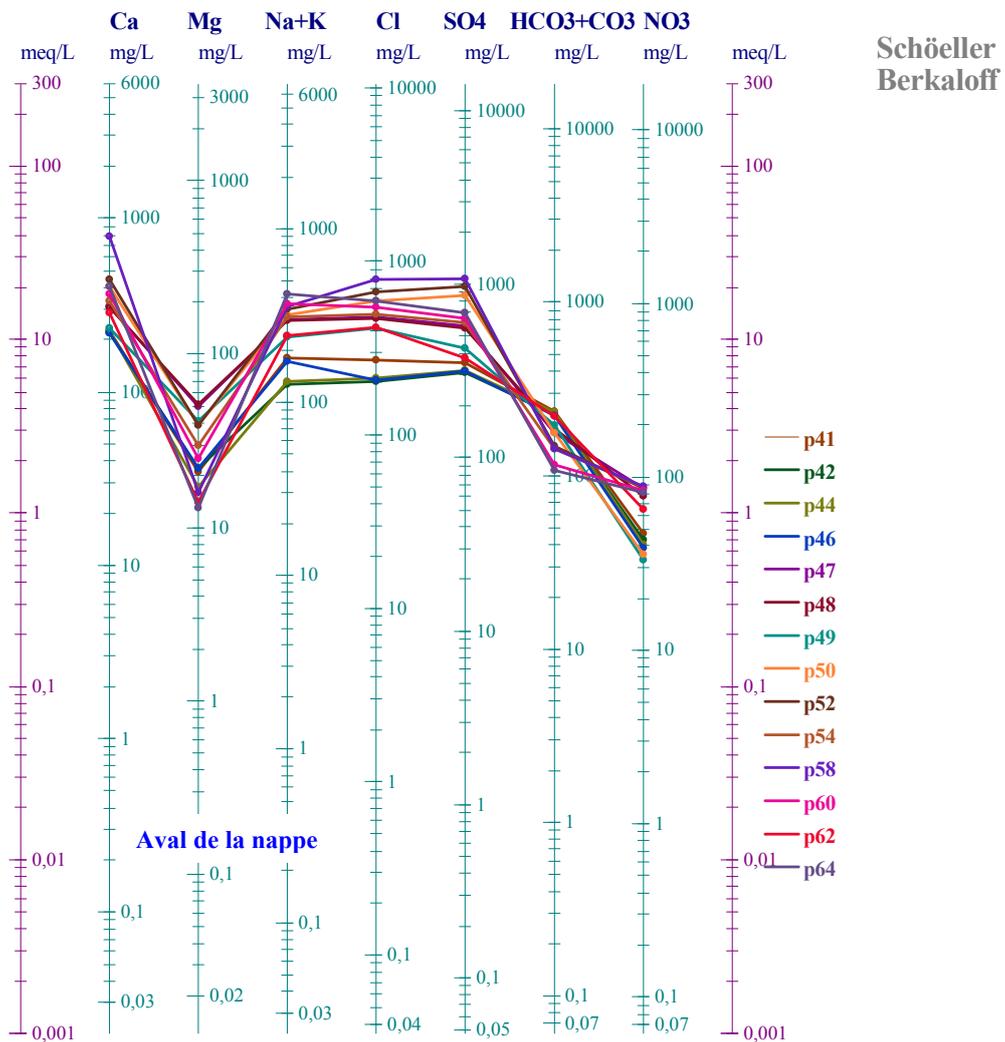
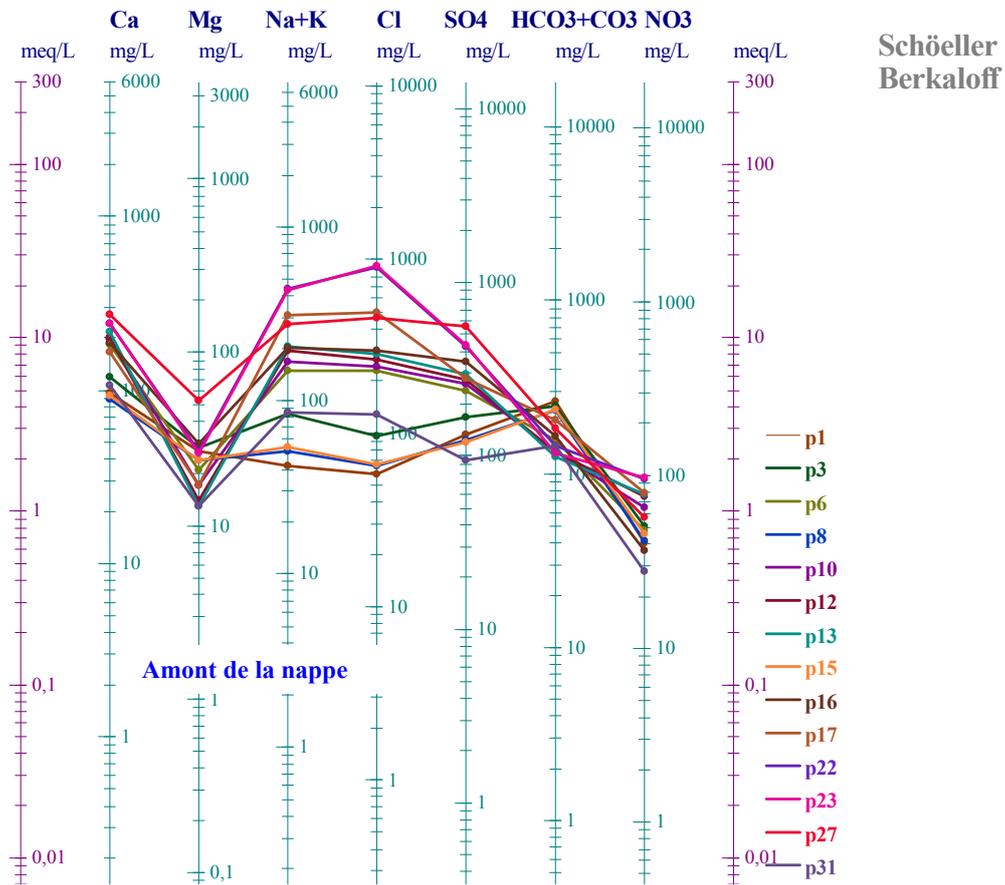


Figure 52: Diagramme de Schoëller-Berkaloff, juillet 2004.

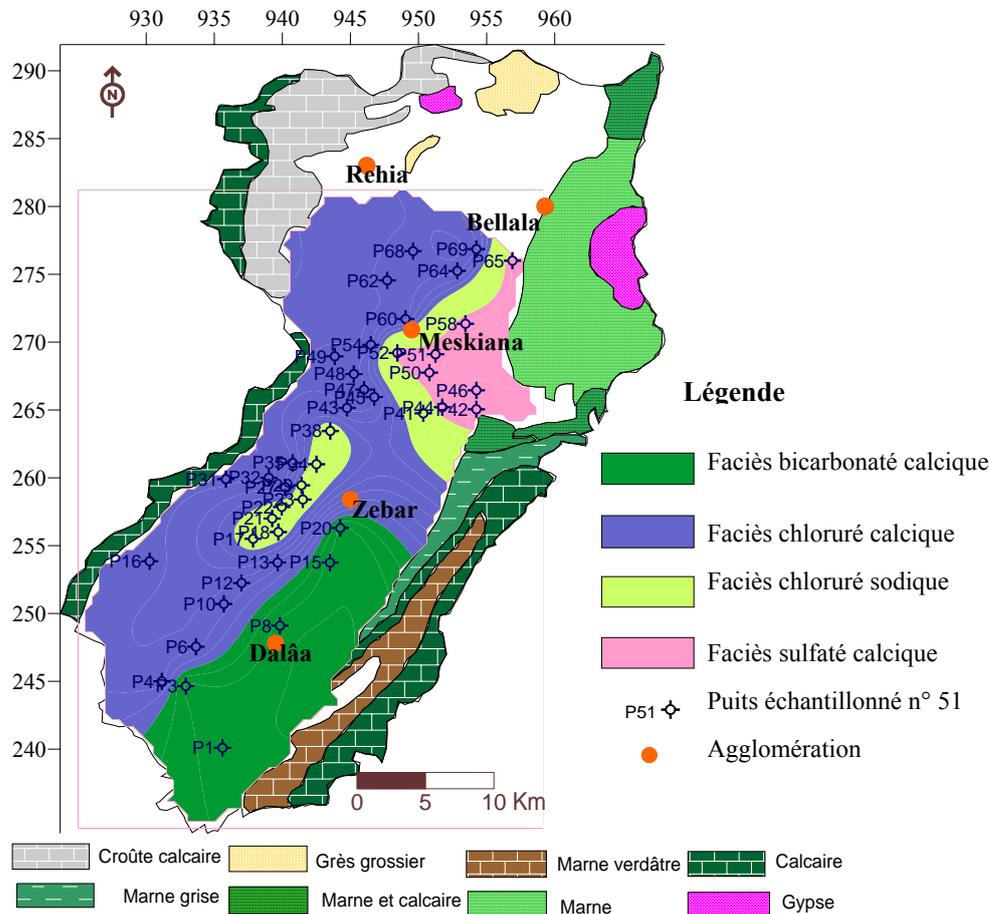


Figure 53: Carte de répartition des faciès chimiques de la nappe de Meskiana.

V.5 CARTOGRAPHIE HYDROCHIMIQUE :

Les eaux souterraines contiennent toujours des sels dissous qui leur confèrent les caractéristiques du milieu dont elles sont issues. Ces sels peuvent également provenir de phénomènes exogènes qui ont contribué à des modifications de la chimie du milieu, parmi lesquels on note l'évaporation et le lessivage.

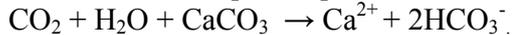
Afin de montrer la répartition spatiale des éléments chimiques, on a procédé à l'établissement de la cartographie hydrochimique. La répartition des concentrations dépend de plusieurs facteurs tels que la lithologie, l'état hydrodynamique de la nappe (les profondeurs de la surface piézométrique, la vitesse d'écoulement) et les conditions climatiques (une température élevée provoque l'évaporation et les précipitations engendrent le lessivage et la dissolution des roches).

Dans notre présente étude, on va cartographier les éléments chimiques dominants caractérisant les faciès chimiques qui présentent une influence sur la qualité des eaux et qui montrent une évolution significative durant toute la période d'observation. Les deux campagnes du mois de mars 2002 et celle du mois de juillet 2002 ont montré des teneurs maximales en sels dissous, c'est pourquoi nous les avons prises comme exemple pour illustrer la variation spatiale des éléments chimiques.

La cartographie hydrochimique a été illustrée par interpolation triangulaire, en utilisant le logiciel Surfer 8 (Golden software, 2002).

V.5.1 Cartes des Bicarbonates (fig.54 et fig.55) :

Les concentrations oscillent entre 88 et 263 mg/l. Dans la zone de Dalâa, les concentrations sont relativement faibles, car les eaux souterraines sont au début de leur cheminement dans la nappe. On note que dans quelques points, les concentrations sont relativement importantes durant la période des hautes eaux, ce qui est dû à la dissolution des calcaires en bicarbonates par les pluies acides selon la réaction suivante :



Les valeurs maximales sont rencontrées au niveau des bordures, surtout dans la zone orientale de Djebel Guerigueur. Quelques puits possèdent des concentrations remarquables, malgré qu'ils se situent au centre de la plaine, ceci est probablement dû à l'influence des cailloutis calcaires qui se répartissent sur la plaine ou des calcaires travertins d'âge Quaternaire.

La présence des ions bicarbonates dans les puits qui se situent à proximité des bordures calcaires confirme l'alimentation de la nappe latéralement.

On signale que les fortes concentrations sont enregistrées pendant la période des hautes eaux (mars 2002) par rapport à celle de la période des basses eaux (juillet 2002). Il est à noter que les teneurs en bicarbonates diminuent dans le sens de l'écoulement des eaux souterraines : elles n'excèdent pas 90 mg/l dans la zone de drainage, au Nord de Meskiana.

V.5.2 Cartes des chlorures (fig.56 et fig.57) :

L'observation des cartes de chlorures montre que les teneurs varient entre 47 et 950 mg/l. Ces dernières sont importantes au Nord-Est de la plaine. Les argiles et les alluvions du dépôt de remplissage Mio-Plio-Quaternaire et les dépôts salifères, provenant de l'érosion des formations gypsifères de Djebel Belkefif, constituent l'origine de ces chlorures. Le rapprochement des valeurs des concentrations durant les deux (02) périodes des hautes eaux et basses eaux met en évidence l'effet du lessivage et de l'évaporation. L'affleurement de la roche mère en surface favorise le premier phénomène et la faible profondeur de la surface piézométrique favorise le second.

Au centre de la plaine, on a enregistré des concentrations importantes en chlorures (925 mg/l), on pense qu'ils tirent leur origine d'un pointement triasique gypsifère.

Il est à signaler que l'évolution de la teneur en chlorures se fait suivant deux axes : le premier selon le sens de l'écoulement des eaux souterraines, c'est-à-dire selon une direction SW-NE, et le second à partir des bordures vers le centre de la plaine.

Les activités anthropiques contribuent également à l'augmentation des teneurs en chlorures. En effet, le déversement d'eaux usées domestiques, sans qu'elles soient traitées préalablement, nuit à la qualité des eaux souterraines.

V.5.3 Cartes des sulfates (fig.58 et fig.59) :

Les concentrations, en général, oscillent entre 75 et 1150 mg/l. Les fortes concentrations sont enregistrées durant la période des hautes eaux, au Nord-Est de la nappe. Elles sont dues, d'une part, à la dissolution des gypses qui sont contenus dans les marnes emschériennes, et d'autre part au lessivage des dépôts évaporitiques, provenant de Djebel Belkefif. Des teneurs remarquables ont été observées pendant la période des basses eaux, sous l'effet de l'évaporation, car la surface piézométrique se trouve à une faible profondeur.

Les plus faibles concentrations sont constatées en amont de la nappe, le long des bordures calcaires où se localise le faciès bicarbonaté-calcique, car les eaux souterraines sont faiblement minéralisées. En général la présence de fortes concentrations obéit à deux facteurs :

- Le lessivage des formations gypsifères et les dépôts évaporitiques provenant de Djebel Belkefif.
- L'évaporation, pendant la période des basses eaux, produit de fortes concentrations, car la surface piézométrique n'est pas profonde.

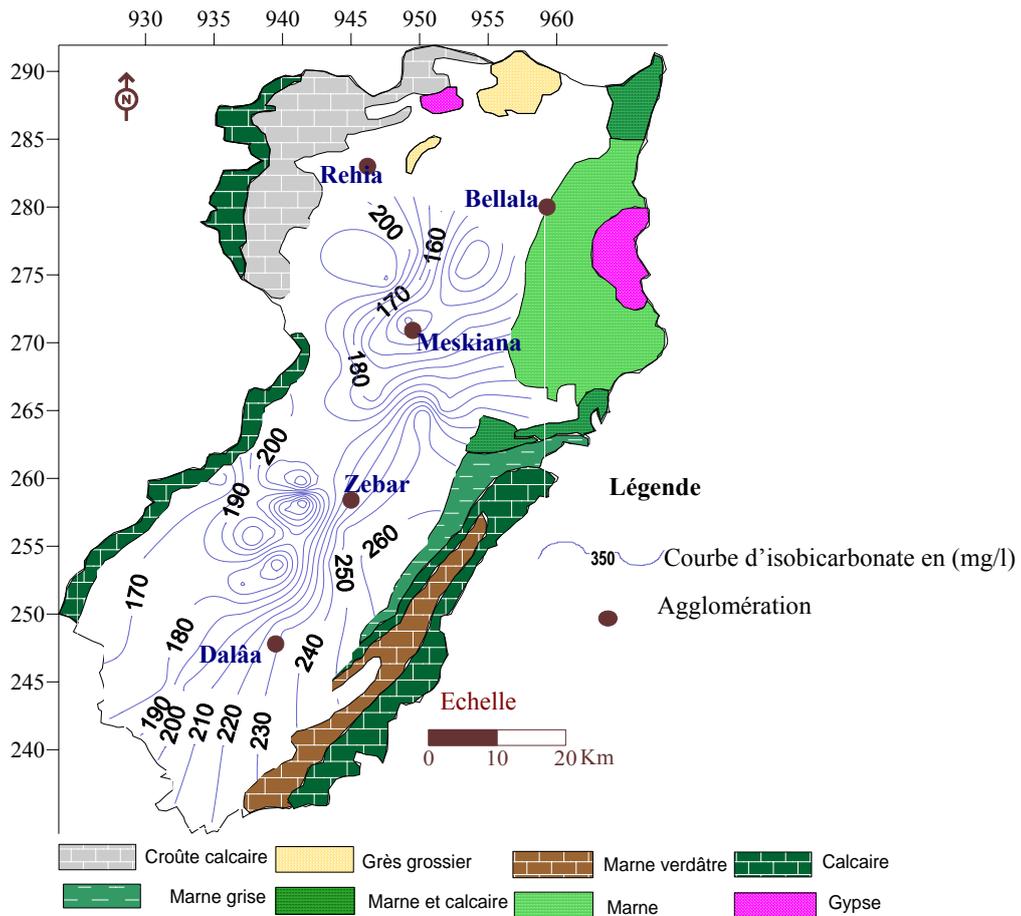


Figure 54: Carte des bicarbonates, mars 2002 (mg/l).

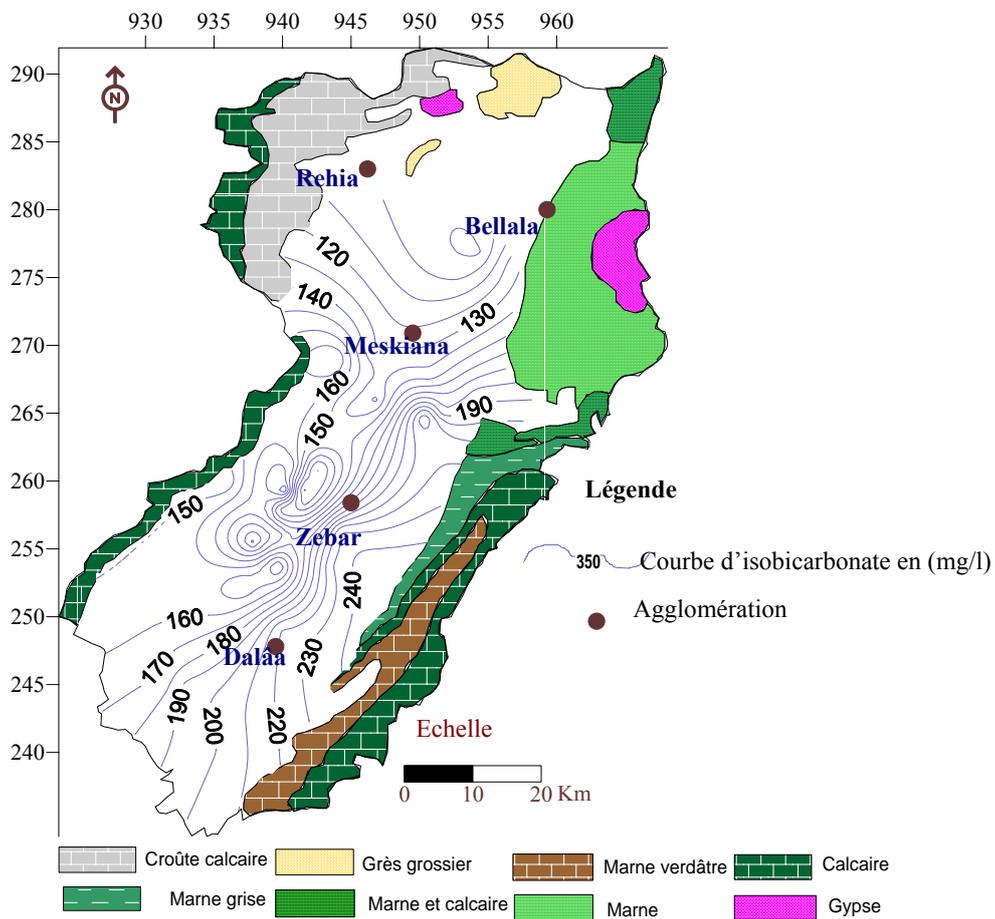


Figure 55: Carte des bicarbonates, juillet 2002 (mg/l).

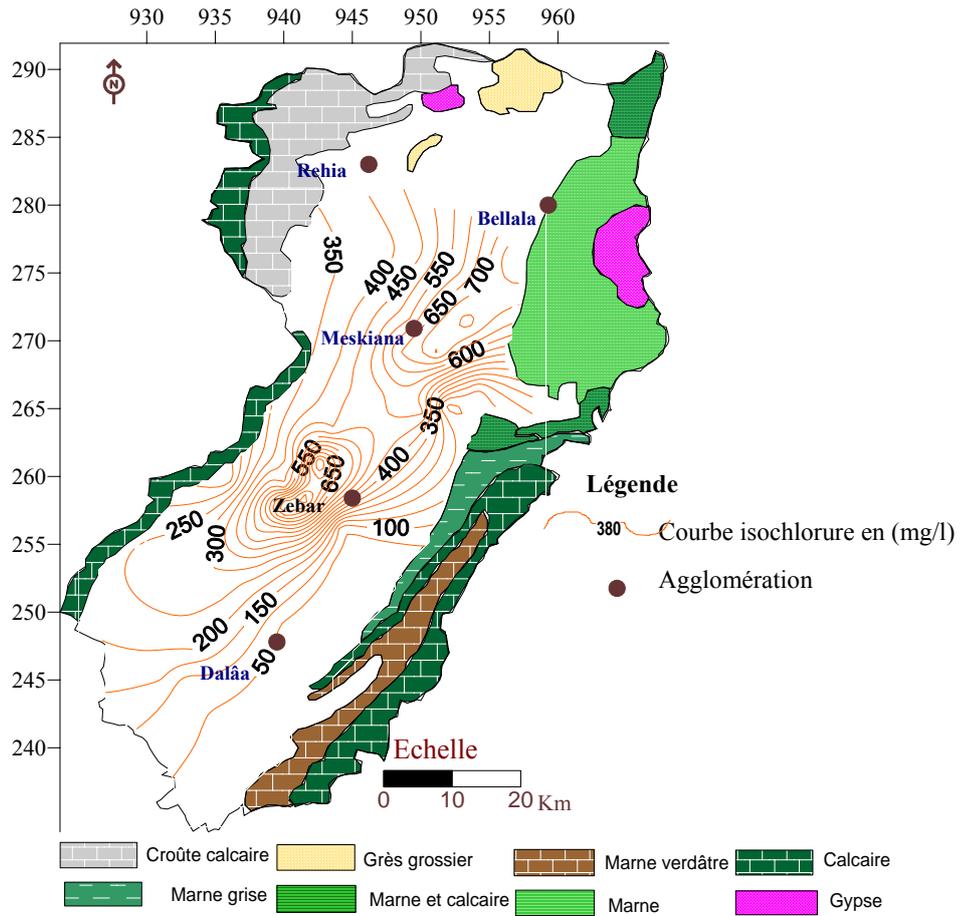


Figure 56: Carte des chlorures, mars 2002 (mg/l).

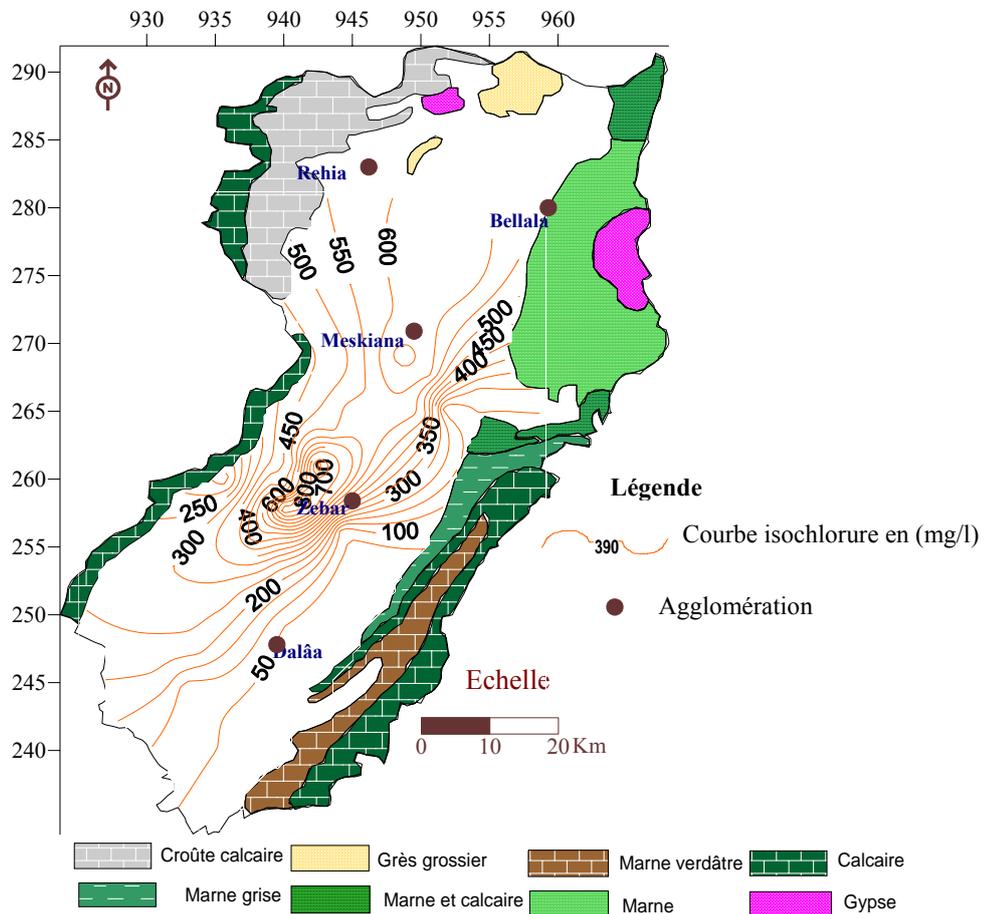


Figure 57: Carte des chlorures, juillet 2002 (mg/l).

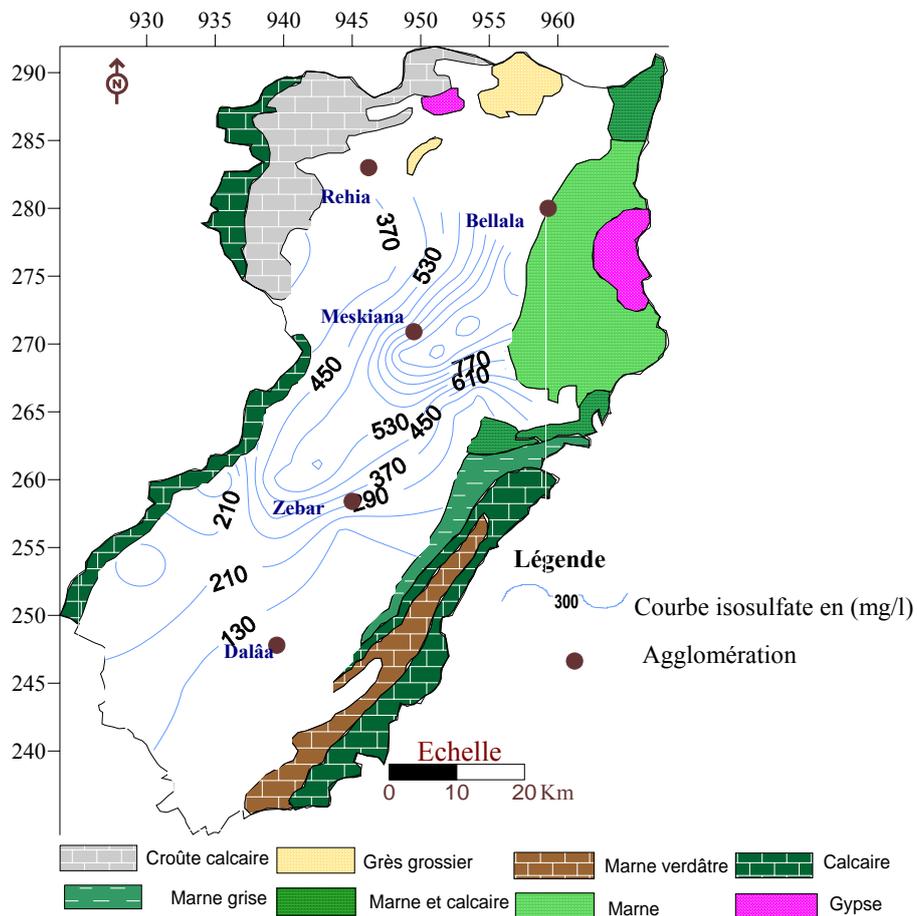


Figure 58: Carte des sulfates, mars 2002 (mg/l).

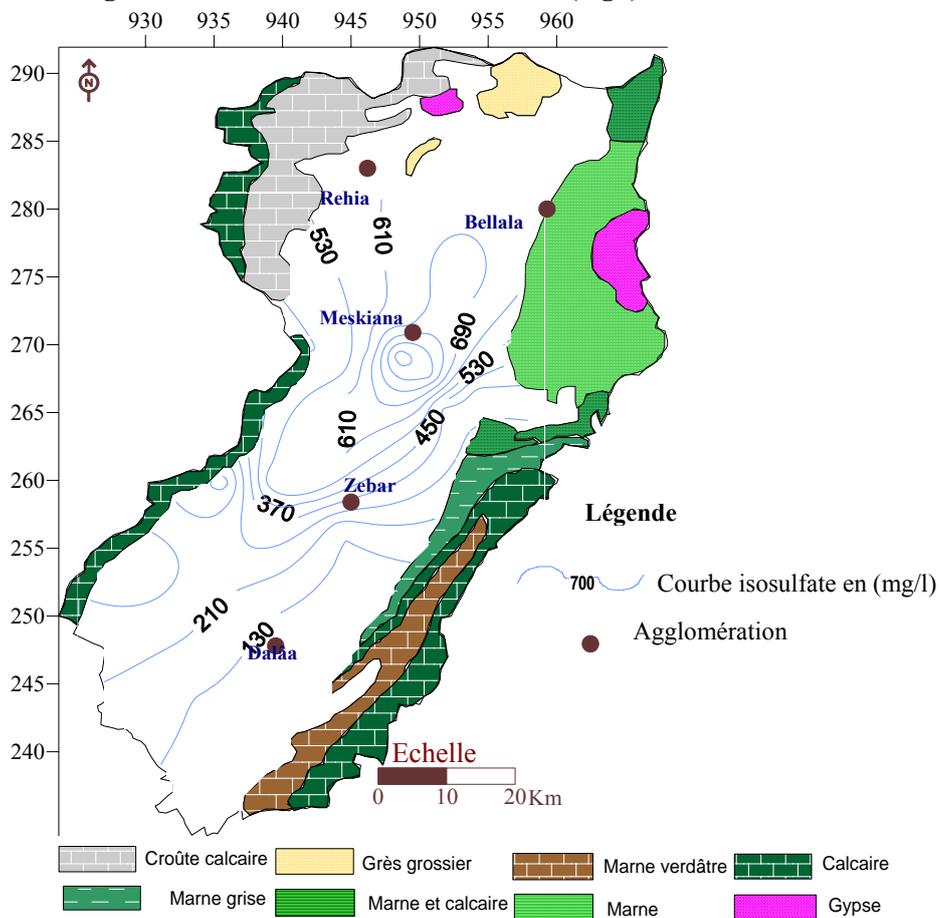


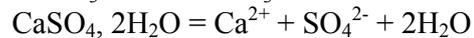
Figure 59: Carte des sulfates, juillet 2002 (mg/l).

V.5.4 Cartes du calcium (fig.60 et fig.61) :

Les concentrations oscillent en général entre 75 et 850 mg/l. Ces dernières sont relativement faibles à l'amont de la nappe par rapport aux autres régions, car les eaux souterraines ne sont pas encore minéralisées et proviennent de la dissolution des formations carbonatées de bordures. On remarque que les teneurs croissent dans le sens de l'écoulement. Les fortes teneurs apparaissent au Nord-Est, on pense qu'elles résultent de la dissolution des gypses contenus dans les marnes emschériennes et les dépôts évaporitiques provenant de Djebel Belkefif.

La variation des teneurs en calcium est semblable à celle des chlorures, ce qui confirme la prédominance du faciès chloruré-calcique.

Les ions Ca^{2+} proviennent de la dissolution des formations carbonatées (CaCO_3) et des gypses contenus dans les marnes emschériennes (CaSO_4) selon les équations d'équilibre suivantes :



On remarque que les fortes concentrations coïncident avec la période des basses eaux, ce qui nous laisse penser que l'élévation des concentrations est due au phénomène d'évaporation. La dissolution des calcaires ne contribue qu'avec un faible degré.

V.5.5 Cartes du sodium (fig.62 et fig.63) :

Les concentrations varient entre 23 et 425 mg/l. L'observation des deux cartes montre que les concentrations sont importantes dans la zone Nord-Est de la plaine pendant la période des basses eaux, ce qui traduit l'effet de l'évaporation, car la surface piézométrique n'est pas profonde. Les formations évaporitiques du Trias de Dj. Belkif constituent l'origine du sodium. Des teneurs assez remarquables sont observées au centre de la nappe, pendant les deux périodes, on pense que les pointements triasiques masqués sous le recouvrement du remplissage sont à leur origine.

On signale que les faibles concentrations se localisent en amont de la nappe, là où les eaux souterraines sont au début de leur cheminement, c'est-à-dire ne sont pas encore trop minéralisées. Les argiles du Crétacé, qui se trouve dans la nappe, peuvent donner du sodium par le phénomène d'échange de base et ce en fixant un ion Ca^{2+} après libération de deux ions Na^+ .

V.6 ETUDE DE L'ORIGINE DU CHIMISME DES EAUX SOUTERRAINES :

L'analyse des données chimiques à l'aide de la cartographie a pu donner une idée sur le mécanisme du chimisme des eaux souterraines de la nappe aquifère.

L'influence des formations géologiques sur la nature des faciès est très remarquable : les calcaires ont donné le faciès bicarbonaté calcique, confirmant ainsi l'alimentation latérale de la nappe, à partir des bordures calcaires.

Les marnes emschériennes, qui sont gypsifères, ainsi que les dépôts triasiques, sont à l'origine des faciès chloruré calcique, chloruré-sodique et sulfaté-calcique, par les phénomènes de lessivage et d'évaporation.

Les conditions hydrodynamiques de la nappe ont favorisé l'acquisition de ces faciès :

-La surface piézométrique n'est pas assez profonde ce qui augmente l'effet de l'évaporation dans la zone septentrionale, où le gradient hydraulique diminue, donnant ainsi suffisamment de temps à l'interaction entre les eaux souterraines et la lithologie ;

-Pendant la période des hautes eaux, les précipitations provoquent la dissolution des calcaires de bordures et le lessivage des dépôts de remplissage.

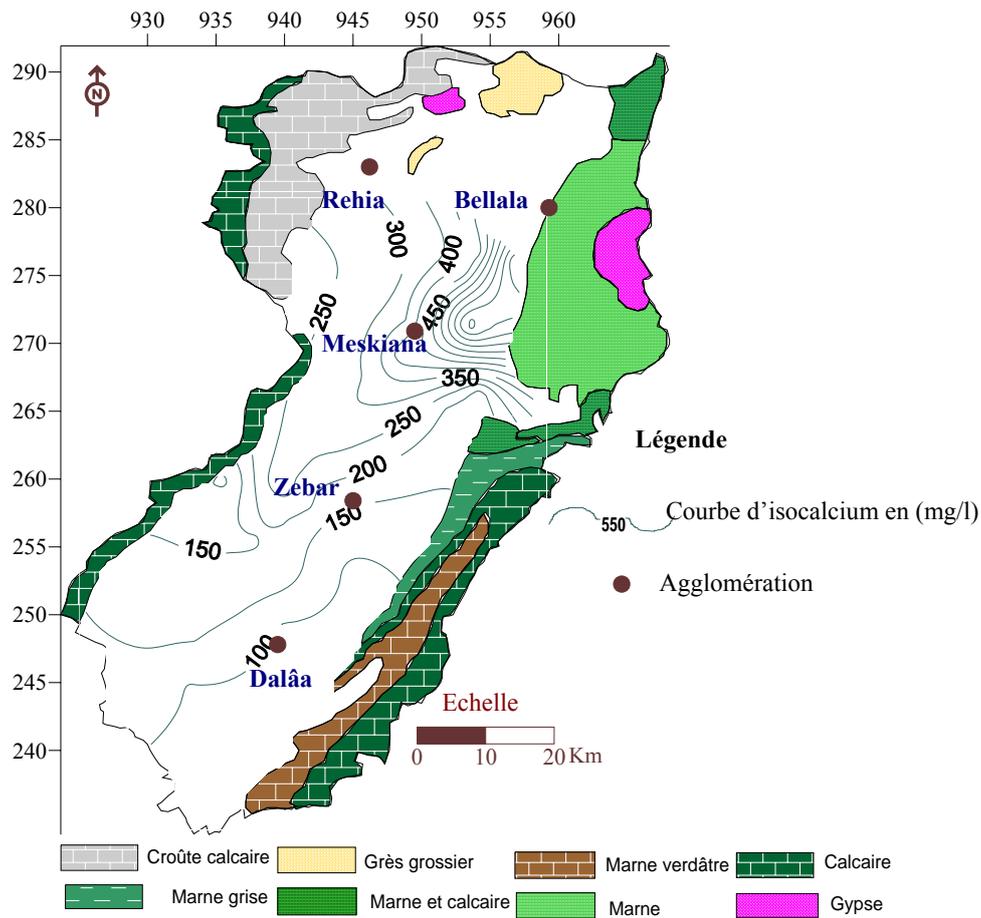


Figure 60: Carte du calcium, mars 2002 (mg/l).

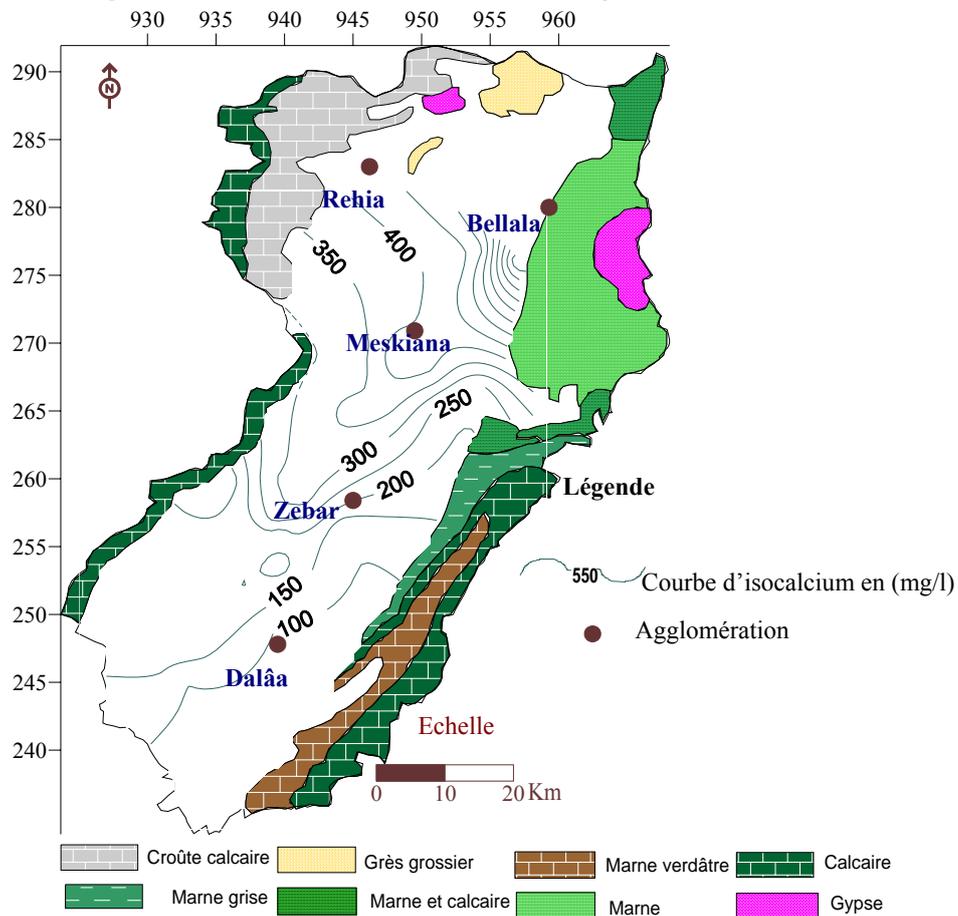


Figure 61: Carte du calcium, juillet 2002 (mg/l).

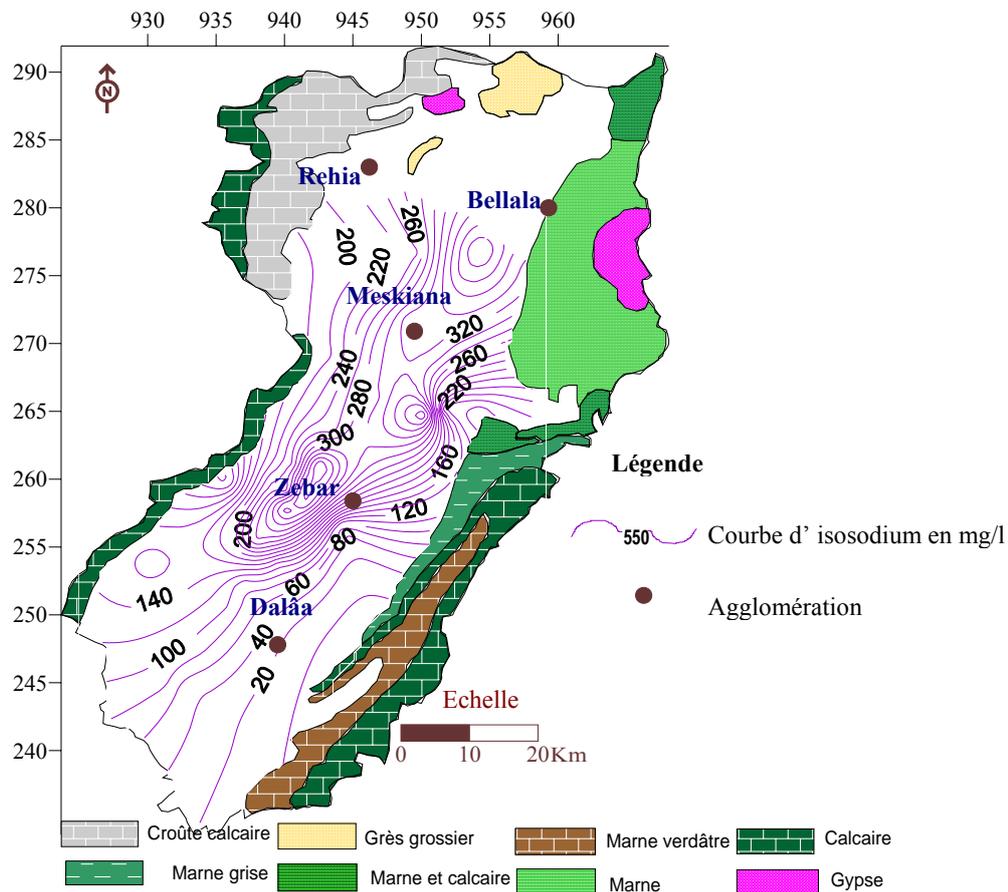


Figure 62: Carte du sodium, mars 2002 (mg/l).

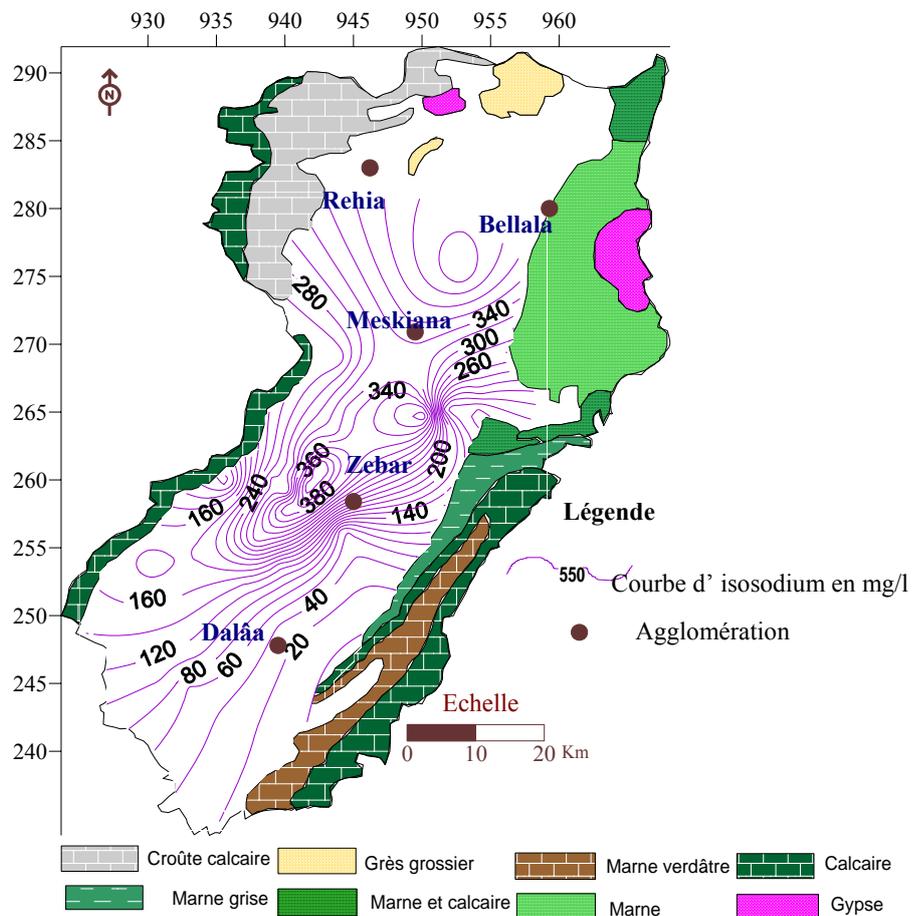


Figure 63: Carte du sodium, juillet 2002 (mg/l).

- Les eaux souterraines s'écoulent suivant la direction SW-NE et se chargent progressivement au fur et à mesure que l'on se déplace vers la zone d'accumulation, ce qui explique les fortes teneurs observées dans cette région.

Quelques éléments chimiques proviennent de plusieurs origines différentes tels que le calcium et le sodium, celle qui influe sur la prédominance des faciès doit être mise en évidence. Ces faciès se sont-ils stabilisés ou évoluent-ils vers d'autres tendances ?

Ces éléments chimiques ont-ils la même évolution dans le temps et dans l'espace ?

Pour répondre à ces questions, une étude détaillée s'impose pour mettre en relief l'origine, l'évolution et l'influence de chaque élément sur l'acquisition des faciès. La réalisation d'une telle étude se basera sur les propriétés de chaque élément chimique et les outils statistiques.

V.6.1 Faciès caractéristiques :

A partir de la représentation graphique des faciès chimiques par les diagrammes de Piper et celui de Schoelleur-Berkaloff, on a constaté la dominance de 04 faciès qui sont : le chloruré-calcique, le chloruré-sodique, le sulfaté-calcique et le bicarbonaté-calcique. Ceci est vérifié par les teneurs dominantes des ions suivants : Cl^- (26.73 méq/l), SO_4^{2-} (23.97 méq/l), HCO_3^- (4.31 méq/l), Ca^{2+} (42.25 méq/l) et Na^+ (22 méq/l).

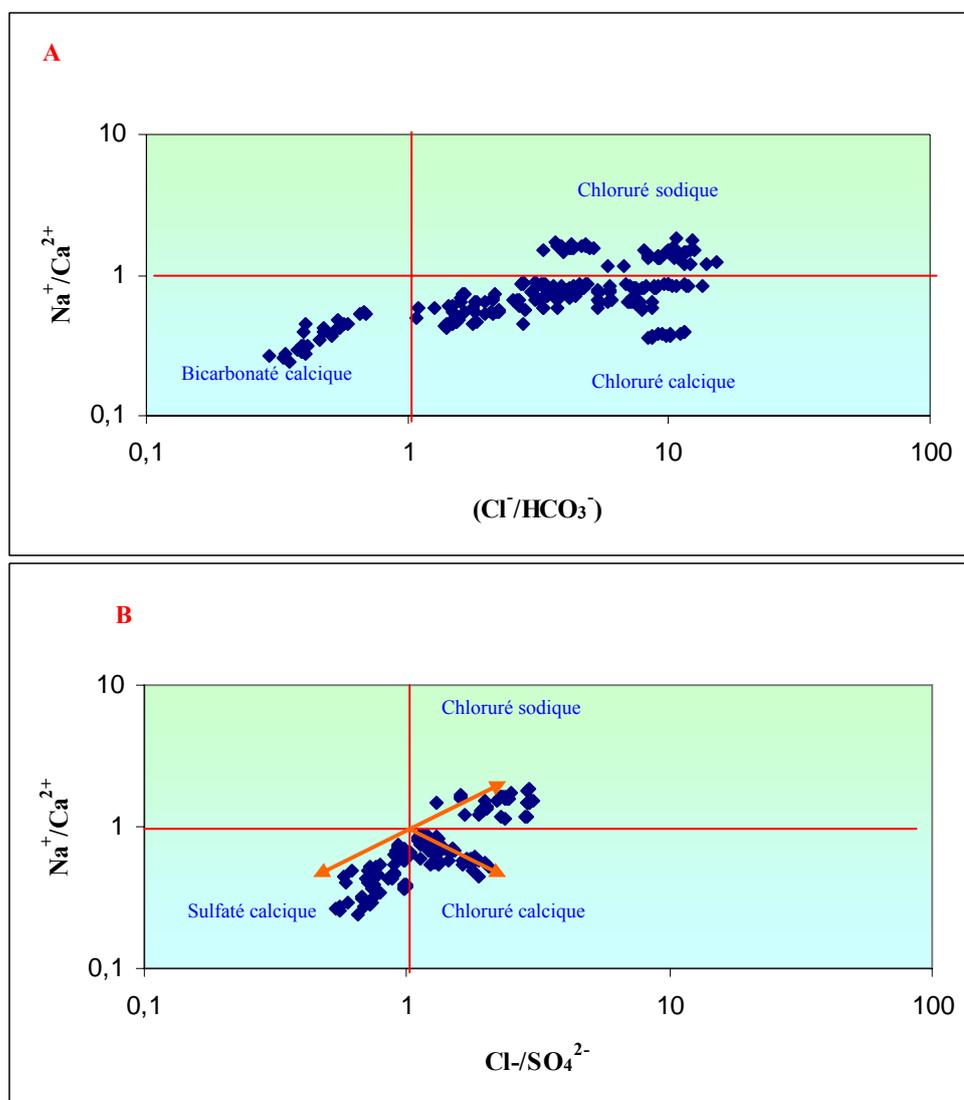


Figure 64: Evolution et distribution des faciès chimiques.

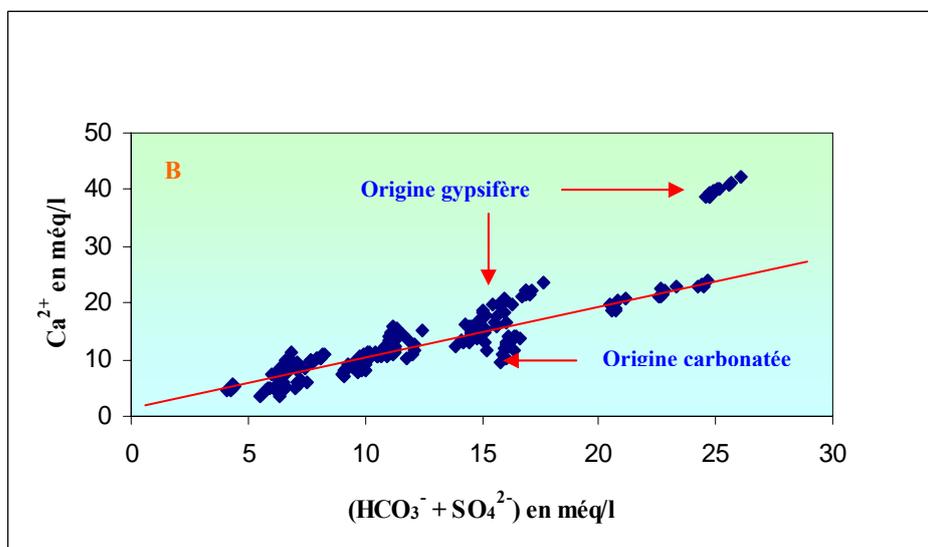
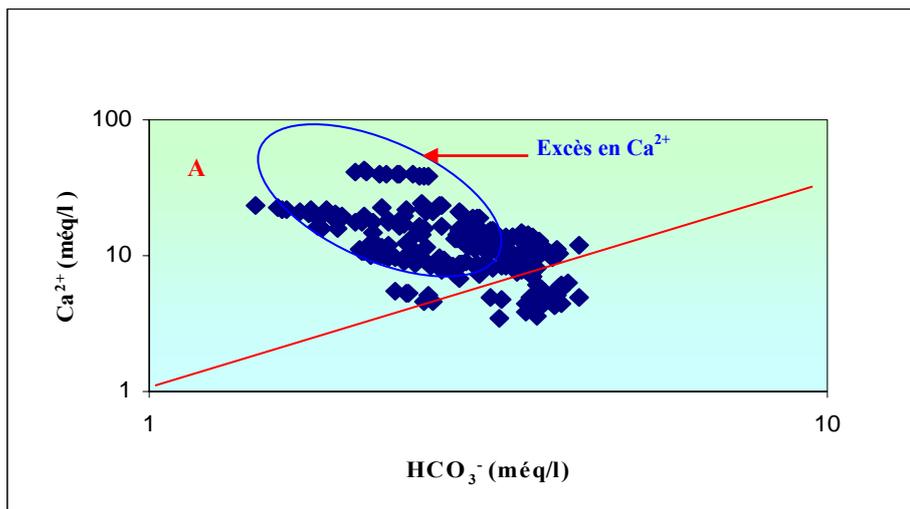
très utile pour la confirmation de la présence de ces faciès caractérisant les eaux souterraines de la nappe. Etant donné la dominance des ions précédents, on a réalisé deux diagrammes (figure 64, A et B) qui utilisent les rapports $\text{Na}^+ / \text{Ca}^{2+} - \text{Cl}^- / \text{HCO}_3^-$ et $\text{Na}^+ / \text{Ca}^{2+} - \text{Cl}^- / \text{SO}_4^{2-}$. L'interprétation de ces deux diagrammes a montré la concentration des rapports d'ions en 04 pôles indiquant les 04 faciès, déterminés précédemment, qui caractérisent la nappe. On note l'absence des faciès : bicarbonaté sodique et sulfaté sodique.

V.6.2 Origine des éléments chimiques :

Les eaux souterraines qui circulent dans la nappe alluviale de Meskiana proviennent des formations carbonatées de l'Eocène et du Maestrichtien qui bordent la plaine. Ensuite, elles s'écoulent dans un matériel très hétérogène (des alluvions, des sables, des graviers, des dépôts évaporitiques,,etc.). Le parcours d'écoulement et les couches traversées influent sur l'acquisition des éléments chimiques. En se basant sur les mesures et les analyses chimiques de toutes les campagnes, on va essayer de déterminer l'origine probable de tous les ions.

V.6.2.1 Les éléments $\text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-}$:

Le calcium tire son origine des carbonates et du gypse, la détermination de l'origine de chaque concentration en Ca^{2+} est nécessaire pour connaître les mécanismes du chimisme de la nappe.



nous avons

Figure 65: Détermination de l'origine du calcium.

établi un graphe où nous avons représenté le calcium en fonction des bicarbonates et des sulfates (figure 65B). L'analyse de ce graphe montre que 35 échantillons sur 225 ont une origine carbonatée soit 15% de l'ensemble des échantillons.

V.6.2.2 Les éléments Na^+ - Cl^- :

Dans les eaux naturelles, la présence des deux éléments Na^+ et Cl^- est attribuée à la dissolution de la halite que l'on rencontre dans les formations triasiques. Cependant, les chlorures comme le sodium peuvent avoir d'autres origines (naturelles ou anthropiques).

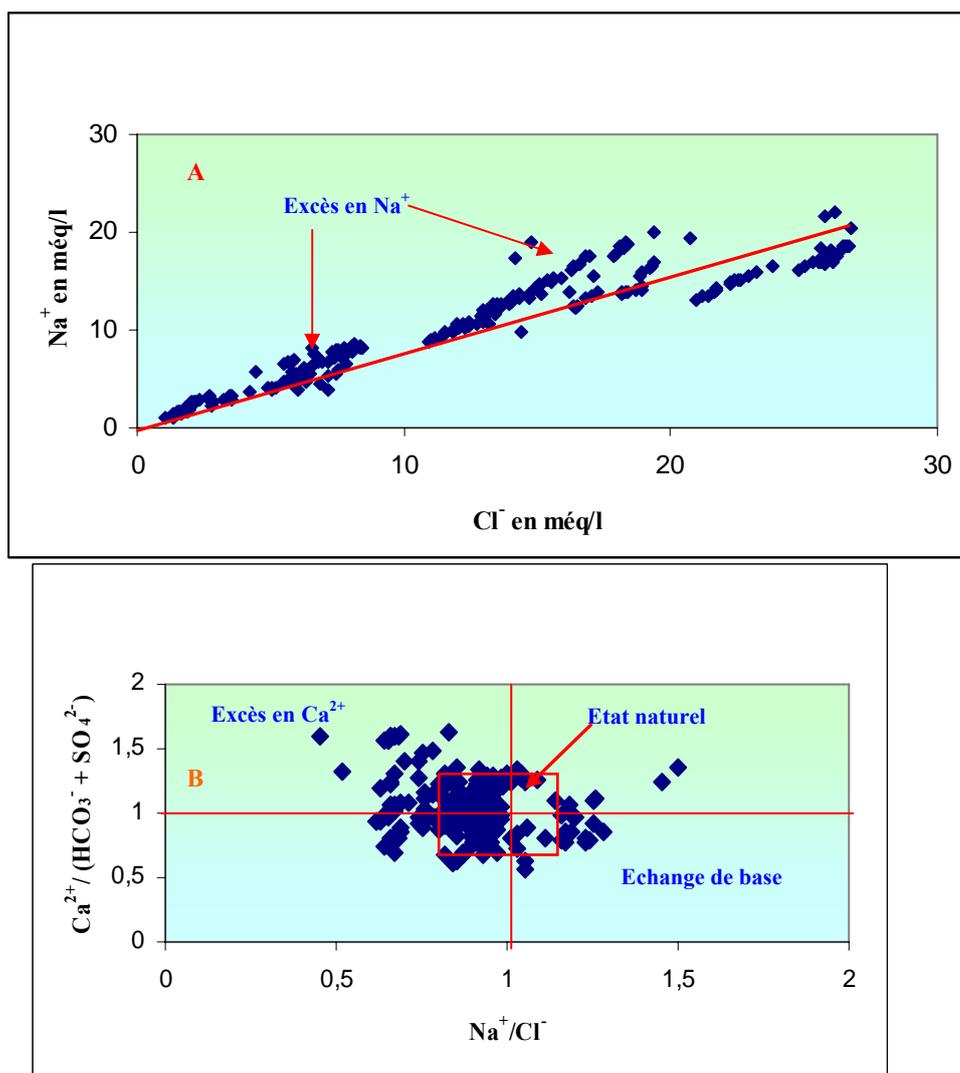


Figure 66 : Détermination de l'origine du sodium.

La représentation graphique de l'évolution du Na^+ en fonction de Cl^- (figure 66A) a montré un excès des teneurs en Na^+ , qui s'explique par l'existence d'une autre origine pour les ions sodiques (autre que l'halite).

L'augmentation des teneurs en Na^+ qui a accompagné les faibles teneurs en Cl^- est due au phénomène d'échange de base (figure 66B), car les argiles du substratum emschérien peuvent libérer des ions Na^+ après avoir fixé le Ca^{2+} .

Les fortes teneurs en Na^+ qui ont accompagné celles élevées du Cl^- , sont attribuées à la dissolution de l'halite contenue dans les marnes emschériennes et aux évaporites du Trias de Djebel Belkefif. Ce diagramme a confirmé un excès de Ca^{2+} par rapport à Na^+ .

V.6.2.3 Les éléments HCO_3^- , Cl^- et SO_4^{2-} :

Après avoir fait le point sur les origines des cations, on a essayé de représenter l'évolution des anions en fonction de la conductivité. L'interprétation de la figure 67A montre que la conductivité électrique n'évolue pas avec les bicarbonates, alors que les chlorures et les sulfates croissent avec la salinité. Cette dernière est donc due aux éléments salifères.

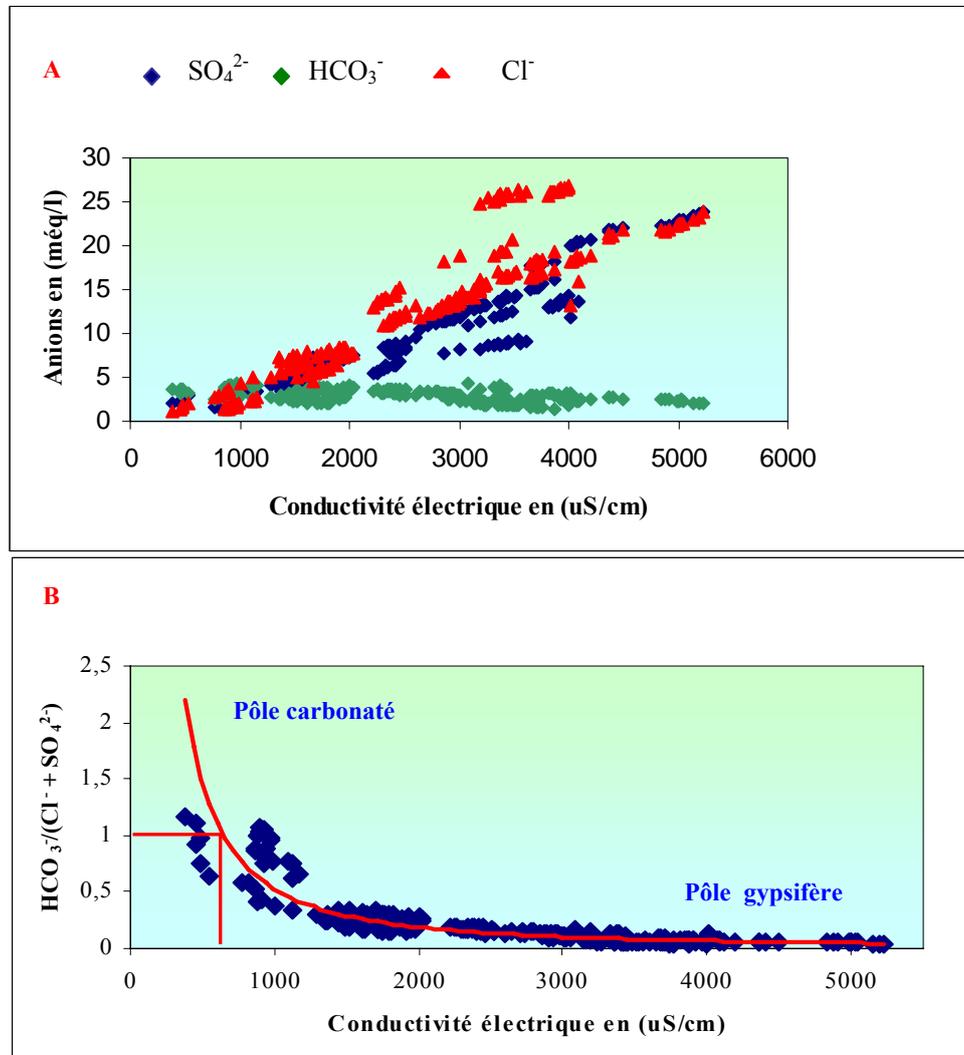


Figure 67 : Evolution des anions en fonction de la conductivité électrique.

La réalisation d'un diagramme ($\text{HCO}_3^- / \text{Cl}^-$ et SO_4^{2-}) - Conductivité électrique a montré la présence de deux pôles : le premier est carbonaté et représente 16.8 % des puits, il se caractérise par une dominance des ions HCO_3^- pour des conductivités inférieures à $600 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Le second, gypsifère, représente la majorité des points d'eau (83.2%), les ions Cl^- et SO_4^{2-} y dominent. Ce pôle est accompagné d'une conductivité plus importante qui atteint $5230 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Figure 67B.

L'évolution de la conductivité électrique commence par des valeurs faibles ($< 600 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) qui sont liées aux formations carbonatées des bordures, caractérisant les puits ayant un faciès bicarbonaté calcique. Lorsque les eaux souterraines s'écoulent en contact avec le substratum marneux gypsifère et les dépôts évaporitiques, elles se chargent en ions Cl^- et SO_4^{2-} et acquièrent des valeurs de conductivité très importantes, qui dépassent $5000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.

V.6.2.3 Les éléments Cl-SO₄²⁻ :

Ces deux ions sont issus de deux formations différentes, le SO₄²⁻ provient du gypse et le Cl⁻ provient de la dissolution de la halite et probablement d'une pollution anthropique. On a associé l'évolution de ces ions à la conductivité électrique pour mettre en relief la façon selon laquelle ils évoluent et déterminer lequel entre eux est à l'origine de la salinité des eaux de la nappe. L'interprétation du graphe (figure.68A) a révélé que la majorité des points d'eau présente un rapport (Cl/SO₄²⁻) supérieur à 1, indiquant ainsi la dominance des ions Cl⁻ par rapport à SO₄²⁻, ce qui confirme la dominance du faciès chloruré calcique et sodique. Quelques points d'eau présentent des valeurs du rapport (Cl/SO₄²⁻) inférieures à 1, indiquant une origine gypsifère (figure 68B).

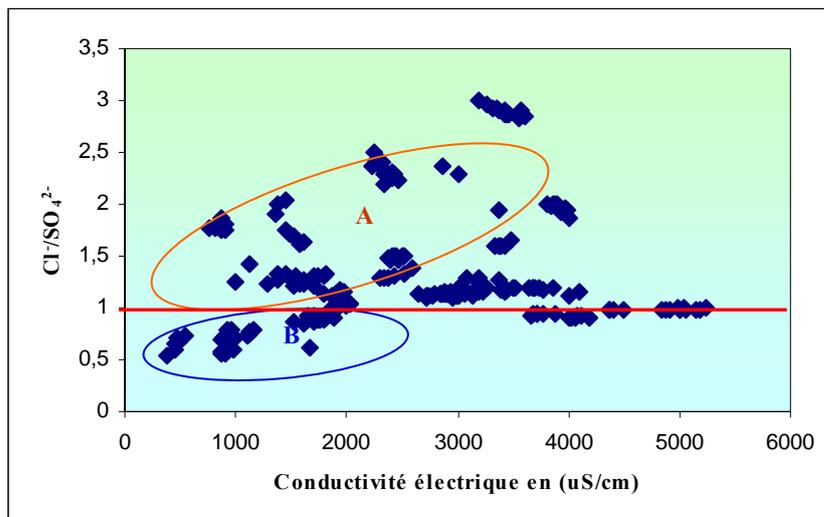


Figure 68 : Evolution des chlorures et des sulfates en fonction de la conductivité.

V.6.3 Etude de l'acquisition de la minéralisation :

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

Les eaux qui s'infiltrent dans les formations géologiques :

- calcaires de bordures, seront chargées en ions Ca²⁺, HCO₃⁻, par la dissolution. Les puits qui se trouvent à proximité des bordures attestent de cette minéralisation et se caractérisent par un faciès bicarbonaté calcique.
- riches en gypses et en sels, ce qui leur permet d'acquérir des concentrations importantes en Na⁺, Cl⁻, Ca²⁺, SO₄²⁻.

Les activités anthropiques peuvent provoquer la concentration des ions par :

- L'utilisation des engrais chimiques dans l'agriculture, comme fertilisants, fait augmenter les concentrations des éléments de NO₃⁻, K⁺ et PO₄³⁻.
- L'irrigation par des eaux salées provoque la salinisation des sols et augmente ainsi la minéralisation.

Dans le but d'expliquer les mécanismes d'acquisition de la minéralisation, on a utilisé le programme WATEQ pour déterminer les indices de saturation de quelques minéraux spécifiques. Tableau 18.

Les deux campagnes de l'année 2002 ont fait l'objet de cette application. Les calculs ont montré que :

-les minéraux carbonatés présentent des degrés de saturation différents. En effet, celui de la calcite varie de - 0.36 à + 0.19, suivi par celui de l'aragonite qui varie de - 0.5 à + 0.12 et enfin celui de la dolomite qui varie de - 1.56 à - 0.29.

-Si l'on admet que l'état d'équilibre se fait dans l'intervalle de - 0.5 à + 0.5, on peut dire que les trois minéraux ont atteint leur état d'équilibre et non pas celui de la sursaturation.

La répartition dans l'espace de ces indices montre une augmentation des concentrations dans deux sens, pour la calcite et l'aragonite : la première à partir des bordures vers l'axe de la nappe et la seconde dans le sens de l'écoulement du Sud-Ouest vers le Nord-Est (figure 69 et figure 70). Par contre, la concentration de la dolomite montre une évolution inverse à celles des deux minéraux précédents, ce qui confirme l'origine gypsifère et évaporitique du calcium et non pas celle carbonatée.

- Les minéraux évaporitiques montrent des degrés de saturation plus faibles que les minéraux carbonatés (figure 69 et figure 70). Le gypse enregistre des indices qui varient de -1.63 à -0.08 (où 70 % des points d'eau analysés n'ont pas atteint le degré de saturation), suivi de l'anhydrite dont l'indice varie de - 1.85 jusqu'à - 0.3 (83% des puits sont sous-saturés) et enfin l'halite dont les indices varient de -7.64 à - 4.10 (donc très sous saturés)

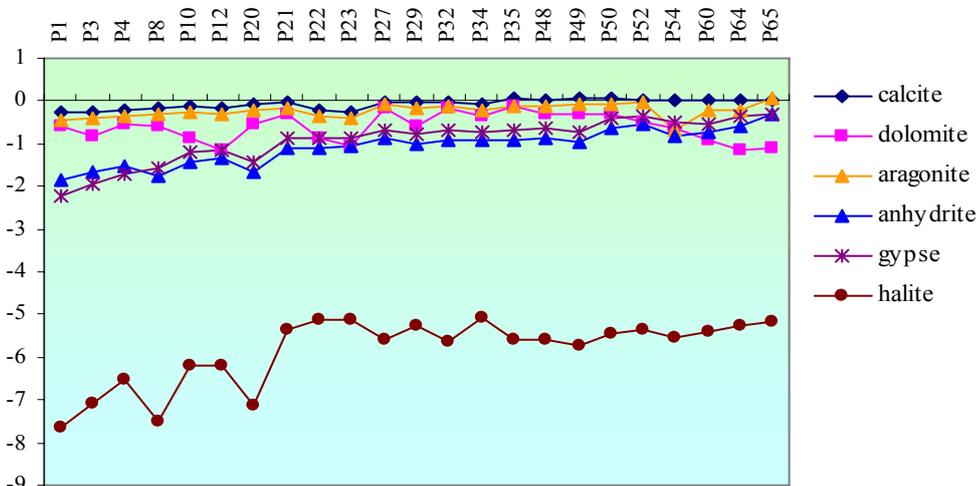


Figure 69: Variation de l'indice de saturation des minéraux, mars 2002.

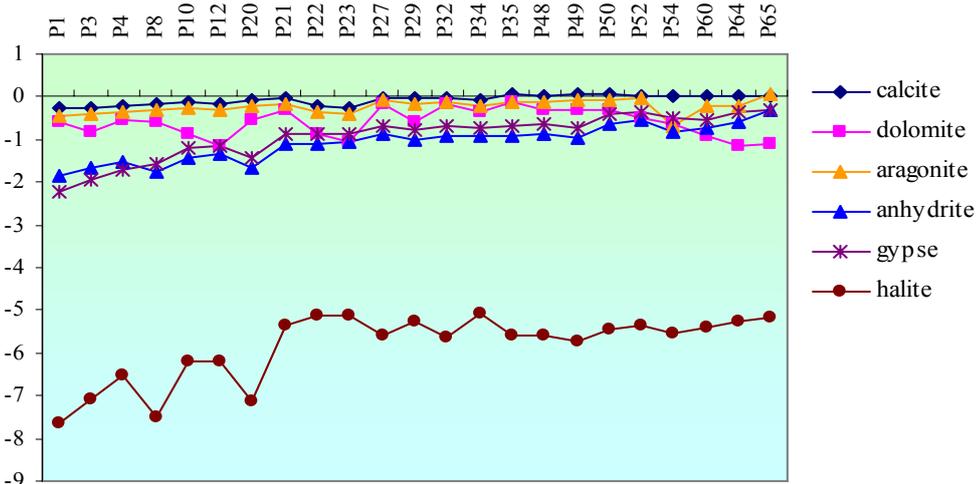


Figure 70: Variation de l'indice de saturation des minéraux, juillet 2002.

Tableau 18 : Evolution des indices de saturation des minéraux des campagnes de l'année 2002.

| Région | P | faciès | Mars 2002 | | | | | | Juillet 2002 | | | | | | |
|----------|------|--------|---------------------|----------------------------|--------------------|------------------------|-------------------------|----------------|--------------|---------------------|----------------------------|--------------------|------------------------|-------------------------|----------------|
| | | | Minéraux carbonatés | | | Minéraux évaporitiques | | | faciès | Minéraux carbonatés | | | Minéraux évaporitiques | | |
| | | | calcite CaCO3 | dolomite CaMg (CO3)2 | aragonite CaCO3 | anhydrite CaSO4 | gypse CaSO4: 2H2O | halite NaCl | | calcite CaCO3 | dolomite CaMg (CO3)2 | aragonite CaCO3 | anhydrite CaSO4 | gypse CaSO4: 2H2O | halite NaCl |
| Dalâa | P1 | BC | - 0.28 | - 0.6 | - 0.43 | - 1.85 | - 2.2 3 | - 7.64 | BC | - 0.36 | - 0.96 | - 0.50 | - 1.82 | - 2.15 | - 7.40 |
| | P 3 | BC | - 0.24 | - 0.83 | - 0.38 | - 1.66 | - 1.95 | - 7.10 | BC | - 0.25 | - 0.10 | - 0.39 | - 1.61 | - 1.91 | - 6.95 |
| | P 4 | CC | - 0.20 | - 0.53 | - 0.34 | - 1.51 | - 1.69 | - 6.5 | CC | - 0.18 | - 0.62 | - 0.33 | - 1.46 | - 1.48 | - 6.37 |
| | P 6 | CC | - 0.13 | - 0.87 | - 0.27 | - 1.50 | - 1.28 | - 6.33 | CC | - | - | - | - | - | - |
| | P 8 | BC | - 0.18 | - 0.61 | - 0.33 | - 1.77 | - 1.55 | - 7.50 | BC | - 0.22 | - 0.75 | - 0.36 | - 1.75 | - 1.53 | - 7.35 |
| | P 10 | CC | - 0.10 | - 0.89 | - 0.24 | - 1.41 | - 1.19 | - 6.21 | CC | - 0.13 | - 1.15 | - 0.28 | - 1.30 | - 1.08 | - 6.13 |
| | P 12 | CC | - 0.15 | - 1.15 | - 0.30 | - 1.35 | - 1.13 | - 6.20 | CC | - 0.15 | - 1.26 | - 0.30 | - 1.24 | - 1.03 | - 6.05 |
| Zebar | P 20 | BC | - 0.08 | - 0.54 | - 0.23 | - 1.65 | - 1.43 | - 7.11 | BC | - 0.15 | - 0.71 | - 0.30 | - 1.60 | - 1.38 | - 6.96 |
| | P 21 | CS | - 0.04 | - 0.29 | - 0.18 | - 1.09 | - 0.87 | - 5.34 | CS | - 0.04 | - 0.43 | - 0.18 | - 1.03 | - 0.81 | - 5.28 |
| | P 22 | CS | - 0.21 | - 0.87 | - 0.35 | - 1.10 | - 0.88 | - 5.14 | CS | - 0.13 | - 0.94 | - 0.28 | - 0.96 | - 0.74 | - 4.10 |
| | P 23 | CS | - 0.26 | - 1.05 | - 0.41 | - 1.07 | - 0.85 | - 5.11 | CS | - 0.16 | - 1.17 | - 0.30 | - 0.93 | - 0.71 | - 5.50 |
| | P 27 | CC | - 0.05 | - 0.19 | - 0.09 | - 0.88 | - 0.66 | - 5.61 | CC | + 0.06 | - 0.31 | - 0.08 | - 0.83 | - 0.61 | - 5.55 |
| | P 29 | CS | - 0.03 | - 0.58 | - 0.18 | - 0 1.0 | - 0.78 | - 5.24 | CS | - 0.19 | - 1.22 | - 0.32 | - 0.80 | - 0.58 | - 5.15 |
| | P 31 | CC | - 0.35 | - 1.13 | - 0.49 | - 1.65 | - 1.87 | - 6.88 | CC | - 0.33 | - 1.27 | - 0.47 | - 1.71 | - 1.49 | - 6.66 |
| | P 32 | CC | - 0.04 | - 0.15 | - 0.10 | - 0.90 | - 0.70 | - 5.64 | CC | + 0.01 | - 0.70 | - 0.13 | - 0.84 | - 0.62 | - 5.51 |
| | P 34 | CS | - 0.08 | - 0.37 | - 0.23 | - 0.93 | - 0.71 | - 5.09 | CS | - 0.21 | - 1.29 | - 0.35 | - 0.76 | - 0.54 | - 5.02 |
| | P 35 | CC | + 0.08 | - 0.14 | - 0.10 | - 0.90 | - 0.68 | - 5.61 | CC | + 0.01 | - 0.55 | - 0.13 | - 0.81 | - 0.59 | - 5.48 |
| Meskiana | P38 | CS | - 0.12 | - 0.71 | - 0.26 | - 1.49 | - 1.71 | - 6.66 | CS | - 0.13 | - 0.70 | - 0.26 | - 0.83 | - 0.62 | - 5.67 |
| | P 48 | CC | + 0.04 | - 0.31 | - 0.11 | - 0.86 | - 0.64 | - 5.57 | CC | - 0.03 | - 0.62 | - 0.17 | - 0.80 | - 0.58 | - 5.44 |
| | P 49 | CC | + 0.06 | - 0.30 | - 0.08 | - 0.97 | - 0.75 | - 5.74 | CC | + 0.05 | - 1.04 | - 0.09 | - 0.88 | - 0.66 | - 5.59 |
| | P 50 | SC | + 0.07 | - 0.29 | - 0.07 | - 0.64 | - 0.42 | - 5.45 | SC | + 0.01 | - 0.62 | - 0.16 | - 0.61 | - 0.39 | - 5.39 |
| | P 51 | SC | - 0.07 | - 0.41 | - 0.07 | - 0.51 | - 0.29 | - 5.31 | SC | - | - | - | - | - | - |
| | P 52 | SC | + 0.04 | - 0.50 | - 0.10 | - 0.56 | - 0.34 | - 5.36 | SC | - 0.01 | - 0.76 | - 0.15 | - 0.53 | - 0.31 | - 5.33 |
| | P 54 | CC | + 0.02 | - 0.65 | - 0.70 | - 0.80 | - 0.51 | - 5.52 | CC | - 0.05 | - 0.94 | - 0.21 | - 0.74 | - 0.52 | - 5.39 |
| | P 58 | SC | + 0.022 | - 1.02 | + 0.12 | - 0.34 | - 0.12 | - 5.29 | SC | - | - | - | - | - | - |
| | P 60 | CC | + 0.026 | - 0.93 | - 0.23 | - 0.74 | - 0.52 | - 5.41 | CC | - 0.06 | - 1.05 | - 0.22 | - 0.78 | - 0.48 | - 5.59 |
| | P 64 | CC | + 0.03 | - 1.17 | - 0.22 | - 0.60 | - 0.37 | - 5.25 | CC | - 0.08 | - 1.40 | - 0.28 | - 0.63 | - 0.41 | - 5.22 |
| | P 65 | SC | + 0.032 | - 1.11 | + 0.08 | - 0.32 | - 0.32 | - 5.15 | SC | + 0.19 | - 1.42 | + 0.05 | - 0.30 | - 0.08 | - 5.19 |
| | P 69 | - | - | - | - | - | - | - | CC | - 0.15 | - 1.56 | + 0.10 | - 0.60 | - 0.37 | - 5.17 |

Les concentrations les plus importantes ont été enregistrées dans les régions Nord-Est de Meskiana où affleurent les dépôts évaporitiques et celle de Zebar où se trouvent les marnes emscheriennes gypsifères.

Le calcul de l'indice de saturation des différents minéraux dans l'eau indique que seuls les minéraux carbonatés ont tendance à atteindre l'équilibre, surtout sous la forme de calcite et en particulier pendant la période des hautes eaux. Par contre, les minéraux évaporitiques sont toujours à l'état de sous-saturation, malgré les fortes concentrations qu'ils acquièrent.

V.7 ANALYSE STATISTIQUE (APPLICATION DE L'ACP):

V.7.1 Introduction :

La représentation graphique des éléments chimiques et l'étude des rapports caractéristiques ont montré qu'un grand nombre de paramètres chimiques et physico-chimiques étaient significatifs, pris individuellement. Pour expliquer l'évolution du chimisme, la plupart du temps une (ou plusieurs) liaison plus ou moins forte existe entre ces paramètres. Il est donc apparu intéressant d'essayer de traiter les données statistiquement, en utilisant une méthode d'analyse multidimensionnelle comme l'Analyse en Composantes Principales (ACP).

V.7.2 Principe:

Chaque échantillon d'eau d'une campagne de prélèvement constitue une unité statistique. Les différents paramètres soumis à l'analyse constituent les variables qui caractérisent ces unités statistiques. Chacune des six campagnes analysées au cours des trois années (2002,2003 et 2004) a donc été traitée statistiquement grâce à l'utilisation du logiciel SPAD (voir annexe IV).

Notre présente étude porte sur les éléments majeurs, qui influent sur l'évolution de la minéralisation. On a inclus la conductivité électrique, dont l'évolution dépend de cette dernière.

V.7.3. L'ACP globale :

Une analyse en composantes principales (ACP), a été réalisée sur un tableau de données de huit (08) variables et de 160 individus. Nous avons poussé l'analyse jusqu'à deux facteurs et 82.44 % de la variance ont pu être exprimés.

Ce nombre d'individus permet d'avoir un coefficient de corrélation critique de 0.31 (Mangin, 1979) soit $r^2 = 0.094$.

V.7.3.1 Matrice de corrélation:

L'examen du tableau 19 relatif à la matrice de corrélation permet de voir que pratiquement toutes les variables sont corrélées entre elles. Il existe une forte corrélation entre la conductivité électrique d'une part et les sulfates, le sodium, le calcium et les nitrates d'autre part.

Tableau.19: Matrice de corrélation entre les variables.

| | Cl ⁻ | SO ₄ ²⁻ | HCO ₃ ⁻ | NO ₃ ⁻ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Na ⁺ +K ⁺ | Cond. |
|---------------------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------|------------------|---------------------------------|-------|
| Cl ⁻ | 1,00 | | | | | | | |
| SO ₄ ²⁻ | 0,75 | 1,00 | | | | | | |
| HCO ₃ ⁻ | -0,55 | -0,52 | 1,00 | | | | | |
| NO ₃ ⁻ | 0,62 | 0,48 | -0,63 | 1,00 | | | | |
| Ca ²⁺ | 0,63 | 0,92 | -0,57 | 0,51 | 1,00 | | | |
| Mg ²⁺ | 0,37 | 0,30 | 0,25 | -0,10 | -0,01 | 1,00 | | |
| Na ⁺ +K ⁺ | 0,95 | 0,77 | -0,61 | 0,68 | 0,65 | 0,29 | 1,00 | |
| Cond. | 0,88 | 0,90 | -0,55 | 0,57 | 0,82 | 0,29 | 0,88 | 1,00 |

D'autres corrélations moins significatives entre la conductivité électrique d'une part et les bicarbonates permettent de dire que la salinité de l'eau est beaucoup plus due aux formations salifères telles que le gypse, l'anhydrite, le sel gemme, la sylvinite, ...

La forte liaison qui existe entre les sulfates et le calcium confirme cette tendance.

Les nitrates sont bien corrélés avec le sodium suite à l'utilisation abusive des engrais type N P K.

V.7.3.2 Analyse de l'espace des variables (fig.71a) :

La projection des variables sur le plan factoriel F1-F2 montre que l'axe F1 exprime 65.09 % de la variance et il est déterminé par, Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , et $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, NO_3^- et la conductivité. Il oppose donc les eaux minéralisées aux eaux faiblement chargées.

Le facteur F2 vertical exprime 17.35 % de la variance. Il n'est déterminé d'une manière positive que par le magnésium

V.7.3.3 Analyse de l'espace des individus (fig.71b)

La projection des individus sur le plan F1-F2 a révélé que :

-L'axe F1 montre l'opposition entre les eaux faiblement minéralisées se trouvant à l'amont de l'aquifère et les eaux fortement minéralisées qui se trouvent à l'aval.

- l'axe FII montre également une opposition entre les eaux riches en magnésium (groupe B) et les eaux faiblement chargées en cet élément (groupe A). Les premières se localisent en amont de la nappe et à la proximité des bordures, et les secondes se situent au centre et au Nord-Est de la nappe dans l'exutoire de celle-ci.

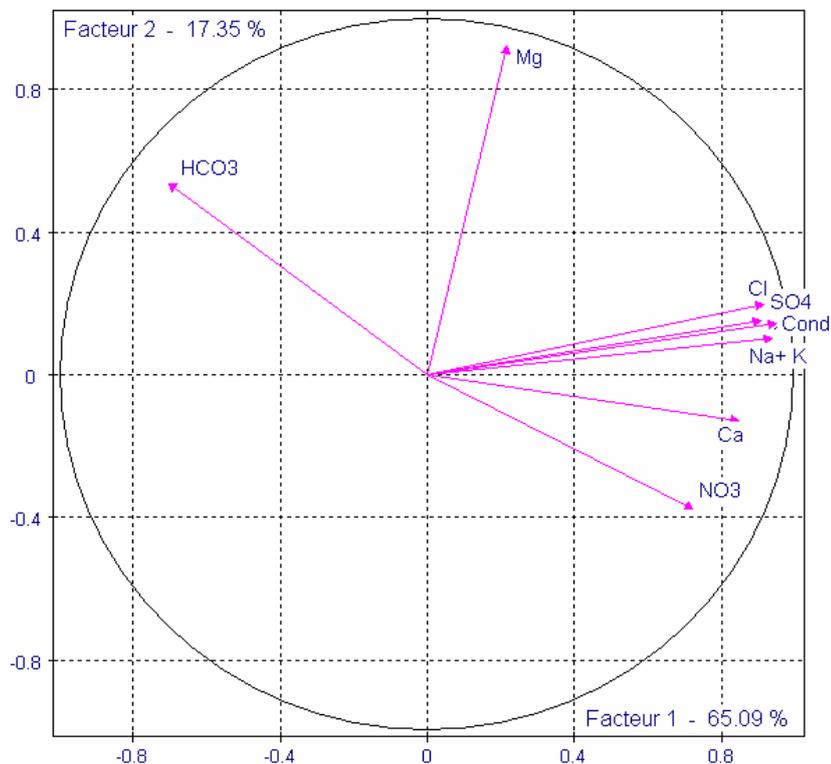


Figure. 71a: Espace des variables de l'ACP globale.

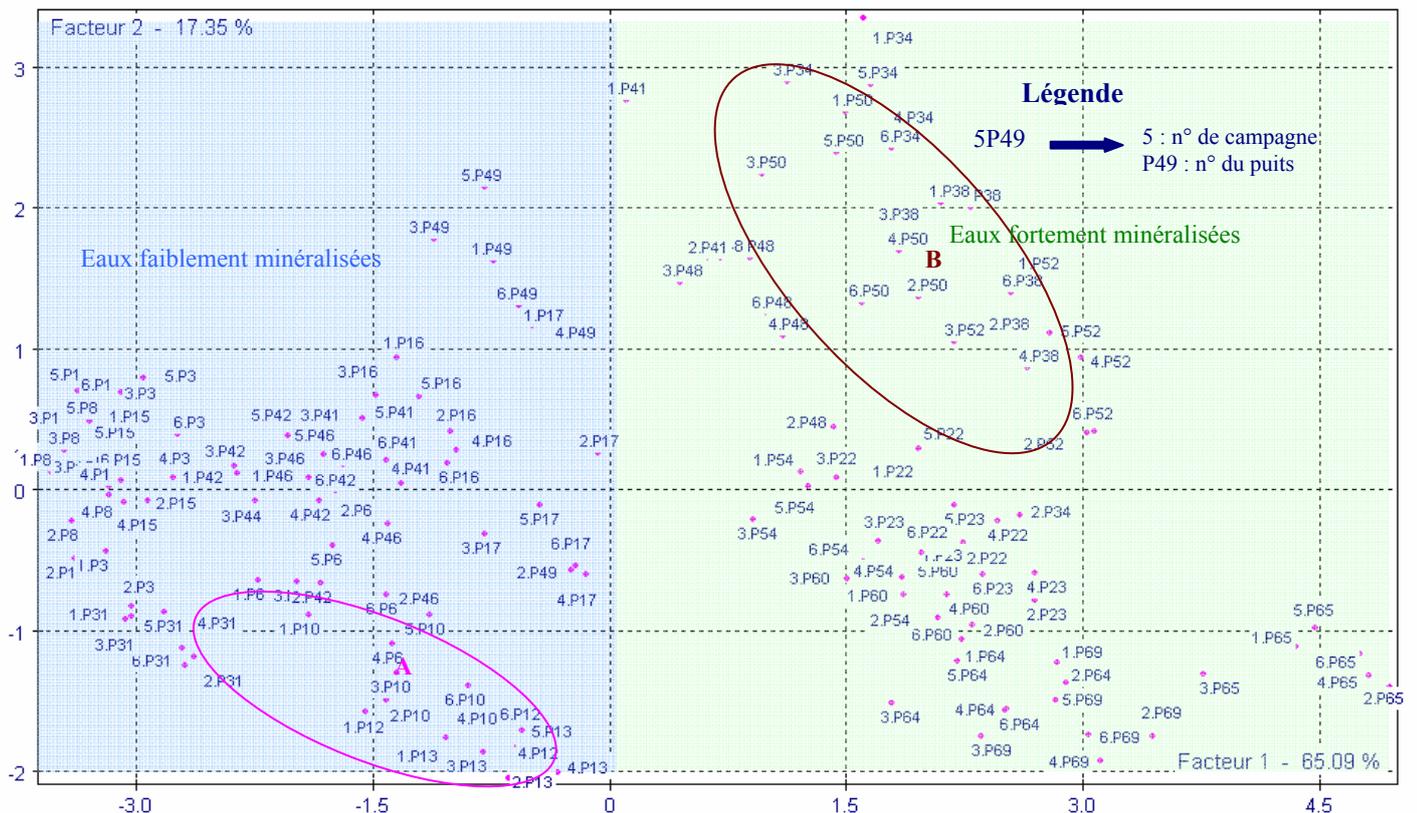


Figure. 71b: Espace des individus.

V.8 APTITUDE DES EAUX A L'IRRIGATION :

V.8.1 Introduction :

Dans les zones arides et semi-arides, l'approvisionnement en eau d'irrigation constitue l'un des facteurs déterminants dans la production agricole, aussi bien dans l'intensification des cultures, que dans l'extension des surfaces irriguées. Pour les régions tempérées, les eaux superficielles constituent la principale source d'eau d'irrigation ; alors que dans les zones semi-arides, où cette ressource est rare ou inexistante, on fait appel aux eaux souterraines. Le développement de l'agriculture dans ces zones rencontre actuellement, en dehors de la rareté des ressources hydriques, de nouveaux problèmes tels que le risque de salinisation des sols qui peut être apprécié par la conductivité électrique et celui de l'alcalinisation des sols. Cette dernière est due aux échanges ioniques (du sodium, du calcium et du magnésium) entre l'eau et le sol irrigué.

L'accumulation des sels hydrosolubles dans le sol d'enracinement influe négativement sur la croissance des plantes, on a recensé deux séries d'effets de la salinité (M. De FORGES, 1972) : les uns portent sur les végétaux, les autres sur le sol. En effet, ces sels causent des changements de la perméabilité et de l'aération du sol d'une part, et d'autre part ils provoquent des perturbations du métabolisme des plantes et du processus osmotiques de ces dernières.

Comme la région de Meskiana est à vocation agricole et les risques de salinisation des sols se font sentir, une étude d'aptitude des eaux à l'irrigation s'avère nécessaire car cette région se caractérise par une faible pluviométrie, une forte évaporation et une eau souterraine trop chargée en chlorures et en sulfates. Les risques qu'encourt cette plaine

imposent une bonne connaissance des régimes hydriques et salins afin de pouvoir assurer une durabilité d'utilisation des ressources en eau et des sols.

Dans la présente approche, on a fait l'estimation de quelques paramètres de salinité en rapport avec l'usage agricole pour les six campagnes saisonnières.

V.8.2 Caractérisation des eaux pour l'irrigation :

La salinisation peut entraîner, comme on l'a signalé précédemment, des effets nocifs sur la qualité des eaux pour l'irrigation, et ce en raison de la fixation du sodium et des chlorures par les colloïdes du sol. La présence du sodium exerce alors une action néfaste sur la végétation et le sol :

-Un accroissement de la pression osmotique qui rend l'eau plus difficilement mobilisable par les plantes;

-Une toxicité de certains ions pour les végétaux (Cl^- , Na^+ , etc.);

-Une dégradation du sol (modifications de l'état structural, diminution de la perméabilité, etc).

Lorsque la concentration des ions Na^+ à l'état soluble dans le sol est importante, ces ions remplacent le plus fréquemment les cations Ca^{+2} (échange de base) dans le complexe absorbant. Une eau chargée en sels peut provoquer cette action. Ce risque est déterminé à l'aide de la valeur du sodium absorbable (Sodium Absorption Ratio, SAR). Pour une même conductivité, le risque est d'autant plus grand que le coefficient est plus élevé. Le SAR est défini par la relation suivante:

$$\text{SAR} = \frac{(\text{Na}^+ + \text{K}^+)}{\sqrt{(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/2}} \quad (16)$$

Tous les ions sont exprimés en méq/l.

Les résultats des calculs sont représentés dans l'annexe IV.

V.8.2.1 Classification des eaux par la méthode de Richards :

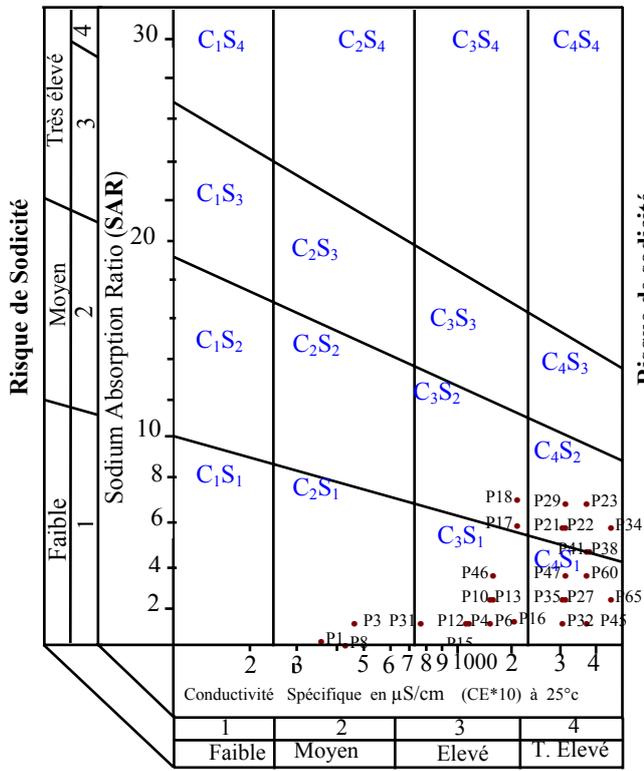
Cette classification a été proposée par Richards, chercheur à l'USDA de Riverside en Californie, en 1954, elle a été très utilisée et l'est encore de nos jours. Elle est très utile et fiable pour caractériser une eau d'irrigation. Cependant, elle ne peut pas servir pour estimer un risque de salinisation ou de sodisation.

En effet, cette classification ne peut prendre en compte l'évolution des caractéristiques de l'eau lorsque sa minéralité augmente dans les sols des zones arides ou semi- arides auxquels elle est destinée. Elle donne une vision sur l'état actuel de ces caractéristiques mais ne permet pas d'anticiper sur le devenir de cette eau.

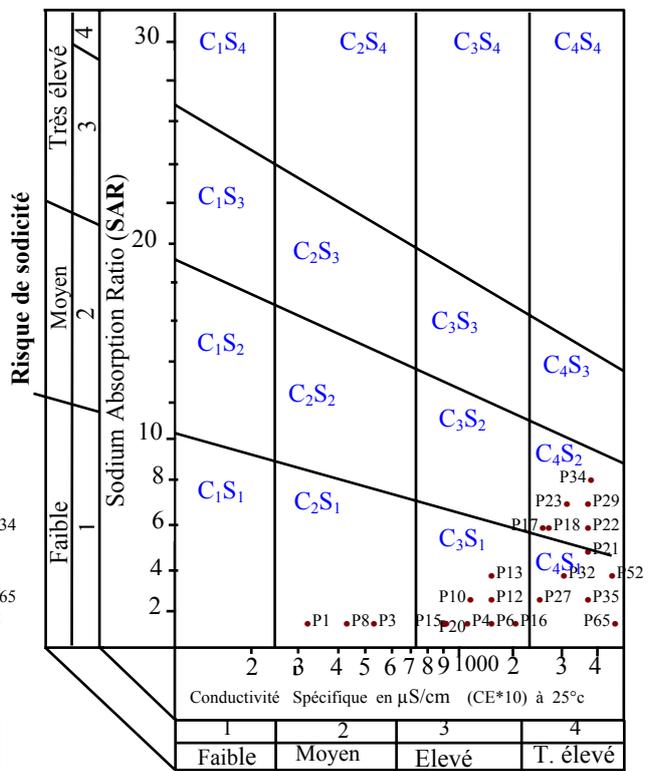
L'eau avec un SAR se situant entre 0 et 6 peut généralement être utilisée sur tout type de sol avec une faible accumulation de sodium. Quand le SAR se situe entre 6 et 9, les risques de problèmes liés avec la perméabilité du sol augmentent. Dans ce cas, le sol devrait être échantillonné tous les 1 ou 2 ans pour déterminer si l'eau augmente la teneur en sodium du sol (Couture, 2004).

Après avoir reporté tous les points d'eau des différentes campagnes sur le diagramme de Richards (voir fig.83a et fig. 83b), selon la conductivité électrique et la valeur de SAR, on a pu dégager la présence des cinq classes suivantes :

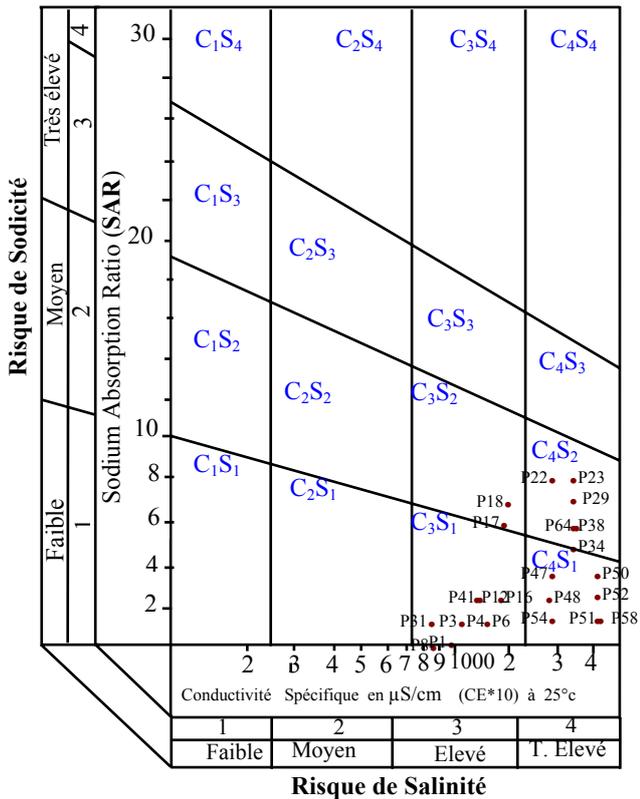
-La classe C2S1 : Elle caractérise une eau bonne pour l'irrigation et pouvant être utilisée sans contrôle particulier pour l'irrigation des plantes moyennement tolérantes aux sels. Cette classe représente les eaux de faible minéralisation que l'on rencontre en amont de la nappe à proximité des bordures. Cette classe n'a paru que dans les deux campagnes de l'année 2002 et avec un faible pourcentage (7.2 %) (tableau .20) ;



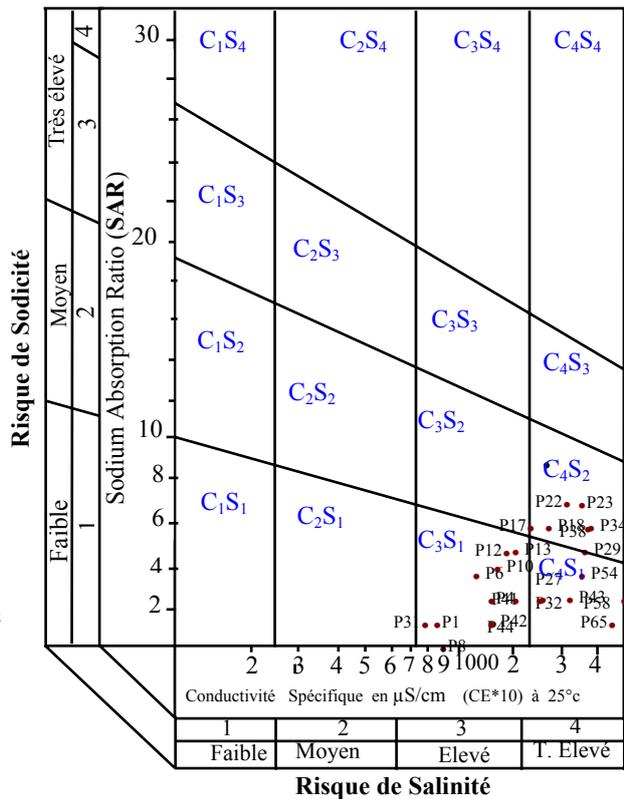
Mars 2002



Juillet 2002



Mars 2003



Juillet 2003

Figure 72a: Diagrammes de Richards pour les années 2002, 2003.

-Les classes C3S1, C3S2: Généralement, ces deux classes renferment des eaux admissibles pour l'irrigation des cultures tolérantes aux sels, sur des sols bien drainés ou de bonne perméabilité et la salinité doit être contrôlée. La classe C3S1 représente les puits qui se situent au Nord de la ville de Meskiana et ceux qui se trouvent dans la région de Dalâa. Elle représente 35.7 % des puits des six campagnes, alors que la classe C3S2 ne représente qu'un pourcentage de 6.5 % ;

-Les classes C4S1, C4S2: elles représentent les eaux médiocres fortement minéralisées, susceptibles de convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes aux sels et sur des sols bien drainés et lessivés. La majorité des puits appartenant à la classe C4S1 se situent entre Zebar et Meskiana et représentent 18.08% des points d'eau analysés. La classe C4S2 est d'une sodicité plus importante que celle de la classe précédente. On la rencontre dans la région de Zebar et au Nord-Est de la plaine de Meskiana, avec un pourcentage de 30.82 %.

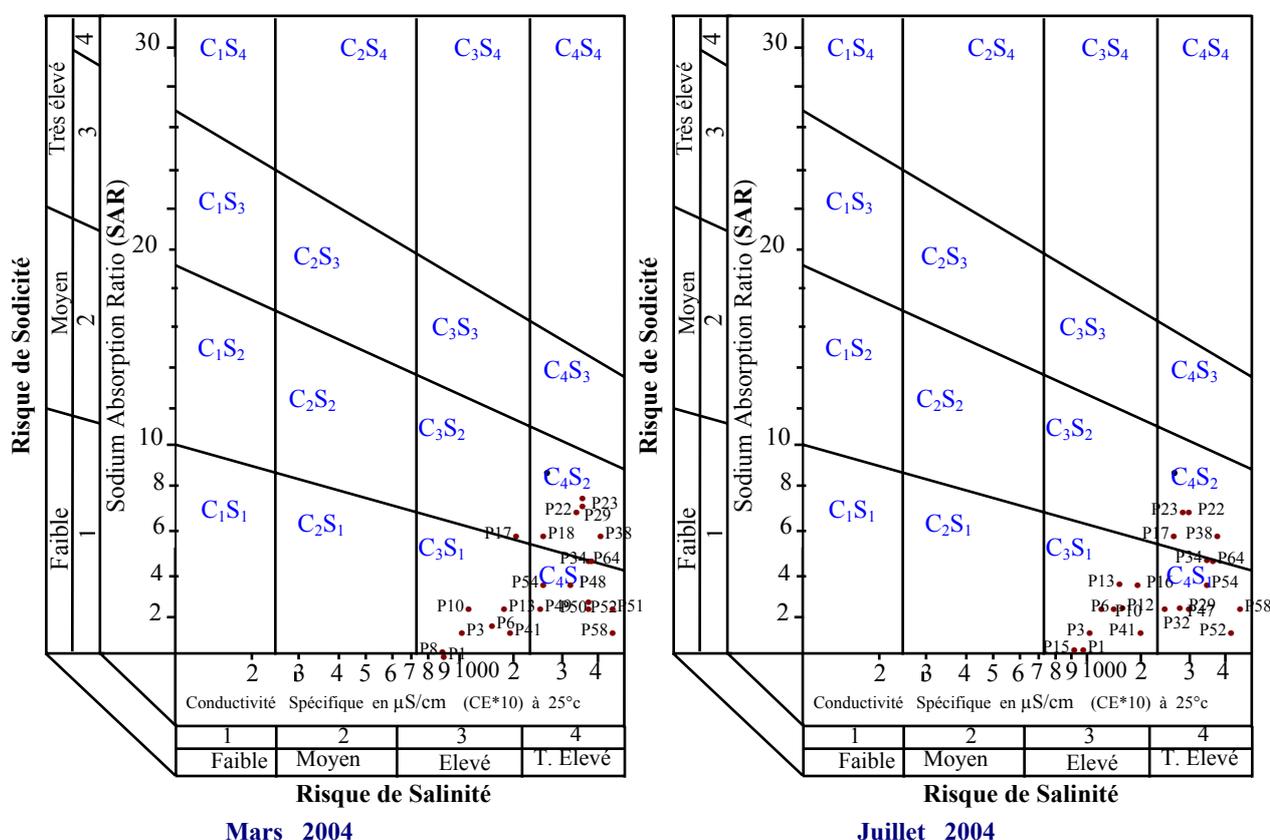


Figure 72b: Diagrammes de Richards pour l'année, 2004

Les eaux de la nappe alluviale de la plaine de Meskiana présentent, en général, les mêmes qualités pour l'irrigation au cours de toute la période d'observation (tableau 20). La dégradation observée traduit l'effet de la lithologie (présence de gypses et d'argiles) d'une part et l'effet de l'évaporation d'autre part (augmentation des concentrations).

Tableau .20: Evolution des classes d'irrigation selon la méthode de Richards.

| | Mars2002 | Juillet 2002 | Mars2003 | Juillet 2003 | Mars2004 | Juillet 2004 |
|------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|
| | 43 puits | 39 puits | 39 puits | 39 puits | 31 puits | 33 puits |
| C2S1 | 6.71 % | 7.69 % | 00 % | 00 % | 00 % | 00 % |
| C3S1 | 27.92 % | 28.20 % | 38.46 % | 38.46 % | 38.71% | 42.42 % |
| C3S2 | 4.65 % | 2.56% | 2.55 % | 00 % | 3.22 % | 00 % |
| C4S1 | 32.65 % | 17.94 % | 35.92 % | 30.76 % | 29.03 % | 27.27 % |
| C4S2 | 27.95 % | 43.59 % | 23.06 % | 30.76 % | 29.03 % | 30.30 % |

V.8.2.1.1 Cartographie d'aptitude des eaux à l'irrigation selon la classification de Richards.

Dans le but de mettre en relief l'effet de la lithologie sur l'aptitude des eaux à l'irrigation, nous avons cartographié la qualité des eaux à l'irrigation de la campagne du mois de juillet 2002, qui englobe le maximum de puits. La répartition de cette qualité a fait apparaître trois classes (figure 84) :

- Bonne (C2S1): Elle se localise dans la région de Dalâa à l'amont de la nappe et représente les eaux de faible minéralisation qui sont issues des formations carbonatées de bordures ;
- Admissible (C3S1-C3S2): Elle englobe, généralement les eaux moyennement minéralisées avec des risques de salinisation moyens et de faible alcalisation ;
- Médiocre (C4S1-C4S2) : Cette classe se caractérise par les eaux de forte minéralisation, présentant des risques de salinisation des sols importants, mais à alcalisation moyenne. On la rencontre au centre et au Nord de la plaine.

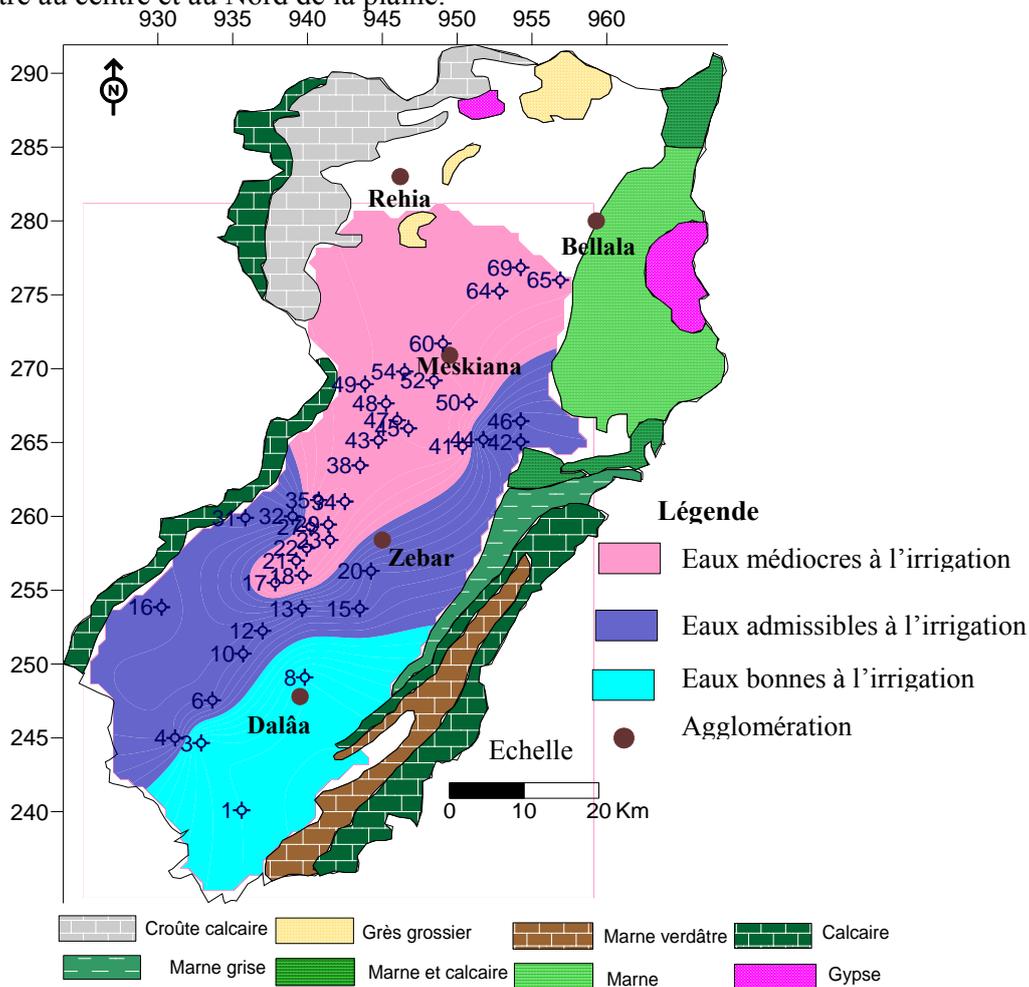


Figure 73 : Carte d'aptitude des eaux à l'irrigation selon la classification de Richards, pour la nappe de Meskiana pour la période de juillet. 2002.

V.8.2.2 Classification des eaux par la méthode de Wilcox :

Généralement, les plantes supportent mal les sols saturés en sodium. La classification de Wilcox fondée sur la conductivité électrique et la teneur en sodium dans l'eau exprimée en pourcentage. La représentation des différents échantillons sur ce diagramme permet la caractérisation des eaux pour leur aptitude à l'irrigation (figure 74a et 74b). Le %Na⁺ est définie par la relation :

$$\%Na^+ = \frac{(Na^+ + K^+)}{(Ca^{+2} + Mg^{+2} + Na^+ + K^+)} \times 100 \quad (17) \quad \text{Tous les ions sont exprimés en méq/l.}$$

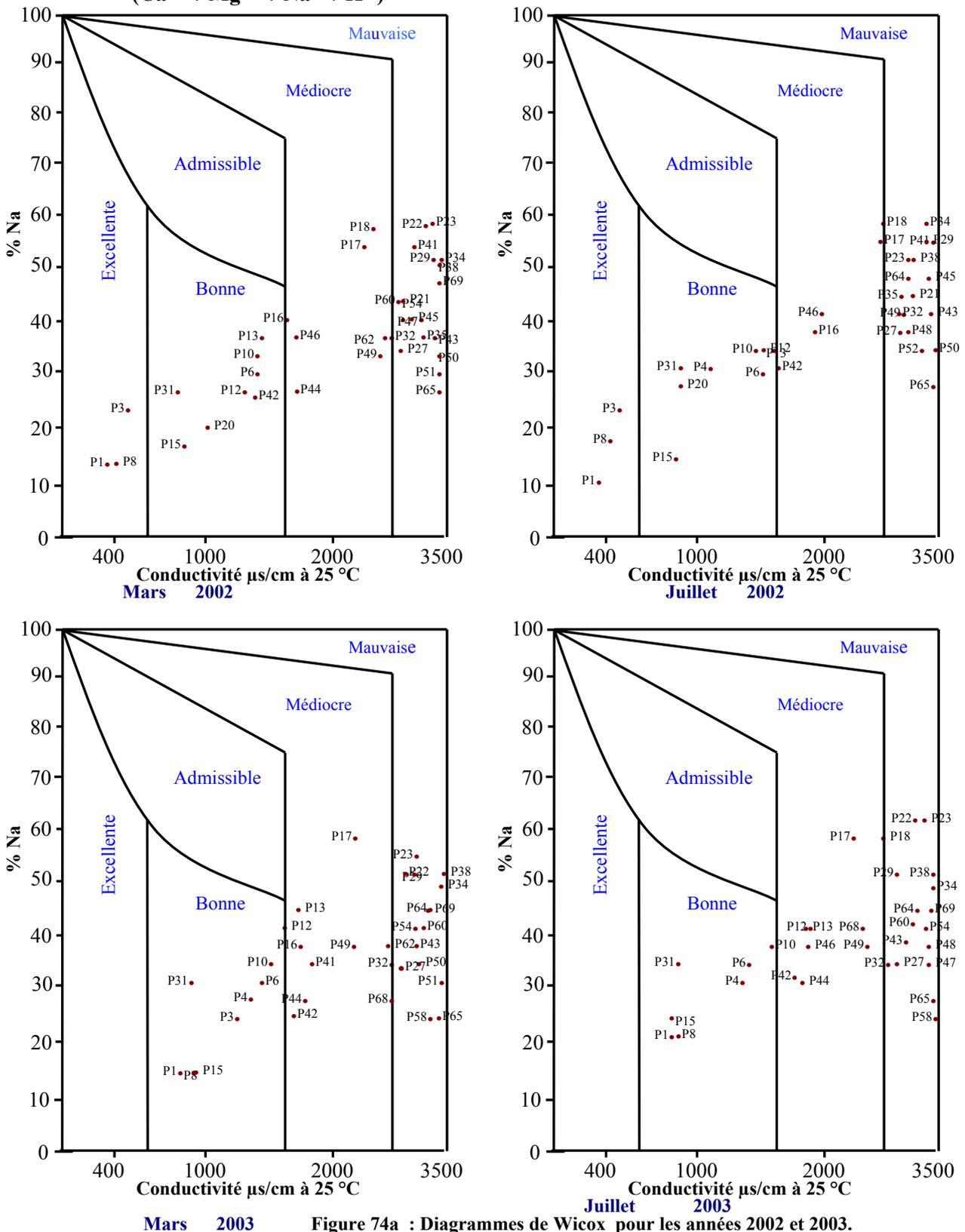


Figure 74a : Diagrammes de Wicox pour les années 2002 et 2003.

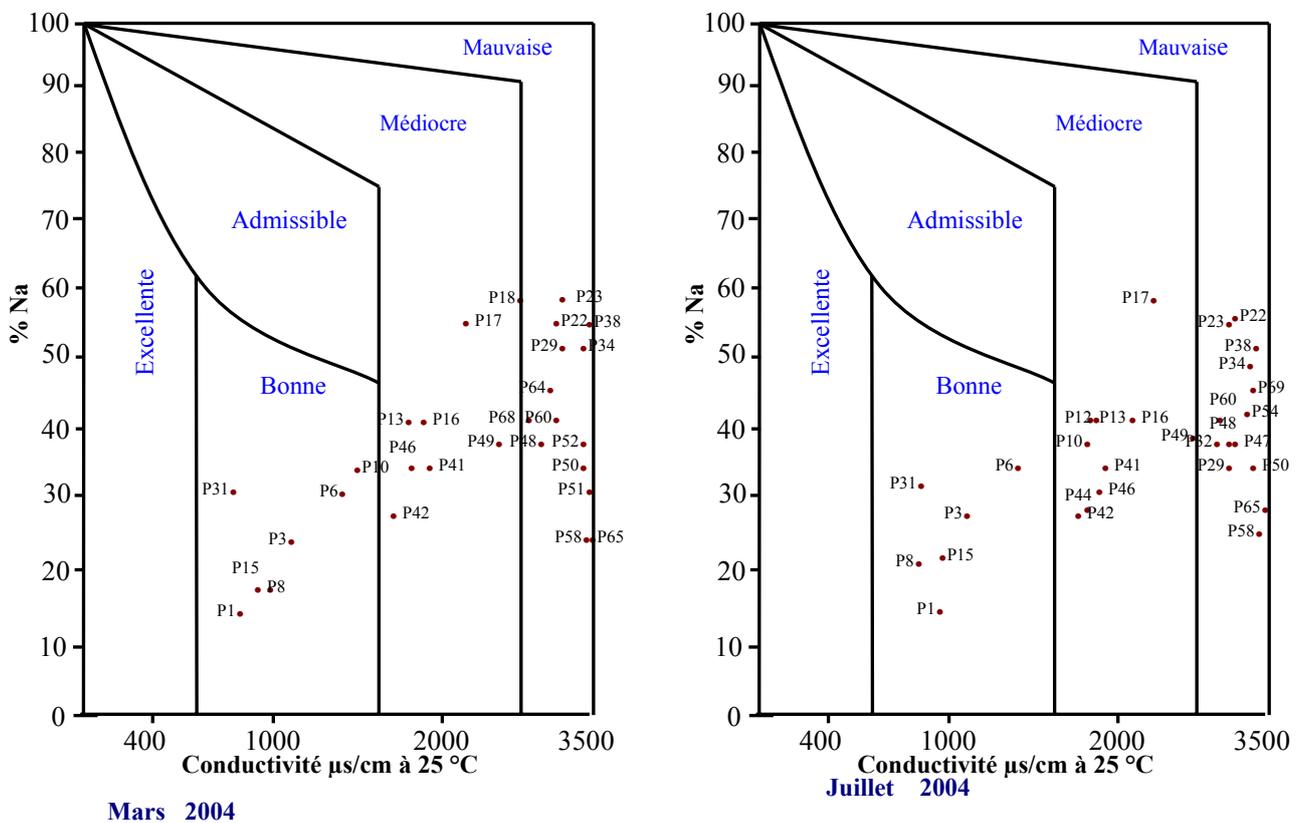


Figure 74b: Diagrammes de Wilcox pour l'année 2004.

Les diagrammes couvrant toute la période d'observation montrent que les eaux souterraines de la nappe de Meskiana, selon la classification de Wilcox, appartiennent aux quatre classes : Excellente, Bonne, Médiocre et Mauvaise (tableau 21).

Tableau 21: Evolution des classes d'irrigation selon la méthode de Wilcox.

| | Mars 2002 | Juillet 2002 | Mars 2003 | Juillet 2003 | Mars 2004 | Juillet 2004 |
|------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|
| | 43 puits | 39 puits | 39 puits | 39 puits | 31 puits | 33 puits |
| Excellente | 6.97 % | 7.69 % | 00 % | 00 % | 00 % | 00 % |
| Bonne | 20.93 % | 17.94 % | 20.51 % | 17.94 % | 22.58 % | 18.18 % |
| Médiocre | 16.27 % | 12.82 % | 25.64 % | 30.76 % | 22.58 % | 27.27 % |
| Mauvaise | 55.81 % | 61.35 % | 51.28 % | 51.28 % | 54.83 % | 54.54 % |

- La classe Excellente : Cette classe n'apparaît que dans la campagne de mars 2002, elle caractérise les eaux provenant des formations carbonatées de bordures, surtout dans la région de Dalaâ ;
 - La classe Bonne : Elle regroupe les eaux qui sont faiblement minéralisées, on la rencontre à proximité des bordures dans les régions de Dalaâ et Zebar ;
 - La classe Médiocre : Elle regroupe les eaux plus minéralisées que celles des classes précédentes, elle se manifeste au centre, au sud Ouest et au Nord-Est de la plaine.
 - La classe Mauvaise : Elle regroupe les eaux qui se situent au centre et au Nord de la plaine. Elle est la plus répandue dans la nappe (54.84 %).
- On constate que les eaux souterraines subissent une dégradation selon le sens de l'écoulement, montrant ainsi l'effet de la lithologie sur leur qualité (figure 75).

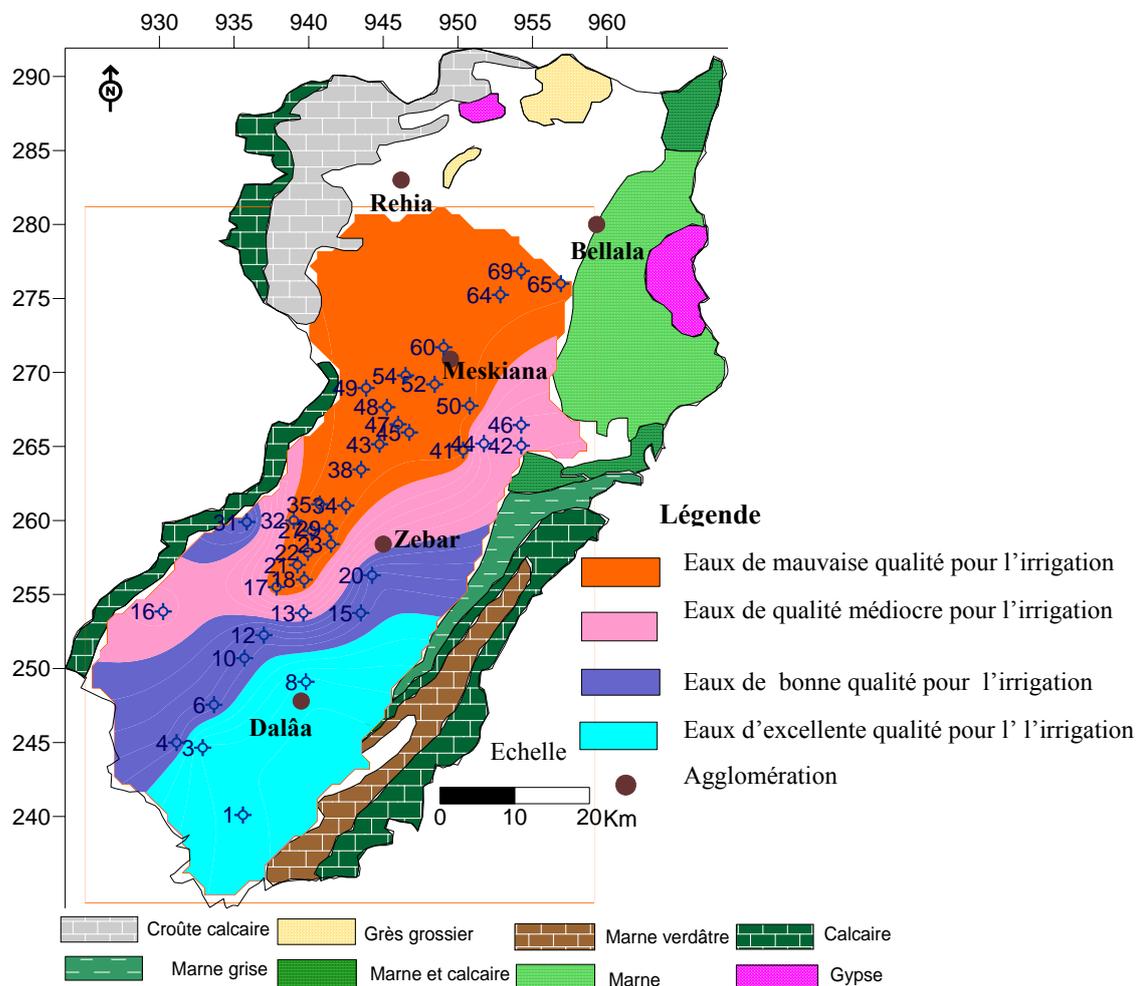


Figure 75 : Carte d'aptitude des eaux à l'irrigation selon la classification de Wilcox, pour la nappe de Meskiana pour la période de juillet, 2002.

Remarque : En examinant les deux cartes d'aptitude des eaux à l'irrigation établies à l'aide des deux méthodes de Richards et Wilcox, on remarque qu'elles présentent la même distribution de la qualité. En effet, la classe 'bonne', donnée par la première méthode, correspond à celles 'excellente' et 'bonne', donnée par la deuxième méthode. La classe 'admissible' définie par la méthode de Richards correspond aux classes 'bonne' et 'médiocre' définies par la méthode de Wilcox. La classe 'mauvaise' est déterminée par les deux classifications.

V.9 CONCLUSION:

L'étude hydrogéochimique des eaux de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire de Meskiana permet de dire que :

- Les eaux sont caractérisées par une forte salinité et par la présence de quatre faciès dominants, qui sont le chloruré calcique, le chloruré sodique, le sulfaté calcique et le bicarbonaté calcique ;
- La répartition spatiale des éléments chimiques montre que le chimisme est fortement lié à la lithologie de la nappe, suite à la dissolution des formations carbonatées et des formations évaporitiques ;
- Le suivi de la qualité des eaux dans le temps a montré l'effet des précipitations et de l'évaporation sur la minéralisation des eaux souterraines ;
- L'évolution des éléments chimiques (Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , HCO_3^-), qui caractérisent les formations géologiques principales du bassin, a montré la dominance des ions salifères (Na^+ , Cl^-) et des ions gypsifères (Ca^{2+} , SO_4^{2-}) par rapport à ceux carbonatés (Ca^{2+} , HCO_3^-) dans l'acquisition de la salinité. Ce bilan a également mis en évidence le phénomène d'échange de base entre les eaux de la nappe et les passages argileux, ce dernier a été révélé par l'augmentation des teneurs en Na^+ par rapport à Cl^- .

- Le calcul de l'indice de saturation des minéraux carbonatés et gypsifères a montré que les premiers ont tendance précipiter avant les seconds, ceci a permis aux éléments chimiques provenant de la dissolution des gypses d'acquérir des teneurs importantes.
- L'analyse en composante principale a confirmé le mode de minéralisation des eaux souterraines, car les puits qui se situent en amont de la nappe se trouvent faiblement minéralisés au contraire de ceux qui se positionnent en aval, qui sont trop minéralisés.
- La classification de Richards et celle de Wilcox ont prouvé la dégradation de la qualité des eaux pour l'irrigation.

Chapitre VI :

POLLUTION DES EAUX SOUTERRAINES

VI.1 INTRODUCTION :

Les activités humaines passées ou présentes, et en particulier les activités industrielles, mais aussi agricoles et domestiques, libèrent dans l'environnement des produits et des substances potentiellement dangereux, appelés contaminants ou polluants. Ces derniers sont rejetés vers les milieux naturels (eau et sol). Leur présence, notamment dans les eaux souterraines, pose un problème transdisciplinaire à l'interface des écosystèmes et des ressources hydriques.

La région de Meskiana a connu durant ces dernières années une certaine expansion économique et particulièrement agricole, après l'application du Programme National de Développement de l'Agriculture en (PNDA) en 2000 et celui du Fonds National pour la Régulation du Développement Agricole (FNRDA) en 2001. Ceci a, d'une part, augmenté la demande en eau et a d'autre part exposé les ressources en eau à différentes pollutions résultant de l'activité agricole. L'unité de l'Entreprise de Laines et de Textiles (ELATEX), implantée dans la ville de Meskiana, déverse ses eaux usées dans le milieu naturel sans traitement préalable. Ses effluents sont riches en métaux lourds, qui probablement ont atteint les eaux souterraines.

La présente étude vise donc à délimiter les zones contaminées et à déterminer l'origine de ces contaminants dans l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire, car le contrôle de cette contamination passe par une bonne connaissance des sources de contaminants et des conditions hydrodynamiques et lithologiques de la nappe, qui influent sur leur mobilité.

VI.2 LES PRINCIPALES SOURCES DE POLLUTION:

Durant nos sorties sur terrain, on a pu faire un inventaire des différentes sources de pollution (figure 76), qui se résument comme suit:

- L'élevage des animaux (ovins, bovins et volailles), qui produit environ 450.000 kg d'azote par an, cette estimation ayant été faite par les services agricoles de la Wilaya d'Oum El Bouaghi en 2003;
- Les cultures maraîchère et céréalière, qui utilisent d'importantes quantités de fertilisants sous forme de fumier, à raison de 280 Kg /ha par an, ou d'engrais azotés (100 à 300 Kg/ha);
- L'usine de l'ELATEX (actuellement en arrêt) ;
- Les rejets urbains, qui déversent des eaux usées domestiques dans la plaine, sans traitement préalable ;
- Les décharges ménagères sauvages.

Ce recensement nous a permis de choisir un réseau d'une quarantaine de puits pour le suivi de l'évolution de ce type de pollution. Le choix de ce réseau de surveillance s'est fait à l'aide de critères lithologiques et hydrodynamiques. Huit campagnes de prélèvements ont été menées à raison de deux par an.

Ces différentes campagnes ont permis le dosage de quelques polluants, mentionnés dans le tableau 22.

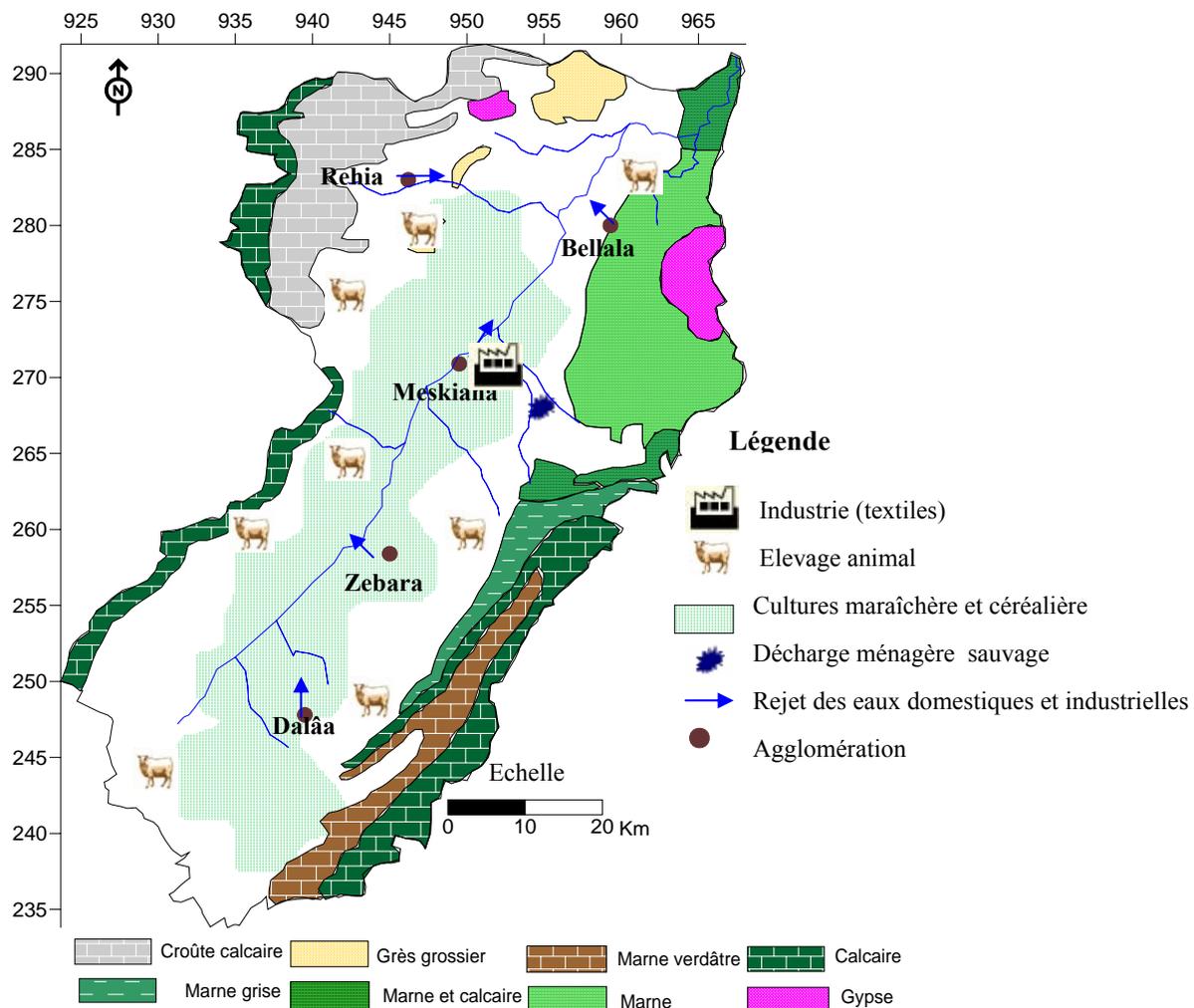


Figure 76: Inventaire des sources de pollutions, dans la plaine de Meskiana.

Tableau 22 : Résultats d'analyse des éléments polluants dans la plaine de Meskiana au cours des différentes campagnes.

| Polluants | Période | Max | Moy | Min |
|--------------------------------------|--------------------------------|-------------|------|-------|
| NO ₃ ⁻ (mg/l) | Toute la période d'observation | 125 | 59 | 20 |
| NO ₂ ⁻ (mg/l) | Juillet 2004 | 0.32 | 0.17 | 0.01 |
| NH ₄ ⁺ (mg/l) | Juillet 2004 | 0.41 | 0.20 | 0.012 |
| PO ₄ ³⁻ (mg/l) | Juillet 2004 Novembre 2005 | 0.45 | 0.34 | 0.25 |
| Sr ²⁺ (mg/l) | Juillet 2004 Décembre 2004 | 6.1 | 3.2 | 0.3 |
| Fe ⁺⁺ (mg/l) | Juillet 2004 Décembre 2004 | 1.22 | 0.48 | 0.08 |
| B (mg/l) | Juillet 2004 | 3.1 | 1.1 | 0.06 |

VI.3 IMPACT DE L'ACTIVITE AGRICOLE :

VI.3.1 Production des nutriments:

L'azote est l'élément nutritif le plus déficient dans les systèmes de production agricole. La croissance de la plupart des cultures exige l'apport d'azote, particulièrement les variétés modernes à haut rendement. Les sources d'azote pour ces cultures peuvent être :

- La matière organique du sol par la minéralisation ;
- Les amendements organiques comme le fumier et les autres déchets ;
- Les engrais azotés.

Ces derniers donnent naissance aux nitrates par les processus de nitrification qui correspondent à l'oxydation biologique de l'azote ammoniacal en azote nitrique NO_3^- (figure 77). Les étapes successives de la nitrification se font par l'intermédiaire de deux familles de bactéries principalement présentes dans les sols : *Nitrosomonas* pour la nitritation (transformation de NH_4^+ en NO_2^-) et *Nitrobacter* pour la nitratation (transformation de NO_2^- en NO_3^-).

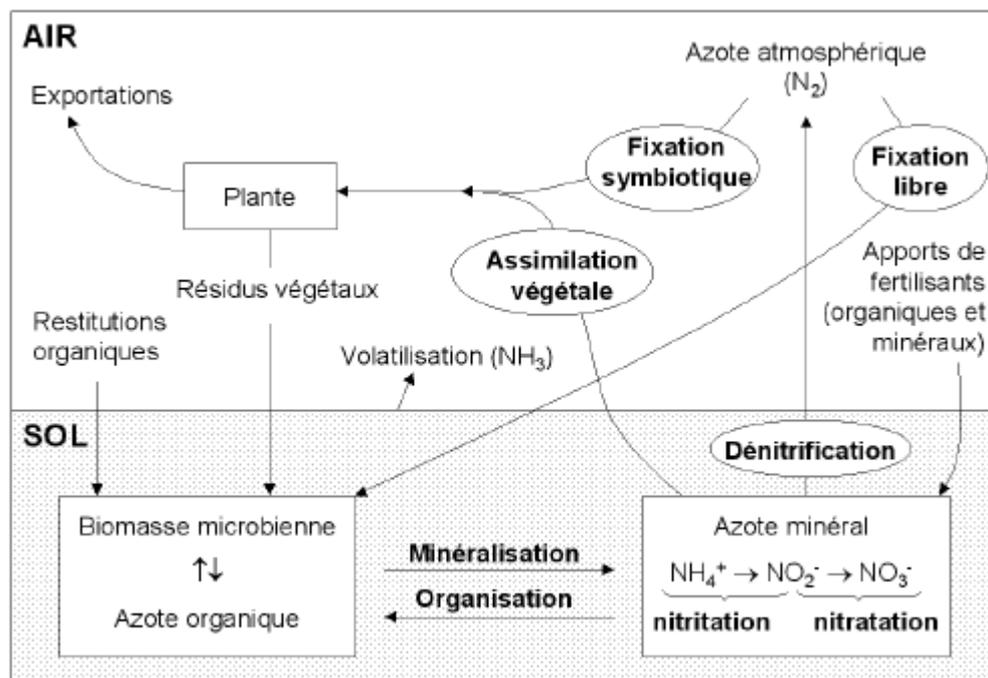


Figure 77 : Cycle de l'azote dans le sol, (Recous et al. 1997).

Dans la plaine de Meskiana, les teneurs en nitrates au niveau de la nappe mio-plio-quadernaire sont très élevées et dépassent les normes de l'OMS (tableau 22). On note que la teneur des nitrites est de l'ordre de 0.3 mg/l, dépassant ainsi les normes de l'OMS (0.1 mg/l) et l'ammonium atteint la teneur de 0.41 mg/l.

VI.3.1.1 L'élevage :

L'élevage des animaux (ovins, bovins et volailles) produit environ 450.000 kg N /an d'azote, d'après une estimation des services agricoles de la Wilaya d'Oum El Bouaghi en 2003 (tableau 23). La majorité de cette quantité est utilisée par les agriculteurs comme fertilisants.

Tableau 23: Estimation de l'apport annuel en azote à partir de l'élevage.

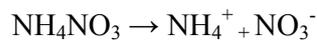
| Cheptel | Effectif | Coef Azote Kg/an | Azote produit Kg/an |
|----------------------------|----------|------------------|---------------------|
| Vaches laitières | 936 | 85 | 79560 |
| Bovins viandes | 1336 | 72 | 96192 |
| Brebis mères | 19228 | 10 | 192280 |
| Agneau | 10214 | 05 | 51070 |
| Poulets | 85835 | 0.24 | 20600.4 |
| Lapines mères | 3179 | 3.24 | 10300 |
| Total d'azote en kg par an | | | 450002.4 |

VI.3.1.2 Les engrais azotés :

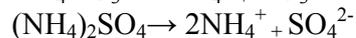
Les engrais azotés sont des produits minéraux apportés au sol pour fournir les quantités suffisantes d'azote et d'autres éléments nutritifs aux plantes et ce pour rentabiliser la récolte. Les doses d'engrais recommandées dépendent de la pluviosité, du type de culture et de la nature de sol. Selon notre enquête sur le terrain avec les agriculteurs et la Direction des Services Agricoles de la Wilaya d'Oum El Bouaghi (DSA), ces doses varient de 100 à 300 Kg/ha.

Apportés au sol, et en présence des eaux d'irrigation, les principaux engrais azotés subissent les réactions suivantes pour donner des nutriments :

-Ammonitrate (teneur en azote est 33.5 %) :



-Sulfate d'ammoniaque (teneur en azote est 21 %) :

**VI.3.1.3 Le fumier :**

Compte tenu du manque de bases de données se rapportant à la fertilisation par l'utilisation des engrais organiques, on s'est adressé aux agriculteurs pratiquant les différentes cultures (maraîchères et céréalières) pour estimer la quantité de fumier utilisée. Cette dernière est de l'ordre de 280 Kg/ha.

VI.3.2 Etude de l'évolution de teneurs des nitrates :**VI.3.2.1 Répartition spatiale générale :**

La répartition des teneurs en nitrates dans la plaine de Meskiana est liée aux facteurs polluants signalés précédemment, et en particulier à l'activité agricole et à la nature lithologique de la couche superficielle. La cartographie des concentrations (figure 78) montre que la zone de grande perméabilité ($0,77 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$), qui se trouve à proximité de la ville de Meskiana, est beaucoup plus exposée à la pollution, car les ions nitrates s'infiltrent rapidement et on y enregistre des teneurs dépassant 120 mg/l. Au contraire, celle de faible perméabilité se situe à côté de Dalâa, où les teneurs enregistrées sont faibles et ne dépassent pas 20 mg/l, car le toit argileux fixe les ions nitrates et ainsi protège la nappe. Les faibles teneurs en nitrates dans cette zone peuvent s'expliquer par le mélange des eaux récentes issues des formations carbonatées avec celles de la nappe d'âge Mio-Plio-Quaternaire. Durant la période d'observation, 52 % des puits ont présenté une teneur dépassant les normes de l'OMS (tableau 24).

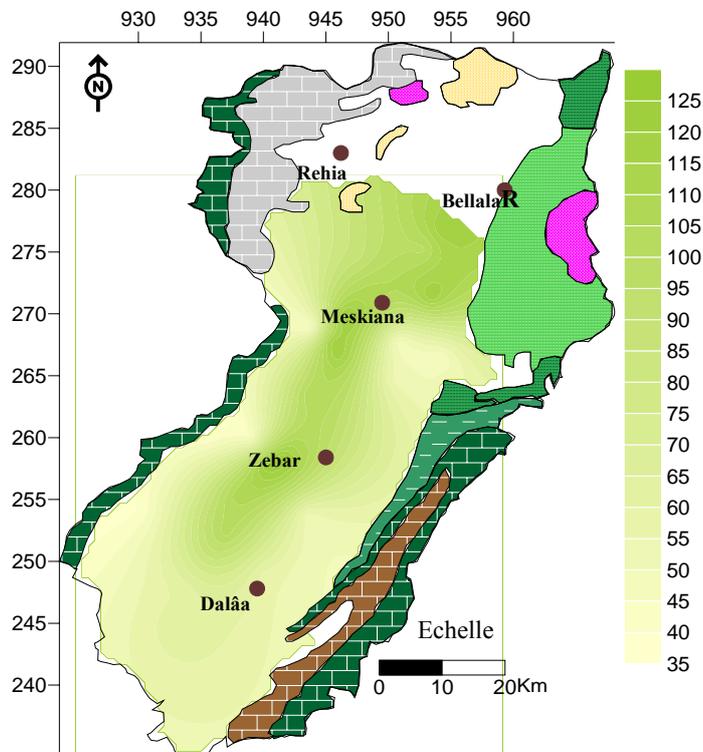


Figure 78: Carte des nitrates (mg/l) dans la nappe de Meskiana pour la période de novembre 2005.

Tableau 24 : Evolution du nombre de puits dont la teneur en nitrates dépasse les normes de potabilité de l'OMS.

| Campagne | Nombre d'échantillons | % des puits dépassant la norme |
|-----------------|-----------------------|--------------------------------|
| Mars 2002 | 43 | 22 |
| Juillet 2002 | 39 | 54 |
| Mars 2003 | 39 | 56 |
| Juillet 2003 | 39 | 59 |
| Mars 2004 | 31 | 55 |
| Juillet 2004 | 33 | 58 |
| Décembre 2004 | 32 | 65 |
| Novembre 2005 | 30 | 75 |
| Total des puits | 286 | |
| Moyenne | 52 | |

VI.3.2.2 Evolution des nitrates dans le temps :

L'interprétation de la figure 79 montre que les ions nitrates évoluent de la même manière pendant toute la période d'observation. Cependant, on peut dire que lors des campagnes de hautes eaux, les teneurs enregistrées sont plus faibles que lors des campagnes de basses eaux. On signale que la campagne du mois de novembre 2005 a connu l'enregistrement de teneurs maximales, car elle coïncide avec le début de la saison agricole

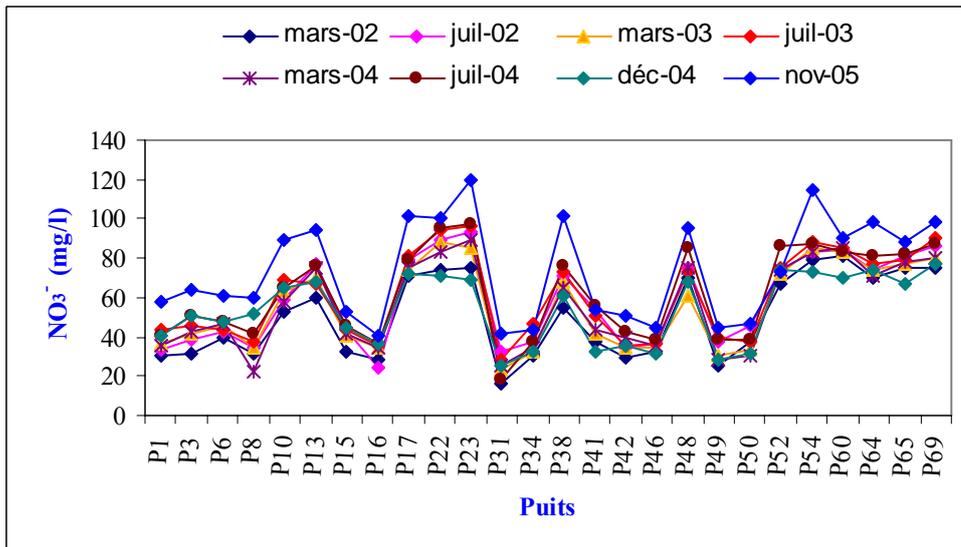


Figure 79 : Evolution des nitrates en fonction du temps dans la nappe de Meskiana.

-Remarque :

Pendant toute la période d'observation, on a remarqué que la même répartition des concentrations se répète, avec de faibles variations d'une campagne à autre, ce qui s'explique par le fait que les agriculteurs ont les mêmes pratiques et parce que les conditions naturelles (la lithologie et les caractéristiques du climat) sont relativement constantes.

Les fortes teneurs enregistrées dans la zone de drainage de la nappe, pendant la période des hautes eaux (au Nord de la ville de Meskiana), sont probablement dues à l'effet de chasse de cette nappe.

VI.3.3 Origine des nitrates:

Afin de révéler l'effet des activités agricoles sur la présence des nitrates, nous avons effectué des analyses sur des échantillons prélevés à partir des sols cultivés (prélèvement à proximité des puits) pendant la campagne du mois de novembre 2005.

La comparaison des concentrations de l'azote du sol avec celles des nitrates contenus dans l'eau de la nappe Mio- Plio-Quaternaire montre une bonne corrélation (figure 80), néanmoins on signale la présence de quelques points où la concentration en nitrates est très élevée par rapport à celle de l'azote, ceci étant probablement dû à une autre origine autre que les fertilisants. Les rejets des eaux domestiques sont certainement à l'origine de cette augmentation.

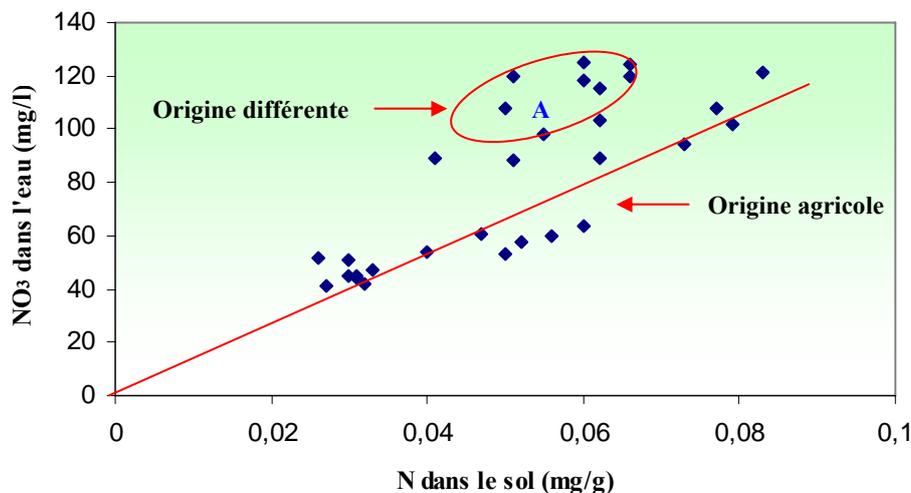


Figure 80: Corrélation de la concentration des nitrates avec l'azote du sol.

VI.3.4 Evolution des nitrates en fonction des paramètres physico-chimiques :

VI.3.4.1 Relation nitrate-nitrite :

Les ions nitrates évoluent d'une manière inverse par rapport aux nitrites (figure 81) car ces deux ions présentent deux formes opposées de l'azote : L'une oxydée (nitrates) et l'autre réduite (nitrites).

VI.3.4.2 Relation nitrate-ammonium :

L'ammonium évolue d'une manière inverse par rapport aux nitrates pour les mêmes raisons qu'on a évoqué pour la relation nitrate-nitrite, car les deux premiers constituent la forme réduite de l'azote alors que les nitrates présentent celle oxydée (voir fig.82). Il est à signaler qu'il est difficile de connaître l'origine de l'ammonium quand les rejets des eaux usées domestiques ammoniacaux se déversent dans des zones agricoles, car ces derniers s'oxydent en donnant des nitrates qui se réduisent en ammonium et nitrite.

VI.3.4.3 Relation nitrate-Oxygène dissous:

Les teneurs des nitrates évoluent dans le même sens que celles de l'oxygène dissous. Pour les faibles profondeurs où l'oxygène est abondant, on enregistre des teneurs importantes pour les deux ions, parce que l'azote garde sa forme oxydée. Au contraire, pour les profondeurs importantes, on enregistre des concentrations faibles pour les nitrates et l'oxygène. Par manque de ce dernier, l'azote prend une forme réduite.

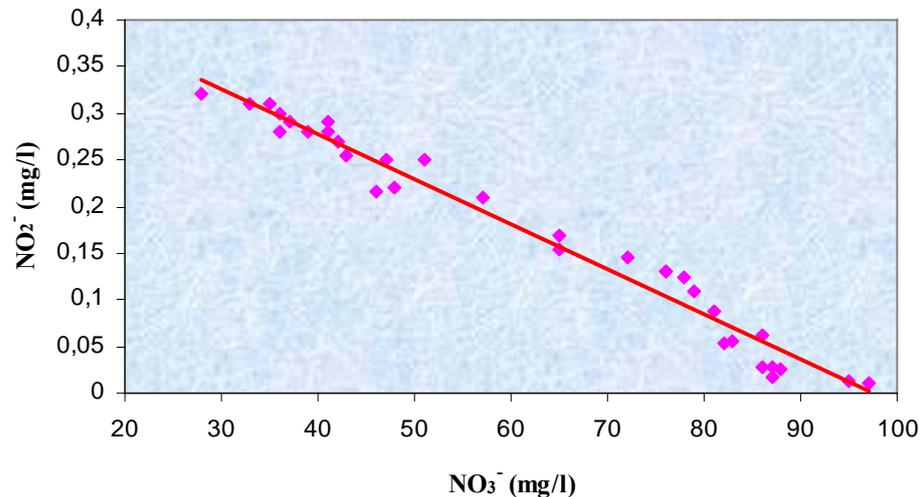


Figure 81: Evolution des nitrates en fonction des nitrites, pendant le mois de juillet 2004.

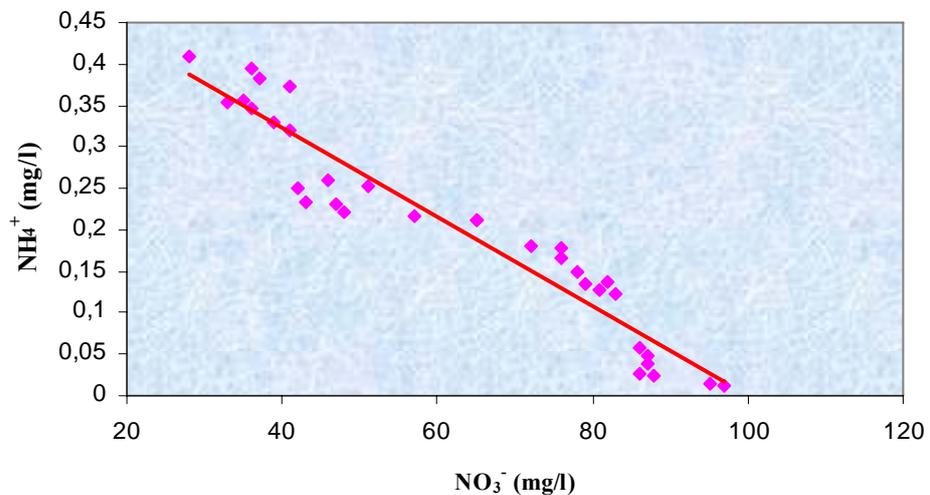


Figure 82: Evolution des nitrates en fonction de l'ammonium, pendant le mois de juillet 2004.

Quelques points sont observés avec des teneurs considérables en oxygène accompagnées de faibles teneurs en nitrates (figure 83), on pense qu'il s'agit de puits qui se trouvent en dehors des zones agricoles.

VI.3.4.4 Relation nitrate-profondeur :

La teneur des nitrates évolue d'une manière inverse avec la profondeur du niveau statique des puits. Ainsi, la teneur de l'oxygène dissous diminue avec la profondeur, ce qui entraîne la réduction des nitrates en nitrite et en ammonium (figure 84).

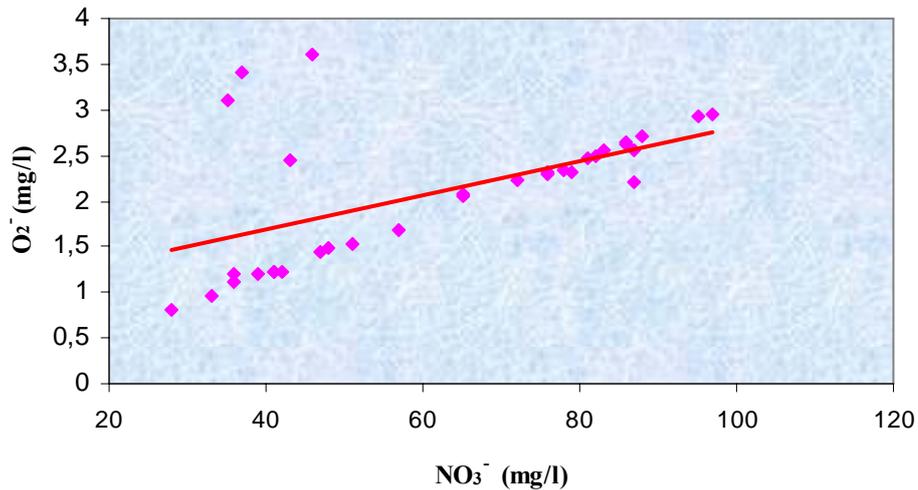


Figure 83: Evolution des nitrates en fonction de l'oxygène dissous pendant le mois de juillet 2004.

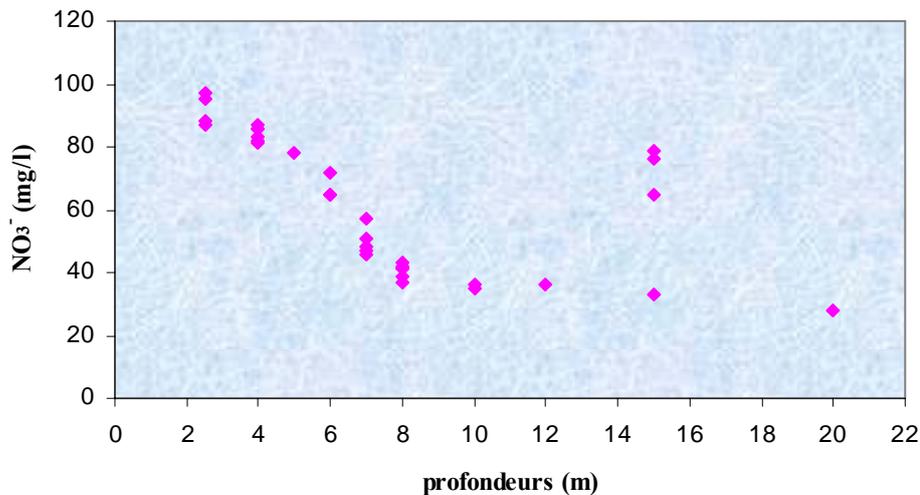


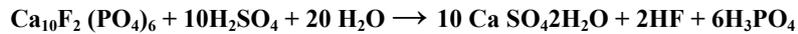
Figure 84: Evolution des nitrates en fonction de la profondeur du niveau statique pour le mois de juillet 2004.

- VI.3.5 Les phosphates :

Le phosphore est nécessaire à la croissance des plantes. Il est présent dans le sol sous la forme de phosphates : soit dissous dans l'eau, soit fixé sur les particules du sol, soit dans les minéraux ou encore sous forme organique. Au fur et à mesure que les racines prélèvent les phosphates dissous dans l'eau, les molécules fixées sont progressivement libérées.

Les agriculteurs utilisent les engrais phosphatés d'une manière aléatoire avec une dose qui varie de 15 à 25 Kg/ha, sans respecter les recommandations de l'Institut National de la

Vulgarisation Agricole (INVA) et de l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC) qui fixent cette dose à 46 kg/ha. Les engrais utilisés sont fabriqués à partir des roches phosphatées. Le phosphore présent dans ces roches n'est pas assimilable directement par les plantes, surtout dans les sols basiques. La production industrielle de ce dernier se fait selon le processus suivant :



Roche phosphatée Acide sulfurique Eau Gypse Fluorure d'hydrogène Acide phosphorique

L'acide phosphorique constitue la base de fabrication de tous les types d'engrais phosphatés.

En ce qui nous concerne, nous avons procédé à deux campagnes d'analyses de cet élément (décembre 2004 et novembre 2005).

L'évolution des phosphates est semblable à celle des nitrates (figure 85). En effet, l'examen des cartes des phosphatés a montré une certaine ressemblance avec celle des nitrates, ce qui laisse penser que leur origine est anthropique résultant ainsi de l'activité agricole et non pas d'une origine naturelle (figures 86a et b).

Les teneurs en phosphates enregistrées varient de 0.25 mg/l à 0.5 mg/l, elles sont inférieures à la norme de potabilité.

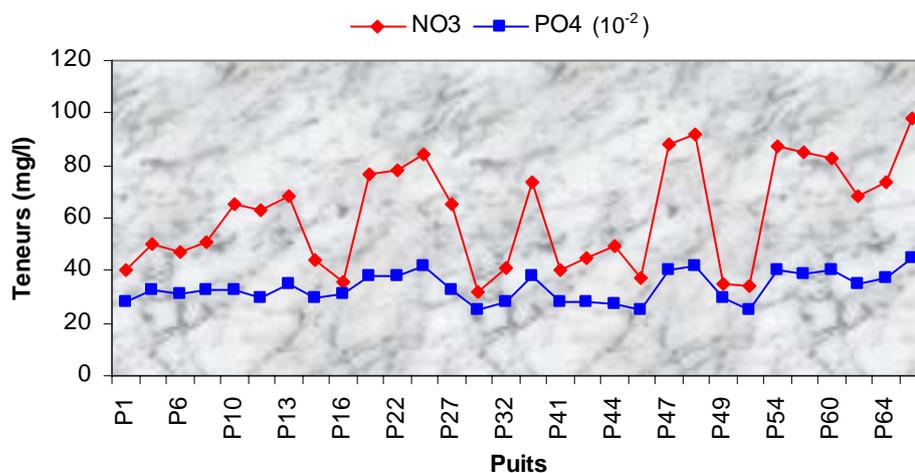


Figure 85: Corrélation de la teneur des nitrates avec celle des phosphates pour la période de décembre 2004.

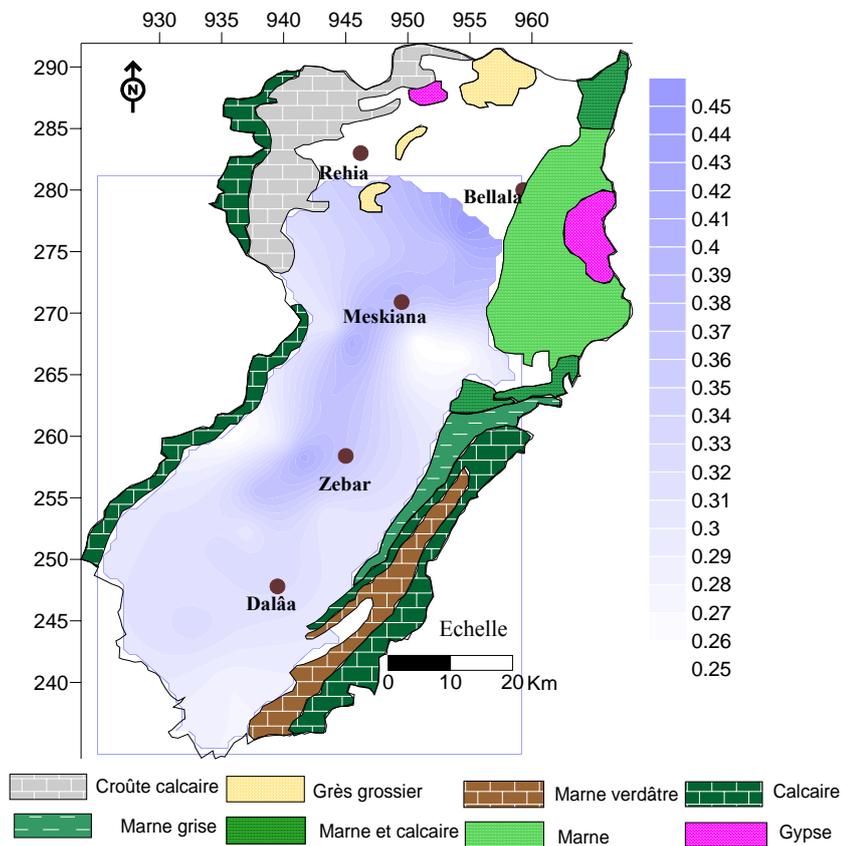


Figure 86a: Carte des phosphates (mg/l), de la nappe de Meskiana pour la période de décembre 2004.

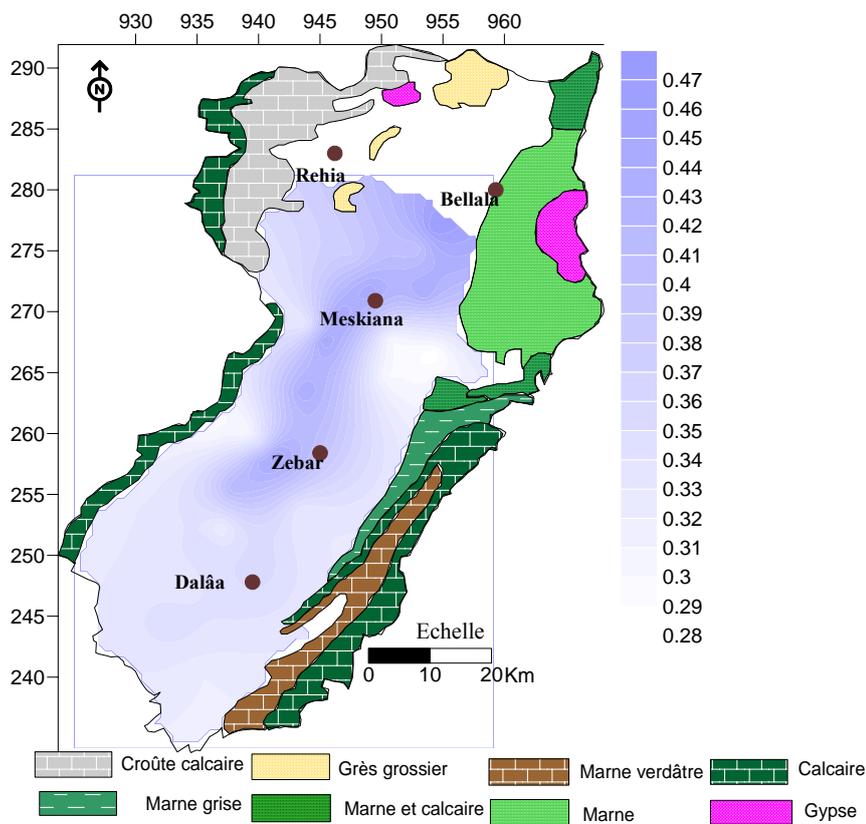


Figure 86b: Carte des phosphates (mg/l), de la nappe de Meskiana pour la période de novembre 2005.

VI.4 L'INFLUENCE DES REJETS URBAINS :

VI.4.1 Apport des nitrates

L'Oued Meskiana constitue le principal cours d'eau drainant les eaux de pluie et les eaux usées domestiques, et tous les rejets urbains y déversent une charge polluante considérable. Ce collecteur naturel possède des échanges hydrauliques permanents avec la nappe, ce qui permet la migration des contaminants vers cette dernière.

Suite aux analyses effectuées sur les eaux usées des différents rejets d'agglomérations, et après la détermination des débits journaliers de ces rejets (valeurs estimées par la Subdivision de l'Hydraulique de Meskiana), on a pu estimer l'apport annuel de nitrates qui se déverse dans la plaine (tableau 25). Après examen des conditions topographiques et les écoulements de surface, on a jugé que le rejet de Rehia n'influe pas sur la nappe phréatique.

Tableau 25 : Estimation de l'apport annuel en nitrates provenant des eaux usées domestiques.

| | [C] moy de NO ₃ (Kg/m ³) | Débit (m ³ /j) | V annuel (m ³) | Apport annuel de NO ₃ ⁻ (Kg) |
|-----------------|--|------------------------------|-------------------------------|---|
| Meskiana | 0,14. 10 ⁻³ | 2140 | 781100 | 109,354 |
| Dalâa | 0,125. 10 ⁻³ | 792 | 289080 | 36,135 |
| Belalla | 0,12. 10 ⁻³ | 86,4 | 31536 | 3,78432 |
| Zebar | 0,127. 10 ⁻³ | 54,6 | 67160 | 8,52932 |
| Total | | | | 157,80264 |

Les rejets urbains, qui se déversent dans la plaine sans subir de traitement préalable, sont chargés de matières organiques et produisent des nitrates. Par le processus d'organisation, cette transformation se fait selon les processus décrits par NICOLARDOT.B et al (2000). Figure 87.

En effet, après l'élaboration de l'évolution des éléments majeurs, on a remarqué une certaine corrélation entre les nitrates et les chlorures (voir la matrice de corrélation au chapitre précédent), où le coefficient de corrélation est de l'ordre de 0.62 pour une population de 160 puits (ACP globale). En d'autre terme, les chlorures peuvent avoir plusieurs origines naturelles et anthropiques (écart type 265.94: mg/l, tableau 15). On pense qu'une partie des chlorures tire son origine des eaux usées domestiques qui constituent, en même temps une source de nitrates d'origine organique.

L'évolution des nitrates et des chlorures, à travers les différentes campagnes, montre cette dépendance. Dans le but de confirmer cette dernière, on a fait une comparaison entre l'évolution des chlorures et celle des nitrates.

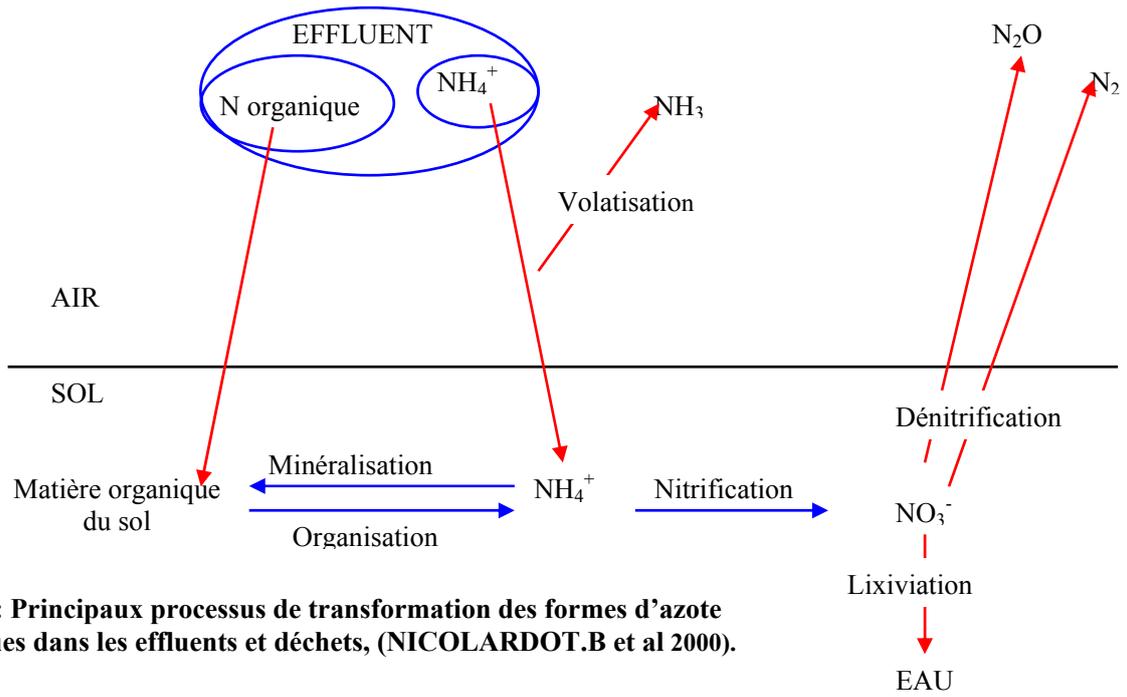


Figure 87: Principaux processus de transformation des formes d'azote contenues dans les effluents et déchets, (NICOLARDOT.B et al 2000).

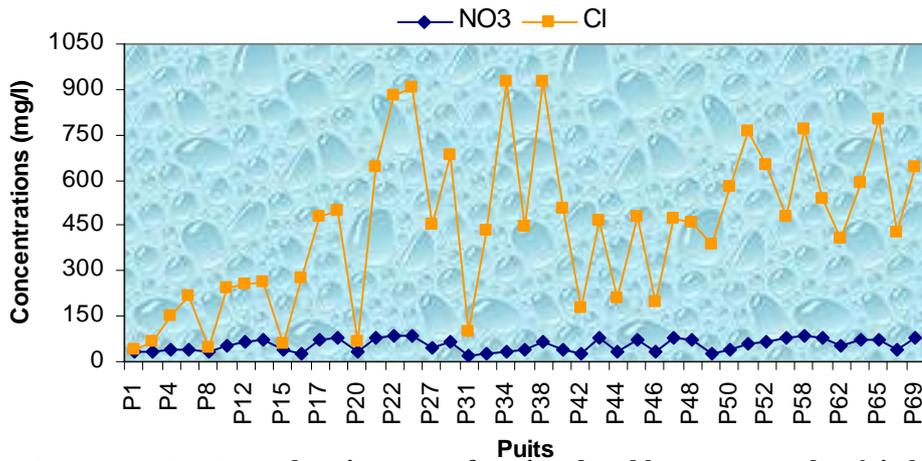


Figure 88a: Evolution des nitrates en fonction des chlorures, pour la période de mars 2002.

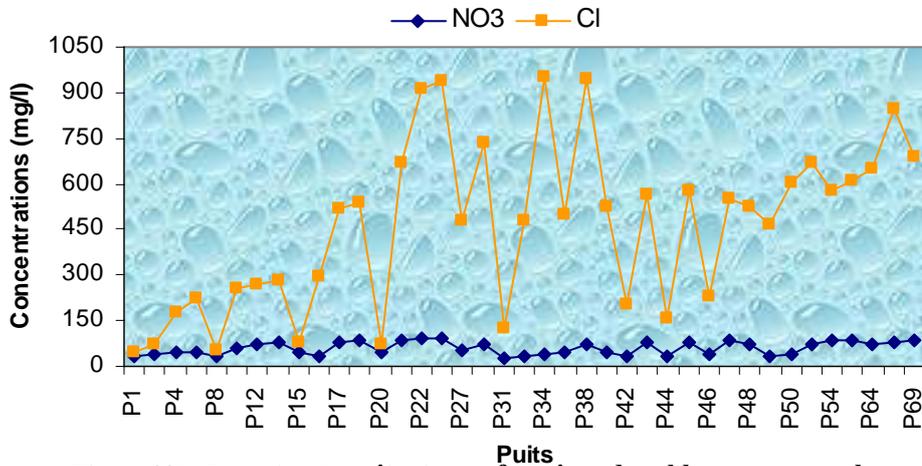


Figure 88b: Evolution des nitrates en fonction des chlorures, pour la période de juillet 2002.

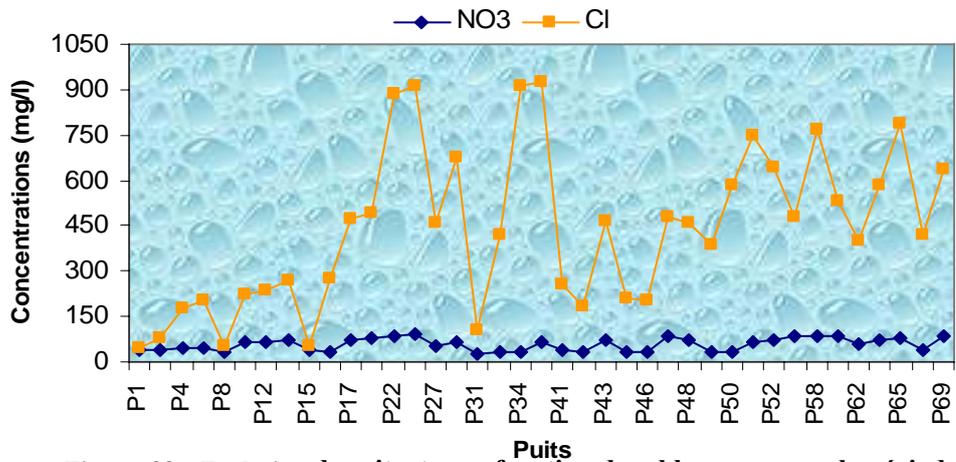


Figure 88c: Evolution des nitrates en fonction des chlorures, pour la période de mars 2003.

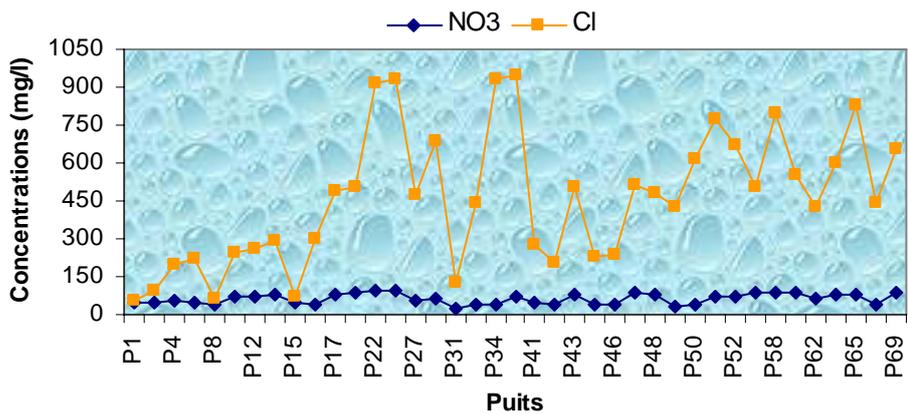


Figure 88d: Evolution des nitrates en fonction des chlorures, pour la période de juillet 2003.

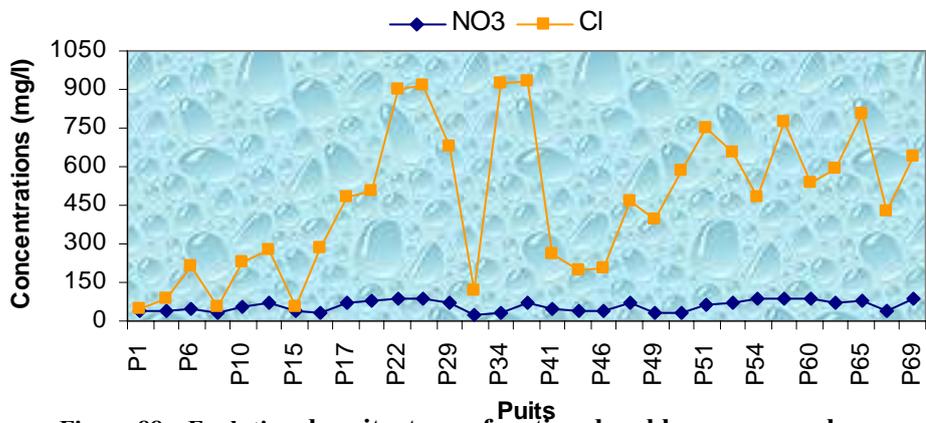


Figure 88e: Evolution des nitrates en fonction des chlorures, pour la période de mars 2004.

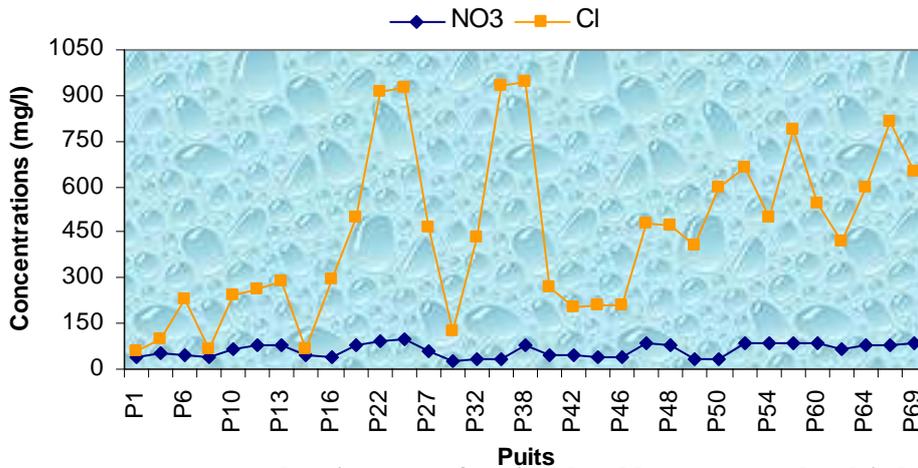


Figure 88f: Evolution des nitrates en fonction des chlorures, pour la période de juillet 2004.

VI.4.2 Le bore :

Il est présent à l'état de trace dans les eaux souterraines, son origine naturelle est très rare et son existence ne peut qu'être anthropique. Il provient essentiellement des rejets industriels, urbains ou domestiques, par sa présence en forte concentration dans les détergents sous forme de perborates (20 % de la composition des lessives en poudre); il est parfois utilisé comme traceur de pollution dans les études d'assainissement.

L'observation de la cartographie du bore dans la nappe Mio-Plio-Quaternaire de Meskiana (figure 89), permet de dire que cet élément constitue un indicateur de la pollution urbaine, car les fortes concentrations sont liées aux points de rejets des eaux usées domestiques. Les teneurs maximales enregistrées sont de l'ordre de 3.5 mg/l et se localisent en aval des agglomérations dans l'axe de la nappe.

Le bore est un élément indispensable à la croissance des plantes et est directement appliqué au sol comme engrais. Il est fortement mobile dans ce milieu et facilement entraîné par lessivage. L'industrie des engrais, par le complexe ASMIDAL, n'utilise pas cet élément comme additif dans les engrais, c'est pourquoi on a attribué sa présence à la pollution urbaine et non pas à l'activité agricole. Il est à signaler que la dissolution des sédiments triasiques peut donner aussi naissance au bore.

VI.5 LES METAUX LOURDS :

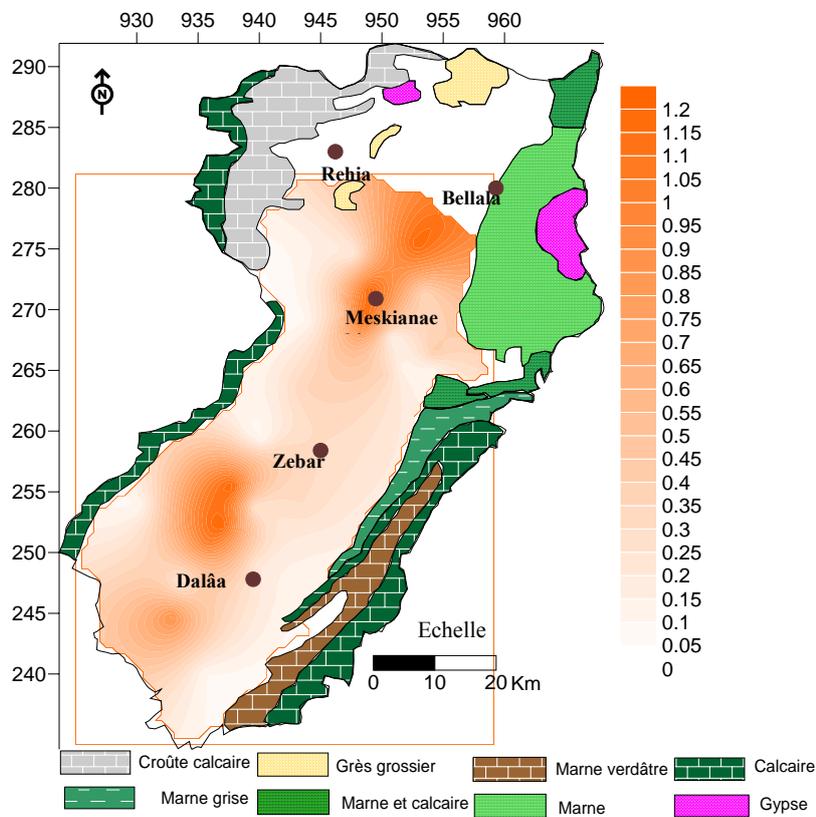
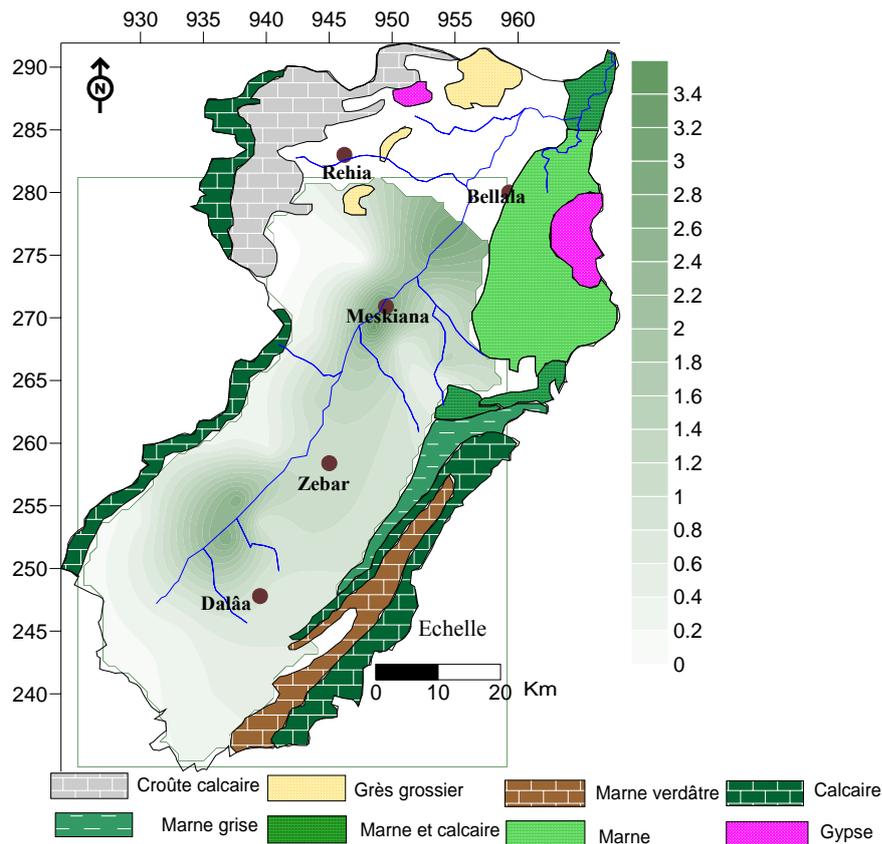
Lors des deux campagnes de décembre 2004 et novembre 2005, on a effectué l'analyse de quelques métaux lourds tels que le fer, le plomb, le zinc, le manganèse le cuivre, le cadmium et le soufre. La concentration de ces éléments est insignifiante à l'exception de celle du fer qui présente de fortes teneurs.

VI.5.1 Le fer :

Le fer est le quatrième élément abondant dans l'écorce terrestre et le premier parmi les métaux lourds. On le trouve surtout sous forme Fe^{++} ou Fe^{+++} . Le fer dissous dans les eaux souterraines est sous forme réduite (Fe^{++}), qui est soluble. Ce dernier est oxydé en Fe^{+++} par le contact avec l'oxygène de l'air, c'est pourquoi la concentration de fer dans les eaux bien aérées est rarement élevée. Le Fe^{+++} précipite sous forme d'hydroxydes insolubles dans l'eau et sont précipités ou adsorbés par les sédiments.

Dans la nappe de Meskiana, lors des deux campagnes du mois de juillet 2004 et du mois de décembre 2004, les concentrations de fer varient de 0.1 à 1.2 mg/l (figure 90a et b).

Quelques puits, qui se situent au Nord de la ville de Meskiana, atteignent des teneurs qui dépassent le niveau recommandé par l'OMS (0.3 mg/l). Sa présence est probablement due aux rejets de l'usine d'ELATEX et/ou au lixiviat de la décharge ménagère de la ville de Meskiana. On pense que sa présence pourrait être due également au matériel de remplissage alluvionnaire.



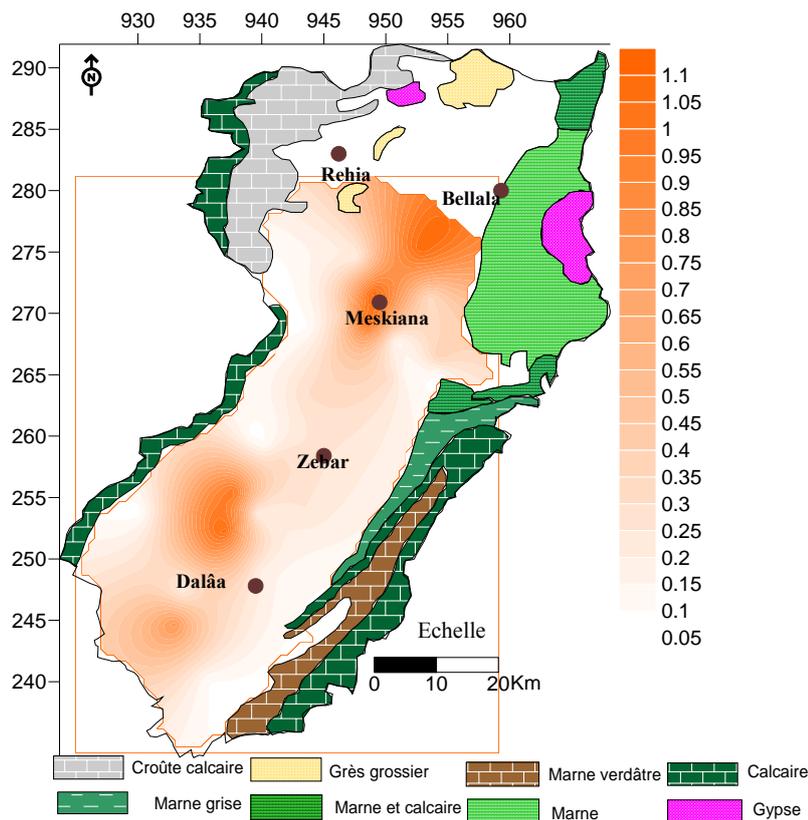


Figure 90b: Carte de Fer (mg/l), de la nappe de Meskiana pour la période de décembre 2004.

VI.5.2 Le strontium :

Le strontium est un métal alcalino-terreux, et il est présent naturellement dans l'environnement (les roches, le sol, l'eau). Les composés du strontium peuvent se déplacer dans l'environnement assez facilement car beaucoup d'entre eux sont solubles. Généralement, on le trouve dans les minéraux de strontianite (SrCO_3) et de célestite (SrSO_4). Cette dernière accompagne les formations évaporitiques, car c'est un minéral qui est souvent associé au gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), (Carre, 1975, cité par Hsissou 1996). Il peut également s'intégrer en faible quantité dans le réseau des carbonates et est peu adsorbé par les argiles.

Le strontium peut s'intégrer dans la structure cristalline des minéraux carbonatés, car ces deux éléments possèdent des rayons ioniques voisins.

Les concentrations excessives en strontium peuvent être provoquées par des procédés industriels.

VI.5.2.1 Répartition du strontium :

L'analyse de la carte de cet élément durant les deux campagnes du mois de juillet 2004 et de décembre 2004, a révélé une répartition selon deux zones distinctes : la première au Sud avec des teneurs n'excédant pas les 2 mg/l et la deuxième au Nord de la plaine avec des teneurs pouvant dépasser les 6 mg/l.

En tenant compte de lithologie de la région, on remarque que les fortes teneurs en strontium coïncident avec l'affleurement des formations évaporitiques, ce qui laisse supposer que cet élément peut avoir comme origine les formations salifères par dissolution de la célestite (SrSO_4). Figure 91a et b.

D'autre part, on remarque que la conductivité électrique de l'eau est bien corrélée avec le Sr^{2+} ($r = 0.77$ pour 33 couples de valeur). Figure 92.

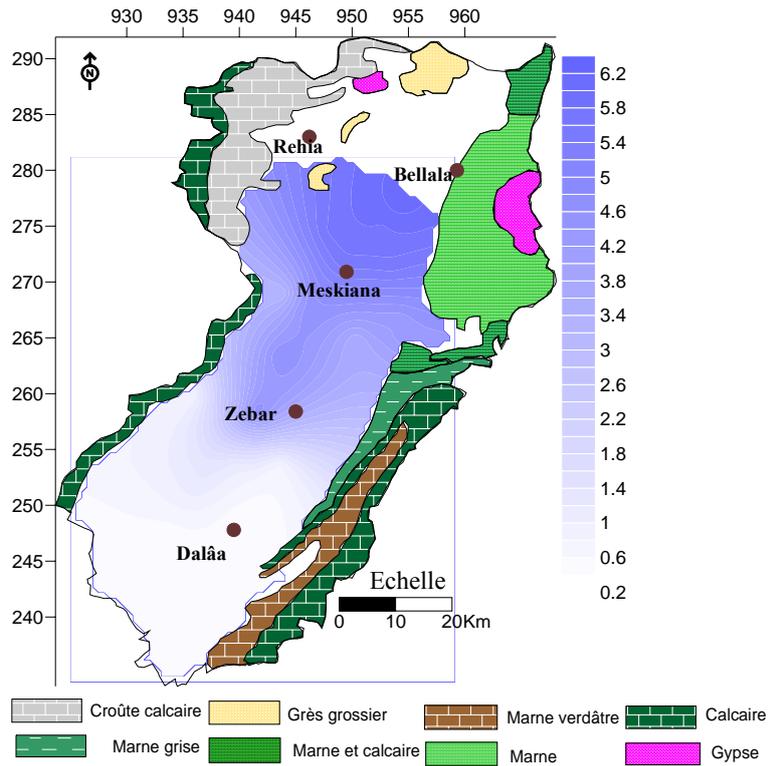


Figure 91a :Variation du strontium (mg/l) dans la nappe de Meskiana pour la période de juillet 2004.

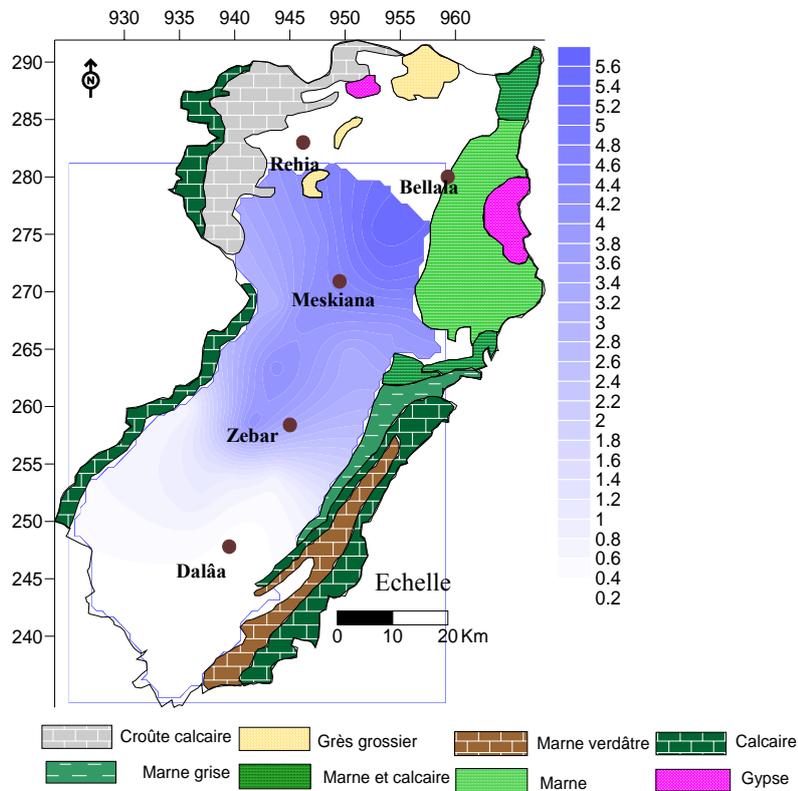


Figure 91b :Variation du strontium (mg/l) dans la nappe de Meskiana pour la période de décembre 2004.

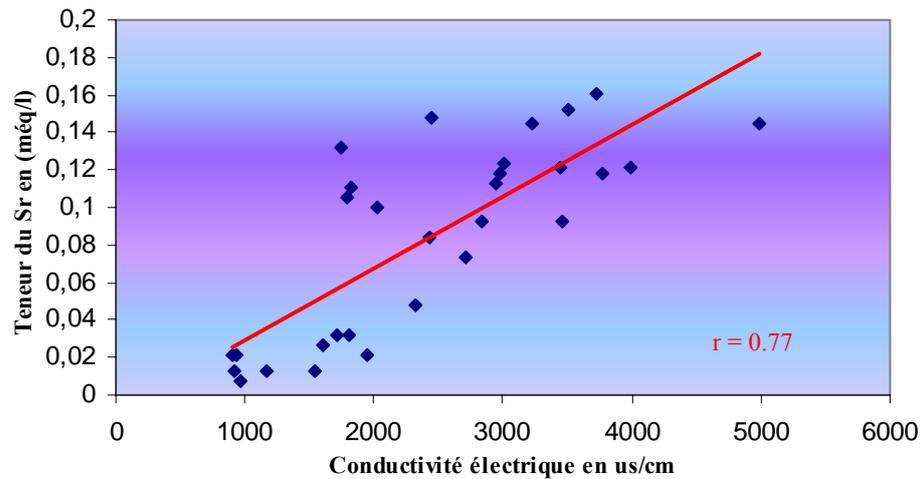


Figure 92: Relation de la teneur du Sr avec la conductivité électrique pendant le mois de juillet 2004.

VI.5.2.2 Le rapport caractéristique Sr^{2+}/Ca^{2+} :

Pour Meybeck (1984, cité par Hsissou Youssef 1996), les rapports des concentrations molaires Sr^{2+}/Ca^{2+} supérieurs à 1‰ sont caractéristiques des eaux gypsifères. De plus, comme chaque ensemble évaporitique possède sa propre valeur du rapport Sr^{2+}/Ca^{2+} , les teneurs en Sr^{2+} et en Ca^{2+} des eaux ayant dissous les formations d'une région devraient permettre d'identifier les circulations souterraines et de distinguer leurs origines.

Le calcul du rapport Sr^{2+}/Ca^{2+} , pour la campagne de juillet 2004, a révélé que la majorité des points d'eau possèdent des valeurs supérieures à 1‰ (figure 93), ce qui traduit l'influence des formations gypsifères sur la présence du strontium. Cette affirmation est en pleine conformité avec les types de faciès rencontrés, où les puits dont le faciès est carbonaté se répartissent en amont de la nappe et en faible pourcentage, alors que les puits ayant un faciès chloruré ou sulfaté occupent la majorité de la nappe, surtout au Nord de cette dernière.

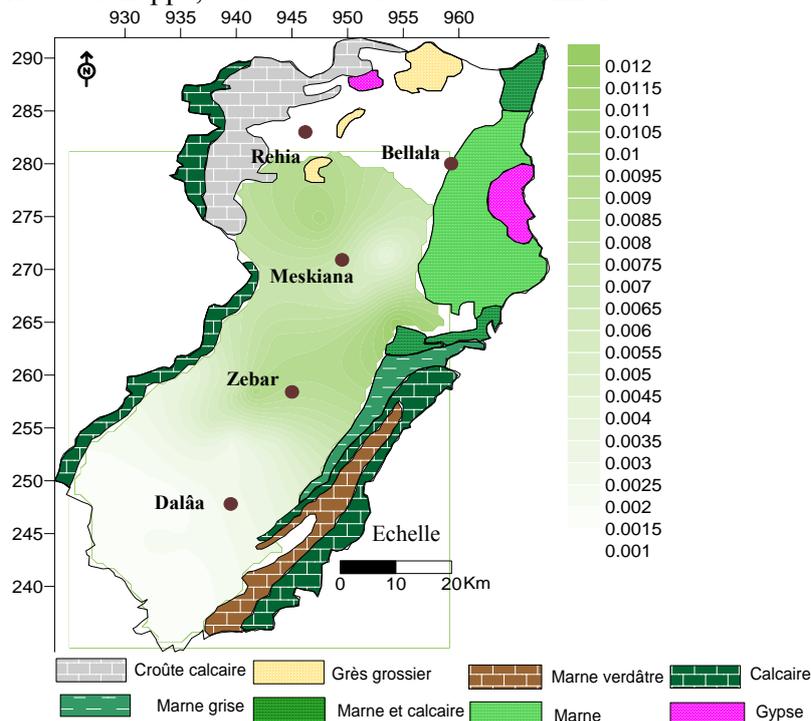


Figure 93 : Carte de variation du rapport Sr^{2+}/Ca^{2+} dans la nappe de Meskiana pour la période de juillet 2004.

VI.6 ETUDE D'APPROCHE DE LA VULNERABILITE DE LA NAPPE DE MESKIANA :

VI.6.1 INTRODUCTION

Après avoir achevé la partie précédente, qui a montré l'état de contamination de la nappe de Meskiana, il s'est avéré intéressant de cartographier les zones vulnérables à la pollution. Cette cartographie pourrait aider les gestionnaires du secteur de l'hydraulique pour mieux gérer cette ressource hydrique en la protégeant contre la pollution et également les aider à implanter les ouvrages de captage en dehors des zones contaminées.

L'objectif visé par l'établissement de la cartographie de la vulnérabilité est de faire apparaître les possibilités de pénétration et de circulation des polluants dans la nappe. On peut aussi évaluer la sensibilité des ouvrages de captage au risque de pollution et par conséquent le limiter

VI.6.2 Vulnérabilité à la pollution chimique des eaux souterraines :

La vulnérabilité d'une nappe d'eau souterraine à la pollution chimique matérialise la facilité avec laquelle elle peut être atteinte par une pollution chronique ou accidentelle, diffuse ou ponctuelle. L'estimation de cette vulnérabilité tient compte de certains facteurs qui sont :

- Les conditions de pénétration des polluants dans la nappe, c'est-à-dire le transit, selon un trajet vertical de corps polluants, entraînés par les eaux d'infiltration depuis la surface du sol jusqu'à une nappe souterraine, à travers la zone non saturée (couche vadose)
- La propagation des polluants dans la nappe, qui est matérialisée par l'écoulement de l'eau polluée. Elle dépend des conditions hydrodynamiques de la nappe.
- Le séjour du polluant dans la nappe, c'est-à-dire sa persistance plus ou moins prolongée, après l'élimination de la source de contamination. La durée de ce séjour est régie par le renouvellement naturel de l'eau dans la nappe aquifère.

Les méthodes d'estimation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution sont très nombreuses. Chacun élabore sa propre méthode selon ses objectifs. Dans notre approche, on va utiliser la méthode DRASTIC, qui s'adapte avec les caractéristiques de notre terrain.

VI.6.3 Présentation de la méthode DRASTIC

La méthode DRASTIC a été mise au point par l'Environmental Protection Agency (EPA) aux Etats-Unis en 1985 et Aller et al. en 1987, afin d'estimer le potentiel de pollution et d'évaluer la vulnérabilité verticale des eaux souterraines (Schneblen et al. 2002). Elle se base sur sept critères qui sont :

[D] : depth to groundwater (Distance à la nappe, épaisseur de la zone non saturée)

[R] : recharge de l'aquifère

[A] : aquifer media (nature de la zone saturée)

[S] : soil media (nature du sol)

[T] : topography (topographie, pente en %)

[I] : impact of the vadose zone (nature de la zone non saturée)

[C] : conductivity (perméabilité de l'aquifère).

Chaque critère est cartographié avec un index, appelé aussi note (n), allant typiquement de 1 à 10. Un facteur de pondération (p) est ensuite appliqué aux différents critères afin de relativiser leur importance respective en terme de vulnérabilité. L'index de vulnérabilité final (Di) est la somme pondérée des sept paramètres selon la formule suivante :

$$D_i = D_n \cdot d_p + R_n \cdot r_p + A_n \cdot a_p + S_n \cdot s_p + T_n \cdot t_p + I_n \cdot i_p + C_n \cdot c_p \quad \text{où } (18)$$

D, R, A, S, T, I, C sont les paramètres cités plus haut.

p : facteur de pondération accordé à chaque paramètre.

n : notation accordée à chaque paramètre.

-Le système de notation appliqué :

Pour chacun des paramètres DRASTIC, une note est affectée sur une échelle entière allant de 1 (le moins important) à 10 (le plus important). Pour un paramètre donné, une note basse implique que la nappe concernée n'est pas vulnérable à la pollution et vice-versa (tableau 26).

Tableau 26 : Classes et notes des sept paramètres (Lallemand Barès 1994).

| D : Distance à la nappe (m) | | R : Recharge (mm) | |
|--------------------------------------|----------|---|----------|
| Valeurs (m) | Notation | Valeurs (mm) | Notation |
| 0 – 1.5 | 10 | 25.5 | 9 |
| 1.5 – 4.5 | 9 | 17.5 – 25.5 | 8 |
| 4.5 – 9 | 7 | 10 – 17.5 | 6 |
| 9 - 15 | 5 | 5 - 10 | 3 |
| 15 - 22 | 3 | 0 - 5 | 1 |
| 22.5- 30 | 2 | | |
| >30 | 1 | | |
| A : Nature de la zone saturée | | S : Nature du sol | |
| Calcaire karstique | 10 | Mince ou absent | 10 |
| Sable et gravier | 8 | Sables | 9 |
| Grès massif | 6 | Limons sableux | 6 |
| Métamorphique altéré | 4 | Limons | 4 |
| Métamorphique | 3 | Limons silteux | 3 |
| Massive shale | 2 | Argiles | 1 |
| T : Topographie (pente) | | I : lithologie de la couche vadoze | |
| Valeurs (%) | Notation | Calcaire Karstique | 10 |
| 0 à 2 | 10 | Sable et gravier | 9 |
| 2 à 6 | 9 | Sable et gravier avec silt et argile | 8 |
| 6 à 12 | 5 | Grès | 6 |
| 12 à 18 | 3 | Calcaire | 6 |
| > 18 | 1 | Silt et argile | 1 |
| 0 à 2 | 10 | | |
| C : Perméabilité | | | |
| Valeur (m/s) | Notation | | |
| $>9,4.10^{-4}$ | 10 | | |
| $4,7.10^{-4}$ à $9,4.10^{-4}$ | 8 | | |
| $32,9.10^{-5}$ à $4,7.10^{-4}$ | 6 | | |
| $14,7.10^{-5}$ à $32,9.10^{-5}$ | 4 | | |
| $4,7.10^{-5}$ à $14,7.10^{-5}$ | 2 | | |
| $4,7.10^{-7}$ à $4,7.10^{-5}$ | 1 | | |

Chaque paramètre est affecté d'un poids qui traduit son influence dans l'estimation de l'Indice de Pollution Drastic. Le tableau 27 montre les poids et les propriétés des sept paramètres.

Le tableau 27: Poids et propriétés des paramètres DRASTIC.

| Symbole | Paramètre | Propriétés | Poids |
|---------|--------------------------|--|-------|
| D | Profondeur de la nappe | Plus cette profondeur est élevée, plus le contaminant met beaucoup de temps pour atteindre la surface piézométrique. | 5 |
| R | Recharge | Véhicule principal pour le transport du contaminant. Plus cette recharge est grande, plus le risque de contamination est élevé. | 4 |
| A | Lithologie de l'Aquifère | Caractérisée par la granulométrie des terrains saturés. Elle intervient dans le piégeage du polluant qui peut s'échapper au pouvoir d'absorption du sol. Plus la granulométrie est fine, plus le piégeage du polluant est grand. | 3 |
| S | Sol | Plus le sol est riche en argile, plus l'absorption des métaux lourds est importante, et plus la protection des eaux souterraines est grande. | 2 |
| T | Topographie | Plus la pente des terrains est grande, plus le ruissellement des eaux est important et par conséquent la contamination des eaux souterraines est faible, | 1 |
| I | Zone non saturée | Son impact est déterminé à partir de la texture des terrains qui la constituent. La percolation du polluant jusqu'à la surface piézométrique est d'autant plus grande que cette texture est favorable. | 5 |
| C | Perméabilité | Plus ce paramètre est grand, plus le transfert du polluant est rapide. | 3 |

VI.6.4 Validité de la méthode :

La précision avec laquelle la méthode Drastic permet de distinguer les régions vulnérables de celles qui sont protégées a été vérifiée dans différentes régions climatiques des États-Unis (Maine, Kansas, Texas, Caroline du Sud, Floride, Idaho, Wisconsin, etc.), ainsi qu'au Québec. Dans ce dernier cas, ISABEL et al (1990) ont vérifié la validité de la méthode sur des unités hydrogéologiques différentes. Dans tous les cas, les zones réellement contaminées correspondent à celles où les indices de vulnérabilité sont les plus élevés.

VI.6.5 Etablissement de la carte de vulnérabilité de la nappe de Meskiana :

La méthode de définition de la vulnérabilité proposée pour la nappe du Mio-Plio-Quaternaire de Meskiana sera la méthode à index avec pondération des critères de type DRASTIC. Les paramètres propres à la nappe de Meskiana sont sensiblement les mêmes que ceux utilisés par Aller et al, mis à part le type de nappe.

VI.6.5.1 Profondeur de la nappe :

La profondeur de la nappe est un paramètre important, qui constitue un facteur déterminant de la vulnérabilité. Plus cette profondeur est élevée, plus le contaminant met de temps à atteindre la surface piézométrique.

Pour la nappe de Meskiana, ce paramètre a été déterminé pendant les relevés piézométriques. On a remarqué que dans certains puits la profondeur est parfois nulle, ce qui met en contact les eaux de surface avec les eaux souterraines et facilite la contamination de ces dernières.

Le calcul des indices pour ce paramètre a été fait selon le tableau 28.

Tableau 28 : Notation et pondération du paramètre de la profondeur

| Intervalle | Dn | Dp | Dn.Dp |
|------------|----|----|-------|
| 0 – 1.5 | 10 | 5 | 50 |
| 1.5 – 4.5 | 9 | 5 | 45 |
| 4.5 – 9 | 7 | 5 | 35 |
| 9 - 15 | 4 | 5 | 25 |
| 15 - 22 | 3 | 5 | 15 |
| 22.5- 30 | 2 | 5 | 10 |

Ces indices ont permis d'établir la carte thématique du paramètre profondeur (figure 94). L'observation de la dite carte montre que les plus faibles indices sont répartis dans la zone de Dalâa et à proximité des bordures. Leurs valeurs ne dépassent pas 25, alors que les plus importants indices se situent dans les zones centrale et septentrionale, avec des valeurs de 35 à 50.

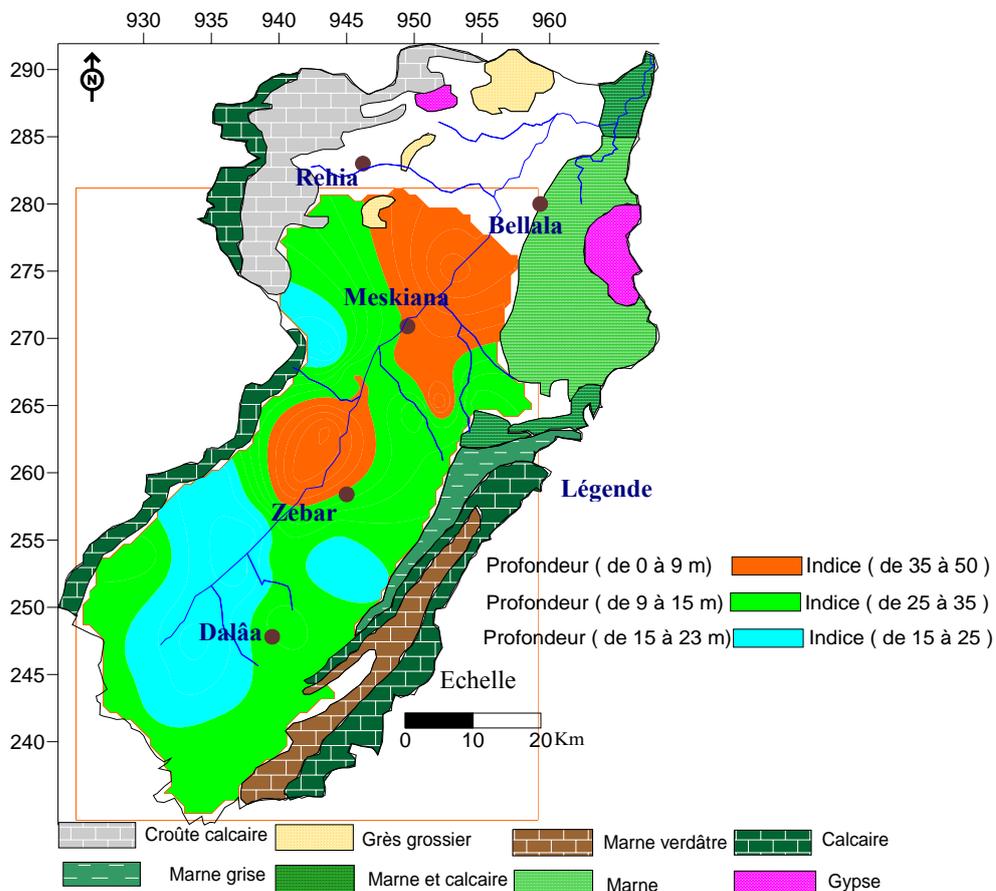


Figure 94 : Carte des indices de la profondeur de la nappe de Meskiana.

VI.6.5.2 La recharge efficace :

Elle concerne la quantité d'eau qui franchit la surface du sol pour renouveler les réserves d'eau souterraine et entretenir le débit de l'écoulement souterrain, après circulation dans l'aquifère. Les résultats du bilan hydrologique montrent que la valeur de ce paramètre est estimée à 5 mm sur l'ensemble du bassin.

Tableau 29 : Notation et pondération du paramètre de la recharge.

| Intervalle | Rn | Rp | Rn.Rp |
|------------|----|----|-------|
| 0 à 5 | 1 | 4 | 4 |

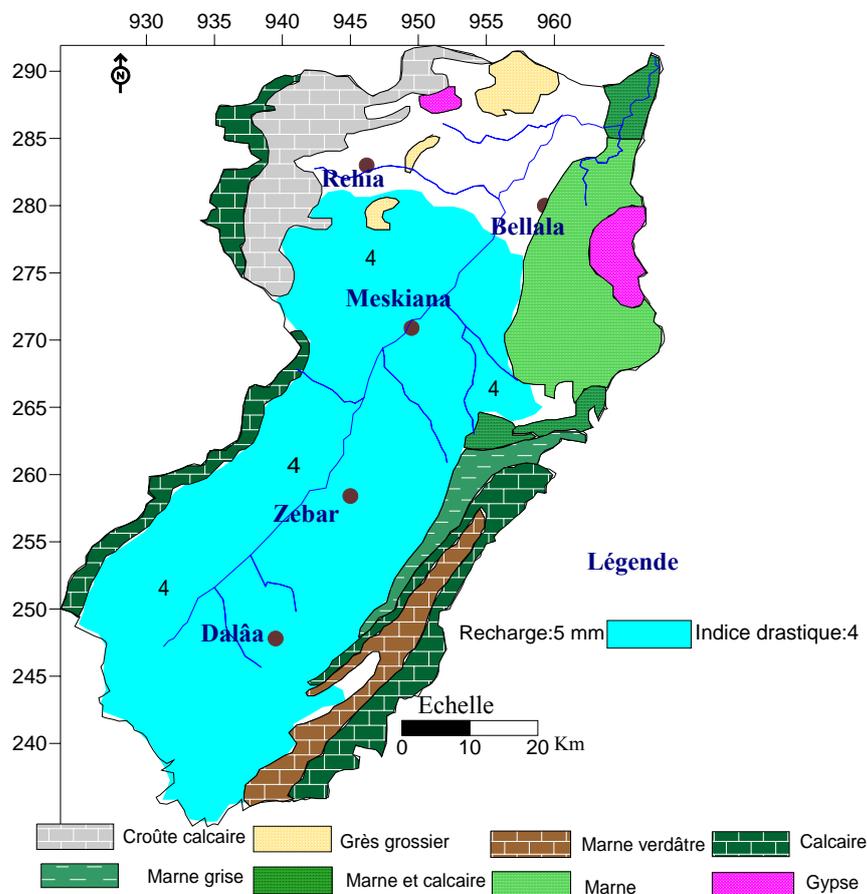


Figure 95 : Carte de la recharge efficace de la nappe de Meskiana.

VI.6.5.3 Nature de la zone saturée :

Ce paramètre désigne la lithologie de l'aquifère. Son identification a été basée sur les logs des forages et des puits creusés pour le captage de la nappe. Ces documents ont montré que le matériau aquifère de la nappe de Meskiana est constitué essentiellement de gravier et conglomérat, de sables et graviers et sables argileux. Les indices correspondant à ce paramètre ont été estimés selon la notation illustrée dans le tableau 30.

Tableau 30 : Notation et pondération du matériau aquifère.

| Calasses | An | Ap | An.Ap |
|------------------------|----|----|-------|
| Gravier et conglomérat | 10 | 3 | 30 |
| Sables et graviers | 9 | 3 | 27 |
| Sables argileux | 4 | 3 | 12 |

L'observation de la carte des matériaux de la zone saturée montre que les indices les plus faibles se situent à proximité des bordures et les plus importants au centre de la plaine.

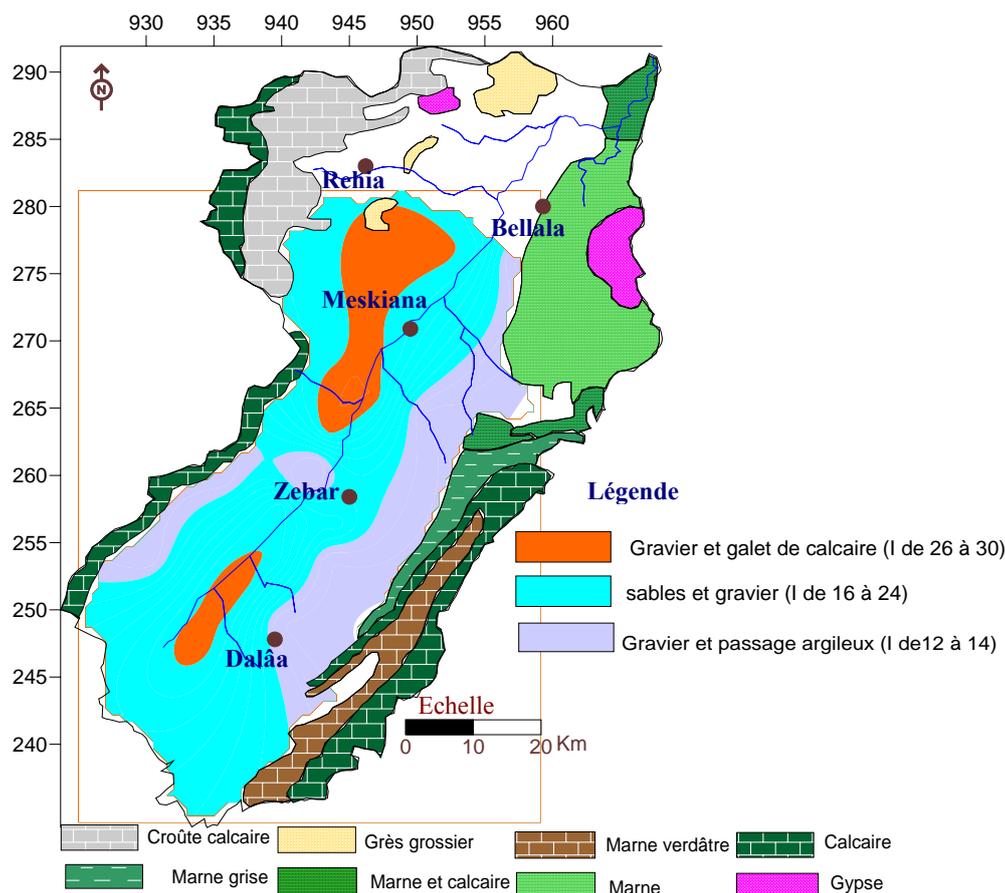


Figure 96 : Carte des matériaux de l'aquifère de Meskiana.

VI.6.5.4 La nature du sol :

La nature de la surface du sol influe sur la pénétration des polluants vers l'aquifère. Plus le sol est riche en argile, plus l'absorption des polluants est importante, et plus la protection des eaux souterraines est grande. Ce paramètre joue un rôle important dans la détermination des zones polluées.

Les informations recueillies à partir des cartes pédologiques et des logs de forages ont permis de dégager la nature du sol. Les valeurs indiciaires ont été déterminées selon les classes signalées dans le tableau 31.

Tableau 31 : Notation et pondération de la nature du sol.

| Classes | Sn | Sp | Sn.Sp |
|--------------------|----|----|-------|
| Conglomérats | 10 | 2 | 20 |
| Sables et gravier | 8 | 2 | 16 |
| Argiles et gravier | 7 | 2 | 14 |
| Argiles | 1 | 2 | 2 |

L'examen de la carte des indices relatifs à la nature du sol montre que le sol argilo-graveleux se répand sur la majorité de la surface de la plaine. Le sol argileux se répartit au Nord de la plaine, alors que les sols sableux et conglomératique occupent des superficies limitées au centre et au Sud de la plaine.

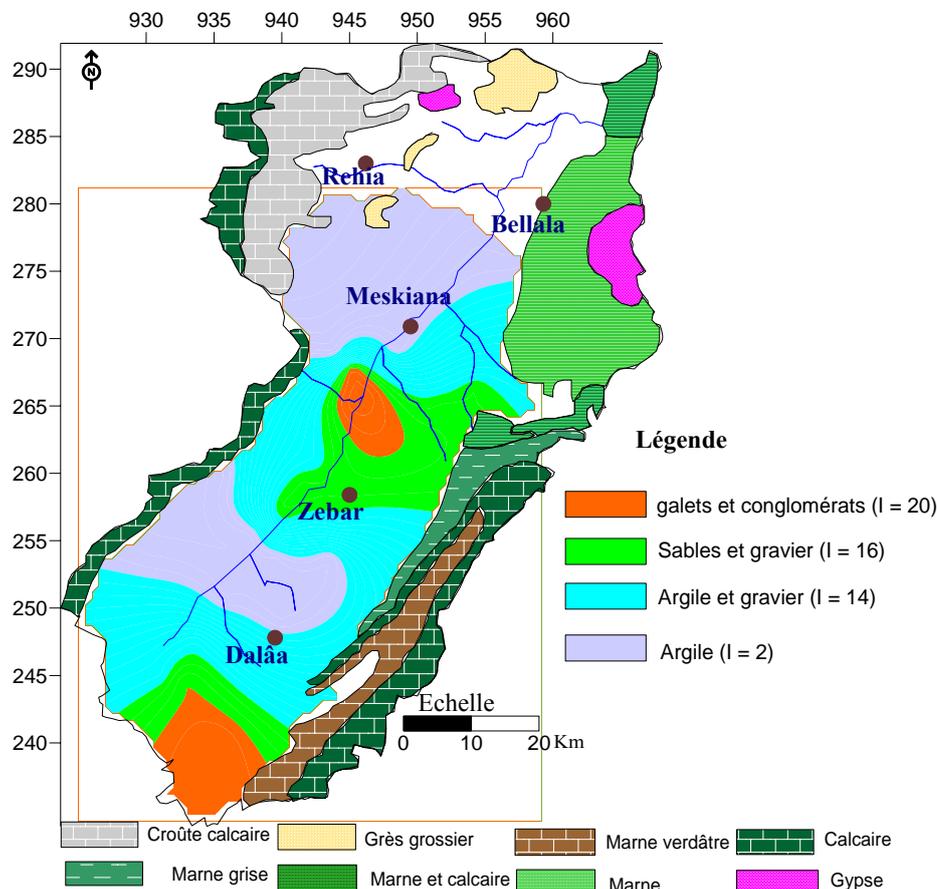


Figure 97 : Carte des types de sols de la nappe de Meskiana.

VI.6.5.5 La topographie (pente) :

Plus la pente des terrains est grande, plus le ruissellement des eaux est important et par conséquent la contamination des eaux souterraines est faible. Les valeurs de pentes ont été estimées en se référant aux cartes topographiques au 1/50000 de Meskiana, de Dalâa, de F'kirina et elles sont présentés dans le tableau 32.

Tableau 32 : Notation et pondération du facteur de la pente.

| Classes | Tn | Tp | Tn.Tp |
|---------|----|----|-------|
| 0 à 2 % | 10 | 3 | 30 |
| 2 à 6 % | 9 | 3 | 27 |

L'observation de la carte montre deux plages de pente. La première varie de 0 à 2 % et occupe la majorité de la plaine, tandis que la seconde varie de 2 à 6 %, et est rencontrée à côté des bordures occidentale et orientale. Figure 98.

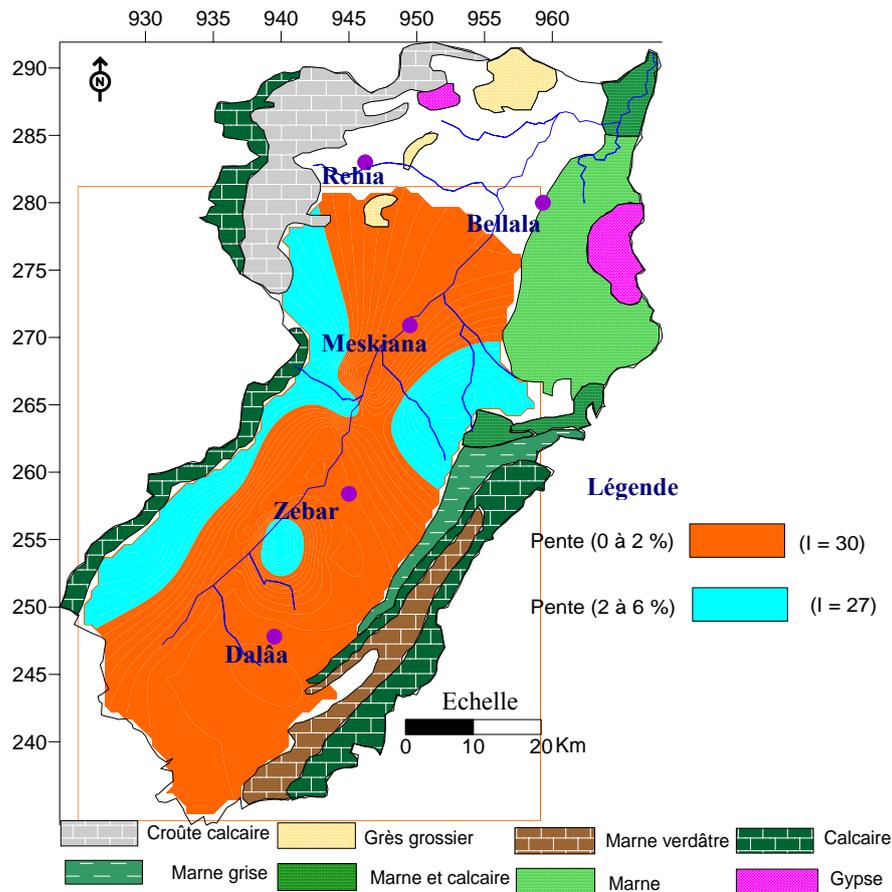


Figure 98 : Carte des pentes topographiques de la nappe de Meskiana.

VI.6.5.6 Nature de la zone non saturée (vadose) :

La nature de la zone non saturée constitue un paramètre important dans l'estimation de la vulnérabilité, car elle influe sur la vitesse de propagation des polluants. Son impact est déterminé à partir de la lithologie des terrains qui la constituent. La percolation des contaminants jusqu'à la surface piézométrique est d'autant plus grande que cette lithologie est favorable. La détermination des classes de ce facteur a été faite en se basant sur les cartes géologiques au 1/50000 de Dalâa, de Meskiana, de F'kirina et celle d'El Aouinet.

Tableau 33 : Notation et pondération de la couche vadose.

| Classes | In | Ip | In.Ip |
|-------------------|----|----|-------|
| Conglomérat | 10 | 5 | 50 |
| Sable et gravier | 8 | 5 | 40 |
| Argile et gravier | 7 | 5 | 35 |
| Argile | 2 | 5 | 10 |

La carte des indices correspondant à la nature de la couche vadose montre que deux zones sont très vulnérables selon ce paramètre : la première se situe au Sud de la plaine à proximité de Dalâa et la seconde se localise au centre de la nappe. Au Nord, les indices sont moins importants mais peuvent dépasser la valeur de 40. On signale la présence d'une couverture argileuse qui occupe une surface limitée à côté des bordures occidentale et orientale

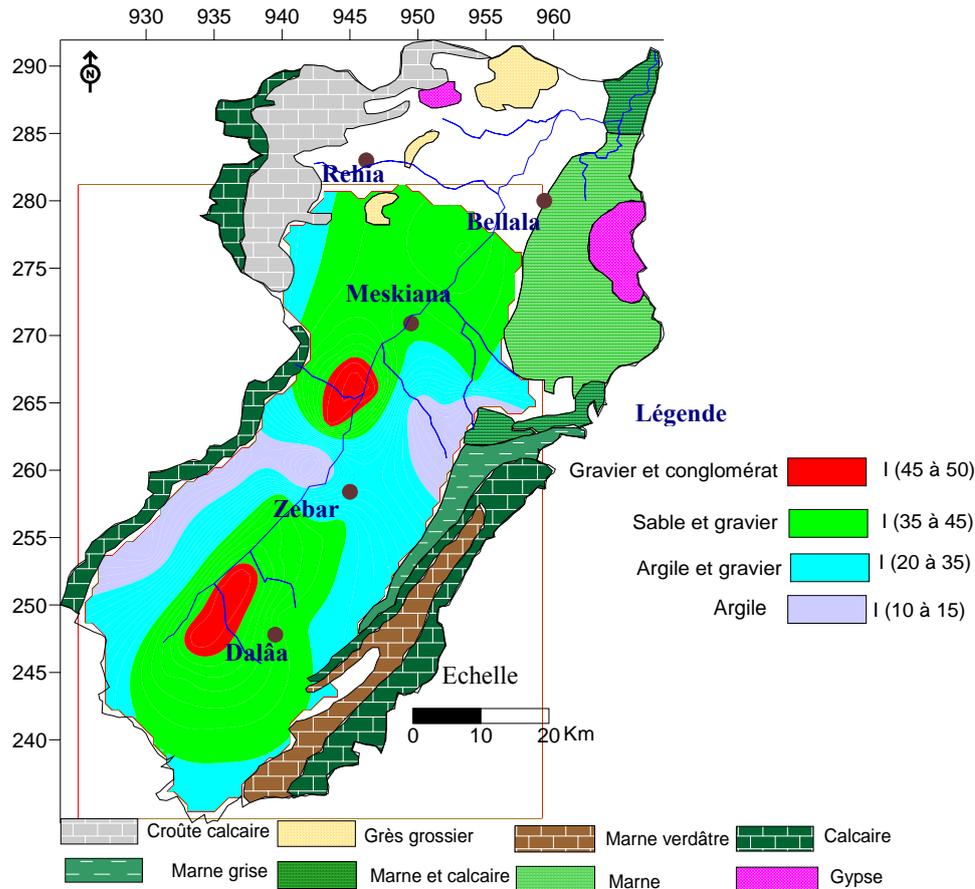


Figure 99 : Carte de l'impact de la couche vadose de la nappe de Meskiana.

VI.6.5.7 La perméabilité

La perméabilité de la couche aquifère nous renseigne sur la vitesse de propagation des polluants dans la nappe. Plus ce paramètre est important, plus le transfert des polluants est rapide. L'estimation des indices de ce paramètre a été faite selon les classes présentées dans le tableau 34.

Tableau 34 : Classes et notations retenues pour la perméabilité.

| Perméabilité en (10^{-4} m/s) | Cn | Cp | Cn.Cp |
|----------------------------------|----|----|-------|
| 0.65 à 0.75 | 8 | 3 | 24 |
| 0.35 à 0.65 | 5 | 3 | 15 |
| 0.05 à 0.35 | 3 | 3 | 9 |
| > 0.05 | 1 | 3 | 3 |

La carte des perméabilités montre que les plus importantes valeurs (0.65 à $0.75 \cdot 10^{-4}$ m/s) se situent au centre de la plaine entre Zebar et Meskiana. Des valeurs moins importantes (0.35 à $0.65 \cdot 10^{-4}$ m/s) se rencontrent au Nord et au Sud de la plaine. Des perméabilités moyennes (0.05 à $0.35 \cdot 10^{-4}$ m/s) se trouvent sur la majorité de la plaine, alors que les plus faibles perméabilités se localisent sur une zone limitée à l'Est de la nappe. Figure 100.

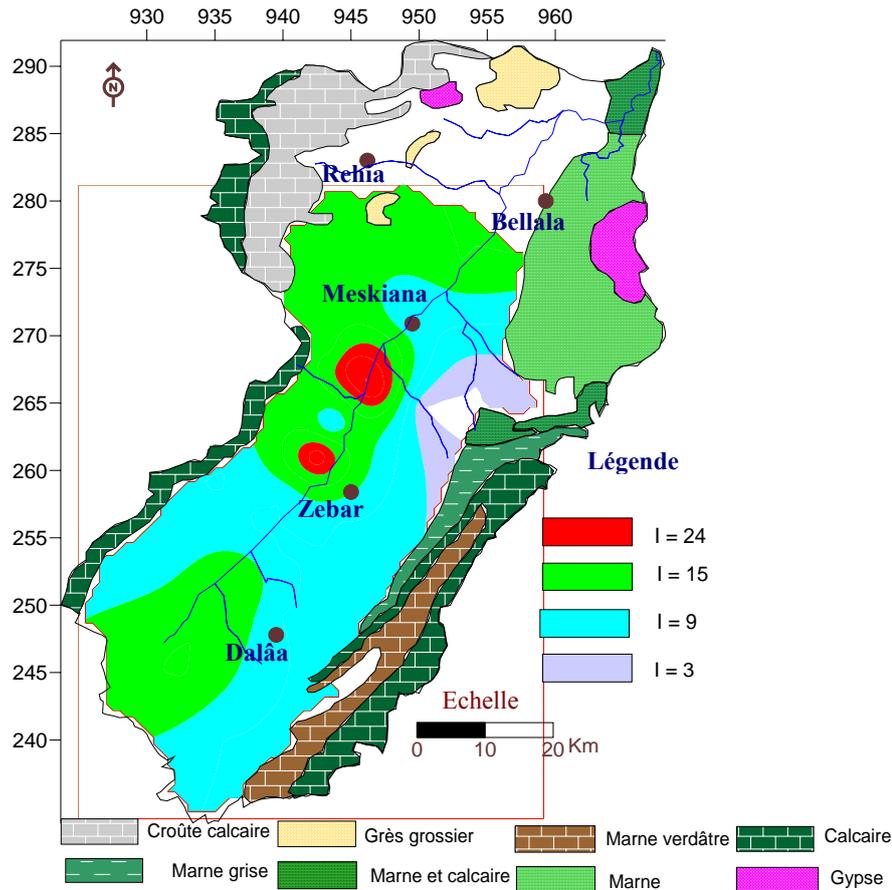


Figure100 : Carte des indices de perméabilités de la nappe de Meskiana.

VI.6.5.8 Carte de synthèse :

La carte de vulnérabilité de la plaine de Meskiana permet de visualiser les principales zones à risque, qui sont liées à des indices élevés. Pour caractériser cette vulnérabilité, on s'est basé sur les plages indiciaires de vulnérabilité qui sont utilisées communément.

- $150 < I$: vulnérabilité forte
- $100 < I < 150$: vulnérabilité moyenne ;
- $I < 100$: vulnérabilité faible.

Cette classification a permis de constater la présence de 03 zones :

- Une zone de plus grande vulnérabilité, dont l'indice dépasse 190, elle coïncide avec l'axe de la nappe où la profondeur de la surface piézométrique est très faible et parfois même nulle. La nature de la couche non saturée influence également cette vulnérabilité.
- Une zone de vulnérabilité moyenne, qui occupe la majorité de la nappe aquifère où l'indice de vulnérabilité varie de 100 à 150 et qui est due essentiellement la faible profondeur de la surface piézométrique et à la nature de la couche vadose.
- Une zone de faible vulnérabilité, qui se localise dans la périphérie de la plaine, mais s'étend sur une surface limitée. Son indice de vulnérabilité varie de 70 à 100.

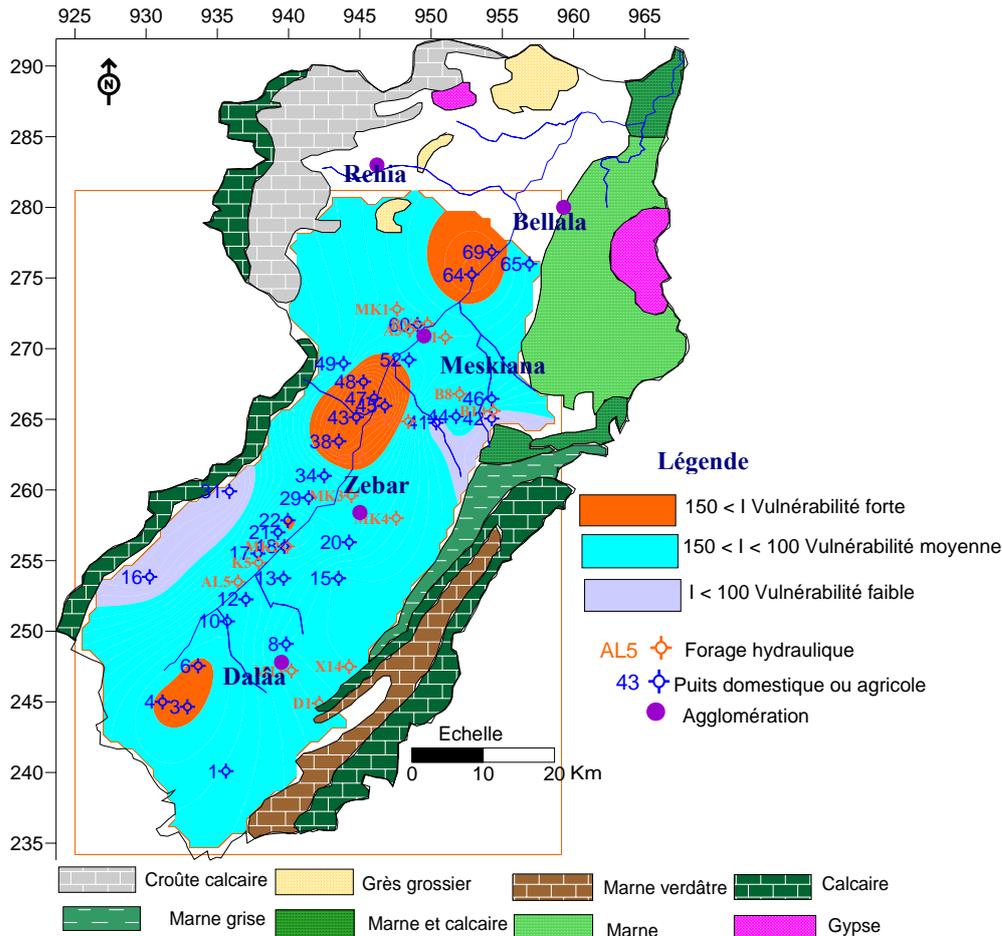


Figure 101 : Carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la nappe Meskiana.

Remarque:

Cette approche présente une application intégrale de la méthode Drastic. Appliquée à la plaine de Meskiana, qui se situe en milieu semi-aride, elle a permis de fournir une carte de vulnérabilité des eaux souterraines de l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire. À l'issue de cette première approche, l'adéquation des zones très vulnérables avec celles où sont observés des cas de pollution a permis de vérifier l'efficacité de la méthode.

VI.6.6 CONCLUSION :

Les différents points abordés le long de ce chapitre ont fait état de la pollution de la nappe souterraine de Meskiana, mais il était difficile d'évaluer l'importance de cette pollution. Notre approche a permis de préciser l'importance de ce problème et de préciser son origine. Ainsi, la nappe superficielle du Mio-Plio-Quaternaire semble être fortement contaminée par des nutriments d'origine agricole, suite à l'utilisation de fertilisants plus que

nécessaire pour les plantes. D'autre part, les rejets urbains, déversés sans aucun traitement préalable dans le réseau hydrographique, sont une source importante de pollution.

L'examen de l'évolution des formes de l'azote en fonction de la lithologie et de l'hydrodynamique des eaux souterraines a permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

- La contamination de la nappe est accentuée surtout là où le niveau piézométrique est relativement faible. Le pompage intensif et régulier des eaux de la nappe dans les zones profondes pourrait augmenter significativement la circulation des eaux souterraines, par appel d'eau, et accélérer la contamination des eaux de la nappe à partir de la surface ;
 - La nature lithologique de la couche vadose et celle de la couche aquifère ont favorisé la contamination de cette dernière et influencé la répartition des nitrates dans l'espace;
 - La répartition du bore dans la nappe a mis en évidence la pollution par les rejets urbains.
- Cette étude a montré la présence de fer dans les eaux souterraines, probablement due à la fois à l'usine d'ELATEX et à la décharge ménagère de la ville de Meskiana, ainsi qu'aux rejets des eaux usées domestiques.

On note l'effet de la contamination naturelle, marquée par le taux de salinité élevé avec de fortes concentrations en Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} et Ca^{2+} .

L'établissement de la carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la plaine de Meskiana a montré le champ de vision à l'ensemble de la plaine et ne se limite pas seulement aux endroits où la pollution a déjà contaminé les eaux souterraines. Elle permet ainsi la prise de mesures de protection, notamment dans la partie couvrant le champ de captage.

**CONCLUSIONS GENERALES
ET
RECOMMANDATIONS**

CONCLUSION GENERALE :

La présente étude, qui a porté sur la nappe alluvionnaire de la plaine de Meskiana, située au Nord-Est de l'Algérie, a abouti aux conclusions suivantes :

-L'étude géologique du bassin de Meskiana a montré que les formations carbonatées de bordure sont d'âge Crétacé. Les formations d'âge Mio-Plio-Quaternaire occupent la totalité de la plaine.

-L'activité tectonique a provoqué la formation de plis de direction NE-SW, accompagnés d'une série de failles de direction orthogonale affectant les formations crétacées.

-Du point de vue hydrogéologique, les calcaires d'âge Crétacé bordant la plaine pourraient être d'importants réservoirs d'eau. Les assises marneuses constitueraient un substratum imperméable.

-L'étude géologique et l'étude géophysique ont pu mettre en évidence l'extension des formations alluvionnaires à l'intérieur de la plaine. Ces formations sont composées de galets, de cailloutis, de graviers, de sables et de limons. Ces dépôts de remplissage sont très hétérogènes et intercalés de couches conductrices constituées par des marnes et des argiles. Cet ensemble constitue la nappe phréatique du remplissage alluvial de la plaine de Meskiana.

-La plaine de Meskiana est soumise à un climat méditerranéen de type semi-aride, avec un hiver froid et pluvieux et un été chaud et sec, avec des précipitations annuelles de l'ordre de 341 mm. La température moyenne interannuelle est de 15,58°C. Le calcul du bilan hydrologique par la méthode de Thornthwaite a révélé que l'ETR est de l'ordre de 314 mm, mobilisant 92 % des précipitations, et que l'infiltration ne représente que 1.55 % de ces dernières. Le ruissellement ne bénéficie également que de 6.45 % de ces précipitations.

-La cartographie piézométrique des différentes campagnes d'observation a montré un écoulement convergent des bordures vers le centre de la plaine pour se diriger vers l'exutoire au Nord-Est.

-L'alimentation se fait à partir des bordures calcaires de Dj Guerigueur à l'Est, et Dj Bou Tokhma et Guern Ahmar à l'Ouest.

-La surface piézométrique présente une fluctuation régulière, caractérisée par une baisse durant la période de basses eaux, sous l'effet de l'évaporation, et une remontée pendant la période de hautes eaux, suite à la recharge de la nappe à partir des précipitations.

Les valeurs les plus importantes de la perméabilité et de la transmissivité se localisent au centre de la plaine et les plus faibles aux bordures. Cette répartition est confirmée par les débits de forages.

-L'étude hydrogéochimique a été réalisée afin de caractériser la qualité des eaux souterraines, donc les facteurs naturels et anthropiques qui influent sur cette qualité. Plusieurs modes et outils d'interprétation ont été utilisés (cartographie, diagrammes, statistiques, informatique, etc.), qui ont montré :

-La présence de quatre faciès chimiques marquant ainsi l'hétérogénéité de la lithologie. En effet, on peut citer le faciès bicarbonaté caractérisant les eaux provenant des bordures calcaires, les faciès chlorurés et sulfaté résultant des formations évaporitiques et le faciès salifère, surtout dans la partie Nord de l'aquifère.

-La répartition spatiale des éléments chimiques a confirmé que l'origine de ces faciès est fortement liée à la nature lithologique de la nappe. La dissolution des formations carbonatées et évaporitiques est à l'origine de cette distribution.

Le suivi de la qualité des eaux dans le temps et dans l'espace a montré l'impact des facteurs climatiques (les précipitations et l'évaporation) sur la minéralisation des eaux de la nappe.

La comparaison des concentrations des éléments chimiques (Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , HCO_3^-) qui caractérisent les formations géologiques principales du bassin, a mis en relief la dominance des ions salifères (Na^+ , Cl^-) et les ions gypsifères (Ca^{2+} , SO_4^{2-}) par rapport à ceux carbonatés (Ca^{2+} , HCO_3^-) dans l'acquisition de la salinité.

Le calcul de l'indice de saturation des minéraux carbonatés et gypsifères a montré que les premiers ont tendance à s'équilibrer avant les seconds, ce qui explique les teneurs importantes des éléments chimiques provenant de la dissolution des gypses.

L'analyse statistique a pu montrer que les eaux souterraines se trouvant en amont de la nappe sont faiblement minéralisées et celles qui se trouvent en aval sont fortement minéralisées.

Les classifications de Richards et celle de Wilcox ont montré la dégradation de la qualité des eaux pour l'irrigation.

Quant à l'aspect environnemental, les investigations sur les sources de pollution de la plaine de Meskiana ont fait apparaître une forte contamination de celle-ci par des nutriments d'origine agricole et par les rejets urbains, qui sont déversés sans aucun traitement préalable, ce qui contribue à la dégradation de la qualité des eaux.

L'interprétation de l'évolution des formes de l'azote en fonction de la lithologie et de l'hydrodynamique des eaux souterraines a montré que :

- La contamination de la nappe est très accentuée à de faibles profondeurs et l'éventualité de la contamination des eaux profondes est envisageable sérieusement, surtout avec l'exploitation systématique actuelle de cette nappe.
- La nature lithologique de la couche vadose et celle de la couche aquifère a favorisé la contamination de cette dernière et a joué un rôle sur la répartition des nitrates dans la plaine.
- Les métaux lourds n'ont pas été détectés par les analyses des différentes campagnes d'observation à l'exception du fer.

RECOMMANDATIONS :

Les recommandations ci-dessous visent à élucider certains problèmes qui ont été observés, à préciser les incertitudes résultant de l'étude actuelle et à proposer des interventions en conséquence :

- Installer un réseau de piézomètres à travers la nappe, pour contrôler la fluctuation de la surface piézométrique, pour prendre les mesures de gestion conservatoires et appropriées de la nappe.
- Rentabiliser et équiper les infrastructures d'observation et de mesure des paramètres climatiques, et ce en évitant les ruptures durant les observations
- Comme la nappe Mio-Plio-Quaternaire de Meskiana constitue la seule réserve hydrique actuelle pour la région, il est recommandé de la recharger artificiellement avec les eaux de surface. Ceci ne pourrait avoir lieu qu'après la programmation d'études approfondies de géologie, de géophysique et d'hydrogéologie.
- Encourager les agriculteurs à améliorer leurs pratiques agricoles, puisqu'un lien significatif a été établi entre la présence de nitrates dans l'eau des puits et la zone d'agriculture intensive. Ce résultat est en soi un avertissement, puisque le seuil qui a été révélé atteste de l'influence indéniable des activités anthropiques.
- Maîtriser le stockage et l'utilisation des matières organiques résultant de l'élevage animal.
- Arrêter le déversement direct des rejets urbains et industriels au niveau de l'Oued Meskiana, en réalisant un traitement préalable de ces effluents avant qu'ils atteignent les oueds et surveiller en permanence la qualité des eaux au niveau de l'oued.

- Réétudier l'emplacement des décharges ménagères des agglomérations en les installant loin des zones vulnérables à la pollution, et ce pour éviter leurs effets sur les ressources hydriques.
- Réaliser une étude de modélisation des écoulements souterrains pour connaître les mécanismes de transfert des polluants, ce qui peut beaucoup aider à la protection de la nappe contre la pollution.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

AGENCE DES BASSINS HYDROGRAPHIQUES (2002) : Les cahiers de l'agence 120 pages.

AHKOUK S. (2004) : Impact des fertilisants agricoles et du mode d'irrigation sur la qualité des eaux souterraines en zones irriguées sous climat semi-aride : cas de la plaine des Chtouka. Bassin du Souss-Massa, Maroc. Thèse doctorat. Université Ibnou Zohr Agadir 134 pages.

AMHARREF M., MANIA J. et HADOUCHI B.(2001) :Adaptation of an Evaluation Vulnerability Method to Groundwater Pollution. First International Conference on saltwater Intrusion and Coastal Aquifers- Monitoring, Modeling, and Management. Essaouira, Morocco, April 23-25, 2001. 10 pages

ANONYME, (1973-1975) : Fiche technique des forages : A3, AL5, B10, B8, CD7 D1, E2, E5, K5, MK2, MK4, MK5.

ARNAUD W. et al (2004) : Développement d'un système harmonisé de surveillance de la qualité des terres agricoles en Région wallonne anticipant la future directive européenne sur les sols. Biotechnol. Agron. Soc. Pages 70-83.

ASTIER J.L. (1971) : La géophysique appliquée à l'Hydrogéologie. Masson et Cie. Edition, Paris 277 pages.

BOUDOUKHA A., GUERAICHE Z. (2004) : Comportement des polluants naturels et urbains dans les eaux de surface de Oued Rhumel. Colloque international Terre et Eau. Université de Annaba 04,05& 06 décembre 2004.

BOURAS A. et SELAMI A. (2006) : Impact des activités agricoles sur la dégradation de la qualité des eaux souterraines de la nappe de Meskiana NE Algérien. Mémoire d'ingénieur. CUTébessa.67 pages

BOUZIANI M.(2005) :L'eau dans tous ses états. Editions DAR EL GHARB.239 pages.

BRGM (2000) : Gestion des sites (potentiellement) pollués. Version 2. Edition BRGM

CASTANY G. (1963) : Traité pratique des eaux souterraines. Dunod Edit. Paris, 641 pages.

CASTANY G. et MARGAT (1977) : Dictionnaire français d'Hydrogéologie. Bur. Rech. Géol. Minière, 249 pages.

CASTANY G. (1968) : Prospection et exploitation des eaux souterraines. Ed. Dunod Paris France 683 pages.

CASTANY G. (1982) : Principes et méthodes de l'Hydrogéologie. Dunod Edit. Paris, 334pages.

CHIPPAUX J.P. al (2002) : Étude de la pollution de l'eau souterraine de la ville de Niamey. Niger. Santé publique. Pages 119-123.

CITEAU LAËTTIA (2004): Etude des colloïdes naturels présents dans les eaux gravitaires de sols contaminés : relation entre nature des colloïdes et réactivité vis-à-vis des métaux (Zn, Cd, Pb, Cu). Thèse doctorat. INRA, Unité de Science du sol – Versailles.147 pages.

COOTE D.R. GREGORICH (2000) : La santé de l'eau – Vers une agriculture durable au Canada. Direction de l'agriculture et agroalimentaire Canada, Ottawa (Ontario).

CORNAS S. (2002) : Guide pratique de l'échantillonnage des eaux souterraines. Société suisse d'hydrogéologie. 80 pages

DEBIECHE T.H. et al (2004) : Utilisation des rapports caractéristiques dans la détermination de la salinité des eaux souterraines. Colloque international Terre et Eau. Université de Annaba 04,05& 06 décembre 2004.

DEVEZ AURELIE (2004) : Caractérisation des risques induits par les activités agricoles sur les écosystèmes aquatiques. Thèse de doctorat. ENGREF, Centre de Montpellier.231 pages.

DJABRI L. (1996) : Mécanismes de la pollution et vulnérabilité des eaux de la seybose. Origines géologiques, industrielles, agricoles et urbaines. Thèse de Doctorat d'État. Université de Annaba 280 pages.

DUCHAUFOR P. (1995) : Pédologie, sol, végétation, environnement (4^{ème} édition). Abrégés. Paris Masson. 324 pages.

DUROZOY G. (1956) : Carte géologique au 1/50 000 de Tébessa feuille 206, et sa notice explicative.

FAKIR Y. (1991) : Caractérisation hydrogéologique et hydrochimique des aquifères côtiers du Sahel de Safi à Oualidia (Méséta côtière, Maroc). Thèse Univ. Semlalia, Marrakech, Maroc. 188 pages.

FAO (2005) : Utilisation des engrais par culture en Algérie. Division de la mise en valeur des terres et des eaux. Rapport de Première édition, publié par la FAO, Rome. 44 pages

FELLRATH M. (1995) : Qualité des eaux. Monographies en Ecologie des Polluants (2). Institut de Génie de l'Environnement, Laboratoire de Génie Sanitaire. Ecole Polytechnique Fédérale de LAUSANNE 220 pages

FORGES M. (1972) : Irrigation et salinité. CIHEAM, options méditerranéennes. Pages 40-45.

GALLAIRE R. (1995) : Hydrologie en milieu subdésertique d'altitude, le cas de l'Aïr (Niger).Doctorat en sciences. Université de Paris XI. 392 pages

GILLI E., MANGAN CH., MUDRU J. (2004) : Hydrogéologie. Objets, méthodes, applications. Dunod, Paris, 303 pages.

GOUAIDIA L.(2001) : Evolution du chimisme d'une nappe en zone semi-aride cas de la nappe alluvionnaire de Tébessa. 11^{ème} séminaire national des sciences de la terre, Tlemcen 28-30 octobre 2001.

GOUAIDIA L et al.(2004) : Application des méthodes statistiques pour expliquer le chimisme de la nappe alluvionnaire de Meskiana. Colloque international Terre et Eau. Université de Annaba 04,05& 06décembre 2004.

GOUAIDIA L et al.(2005) : Impact de la lithologie et la sécheresse sur le chimisme des eaux souterraines d'une nappe en zone semi-aride cas de la nappe alluvionnaire de Meskiana-Bulletin de Société des Sciences Naturelles du Pays Monbilliard. pages 245-255.

GOUAIDIA L et al.(2006) : Impact des activités agricoles et de la nature de la couche vadose sur l'évolution des nitrates dans la plaine de Meskiana (NE Algérien).-Le journal de l'IGME (Institut de Géologie et Minéralogie de l'Espagne),numéro spécial n°17.pages 37-46.

GRILLOT J.C., RAZACK M. (1985) : Evolution spatio-temporelle d'un aquifère alluvial sous l'effet d'une sécheresse pluriannuelle exceptionnelle (littoral médit., Hérault, France), J. Hydrol., 82. Pages 155-173.

GUY VANDILLE BRUNO VAN ZEEBROECK (2003) : Les comptes environnementaux en Belgique. Service public fédéral Economie, PME, Classes moyennes et Energie.42 pages.

HANI A. (2003) : Analyse méthodologique de la structure et des processus anthropiques : application aux ressources en eau d'un bassin côtier méditerranéen. Thèse de Doctorat d'état. Université d'Annaba .209 pages.

HEMILA M.L. (1988) : Hydrogéologie, modélisation et gestion des ressources en eau de la plaine alluviale du bassin de la Meskiana, haut Mellègue Est Algérien.Thèse de doctorat d'Université de Besançon. 198 pages

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

HSISSOU Y., MUDRY J., MANIA J., BOUCHAOU L., CHAUVÉ P. (1997) : Dynamique et salinité de la nappe côtière d'Agadir (Maroc), influence du biseau salé et des faciès évaporitiques. Fifth Scien. Ass. of IAHS, Rabat, Maroc, IAHS publi. n° 244.Pages 73-82.

LECOMTE P. (2000) : Les sites pollués, traitement des sols et des eaux souterraines. CNRCCP. Edition Lavoisier TEC.&DOC .194 pages

MARTIN C. (2003) : Mécanismes hydrologiques et hydrochimiques impliqués dans les variations saisonnières des teneurs en nitrate dans les bassins versants agricoles, approche expérimentale et modélisation. Thèse de doctorat d'Université de Rennes.255 pages.

MARSILY DE G. (1993) : Hydrogéologie : comprendre et estimer les écoulements souterrains et le transport des polluants, Paris ; Ecole des mines de Paris, 237 pages.

MARSILY DE G. (1993) : les différentes approches pour l'élaboration d'un modèle, Actes du séminaire Eaux environnement : Modélisation du comportement des polluants dans les hydrosystèmes, Paris ministère de l'environnement. Pages 9-23.

MEBARKI A.(2005) :Hydrologie des bassins de l'Est Algérien :ressources en eau, aménagement et environnement. Thèse de doctorat d'état. Université de Constantine.360 pages.

MIGNOLET C.et al (1997) : Système d'élevage et risque de pollution azotée. Construction d'un indicateur de risque et application dans la plaine des Vosges. INRA Prod. Anim. Pages 275-285.

NAFAA B.et al (2004) : La salinité des eaux souterraines de la région Est de la plaine d'El Outaya (Biskra) Algérie. Colloque international Terre et Eau. Université de Annaba 04,05& 06 décembre 2004.

NICOLARDOT.B et al (2000) : Disponibilité en azote des effluents urbains, agro-industriels et issus d'élevage. Dossier de l'environnement de l'INRA n°25. Pages 15-26.

OUDDANE B et al (1996) : Méthodologie analytique de dosage du bore dans les eaux souterraines. Techniques sciences méthodes, génie urbain génie rural. ISSN 0299-7258.

PAIN J.-M et al (1996) : Le bore marqueur de pollution urbaine, le bore naturel : état des connaissances et illustrations régionales dans le bassin Artois-Picardie. Techniques sciences méthodes, génie urbain génie rural. ISSN 0299-7258.

POINTET T. (2004) : Les relations nappes-rivières, observations à partir des étiages de petites rivières.La Houille blanche n° 04/2004. Pages 87-91.

RAVANAS et JOBARD (1974) : Rapport sur la prospection électrique de la plaine de Meskiana.Fait par la C.G.G au profit de la DHW de Constantine. 25 pages.

REMON E. (2005): Soil characteristics, heavy metal availability and vegetation recovery at a former metallurgical landfill: Implications in risk assessment and site restoration. Environmental Pollution 137 (2005) 316e323.Pages 316-323.

RODIER J. (1996) : L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. 8^e édition Dunod, Paris.

SARI A. (2002) : Initiation à l'hydrologie de surface, cours. Editions-Distribution HOUMA.223 pages.

SAVARY P. (2003) : Guide des analyses de la qualité de l'eau. Editions Techni.Cités.279 pages.

SCHOELLER H. (1962) : Les eaux souterraines. Hydrologie dynamique et chimique. Recherche, exploitation et évaluation des ressources Masson et Cie. Editions, 642 pages.

TARDAT-HENRY M. (1984) : Chimies des eaux. Editions le griffon d'argile inc. 338 pages.

THIERRIN J.(1990) : Contribution à l'étude des eaux souterraines de la région de Fribourg, Suisse occidentale. Thèse Doctorat. Université de Neuchâtel Suisse.277 pages.

TOUAM N. et BEKKAKRIA B. (2007) : Etude de l'estimation de la vulnérabilité de la nappe de Meskiana NE Algérien. Mémoire d'ingénieur. Centre universitaire de Tébessa.82 pages.

TODD K. (1980): Groundwater hydrology. Second Edition. New York, J.Wiley & Sons, 510 pages

U.S. Environmental Protection Agency (1987): Health effects assessment for boron and compounds. Environmental Criteria and Assessment Office.8 pages.

VILA J.M. (1973) : Notice explicative de la carte géologique, au 1/50.000, d'Ain Beida (feuille n° 149).Editée par Sonatrach en 1977.6 pages.

VILA J.M. (1973) : Notice explicative de la carte géologique, au 1/50.000, de Dalâa (204). Editée par Sonatrach en 1977. 6pages

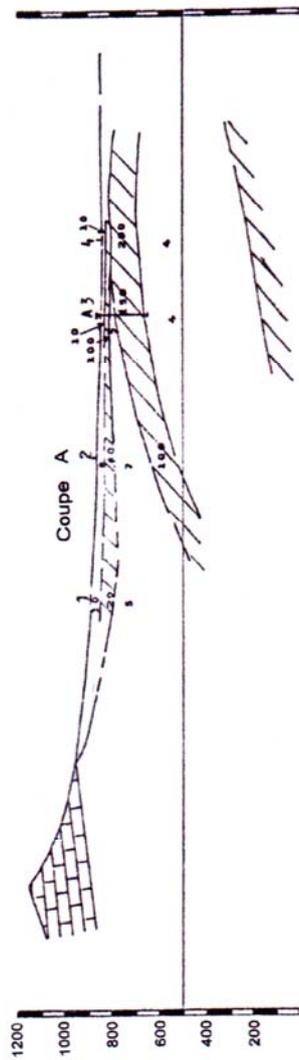
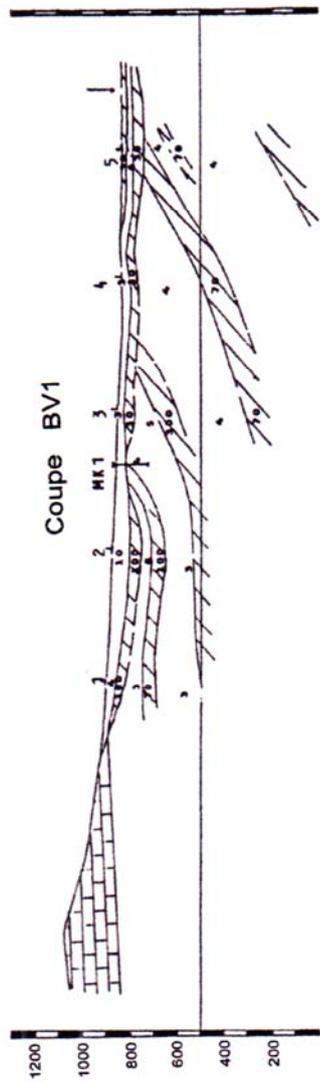
VILA J.M. (1973) : Notice explicative de la carte géologique, au 1/50.000, de F'kirina (176). Editée par Sonatrach en 1977. 6pages

VILA J.M. (1973) : La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens. Thèse de doctorat Es Sciences Naturelles. Université Paris VI. 665 pages.

YOUSFI.R et al (2004) : Apport des applications statistiques sur l'explication du chimisme de la nappe alluviale de la plaine de Meskiana, Nord-Est Algérien. Mémoire d'ingénieur. C.U.Tébessa. 89 pages

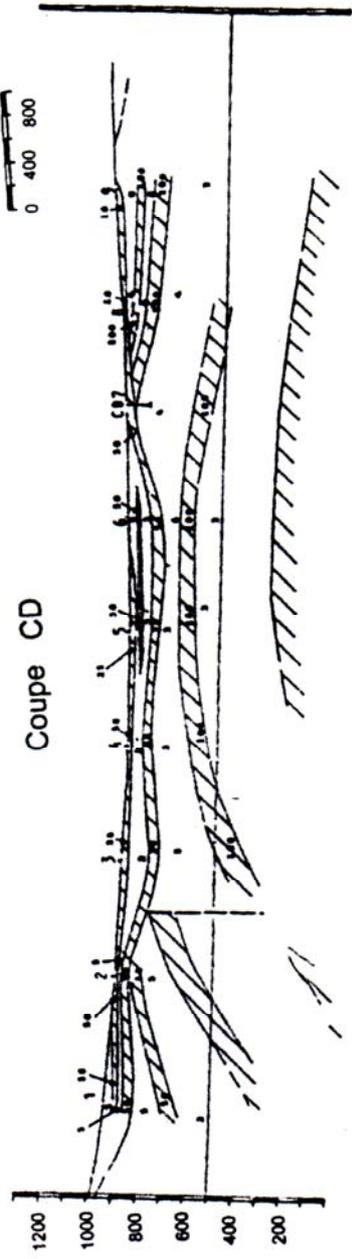
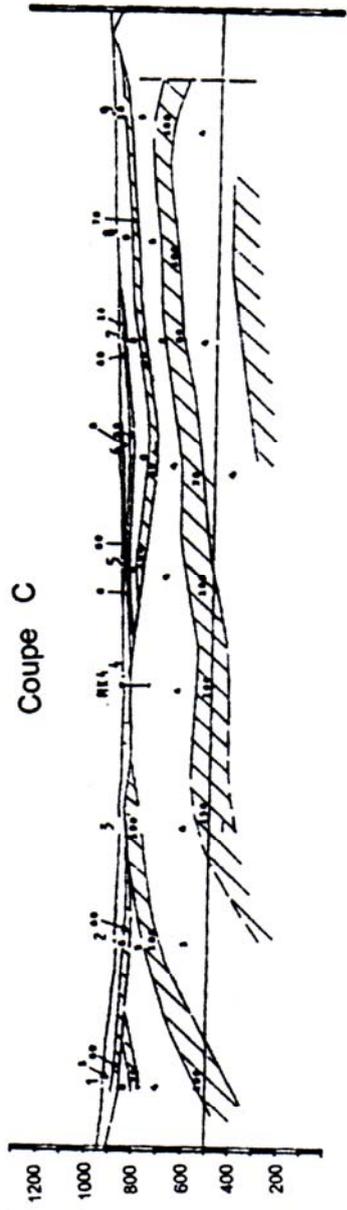
ANNEXES

ANNEXE I
(GÉOPHYSIQUE)

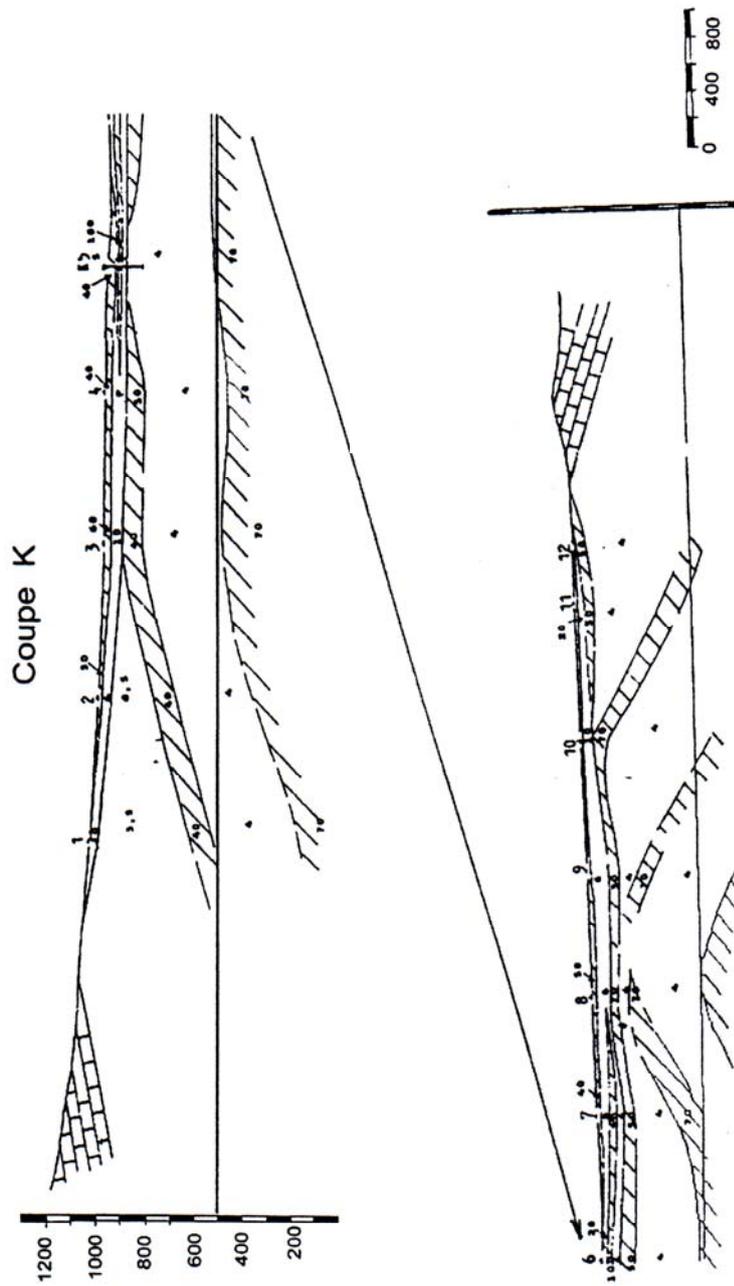


Coupe géoélectrique du profil BV1.



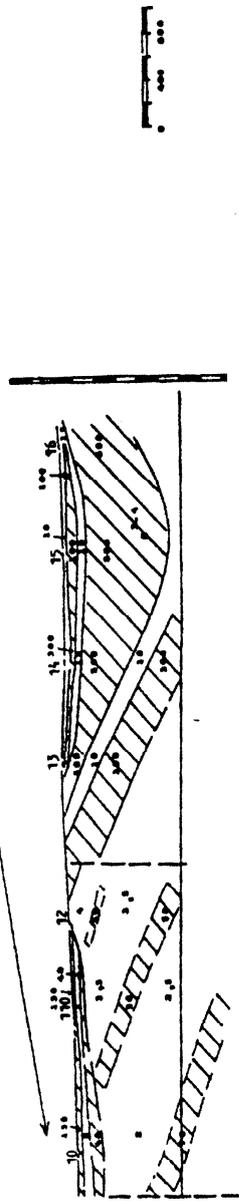
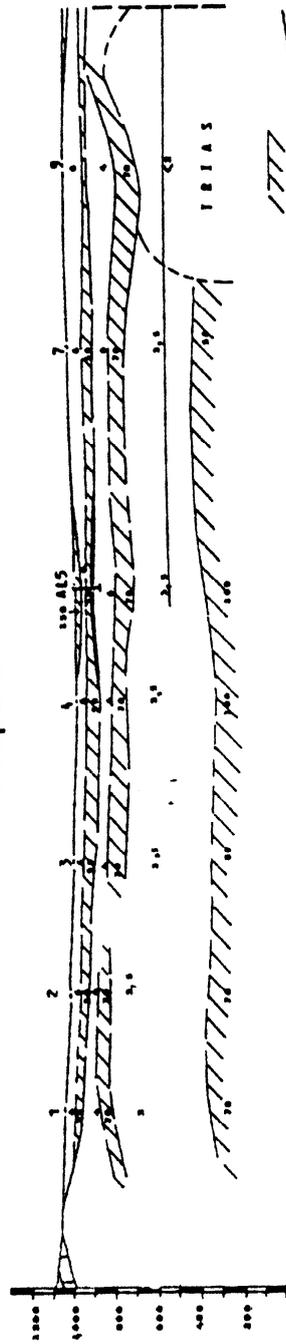


Coupes géoélectriques des profils C et CD.



Coupe géoélectrique du profil K.

Coupe L



Coupe géoelectrique du profil L.

ANNEXE II
(HYDROCLIMATOLOGIE)

Les précipitations mensuelles enregistrées à la station de Meskiana:

| Année | sept | oct | nov | déc | jan | fev | mars | avri | mai | juin | juil | aout |
|-----------|-------|------|-------|-------|------|------|-------|------|-------|------|------|-------|
| 70/71 | 117,8 | 49,8 | 8,9 | 10,8 | 48,7 | 10,4 | 31,3 | 45,7 | 20,3 | 95,1 | 7,5 | 8,7 |
| 71/72 | 18,8 | 58,5 | 5,2 | 31 | 51,1 | 51 | 102 | 51,6 | 25 | 1,6 | 0 | 21,3 |
| 72/73 | 36,9 | 91,3 | 9 | 20,1 | 30,8 | 32,7 | 122,1 | 15,2 | 37,4 | 44,9 | 0,3 | 30,4 |
| 73/74 | 10,3 | 10,9 | 6 | 85,4 | 12,5 | 48,3 | 36,2 | 50,2 | 30,4 | 14,8 | 8,5 | 22,1 |
| 74/75 | 18,5 | 28,9 | 13,5 | 19,2 | 13,4 | 54,8 | 31,4 | 27,6 | 55,6 | 0 | 25,4 | 20,7 |
| 75/76 | 23,1 | 11 | 37,3 | 6,2 | 14,7 | 30,2 | 41,1 | 22,4 | 31,8 | 43,5 | 27,3 | 33,3 |
| 76/77 | 23,1 | 20,1 | 119,5 | 8,3 | 10,8 | 5,6 | 40,1 | 30,4 | 33,2 | 8,7 | 15 | 14,8 |
| 77/78 | 11,2 | 3,3 | 36,7 | 3,9 | 3,9 | 38,7 | 77,5 | 23 | 19,9 | 23,9 | 0 | 32,7 |
| 78/79 | 25,4 | 23 | 16,4 | 3,6 | 17,5 | 34,6 | 61,3 | 59,4 | 46,7 | 17,7 | 0 | 9,9 |
| 79/80 | 98,1 | 10,5 | 31,3 | 31,7 | 16,7 | 29,8 | 49,8 | 21,1 | 33 | 27,3 | 1 | 10,8 |
| 80/81 | 49,8 | 14 | 16,8 | 26,5 | 14,2 | 22,2 | 15,3 | 41,7 | 33,6 | 49,4 | 6,7 | 4,5 |
| 81/82 | 42,7 | 44,2 | 43,8 | 15,6 | 18,4 | 35,6 | 22,4 | 36,2 | 59,21 | 14,8 | 4,8 | 26,7 |
| 82/83 | 7 | 33,2 | 46,3 | 12,8 | 42,2 | 48,6 | 22,7 | 17,6 | 13,6 | 17,9 | 7,8 | 28,3 |
| 83/84 | 11,4 | 32,7 | 4,3 | 32,9 | 13,7 | 41,4 | 41,3 | 19 | 21 | 6,8 | 0 | 15,4 |
| 84/85 | 23,7 | 21,2 | 16,8 | 43 | 25,7 | 15,9 | 64,5 | 15,4 | 57,4 | 22,2 | 15,9 | 6 |
| 85/86 | 66,55 | 12,6 | 16,75 | 36,4 | 10,5 | 19 | 60,9 | 2,5 | 26,8 | 13,2 | 36,5 | 23 |
| 86/87 | 15,83 | 25,4 | 36,6 | 16,7 | 10,2 | 17,4 | 42,6 | 19,2 | 33,3 | 34,2 | 13,7 | 5 |
| 87/88 | 14,44 | 22,6 | 30,2 | 27,5 | 12,7 | 2 | 23,8 | 27,6 | 56,1 | 41,4 | 11,5 | 36,5 |
| 88/89 | 18 | 13,5 | 23,9 | 25,4 | 43,3 | 10,4 | 34,7 | 26,3 | 19 | 45,3 | 8,7 | 101,3 |
| 89/90 | 38,6 | 7,8 | 31,6 | 18,7 | 43 | 19,5 | 40,6 | 50,8 | 48,35 | 17,1 | 13,2 | 115,6 |
| 90/91 | 37,5 | 29,4 | 60,1 | 34,5 | 32,4 | 31,3 | 44,3 | 25 | 54,9 | 14,4 | 8,5 | 35,6 |
| 91/92 | 58,9 | 52,4 | 39,6 | 14,2 | 20,3 | 24,9 | 22,3 | 25,6 | 71,7 | 23,2 | 13,4 | 24,5 |
| 92/93 | 44,08 | 28,4 | 61,05 | 48,4 | 5,3 | 27,9 | 19,4 | 14,5 | 22,36 | 12,8 | 7,1 | 2,3 |
| 93/94 | 16,05 | 26,2 | 9,9 | 19,5 | 44,2 | 20,9 | 9,4 | 13,3 | 31,7 | 50,6 | 14,5 | 6,7 |
| 94/95 | 82 | 36,8 | 7,4 | 5,7 | 88 | 23,5 | 52,4 | 30,2 | 12,7 | 15,8 | 7,6 | 3,5 |
| 95/96 | 94,9 | 33,7 | 28 | 8,2 | 10,5 | 60,9 | 39,3 | 30,5 | 13,83 | 27,6 | 7,5 | 15,5 |
| 96/97 | 56 | 5 | 42,6 | 22,9 | 27,6 | 4 | 27,8 | 50,7 | 12,06 | 12 | 0 | 19,4 |
| 97/98 | 32,1 | 40,5 | 26,7 | 13,5 | 51,5 | 2 | 15,7 | 9,9 | 18,51 | 36,3 | 13 | 13,3 |
| 98/99 | 42,1 | 51,7 | 36,3 | 27,9 | 23,7 | 11,7 | 31,8 | 15,4 | 80 | 22 | 5 | 13,6 |
| 99/00 | 20,3 | 48,7 | 39,5 | 23,2 | 20 | 14,8 | 6,1 | 12 | 50,96 | 36,5 | 10 | 8,5 |
| 00/01 | 41,2 | 32,7 | 13,5 | 13,9 | 22,8 | 16 | 5,5 | 11,1 | 31,6 | 28 | 6 | 46,7 |
| 2001/2002 | 35,84 | 6 | 56 | 6,8 | 12,3 | 16 | 33,5 | 26 | 11,44 | 5 | 15 | 85 |
| 2002/2003 | 32,6 | 77,9 | 59,3 | 36,5 | 53,5 | 25,5 | 31 | 64,5 | 83,7 | 30,9 | 16,2 | 36,8 |
| 2003/2004 | 48,8 | 35,4 | 80,77 | 122,5 | 12,5 | 13,4 | 41,8 | 13,7 | 20,8 | 4,5 | 6,3 | 13,5 |
| 2004/2005 | 46,54 | 18,3 | 4,24 | 31,8 | 32,1 | 15 | 35,5 | 55,5 | 23,9 | 21 | 9,5 | 46,6 |

Les précipitations mensuelles enregistrées à la station de Tébessa :

| Année | sept | oct | nov | déc | jan | fev | mars | avri | mai | jui | juil | aout |
|-----------|------|------|-------|-------|------|------|-------|------|------|------|------|------|
| 72/73 | 36,9 | 99,3 | 11,2 | 34,9 | 46 | 42,7 | 171,1 | 31,3 | 44,7 | 65,5 | 5,3 | 36,4 |
| 73/74 | 16,3 | 12,9 | 6 | 94,4 | 14 | 28,3 | 29,2 | 50,2 | 10,4 | 24,8 | 4,5 | 12,1 |
| 74/75 | 27,1 | 37,9 | 18,5 | 14,2 | 23,4 | 67,8 | 33,6 | 21,6 | 66,6 | 0 | 25,4 | 23,7 |
| 75/76 | 26,1 | 11 | 47,3 | 6,2 | 22,4 | 38,2 | 49,1 | 32,4 | 35,8 | 59 | 27,3 | 39,3 |
| 76/77 | 26,1 | 23,1 | 134,5 | 10,3 | 14,7 | 6,6 | 45,1 | 40,4 | 38,2 | 9,1 | 15 | 19,4 |
| 77/78 | 11,2 | 3,3 | 46,7 | 3,9 | 3,9 | 54,7 | 102,5 | 23 | 23,9 | 3,9 | 0 | 50,1 |
| 78/79 | 5,4 | 26 | 20,4 | 3,6 | 10,3 | 44,6 | 40,3 | 89,4 | 22,7 | 27,7 | 0 | 11,7 |
| 79/80 | 116 | 18,5 | 21,3 | 1,7 | 33,7 | 29,8 | 76,8 | 28,1 | 41 | 4,3 | 0,2 | 3,4 |
| 80/81 | 65,8 | 3,7 | 24,1 | 47,5 | 13,4 | 18,8 | 24,1 | 11,7 | 35,8 | 72,4 | 3,6 | 4,1 |
| 81/82 | 37,3 | 23 | 1,9 | 15,3 | 21,8 | 45,6 | 12,4 | 56,2 | 80,1 | 8,5 | 3,7 | 15,5 |
| 82/83 | 12 | 58,5 | 50,3 | 24,7 | 2,8 | 7,3 | 18,1 | 5,7 | 30,4 | 42,7 | 0,7 | 31,5 |
| 83/84 | 3,9 | 31,7 | 17,9 | 12,2 | 18,9 | 92,4 | 24 | 24,1 | 4,3 | 6,8 | 0,2 | 15,4 |
| 84/85 | 27,2 | 26,2 | 19,1 | 51 | 25,7 | 11,3 | 54,5 | 26,4 | 65,2 | 27,2 | 2,4 | 6 |
| 85/86 | 50,8 | 23,1 | 3,5 | 13,5 | 31,1 | 14,3 | 83,1 | 2,5 | 35,8 | 15,2 | 51 | 13,1 |
| 86/87 | 24,4 | 28,7 | 44,7 | 20,7 | 10,2 | 27,4 | 62,6 | 13,2 | 25,1 | 4,2 | 33,7 | 5 |
| 87/88 | 15,5 | 18,7 | 33,8 | 9,2 | 23,7 | 4,2 | 35,8 | 31,6 | 55,6 | 62,1 | 8,3 | 6,5 |
| 88/89 | 21,1 | 20,6 | 35,1 | 35,4 | 18,3 | 17,4 | 14 | 16,3 | 8,4 | 57,3 | 8,7 | 99,3 |
| 89/90 | 44,6 | 12 | 10,8 | 8,7 | 83 | 0,2 | 34,8 | 43,1 | 66,9 | 17,1 | 15,2 | 137 |
| 90/91 | 53,3 | 22,4 | 99,8 | 64,9 | 30,3 | 12,8 | 54 | 43 | 67,8 | 14,4 | 6,4 | 65,6 |
| 91/92 | 74,7 | 34,4 | 44,3 | 14,2 | 34 | 29,9 | 24,3 | 43,6 | 82 | 23,2 | 13,4 | 4,5 |
| 92/93 | 51,2 | 28,4 | 61,6 | 48,4 | 9,3 | 27,9 | 21,4 | 2,6 | 31,1 | 12,8 | 20,1 | 1,8 |
| 93/94 | 22,7 | 3,8 | 16,8 | 28,7 | 31 | 23,9 | 19,4 | 23,3 | 41 | 2,4 | 4,5 | 11 |
| 94/95 | 7,2 | 66,8 | 0,6 | 6,8 | 24,7 | 3 | 32,2 | 22,1 | 7,4 | 37,9 | 1,7 | 44,1 |
| 95/96 | 150 | 39,7 | 26,6 | 18,2 | 24,9 | 72,9 | 56,3 | 49,8 | 30,2 | 38,9 | 13,2 | 30 |
| 96/97 | 12,4 | 4,1 | 1,2 | 15 | 31,6 | 7,1 | 18,9 | 46,8 | 16,1 | 10,3 | 20,2 | 23,7 |
| 97/98 | 64 | 72,5 | 45,2 | 21,5 | 22,3 | 10,2 | 28,7 | 29,2 | 16,7 | 31 | 0 | 15,1 |
| 98/99 | 78,6 | 36,2 | 55,1 | 14,5 | 56,4 | 11,7 | 45,6 | 15,4 | 30,9 | 16,9 | 18,9 | 33,7 |
| 99/00 | 22,1 | 81,5 | 64,5 | 34,5 | 3,2 | 4,4 | 10,4 | 15 | 87 | 76 | 21 | 18,9 |
| 00/01 | 50,5 | 18 | 16,5 | 13,9 | 26,8 | 16 | 14,8 | 3 | 48,8 | 2 | 8 | 1 |
| 2001/2002 | 54,5 | 10,9 | 23,3 | 7,1 | 16,5 | 11,5 | 4,5 | 29,4 | 41 | 13 | 58 | 85 |
| 2002/2003 | 36,9 | 37,5 | 76,9 | 30 | 100 | 38,9 | 17,5 | 97,5 | 28,6 | 9,4 | 3 | 12 |
| 2003/2004 | 70,4 | 45,2 | 17,5 | 168,4 | 20 | 3,4 | 72,8 | 29 | 38,6 | 16 | 43,7 | 19,4 |
| 2004/2005 | 19,4 | 25,5 | 11 | 66,5 | 28,6 | 33,6 | 23,5 | 20 | 1 | 32 | 1 | 46,6 |

Les températures mensuelles enregistrées à la station de Tébessa :

| Année | sept | oct | nov | déc | jan | fev | mars | avri | mai | jui | juil | aout |
|-----------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| 72/73 | 19,8 | 13,7 | 10,7 | 5,7 | 4,4 | 4,8 | 5,6 | 10,5 | 19,9 | 23,1 | 26,9 | 23,6 |
| 73/74 | 21,7 | 17,1 | 9,3 | 6,3 | 6,2 | 6,4 | 9,8 | 10,8 | 15,6 | 23,5 | 23,9 | 24,1 |
| 74/75 | 20,8 | 13,3 | 9,1 | 5,9 | 5,9 | 6 | 8,5 | 11,9 | 16,4 | 21,3 | 25,4 | 23,2 |
| 75/76 | 22,7 | 14,2 | 9,2 | 7,4 | 5,2 | 6,6 | 7,4 | 11,8 | 16 | 20 | 23,6 | 23,8 |
| 76/77 | 19,9 | 15,4 | 7,8 | 8,2 | 8 | 9,8 | 11,8 | 12,9 | 17,5 | 21,8 | 27,8 | 24,6 |
| 77/78 | 19,8 | 16,6 | 11 | 7,9 | 5,1 | 9,8 | 9,2 | 12,7 | 17 | 23,1 | 25,5 | 24,6 |
| 78/79 | 20,4 | 12,6 | 7,9 | 9,6 | 9,8 | 8,6 | 10,5 | 10,2 | 16,7 | 22 | 26,1 | 25,2 |
| 79/80 | 18,8 | 17,6 | 8,4 | 7,4 | 5,8 | 7,3 | 9 | 10,3 | 14,9 | 22,4 | 24,9 | 25,7 |
| 80/81 | 21,7 | 14,2 | 11 | 4,5 | 3,9 | 6,3 | 12,4 | 15,2 | 19 | 23,3 | 24,5 | 24,1 |
| 81/82 | 20,7 | 17,3 | 9,2 | 9,7 | 7,7 | 7,4 | 9,2 | 11,8 | 17 | 24,2 | 28 | 25,9 |
| 82/83 | 21,5 | 15,9 | 10,8 | 5,7 | 4,7 | 6,7 | 9,3 | 15,3 | 18,9 | 22,5 | 27,1 | 26 |
| 83/84 | 21,6 | 15 | 12,2 | 7,2 | 6,1 | 6 | 8,5 | 13 | 17 | 23,1 | 26,1 | 25,2 |
| 84/85 | 20,6 | 14,5 | 12 | 6,4 | 5,4 | 10,4 | 8,3 | 14,2 | 16,9 | 25,1 | 27,7 | 25,6 |
| 85/86 | 20,4 | 15,7 | 13 | 8 | 6,3 | 8,1 | 9,4 | 13,7 | 19,9 | 22 | 25 | 26,8 |
| 86/87 | 21 | 16,6 | 10,2 | 6,4 | 6,3 | 7,7 | 8,8 | 14,3 | 16,7 | 24,3 | 26,7 | 27,9 |
| 87/88 | 23,6 | 19,3 | 10,7 | 10,5 | 8,2 | 7,4 | 9,9 | 14,8 | 20,5 | 22,5 | 28 | 26,7 |
| 88/89 | 20,6 | 18,2 | 11,6 | 5,8 | 5,4 | 7,2 | 11,5 | 13,7 | 18,2 | 20,9 | 25,6 | 26,1 |
| 89/90 | 22,2 | 15,5 | 13,4 | 10,7 | 6,1 | 10,4 | 10,4 | 12,7 | 17,2 | 25,1 | 24,9 | 22,5 |
| 90/91 | 24,1 | 20 | 11,5 | 5,5 | 5,5 | 6,8 | 11,6 | 10,4 | 14,2 | 21,9 | 26,3 | 25,6 |
| 91/92 | 21,8 | 16,7 | 10,6 | 5,5 | 4,7 | 6,7 | 9,4 | 11,8 | 16,3 | 20,9 | 23,9 | 25,7 |
| 92/93 | 21,9 | 18 | 12,1 | 7,8 | 5,2 | 5,6 | 8,7 | 13,9 | 19,2 | 24,8 | 26,8 | 27 |
| 93/94 | 22,3 | 19,1 | 11,1 | 7,7 | 7,5 | 8,9 | 11,9 | 11,8 | 21,9 | 24,2 | 27 | 28,6 |
| 94/95 | 23,6 | 16,7 | 13,2 | 8,1 | 5,7 | 10,3 | 9,2 | 12,7 | 20,1 | 22,9 | 27,1 | 24,6 |
| 95/96 | 21,1 | 16,3 | 11,3 | 9,8 | 9 | 6,3 | 10,1 | 12,4 | 18,2 | 20,8 | 25,9 | 26,6 |
| 96/97 | 20,3 | 15 | 12,4 | 10,2 | 8,7 | 9,3 | 9,3 | 11,2 | 20,4 | 26,6 | 27,5 | 25,2 |
| 97/98 | 20,5 | 17 | 11,8 | 8,5 | 7,2 | 8,2 | 9,8 | 15,1 | 17,7 | 24,6 | 27,8 | 25,7 |
| 98/99 | 23,2 | 15 | 10,2 | 6,3 | 7,1 | 5,8 | 10,2 | 14,9 | 22,1 | 25,8 | 26,2 | 28,9 |
| 99/00 | 23,6 | 19,2 | 11,1 | 7,1 | 3,8 | 7,2 | 11,2 | 15,8 | 20,8 | 20 | 27 | 26,4 |
| 00/01 | 21,9 | 15,6 | 12,2 | 9,2 | 8 | 7,8 | 15,2 | 14,5 | 19,2 | 25,5 | 28,4 | 27,5 |
| 2001/2002 | 22,9 | 21,5 | 11,2 | 6,2 | 6,2 | 8,5 | 12,6 | 14,6 | 19,6 | 25,6 | 26,8 | 24,2 |
| 2002/2003 | 21,6 | 17,2 | 11,2 | 8,4 | 6,4 | 6,2 | 10,6 | 14,1 | 18,5 | 24,4 | 29,8 | 27,6 |
| 2003/2004 | 21,9 | 19,4 | 12,5 | 7,2 | 6,8 | 9,6 | 11,2 | 13 | 15,5 | 22,4 | 26,2 | 27 |
| 2004/2005 | 20,2 | 20,2 | 10,6 | 8,5 | 4,7 | 4,9 | 11,5 | 14,6 | 21,5 | 23,9 | 28,5 | 25,8 |

**Les précipitations interannuelles cumulées aux stations de
Tébessa et Meskiana.**

| Années | Station de Tébessa | | Station de Meskiana | |
|-----------|--------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| | P (mm) | P (mm) cumulées | P (mm) | P (mm) cumulées |
| 1972/1973 | 625 | 625 | 525,4 | 525,4 |
| 1973/1974 | 303,1 | 928,1 | 337,6 | 862,1 |
| 1974/1975 | 359,8 | 1287,9 | 316 | 1178,1 |
| 1975/1976 | 394,1 | 1682 | 352,9 | 1531 |
| 1976/1977 | 382,5 | 2065,5 | 340,6 | 1871,6 |
| 1977/1978 | 327,1 | 2391,6 | 290,7 | 2161,3 |
| 1978/1979 | 302,1 | 2693,7 | 318,5 | 2464,4 |
| 1979/1980 | 374,9 | 3068,6 | 361,1 | 2839,3 |
| 1980/1981 | 325 | 3393,6 | 303,6 | 3164,3 |
| 1981/1982 | 321,3 | 3714,9 | 377,9 | 3485,6 |
| 1982/1983 | 284,7 | 3999,6 | 294,9 | 3770,3 |
| 1983/1984 | 251,8 | 4251,4 | 267,9 | 4022,1 |
| 1984/1985 | 342,2 | 4593,6 | 323,3 | 4364,3 |
| 1985/1986 | 337 | 4930,6 | 324,9 | 4701,3 |
| 1986/1987 | 299,9 | 5230,5 | 274,3 | 5001,2 |
| 1987/1988 | 305 | 5535,5 | 315 | 5306,2 |
| 1988/1989 | 351,9 | 5887,4 | 382,7 | 5658,1 |
| 1989/1990 | 473 | 6360,4 | 444,2 | 6131,1 |
| 1990/1991 | 534,7 | 6895,1 | 409,4 | 6665,8 |
| 1991/1992 | 422,5 | 7317,6 | 407,8 | 7088,3 |
| 1992/1993 | 316,6 | 7634,2 | 290,4 | 7404,9 |
| 1993/1994 | 228,5 | 7862,7 | 265,3 | 7633,4 |
| 1994/1995 | 254,5 | 8117,2 | 368,9 | 7887,9 |
| 1995/1996 | 550,4 | 8667,6 | 373,3 | 8438,3 |
| 1996/1997 | 207,4 | 8875 | 286,6 | 8261,2 |
| 1997/1998 | 356,4 | 9231,4 | 276,7 | 9002,1 |
| 1998/1999 | 413,9 | 9645,3 | 373,4 | 9416 |
| 1999/2000 | 438,5 | 10083,8 | 296,3 | 9854,5 |
| 2000/2001 | 219,3 | 10303,1 | 272,4 | 10073,8 |
| 2001/2002 | 354,7 | 10657,8 | 308,1 | 10428,5 |
| 2002/2003 | 488,2 | 11146 | 576,8 | 10916,7 |
| 2003/2004 | 544,4 | 11690,4 | 406,1 | 11461,1 |
| 2004/2005 | 308,7 | 11999,1 | 384 | 11769,8 |

Valeurs mensuelles de la radiation globale (Iga) pour les latitudes intermédiaires.

| Latitude Nord | 0° | 10° | 20° | 30° | 40° | 50° | 60° | 70° | 80° |
|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|------|
| janvier | 858 | 759 | 642 | 508 | 364 | 222 | 87.5 | 5 | 0 |
| février | 888 | 821 | 732 | 624 | 495 | 360 | 215 | 82 | 2.9 |
| mars | 890 | 873 | 834 | 764 | 673 | 562 | 432 | 289 | 146 |
| avril | 862 | 894 | 902 | 880 | 833 | 764 | 676 | 577 | 508 |
| mai | 816 | 885 | 930 | 950 | 944 | 920 | 880 | 860 | 889 |
| juin | 790 | 873 | 934 | 972 | 985 | 983 | 970 | 992 | 0.42 |
| juillet | 804 | 879 | 930 | 955 | 958 | 938 | 908 | 905 | 945 |
| août | 833 | 880 | 902 | 891 | 858 | 800 | 728 | 651 | 610 |
| septembre | 875 | 872 | 843 | 788 | 710 | 607 | 487 | 341 | 213 |
| octobre | 880 | 830 | 755 | 658 | 536 | 404 | 262 | 119 | 17.5 |
| novembre | 860 | 767 | 656 | 528 | 390 | 246 | 111 | 17 | 0 |
| décembre | 842 | 735 | 610 | 469 | 323 | 180 | 55.5 | 0 | 0 |

ANNEXE III
(HYDROGEOLOGIE)

Détermination de la transmissivité de la nappe :

La détermination de la transmissivité s'est basée sur l'interprétation graphique de l'approximation logarithmique de **C.E.Jacob**.

$$s = \frac{0.183.Q}{T} \log \frac{2.25T.t}{R^2.S}$$

où :

s : rabattements en (m) ;

T : transmissivité en (m²/s) ;

Q : débit de pompage en (m³/s) ;

S : coefficient d'emmagasinement ;

t : temps écoulé depuis le début de pompage en (secondes) ;

R : distance entre le piézomètre et le forage en (m).

La transmissivité est déterminée à partir de la pente de la droite obtenue $d = f(\log t)$, pour un cycle logarithmique, par la formule suivante :

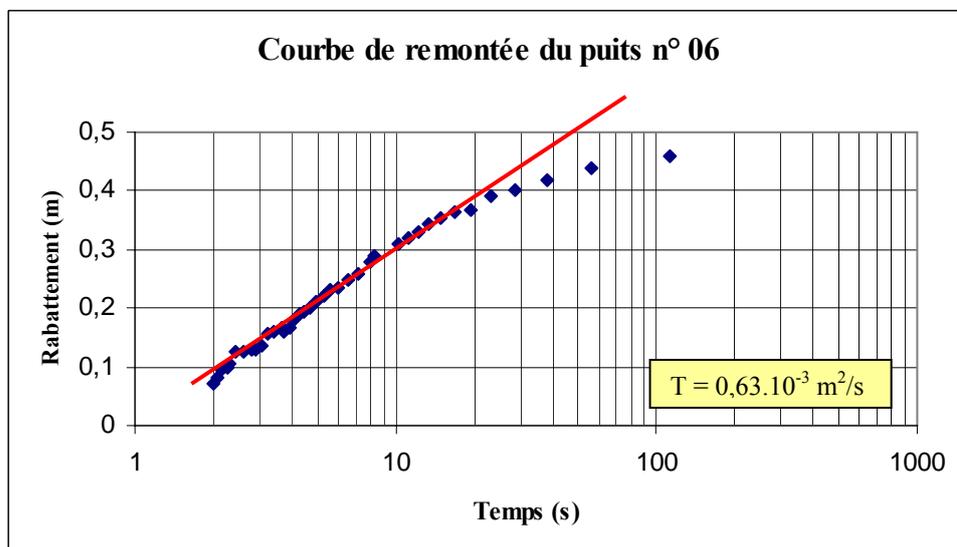
$$T = \frac{0.183.Q}{C}$$

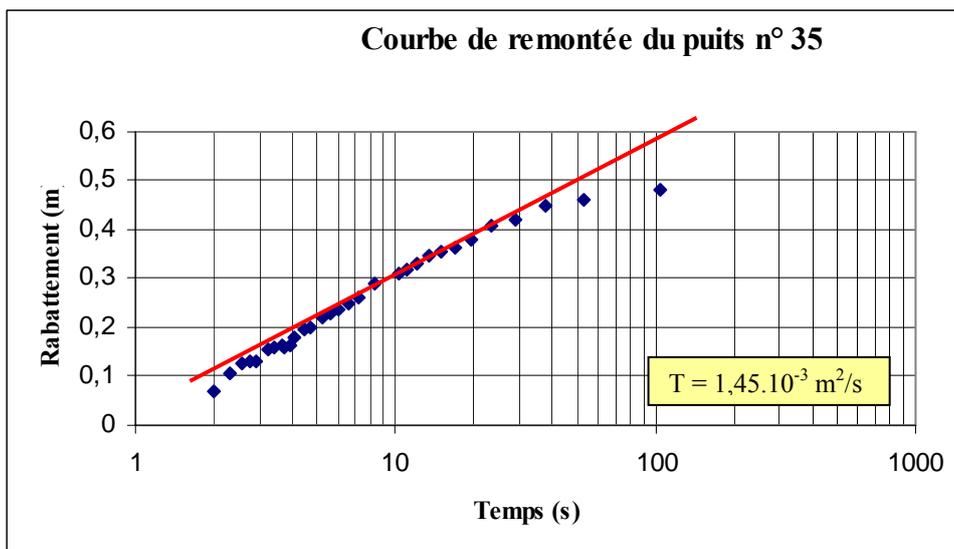
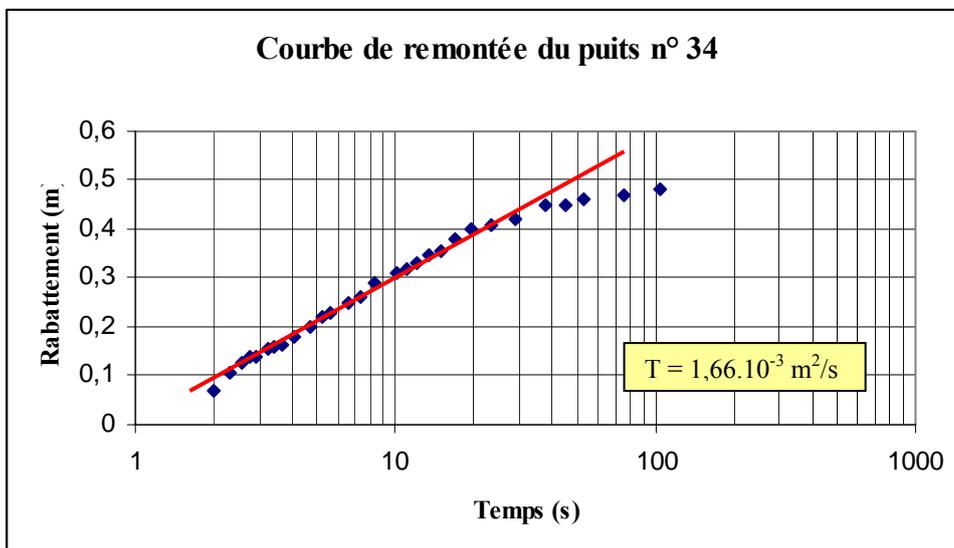
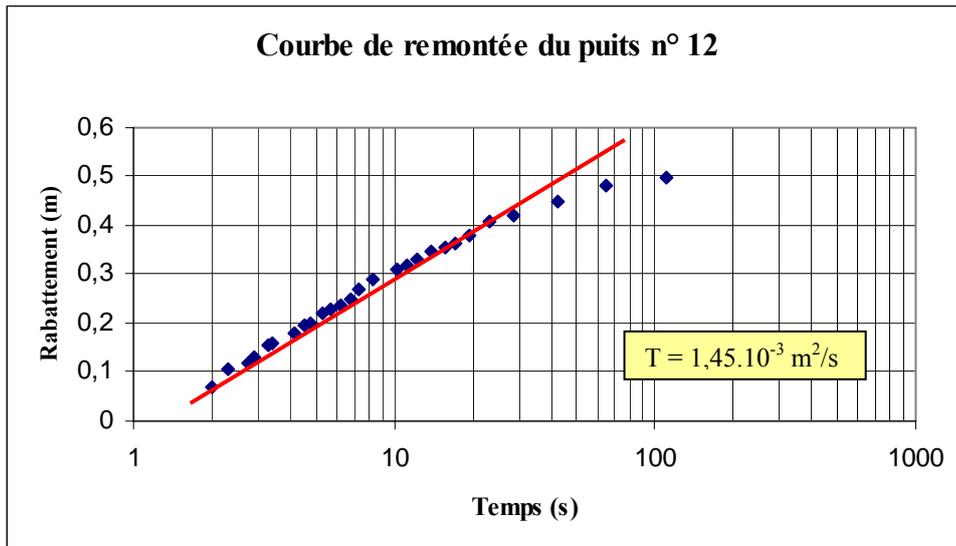
où

T : transmissivité en (m²/s)

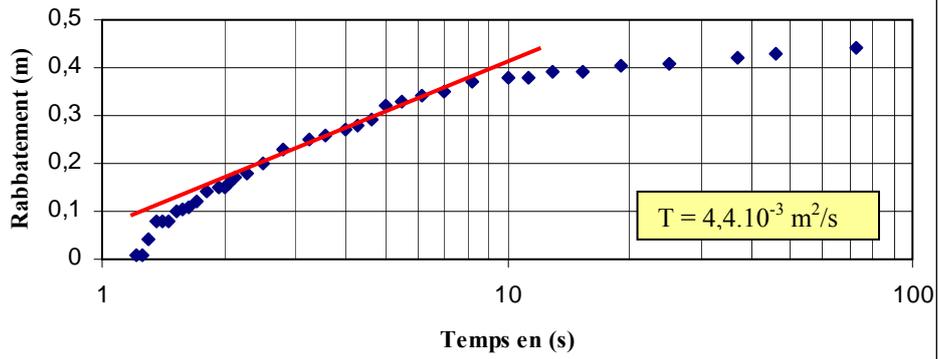
Q : débit de pompage (m³/s)

C : pente de la droite.

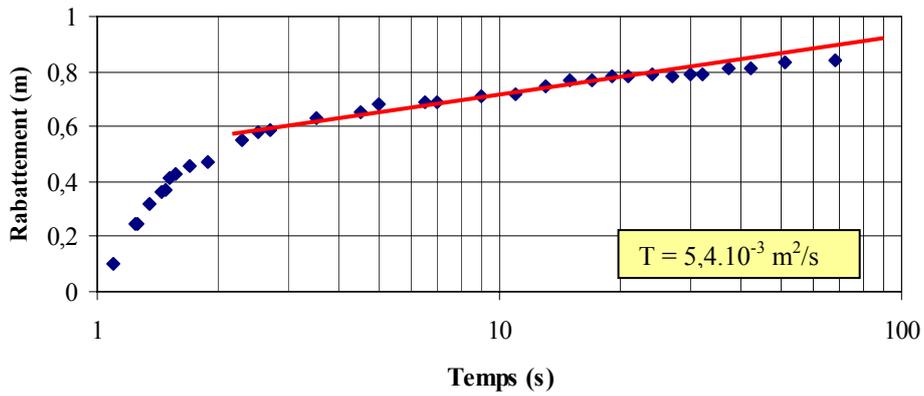




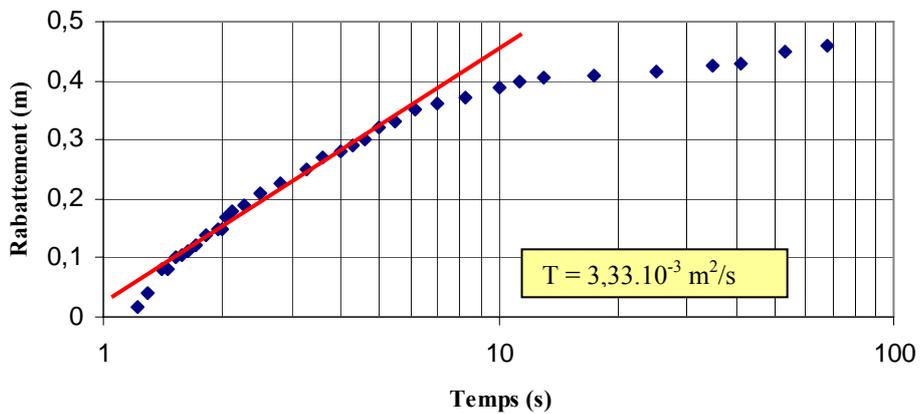
Courbe de remontée du puits n° 38.

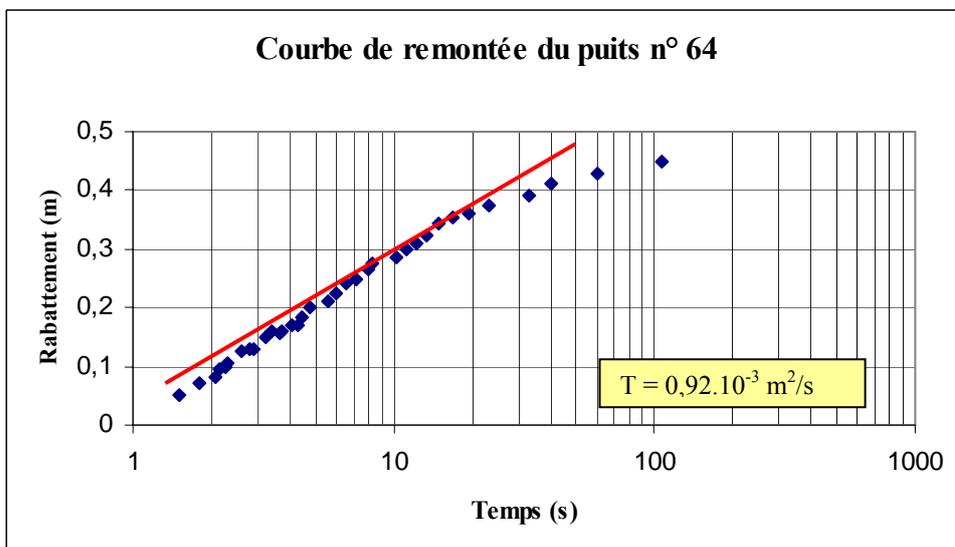
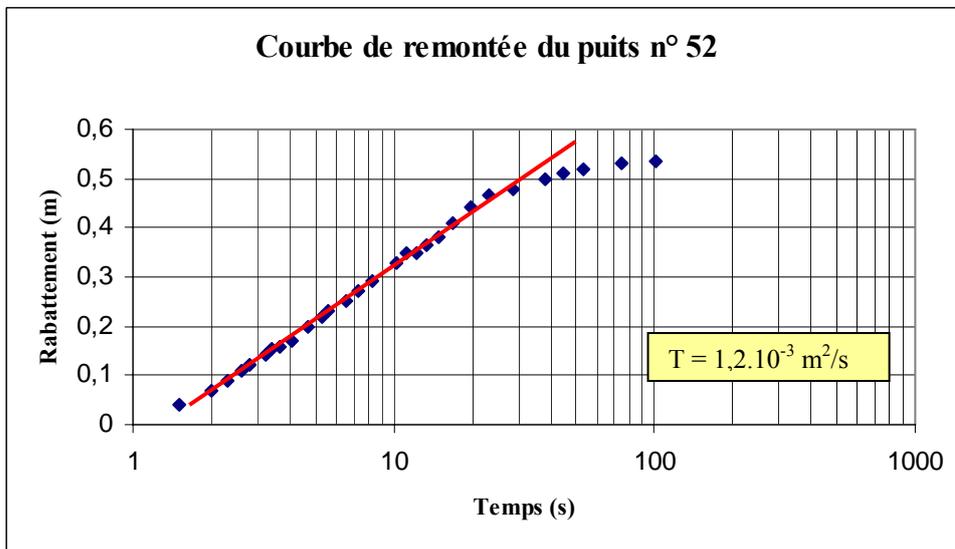
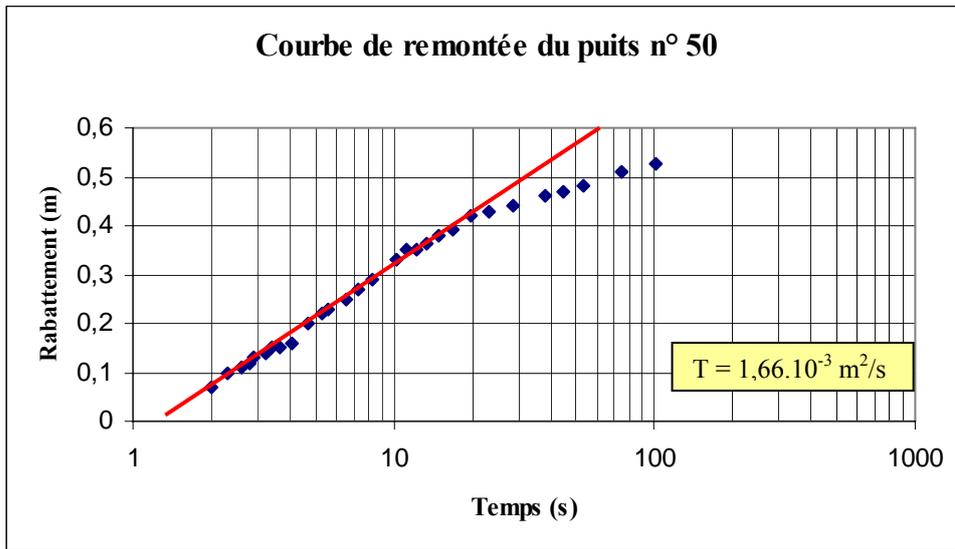


Courbe de remontée du puits n° 40



Courbe de remontée du puits n° 47





SONDAGE MK₂ (bis) N° Fiche Forages N° INVENTAIRE
 carte DELAA Fle No. -204
 Date des travaux 26.10.85 à 24.12.85 Long: 939.750 X
 Echelle de la coupe 1:1000 Lat: 256.000 Y Z= 929m

| Profondeurs en mètres | Tubage et cimentation | plan de coupe | Echelle | Coupe (en mètres) | DESCRIPTION GEOLOGIQUE | Stratig. |
|--------------------------|-----------------------|---------------|---------|----------------------|---|---|
| 0 | T.C. φ 22 | | | | sol - Argile brune - Terre arable | Alluvion récente Quaternaire |
| 6 | T.P. φ 15 3/8 | | | | Graviers et fragments de Calcaire (blanche) | |
| 20 | T.C. φ 15 3/8 | | | | Graviers et fragments de Calcaire (blanche) avec un peu d'argile brune | |
| 30 | T.P. φ 15 3/8 | | | | Fragments de Calcaire avec quelque fragments 'décomposés' | |
| 44 | T.C. φ 15 3/8 | | | | Argile brune, rougeâtre et grisâtre rarement les fragments de Calcaire | |
| 45 | T.C. φ 15 3/8 | | | | Fragments de Calcaire (blanche) | |
| 75 | T.P. φ 15 3/8 | | | | Argile brune avec un peu de fragments de Calcaire | |
| 80 | Jh. | | | | Argile brune | |
| 84 | Jh. | | | | Argile grisâtre | |
| 103 | Jh. | | | | Argile grisâtre avec un peu de fragments de calcaire | |
| 111 | T.C. φ 15 3/8 | | | | Fragments de calcaire mixte avec d'argile grisâtre | |
| 123 | T.Psh φ 15 3/8 | | | | Argile grisâtre avec fragments de Calcaire | |
| 129 | Sabot | | | | | |
| 130 | | | | | | |

MIS A JOUR PAR M^r K. Rao Goli, Hydrogéologue

SONDAGE MESKIANA/MK4 (F4)

N° 473 / F12

Carte : 1/50 000 Meskiana

Date des travaux : 12.77 / 01.78

Long. : 247.55 x

z855

Echelle de la coupe : 1 / 1000

Latit. : 268.0 y

| Profondeurs et cotes | Tubages et Cimentation | Plans d'essai | Essai | Coupe | DESCRIPTION GÉOLOGIQUE | Strat. |
|----------------------|---|---------------|-------|-------|--|------------------------------|
| | <p>G 20 T.P. 1300/0 17 1330/0 15 1340/0 13 1350/0 11 1360/0 9 1370/0 7 1380/0 5 1390/0 3 1400/0 1 1410/0 CIMENT</p> | | | | <p>gravier et argile</p> <p>marne</p> <p>53 - marne calcaire</p> <p>marne</p> <p>101</p> | <p>plioy</p> <p>Turonien</p> |

mis à jour par J.J. BITEAU le 06/78

SONDAGE

MESKIANA A3

N°

177

Carte: MESKIANA 1/50000°

Date des travaux: Du 05/04/86 au 12/07/86

Long.: X: 948,450

Echelle de la coupe: 1/1000°

Latit.: Y: 271,100

| Profondeurs et cotes | Tablages et Elementations | Plans d'eau | Plans | Coupe | DESCRIPTION GEOLOGIQUE | Prof |
|----------------------|---------------------------|-------------|-------|-------|---|------|
| 0 | RG 420 | | | | Argile jaune avec un passage de marne grise entre 14 et 18m. | |
| 10 | | | | | | 18 |
| 20 | | | | | | |
| 30 | TC | | | | Calcaire gris | 38 |
| 40 | | | | | | |
| 50 | TP | | | | Marne grise | |
| 60 | TC | | | | | 60 |
| 70 | | | | | | |
| 80 | TP | | | | Intercalation de marnes, marne-calcaire et parfois calcaire gris. | |
| 90 | | | | | | |
| 100 | reduction | | | | | |
| 110 | | | | | | |
| 120 | TP | | | | | 125 |
| 130 | | | | | Calcaire gris | 136 |
| 140 | TC | | | | | |
| 150 | TP | | | | Marne-calcaire avec quelques bancs métriques de calcaires gris (176-177m), (179-180m) et (186-187m) | |
| 160 | | | | | | |
| 170 | TC | | | | | |
| 180 | | | | | | |
| 190 | TP | | | | | 192 |
| 200 | sabot | | | | Marne grise | 200 |

0m 1000

10

SONDAGE

CD-7

N°

Carte: HESKIANA N° 377

Date des travaux: 2-11-86 ou 20-11-86

Long: X 948 100

Z 900

Echelle de la coupe: 1/1000

Latit: Y 264 850

| Profondeurs et cotes | Tubages et Orientation | Niveau d'eau (bas) | Coupe | DESCRIPTION GÉOLOGIQUE | Ep |
|----------------------|------------------------|--------------------|-------|---|------|
| 0 | | | | argile jaune gravéreuse | 2m |
| 10 | | | | calcaire beige | 16m |
| 20 | | | | gravier: calcaires avec gros galets | 30m |
| 30 | | | | calcaire beige avec un très faible passage d'argile | 47m |
| 40 | | | | | |
| 50 | | | | | |
| 60 | | | | | |
| 70 | | | | argile et marne grise légèrement gypseuse | 100m |
| 80 | | | | | |
| 90 | | | | | |
| 100 | | | | | |

mis à jour par

ls

SONDAGE *B10 bis*
 Carte: *N° 177*
 Date des travaux: *09/93 au 11/93*
 Echelle de la coupe: *1:1000*

x *95,350*
 y *265600* 912

| Profondeur et cotes | Tubages et cimentations | Plans d'eau | Echelle | Coupe | DESCRIPTION GEOLOGIQUE | Etage |
|---------------------|-------------------------|-------------|---------|-------|-------------------------|----------------|
| 0 | | | 7 | | ARGILE JAUNE GRAVILEUSE | Q ¹ |
| 10 | | | | | 20 | 30 |
| 40 | | | 54 | | perte totale | |
| 60 | | | | | | |
| 70 | | | | | | |
| 80 | | | | | | |
| 90 | | | | | | |
| 100 | | | 106 | | | TURONIEN |
| 110 | | | | | | |

SONDAGE

FORAGE C 3 (NESKIANA)

N° Fichier Forages

N° Inventaire

Site : F'KIRINA N°176

Dates des travaux : 25-06-87 ou 19-07-87

Long : X 946.260

Profil de la coupe :

Lat : Y 268.150 Z

| Profondeur (m) | Tubages et Cimentation | Plans d'eau | Echant. | Coupe | DESCRIPTION GEOLOGIQUE | Etage |
|----------------|------------------------|-------------|---------|-------|--|-------|
| 0 | | | | | Argile sableuse graveleuse | 01m |
| 10 | | | | | Grovier et galets calcaires | 04m |
| 20 | | | | | Morne jaune | 20m |
| 30 | | | | | calcaire blanc | 25m |
| 40 | | | | | Morne grise | 50m |
| 50 | | | | | Morne-calcaire avec un passage marnéux | 164m |
| 60 | | | | | | |
| 70 | | | | | | |
| 80 | | | | | | |
| 90 | | | | | | |
| 100 | | | | | | |
| 110 | | | | | | |
| 120 | | | | | | |
| 130 | | | | | | |
| 140 | | | | | | |
| 150 | | | | | Intercolation de morne et morne-calcaire | 200m |
| 160 | | | | | | |
| 170 | | | | | | |
| 180 | | | | | | |
| 190 | | | | | | |
| 200 | | | | | | |

mis à jour par le

SONDAGE MESKIANA MK₁

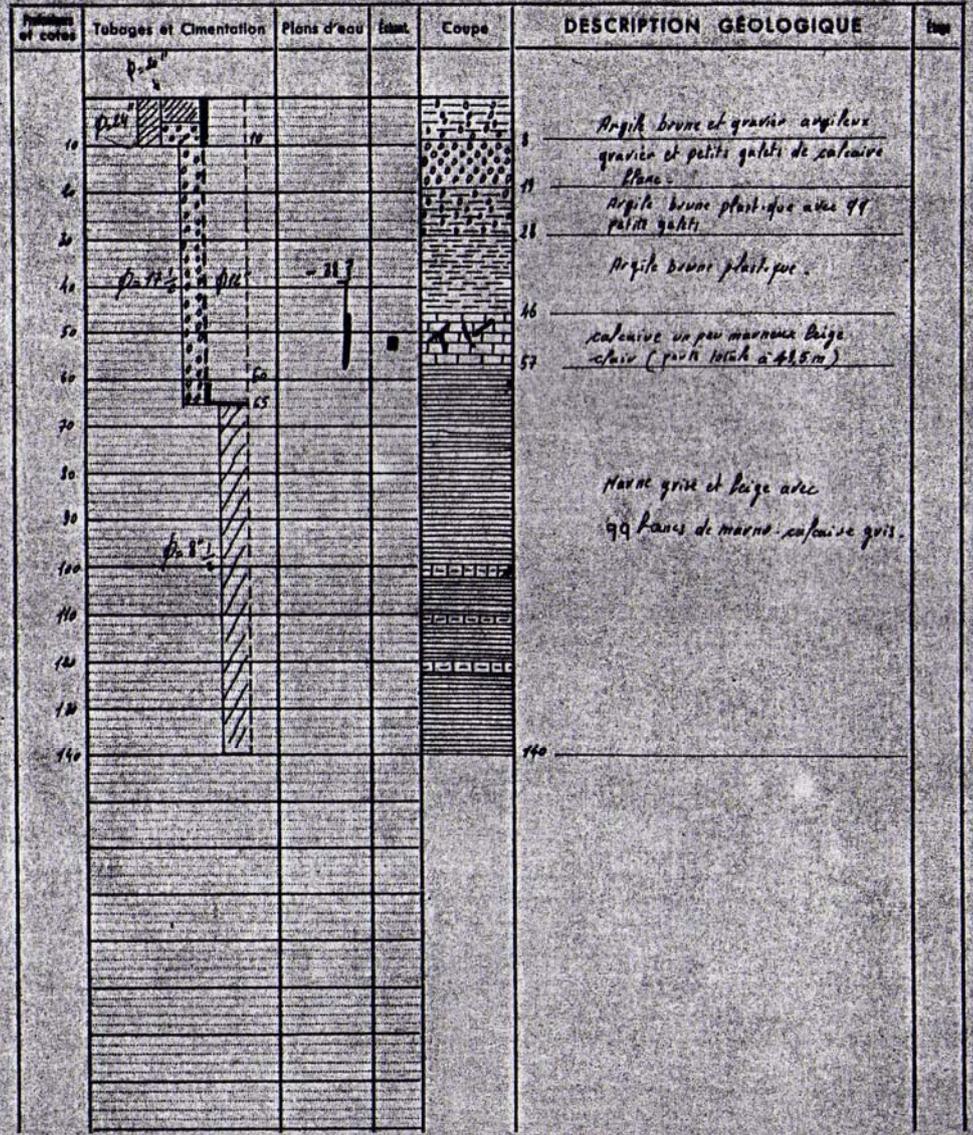
Carte: MESKIANA 1/50000 N° 177

Date des travaux: du 21.3.22 au 18.3.22

Echelle de la coupe: 1/1000

Long: X 947.800 Z=860

Latit: Y 278.000



mis à jour par GAUD

le 16-16-22

ANNEXE IV
(HYDROCHIMIE)

Stratégie d'échantillonnage :

Le choix du réseau d'échantillonnage a été fait en se basant sur la nature lithologique de la nappe aquifère, les conditions hydrodynamiques de cette dernière, le réseau hydrographique, et les sources potentielles de pollutions.

La fréquence des prélèvements a été réalisée selon un pas saisonnier (hautes et basses eaux) pendant 03 années (2002,2003 et 2004), ce qui nous permet de suivre l'évolution de la qualité des eaux, sous l'effet des facteurs climatiques (Précipitations et évaporation), et détecter la pollution de la nappe.

Prélèvement et conservation des échantillons :

Les échantillons ont été prélevés en utilisant un échantillonneur dont le câble dépasse 200 m, puis placés dans des flacons de plastique de 1litre, préalablement rincés à l'eau de l'échantillon. Ces derniers n'ont pas été acidifiés car leur analyse se fait dans l'immédiat au laboratoire de CERAD. Les échantillons sont conservés dans une glacière portative pour garder une température inférieure à 4°C, jusqu'à l'arrivée au laboratoire. On note que les échantillons analysés au laboratoire central de chimie, université de Damas ont été acidifiés à un PH inférieur à 2 avec de l'acide nitrique.

Analyses et mesures paramètres physico-chimiques:

Mesures in situ :

Des paramètres physico-chimiques ont fait l'objet de mesure sur le terrain, en utilisant une valise multi paramètre de marque Multi340i (WTW), tels que le PH, la conductivité électrique et l'oxygène dissous.

Analyses aux laboratoires :

On a procédé à une analyse complète de tous les éléments majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} et HCO_3^-). Les métaux lourds : Fe^{3+} , Mn^{2+} , Al^{3+} , Zn^{2+} , B , Sr^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} et Cu^{2+} ont fait l'objet d'analyse pour quelques campagnes seulement. Les polluants résultants des activités agricoles ont été le sujet d'un suivi particulier (NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ et PO_4^{3-}).

Les méthodes analytiques utilisées sont :

-Méthode colorimétrique pour les éléments (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} , F et Fe total).

-Méthode de spectrophotométrie d'absorption atomique : (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Sr^{2+} , Mn^{2+} , Al^{3+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} et Cu^{2+}). On signale que l'analyse spectrophotométrique a été effectuée, au laboratoire du CERAD en utilisant un spectrophotomètre DR 2000 (HACH) et au laboratoire centrale de chimie à l'université de Damas (Syrie) en utilisant l'appareil Varian Spectra 220.

INTERPRETATIONS DES DONNEES :

Analyse en Composantes Principales (logiciel SPAD)

L'A.C.P. est une méthode factorielle utilisant des combinaisons linéaires entre les variables pour analyser les données. Cette méthode, qui consiste à la réduction des données, nous permet de présenter géométriquement les variables et les observations.

La réduction du nombre de caractères ne se fait pas par une simple sélection de certains d'entre eux, mais par la construction de nouveaux caractères synthétiques obtenus en combinant les caractères initiaux au moyen des facteurs. Cette réduction ne sera possible que si les variables initiales présentent des coefficients de corrélation non nuls.

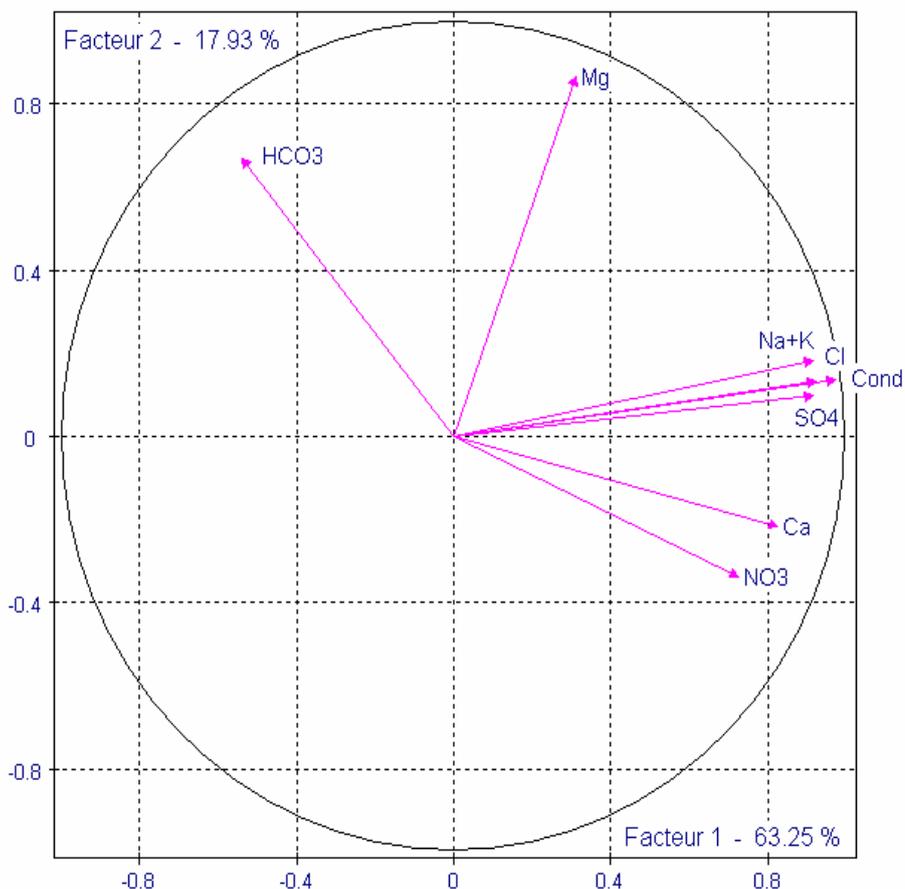
L'interprétation des résultats des variables se fait sur le cercle de corrélation, Les variables qui se situent près du cercle, et qui sont proches l'une de l'autre présentent une forte relation

linéaire entre elles. Par contre les points qui sont à l'opposé, présentent une relation inverse. La projection des variables nous permet d'interpréter les composantes principales et de repérer rapidement les groupes de caractères liés entre eux ou opposés, à condition que les points soient proches de la circonférence. Par contre la projection des individus sur les plans, nous permet d'indiquer quels sont les individus qui caractérisent le plus fortement un axe.

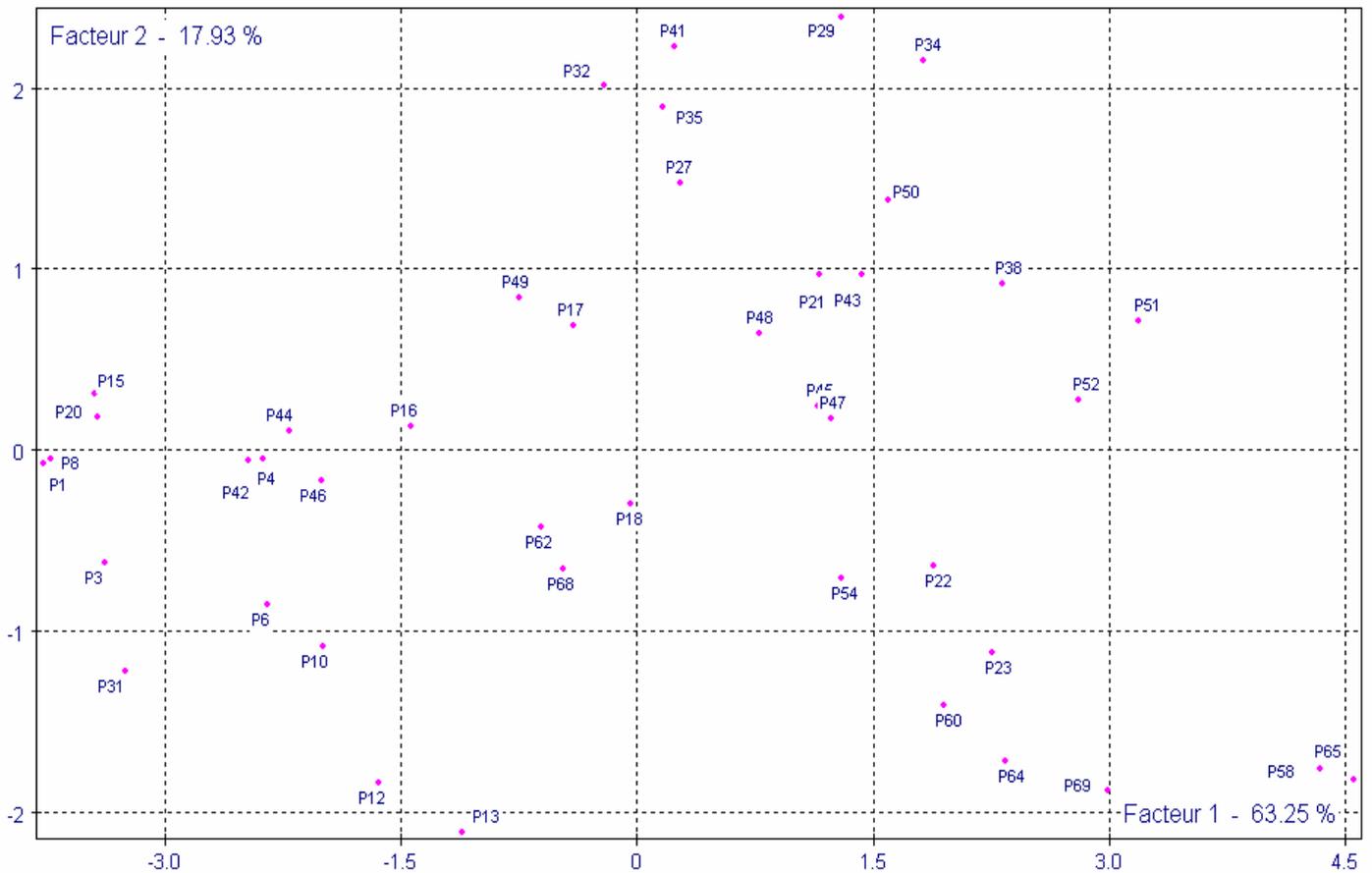
Application de l'ACP sur la campagne de mars 2002 :

Matrice de corrélation entre les variables de la campagne de mars 2002.

| | Cl ⁻ | SO ₄ ²⁻ | HCO ₃ ⁻ | NO ₃ ⁻ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Na ⁺ +K ⁺ | Cond |
|---------------------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------|------------------|---------------------------------|------|
| Cl ⁻ | 1,00 | | | | | | | |
| SO ₄ ²⁻ | 0,77 | 1,00 | | | | | | |
| HCO ₃ ⁻ | -0,43 | -0,39 | 1,00 | | | | | |
| NO ₃ ⁻ | 0,64 | 0,48 | -0,58 | 1,00 | | | | |
| Ca ²⁺ | 0,62 | 0,90 | -0,46 | 0,50 | 1,00 | | | |
| Mg ²⁺ | 0,38 | 0,33 | 0,25 | 0,01 | 0,01 | 1,00 | | |
| Na ⁺ +K ⁺ | 0,93 | 0,76 | -0,38 | 0,66 | 0,59 | 0,42 | 1,00 | |
| Cond | 0,89 | 0,94 | -0,39 | 0,61 | 0,83 | 0,38 | 0,89 | 1,00 |



Espace des variables de la campagne de mars 2002.

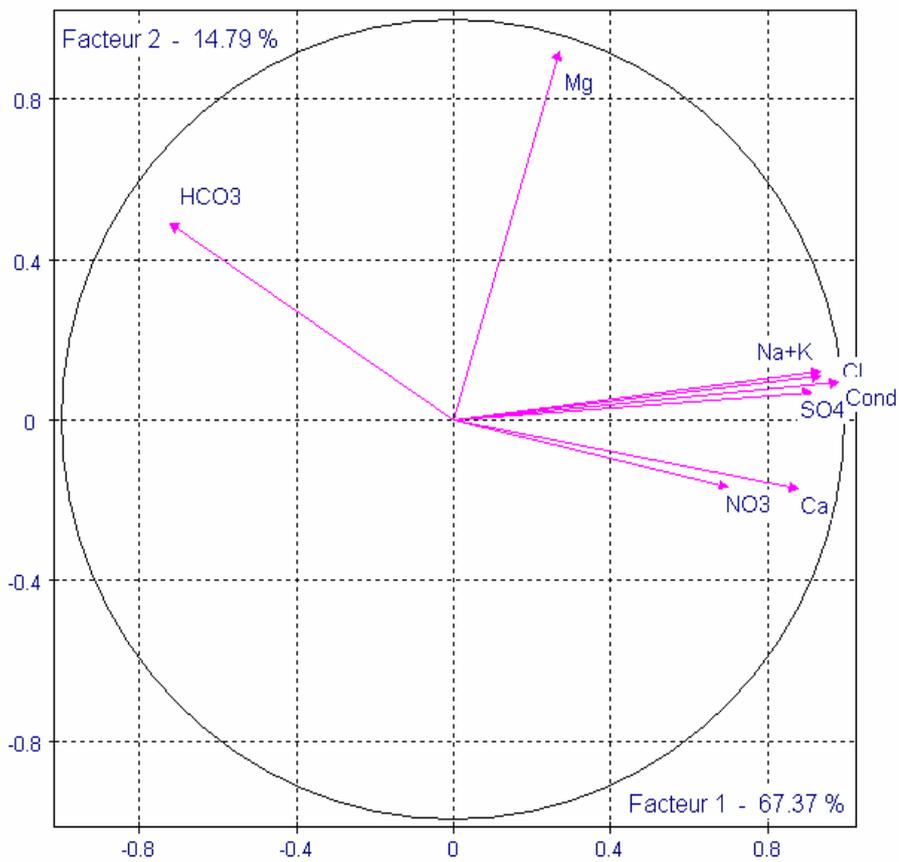


Espace des individus de la campagne de mars 2002.

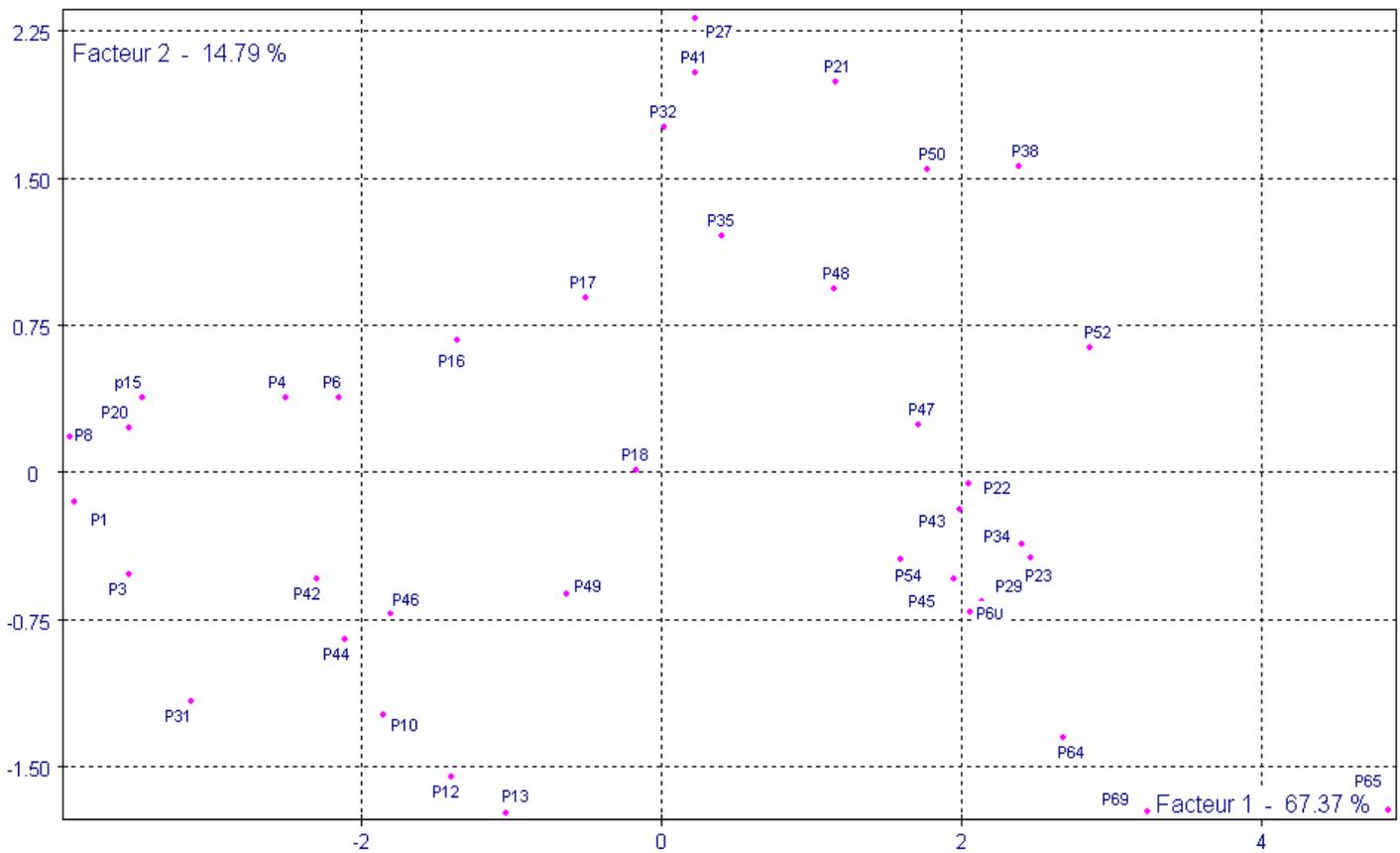
Application de l'ACP sur la campagne de juillet 2002 :

Matrice de corrélation entre les variables de la campagne de juillet 2002.

| | Cl ⁻ | SO ₄ ²⁻ | HCO ₃ ⁻ | NO ₃ ⁻ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Na ⁺ +K ⁺ | Cond |
|---------------------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------|------------------|---------------------------------|------|
| Cl ⁻ | 1,00 | | | | | | | |
| SO ₄ ²⁻ | 0,77 | 1,00 | | | | | | |
| HCO ₃ ⁻ | -0,63 | -0,57 | 1,00 | | | | | |
| NO ₃ ⁻ | 0,65 | 0,45 | -0,55 | 1,00 | | | | |
| Ca ²⁺ | 0,71 | 0,93 | -0,62 | 0,51 | 1,00 | | | |
| Mg ²⁺ | 0,33 | 0,28 | 0,14 | 0,10 | 0,05 | 1,00 | | |
| Na ⁺ +K ⁺ | 0,94 | 0,80 | -0,60 | 0,64 | 0,70 | 0,32 | 1,00 | |
| Cond | 0,92 | 0,94 | -0,62 | 0,60 | 0,88 | 0,32 | 0,93 | 1,00 |



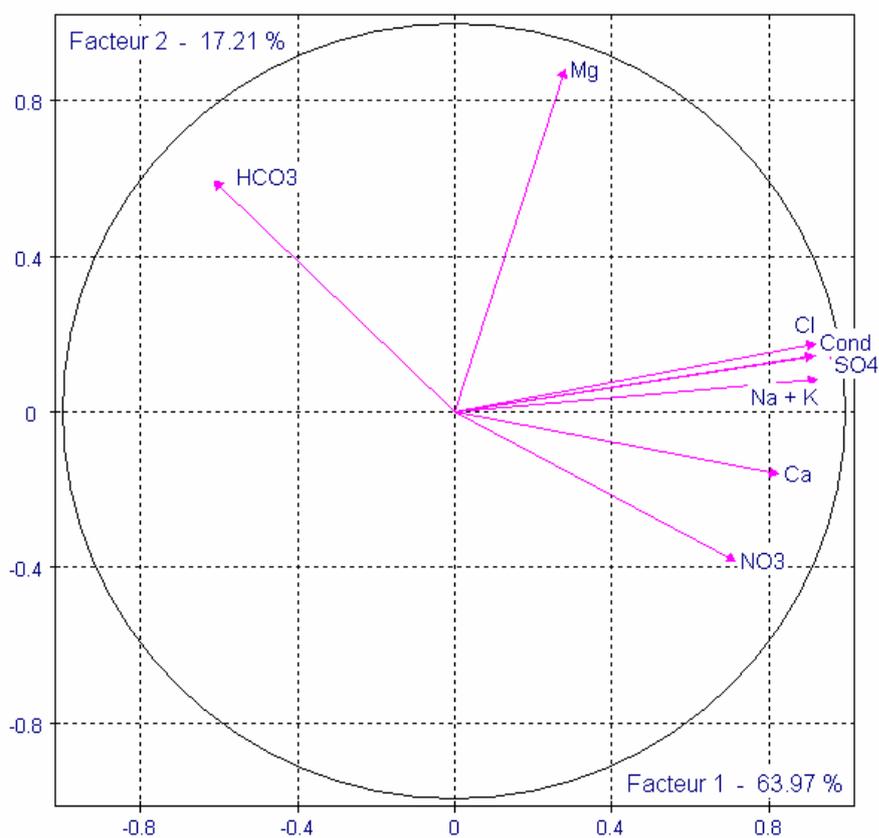
Espace des variables de la campagne de juillet 2002.



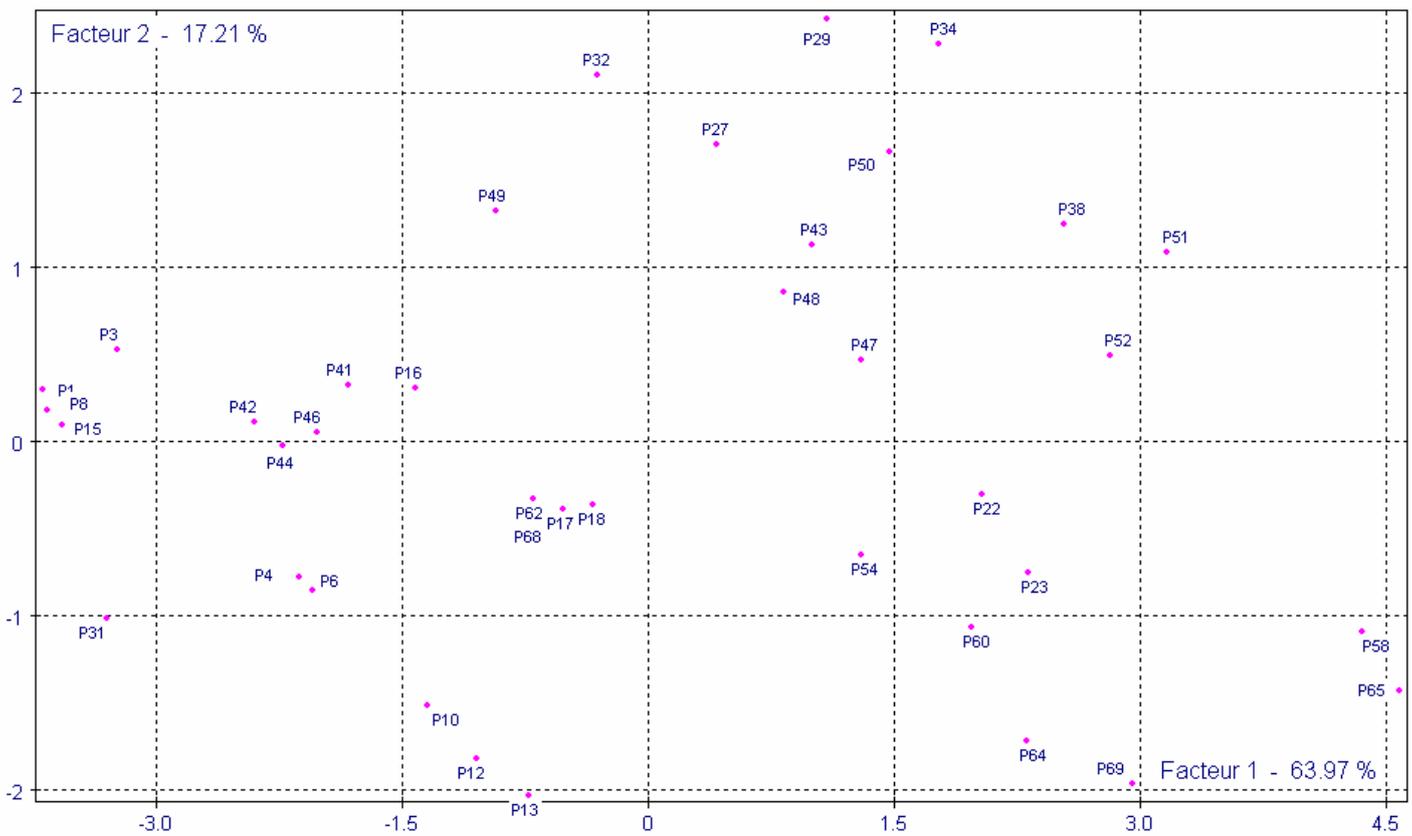
Espace des individus de la campagne de juillet 2002.

Application de l'ACP sur la campagne de mars 2003 :
Matrice de corrélation entre les variables de la campagne de mars 2003.

| | Cl ⁻ | SO ₄ ²⁻ | HCO ₃ ⁻ | NO ₃ ⁻ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Na ⁺ +K ⁺ | Cond |
|---------------------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------|------------------|---------------------------------|------|
| Cl ⁻ | 1,00 | | | | | | | |
| SO ₄ ²⁻ | 0,76 | 1,00 | | | | | | |
| HCO ₃ ⁻ | -0,44 | -0,45 | 1,00 | | | | | |
| NO ₃ ⁻ | 0,60 | 0,47 | -0,58 | 1,00 | | | | |
| Ca ²⁺ | 0,61 | 0,90 | -0,50 | 0,48 | 1,00 | | | |
| Mg ²⁺ | 0,37 | 0,35 | 0,20 | -0,05 | 0,01 | 1,00 | | |
| Na ⁺ +K ⁺ | 0,95 | 0,74 | -0,51 | 0,70 | 0,58 | 0,33 | 1,00 | |
| Cond | 0,92 | 0,95 | -0,46 | 0,58 | 0,84 | 0,36 | 0,89 | 1,00 |



Espace des variables de la campagne de mars 2003.

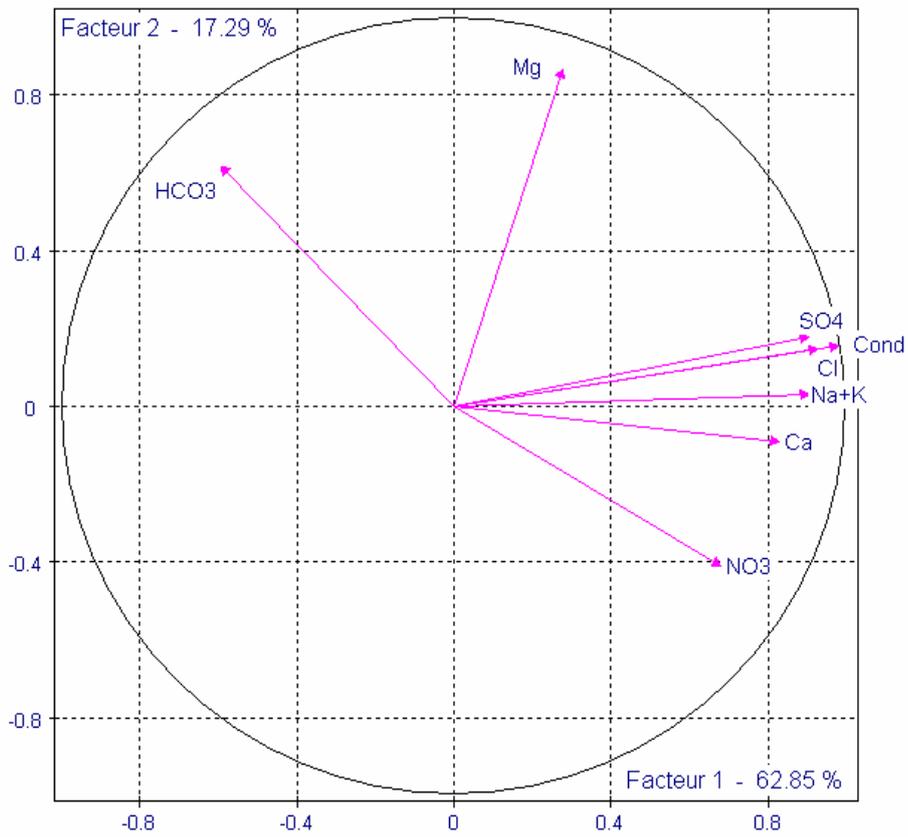


Espace des individus de la campagne de mars 2003.

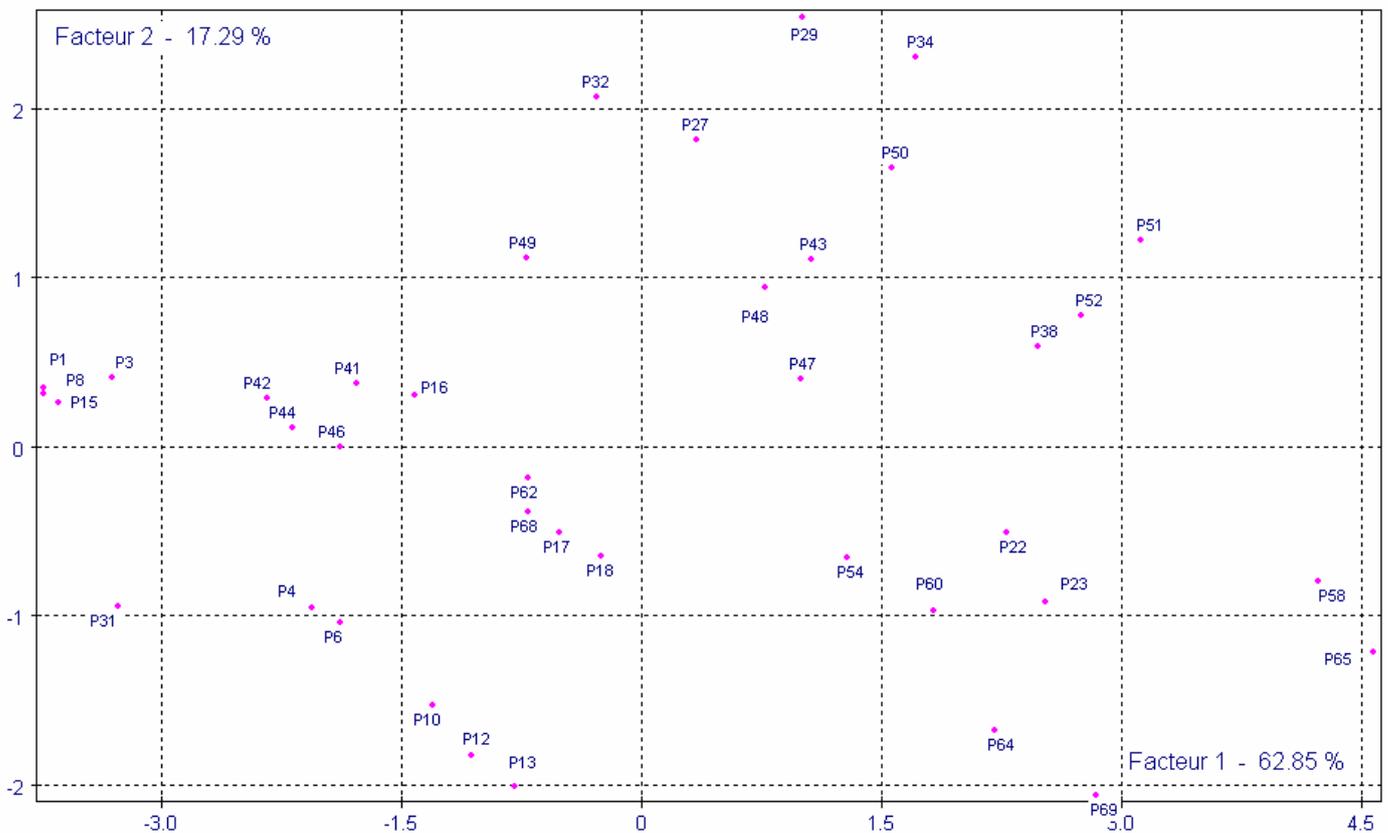
Application de l'ACP sur la campagne de juillet 2003 :

Matrice de corrélation entre les variables de la campagne de juillet 2003.

| | Cl ⁻ | SO ₄ ²⁻ | HCO ₃ ⁻ | NO ₃ ⁻ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Na ⁺ +K ⁺ | Cond |
|---------------------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------|------------------|---------------------------------|------|
| Cl ⁻ | 1,00 | | | | | | | |
| SO ₄ ²⁻ | 0,76 | 1,00 | | | | | | |
| HCO ₃ ⁻ | -0,44 | -0,42 | 1,00 | | | | | |
| NO ₃ ⁻ | 0,58 | 0,43 | -0,56 | 1,00 | | | | |
| Ca ²⁺ | 0,63 | 0,92 | -0,47 | 0,43 | 1,00 | | | |
| Mg ²⁺ | 0,36 | 0,35 | 0,22 | -0,05 | 0,03 | 1,00 | | |
| Na ⁺ +K ⁺ | 0,95 | 0,68 | -0,51 | 0,67 | 0,56 | 0,29 | 1,00 | |
| Cond | 0,93 | 0,95 | -0,45 | 0,55 | 0,85 | 0,35 | 0,87 | 1,00 |



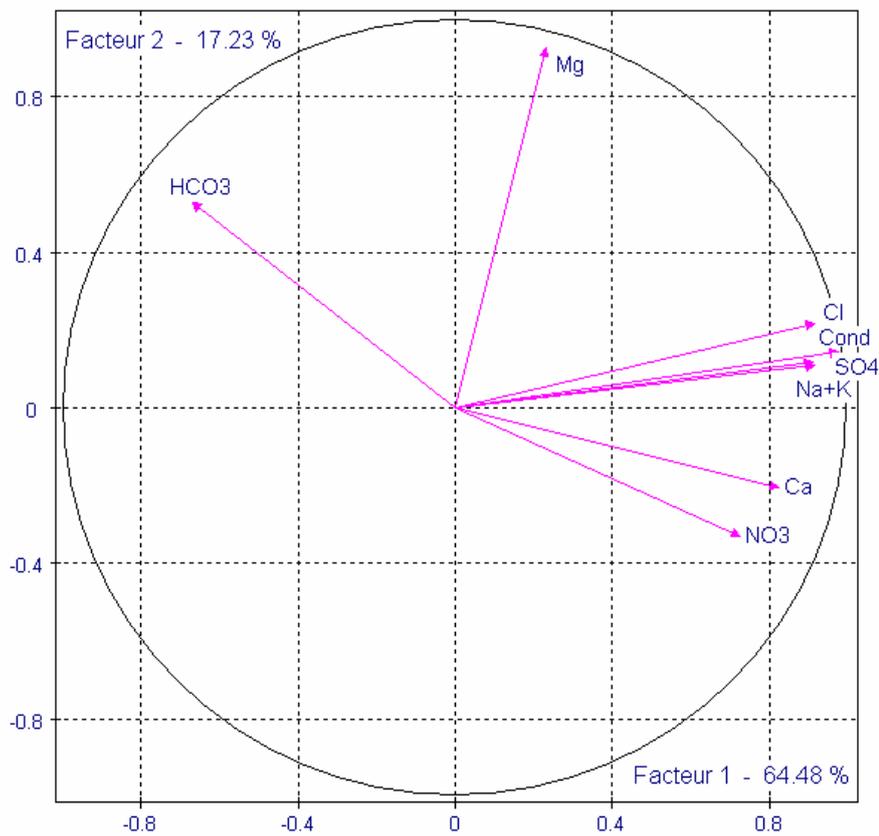
Espace des variables de la campagne de juillet 2003.



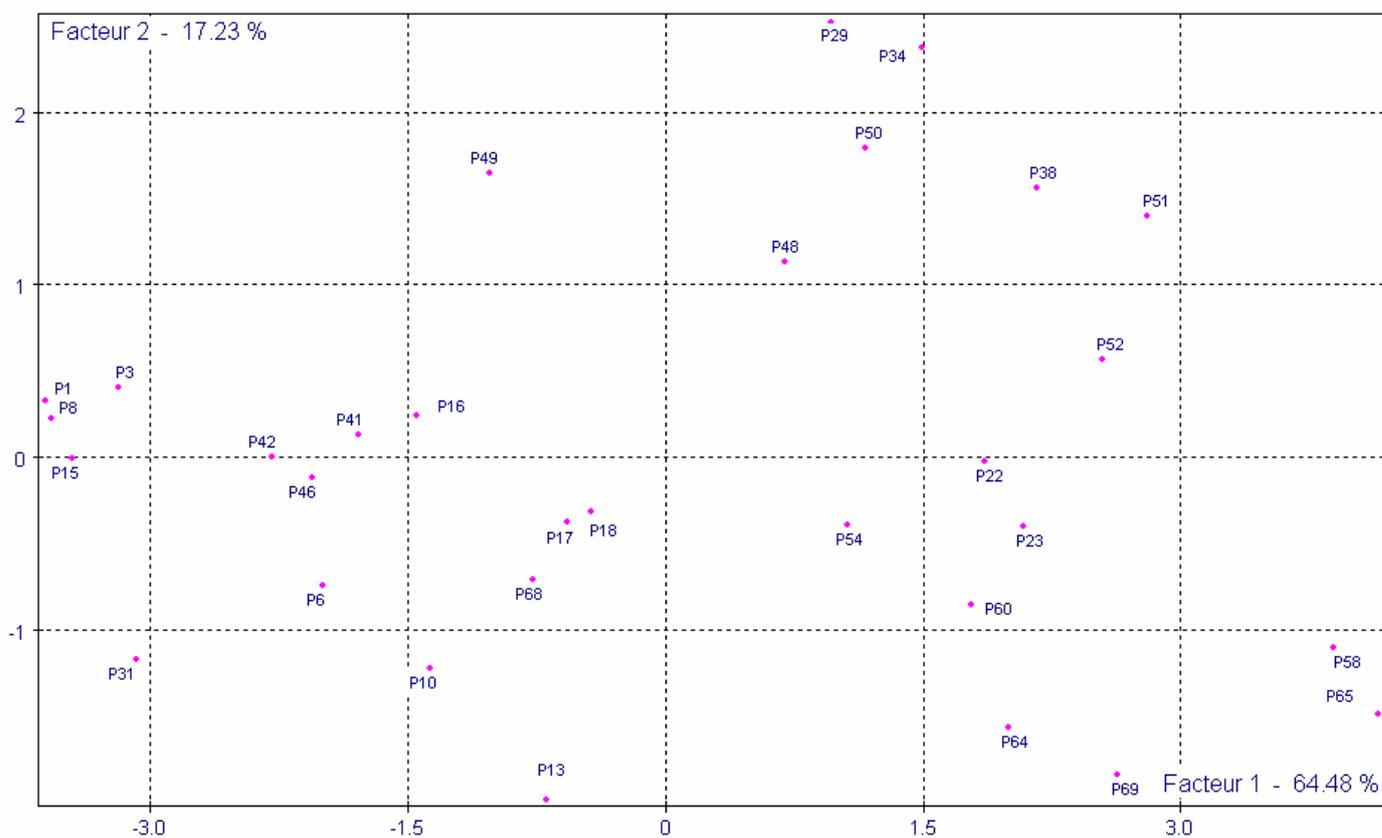
Espace des individus de la campagne de juillet 2003.

Application de l'ACP sur la campagne de mars 2004 :
Matrice de corrélation entre les variables de la campagne de mars 2004.

| | Cl ⁻ | SO ₄ ²⁻ | HCO ₃ ⁻ | NO ₃ ⁻ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Na ⁺ +K ⁺ | Cond |
|---------------------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------|------------------|---------------------------------|------|
| Cl ⁻ | 1,00 | | | | | | | |
| SO ₄ ²⁻ | 0,75 | 1,00 | | | | | | |
| HCO ₃ ⁻ | -0,49 | -0,52 | 1,00 | | | | | |
| NO ₃ ⁻ | 0,63 | 0,48 | -0,57 | 1,00 | | | | |
| Ca ²⁺ | 0,60 | 0,91 | -0,55 | 0,49 | 1,00 | | | |
| Mg ²⁺ | 0,38 | 0,30 | 0,22 | -0,09 | -0,05 | 1,00 | | |
| Na ⁺ +K ⁺ | 0,95 | 0,72 | -0,56 | 0,71 | 0,56 | 0,29 | 1,00 | |
| Cond | 0,92 | 0,95 | -0,53 | 0,60 | 0,84 | 0,32 | 0,88 | 1,00 |



Espace des variables de la campagne de mars 2004.

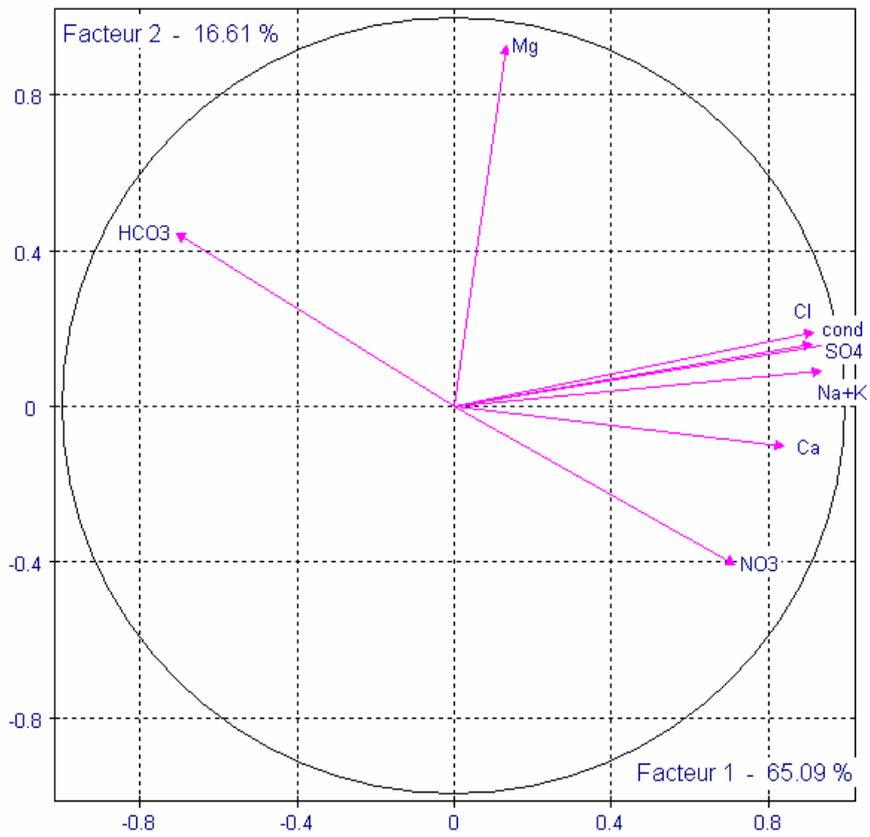


Espace des individus de la campagne de mars 2004.

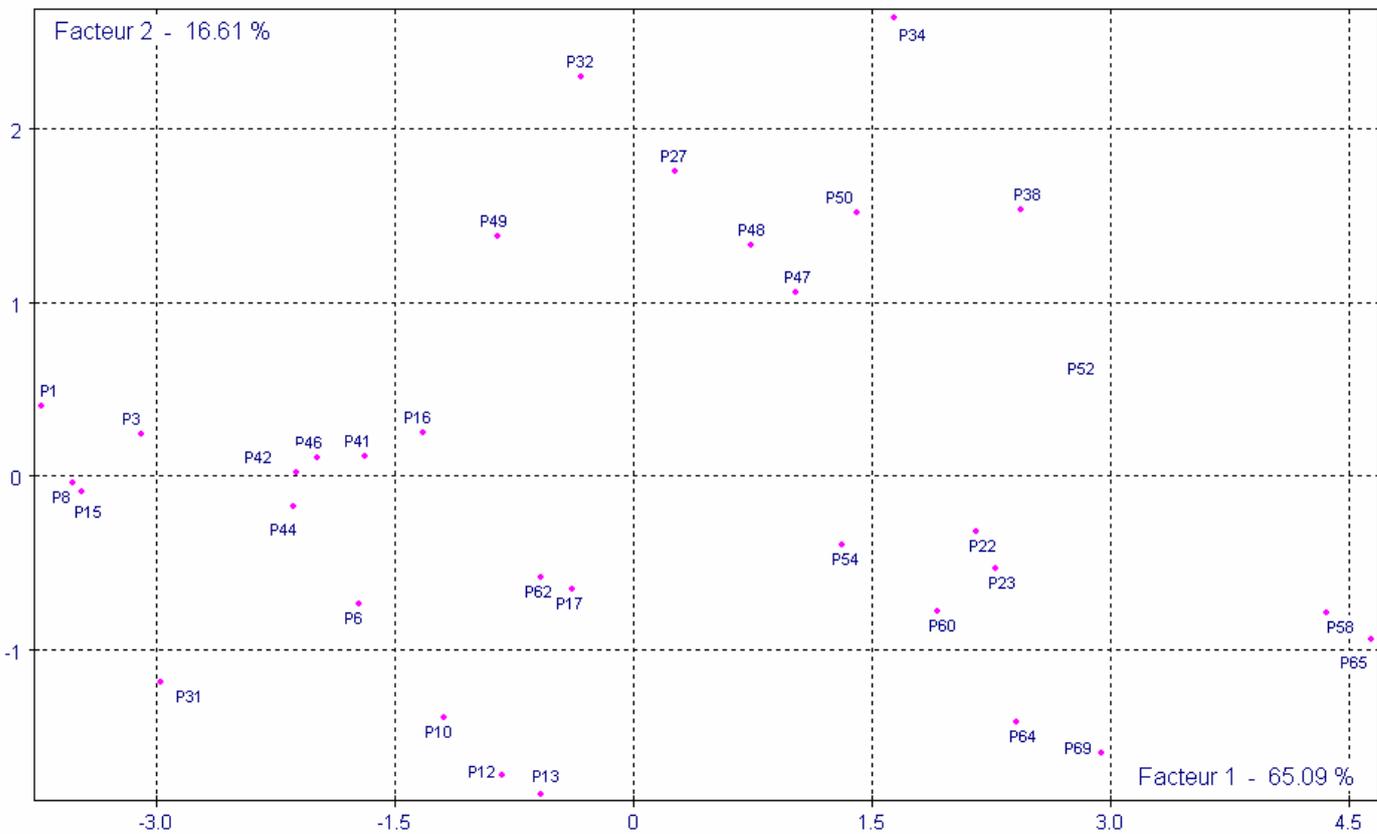
Application de l'ACP sur la campagne de juillet 2004 :

Matrice de corrélation entre les variables de la campagne de juillet 2004.

| | Cl ⁻ | SO ₄ ²⁻ | HCO ₃ ⁻ | NO ₃ ⁻ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Na ⁺ +K ⁺ | Cond |
|---------------------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------|------------------|---------------------------------|------|
| Cl ⁻ | 1,00 | | | | | | | |
| SO ₄ ²⁻ | 0,76 | 1,00 | | | | | | |
| HCO ₃ ⁻ | -0,55 | -0,51 | 1,00 | | | | | |
| NO ₃ ⁻ | 0,59 | 0,48 | -0,62 | 1,00 | | | | |
| Ca ²⁺ | 0,62 | 0,93 | -0,51 | 0,50 | 1,00 | | | |
| Mg ²⁺ | 0,27 | 0,22 | 0,19 | -0,17 | -0,08 | 1,00 | | |
| Na ⁺ +K ⁺ | 0,95 | 0,76 | -0,66 | 0,67 | 0,62 | 0,22 | 1,00 | |
| Cond | 0,92 | 0,95 | -0,55 | 0,58 | 0,86 | 0,23 | 0,90 | 1,00 |



Espace des variables de la campagne de juillet 2004.



Espace des individus de la campagne de juillet 2004.

Equilibre thermodynamique (Logiciel Wateq version 02, avril 2004) :

Le calcul thermodynamique des équilibres chimiques des eaux rend compte des interactions électrostatiques entre les différents ions « i » en présence. Ces derniers sont représentés par l'activité ionique. Pour une solution idéale, l'activité et la molarité sont égales. En pratique, la déviation par rapport au cas précédent est présenté par γ_i :

$$a_i = \gamma_i \cdot m_i$$

a_i et m_i sont respectivement l'activité et la molarité des ions considérés.

Quand on a une réaction chimique quelconque l'équilibre de cette dernière se réalise selon la constante K qui est calculée par la relation :

$$K = \exp\left(-\frac{\Delta G_r^0}{R T}\right)$$

R : constante des gaz parfaits (1,987 10⁻³ kcal.mole⁻¹)

T : température à l'échelle Kelvin. (T = 273,15 + 25°C)

ΔG^0 : l'énergie libre exprimée en kcal.mol⁻¹ à une température de 25°C et une pression de 1 atmosphère.

La variation d'énergie libre ΔG^0 est la différence entre la somme des énergies des éléments qui sont produits par la réaction moins la somme des énergies des éléments entrant dans la réaction.

$$\Delta G^0 = \Sigma G(\text{produits}) - \Sigma G(\text{réaction})$$

Lorsqu'on a la réaction suivante : $\text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} \rightleftharpoons \text{CaSO}_4$

À l'équilibre et pour une température et pression donnée, on a :

$$\text{Log } K = \frac{a_{\text{CaSO}_4}}{a_{\text{Ca}^{2+}} \cdot a_{\text{SO}_4^{2-}}}$$

où a_i est l'activité de l'espèce i telle que $a_i = \gamma_i m_i$ (voir relation plus haut)

Idéalement, la quantité « efficace » de l'espèce i dans le système correspond au nombre de moles de ce constituant (loi de Raoult). Dans les cas réels, la quantité « efficace » peut être notablement différente ; on ne peut plus considérer que $\gamma_i = 1$.

Ce coefficient d'activité γ_i traduit les interactions entre l'espèce i et les autres constituants du système.

Le logiciel Wateq utilise l'équation de Debye-Hückel pour calculer les γ_i et donc la distribution de toutes les espèces en solution.

$$\text{Log } \gamma_i = -\frac{A z_i^2 \sqrt{\mu}}{1 + B a_i^0 \sqrt{\mu}} + b_i \mu$$

$$\mu = \frac{1}{2} \sum_i z_i^2 m_i \quad \text{est la force ionique de la solution } (<1)$$

z_i est la charge de l'ion i ;

A et B sont constants et ne dépendent que de la température ;

a_i^0 est un paramètre représentant la taille de l'ion en solution ;

b_i est une constante qui représente l'écart à la loi de Debye-Hückel.

Etat de saturation :

Le coefficient d'activité g_i traduit les interactions entre l'espèce i et les autres constituants du système. Il est donc indispensable de connaître les concentrations des différentes espèces en solution, ainsi que le PH, le potentiel d'oxydo-réduction, l'alcalinité, la température.

Ensuite, armé des valeurs des coefficients d'activités, on peut calculer les activités des espèces i puis l'état (ou l'indice) de saturation (IS) de la solution vis-à-vis d'un minéral. C'est le rapport :

$$IS = \text{Log } Q/K$$

Pour l'espèce i , K est la constante d'équilibre et Q est le produit d'activité ionique. Une solution est en équilibre avec une phase minérale lorsque $IS = 0$ (flux de dissolution égal au flux de précipitation). La solution est dite sous-saturée lorsque $IS < 0$ et sur-saturée lorsque $IS > 0$.

**Estimation des paramètres de la qualité de l'eau à l'irrigation (SAR et %Na)
pour l'année 2002 :**

| Campagne mars 2002 | | | Campagne juillet 2002 | | |
|--------------------|-------|------|-----------------------|-------|-------|
| Puits | %Na | SAR | Puits | %Na | SAR |
| P1 | 14,31 | 0,57 | P1 | 21,75 | 0,87 |
| P3 | 24,22 | 1,14 | P3 | 29,69 | 1,47 |
| P4 | 26,21 | 1,62 | P4 | 30,00 | 1,89 |
| P6 | 30,96 | 1,86 | P6 | 29,65 | 1,99 |
| P8 | 14,34 | 0,61 | P8 | 18,84 | 0,81 |
| P10 | 32,47 | 2,08 | P10 | 34,17 | 2,34 |
| P12 | 28,65 | 1,75 | P12 | 35,24 | 2,54 |
| P13 | 34,25 | 2,41 | P13 | 35,19 | 2,66 |
| P15 | 17,87 | 0,84 | P15 | 25,80 | 1,38 |
| P16 | 38,48 | 3,04 | P16 | 39,52 | 3,27 |
| P17 | 53,68 | 5,31 | P17 | 55,81 | 5,80 |
| P18 | 55,06 | 5,62 | P18 | 56,52 | 5,95 |
| P20 | 20,87 | 1,03 | P20 | 27,11 | 1,38 |
| P21 | 44,21 | 5,69 | P21 | 46,55 | 5,19 |
| P22 | 54,82 | 6,24 | P22 | 50,40 | 5,92 |
| P23 | 55,44 | 6,47 | P23 | 51,12 | 6,24 |
| P27 | 35,72 | 3,44 | P27 | 37,20 | 3,72 |
| P29 | 50,62 | 5,82 | P29 | 52,24 | 6,52 |
| P31 | 27,86 | 1,32 | P31 | 31,05 | 1,63 |
| P32 | 35,20 | 3,33 | P32 | 40,51 | 4,12 |
| P34 | 50,72 | 6,01 | P34 | 52,76 | 6,74 |
| P35 | 35,27 | 3,42 | P35 | 41,43 | 4,31 |
| P38 | 49,78 | 5,91 | P38 | 51,05 | 6,20 |
| P41 | 52,13 | 6,16 | P41 | 54,05 | 6,67 |
| P42 | 26,56 | 1,66 | P42 | 29,82 | 2,04 |
| P43 | 36,85 | 3,70 | P43 | 42,66 | 4,76 |
| P44 | 28,27 | 1,93 | P44 | 31,68 | 2,28 |
| P45 | 39,19 | 4,05 | P45 | 42,74 | 4,91 |
| P46 | 37,64 | 2,82 | P46 | 40,66 | 3,35 |
| P47 | 38,83 | 4,00 | P47 | 42,25 | 4,67 |
| P48 | 37,64 | 3,72 | P48 | 41,04 | 4,36 |
| P49 | 33,99 | 3,02 | P49 | 39,84 | 3,75 |
| P50 | 34,27 | 3,59 | P50 | 36,36 | 3,93 |
| P51 | 32,44 | 3,58 | P52 | 35,88 | 4,01 |
| P52 | 35,07 | 3,86 | P54 | 41,11 | 4,41 |
| P54 | 39,25 | 3,98 | P60 | 42,09 | 4,76 |
| P58 | 26,23 | 3,17 | P64 | 44,85 | 5,55 |
| P60 | 41,94 | 4,57 | P65 | 27,79 | 3,56 |
| P62 | 38,21 | 3,40 | P69 | 44,74 | 5,694 |
| P64 | 43,30 | 5,05 | | | |
| P65 | 26,85 | 3,32 | | | |
| P68 | 38,49 | 3,57 | | | |
| P69 | 44,47 | 5,43 | | | |

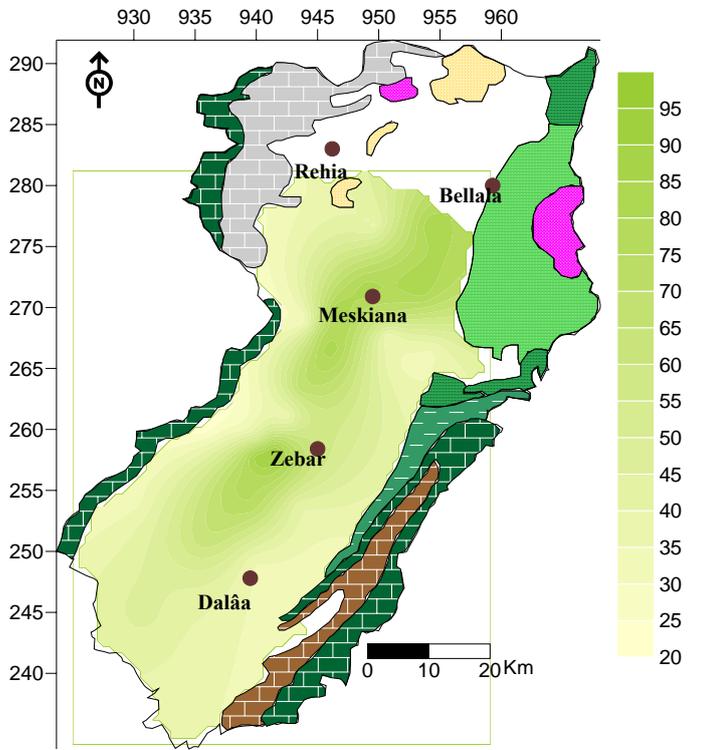
**Estimation des paramètres de la qualité de l'eau à l'irrigation (SAR et %Na)
pour l'année 2003 :**

| Campagne mars 2003 | | | Campagne juillet 2003 | | |
|--------------------|-------|------|-----------------------|-------|------|
| Puits | %Na | SAR | Puits | %Na | SAR |
| P1 | 14,09 | 0,59 | P1 | 22,22 | 0,95 |
| P3 | 23,32 | 1,27 | P3 | 28,17 | 1,54 |
| P4 | 29,61 | 1,87 | P4 | 31,88 | 2,11 |
| P6 | 30,53 | 1,97 | P6 | 34,04 | 2,43 |
| P8 | 16,04 | 0,71 | P8 | 20,81 | 0,94 |
| P10 | 36,40 | 2,63 | P10 | 37,88 | 2,88 |
| P12 | 40,32 | 3,14 | P12 | 40,81 | 3,25 |
| P13 | 41,13 | 3,31 | P13 | 42,03 | 3,50 |
| P15 | 16,70 | 0,75 | P15 | 21,92 | 1,01 |
| P16 | 38,72 | 3,09 | P16 | 39,69 | 3,28 |
| P17 | 57,10 | 5,66 | P17 | 57,05 | 5,83 |
| P18 | 57,42 | 5,84 | P18 | 57,83 | 6,14 |
| P22 | 54,14 | 6,26 | P22 | 60,36 | 8,10 |
| P23 | 54,34 | 6,36 | P23 | 60,30 | 8,17 |
| P27 | 35,46 | 3,45 | P27 | 36,97 | 3,70 |
| P29 | 51,31 | 5,80 | P29 | 51,70 | 6,03 |
| P31 | 31,17 | 1,55 | P31 | 33,36 | 1,78 |
| P32 | 35,11 | 3,24 | P32 | 36,29 | 3,45 |
| P34 | 49,03 | 5,66 | P34 | 49,71 | 5,89 |
| P38 | 49,97 | 5,95 | P38 | 51,35 | 6,26 |
| P41 | 35,16 | 2,70 | P41 | 36,47 | 2,92 |
| P42 | 26,40 | 1,71 | P42 | 32,04 | 2,32 |
| P43 | 37,75 | 3,81 | P43 | 40,07 | 4,25 |
| P44 | 28,98 | 2,00 | P44 | 29,43 | 2,15 |
| P46 | 37,39 | 2,84 | P46 | 37,84 | 3,04 |
| P47 | 38,08 | 3,91 | P47 | 32,24 | 3,03 |
| P48 | 37,54 | 3,74 | P48 | 38,69 | 3,98 |
| P49 | 37,75 | 3,26 | P49 | 39,83 | 3,74 |
| P50 | 34,11 | 3,55 | P50 | 36,09 | 3,96 |
| P51 | 32,26 | 3,52 | P51 | 33,64 | 3,80 |
| P52 | 35,33 | 3,86 | P52 | 34,69 | 3,86 |
| P54 | 39,36 | 3,96 | P54 | 40,60 | 4,27 |
| P58 | 25,80 | 3,11 | P58 | 26,98 | 3,34 |
| P60 | 41,60 | 4,52 | P60 | 42,16 | 4,71 |
| P62 | 37,93 | 3,36 | P62 | 39,64 | 3,67 |
| P64 | 44,43 | 5,14 | P64 | 44,84 | 5,35 |
| P65 | 26,56 | 3,27 | P65 | 27,59 | 3,49 |
| P68 | 38,94 | 3,53 | P68 | 39,24 | 3,67 |
| P69 | 44,18 | 5,28 | P69 | 44,77 | 5,51 |

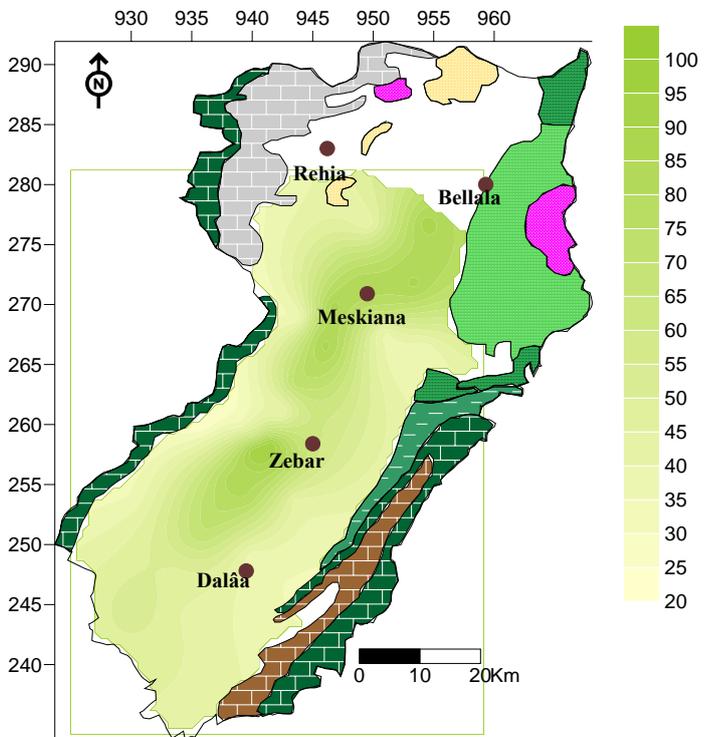
**Estimation des paramètres de la qualité de l'eau à l'irrigation (SAR et %Na)
pour l'année 2004 :**

| Campagne mars 2004 | | | Campagne juillet 2004 | | |
|--------------------|-------|-------|-----------------------|------|-------|
| Puits | SAR | %Na | Puits | SAR | %Na |
| P1 | 0,64 | 14,68 | P1 | 0,75 | 16,76 |
| P3 | 1,31 | 23,78 | P3 | 1,58 | 28,05 |
| P6 | 2,05 | 30,85 | P6 | 2,58 | 35,55 |
| P8 | 0,82 | 17,56 | P8 | 0,99 | 21,62 |
| P10 | 2,65 | 35,93 | P10 | 2,81 | 37,16 |
| P13 | 3,39 | 41,50 | P12 | 3,31 | 41,10 |
| P15 | 0,79 | 16,93 | P13 | 3,45 | 41,49 |
| P16 | 3,15 | 39,07 | P15 | 1,05 | 22,44 |
| P17 | 5,643 | 56,34 | P16 | 3,40 | 41,08 |
| P18 | 5,961 | 57,35 | P17 | 5,88 | 57,14 |
| P22 | 6,30 | 53,85 | P22 | 6,81 | 55,84 |
| P23 | 6,51 | 54,54 | P23 | 6,74 | 55,73 |
| P29 | 5,88 | 51,37 | P29 | 3,81 | 38,82 |
| P31 | 1,64 | 31,44 | P31 | 1,81 | 33,64 |
| P34 | 5,77 | 49,49 | P32 | 3,57 | 37,64 |
| P38 | 6,01 | 50,08 | P34 | 5,95 | 50,24 |
| P41 | 2,78 | 35,34 | P38 | 6,17 | 50,81 |
| P42 | 1,85 | 27,21 | P41 | 2,86 | 35,96 |
| P46 | 2,77 | 36,39 | P42 | 2,02 | 28,48 |
| P48 | 3,79 | 37,56 | P44 | 2,15 | 29,93 |
| P49 | 3,36 | 37,91 | P46 | 2,74 | 35,18 |
| P50 | 3,61 | 34,42 | P47 | 3,97 | 38,66 |
| P51 | 3,61 | 32,59 | P48 | 3,89 | 38,32 |
| P52 | 3,91 | 35,48 | P49 | 3,56 | 39,37 |
| P54 | 3,95 | 39,10 | P50 | 3,83 | 35,81 |
| P58 | 3,14 | 25,89 | P52 | 3,97 | 35,80 |
| P60 | 4,56 | 41,54 | P54 | 4,13 | 40,03 |
| P64 | 5,17 | 44,29 | P58 | 3,30 | 26,80 |
| P65 | 3,32 | 26,76 | P60 | 4,74 | 42,55 |
| P68 | 3,58 | 39,12 | P62 | 3,55 | 38,98 |
| P69 | 5,27 | 43,91 | P64 | 5,34 | 44,86 |

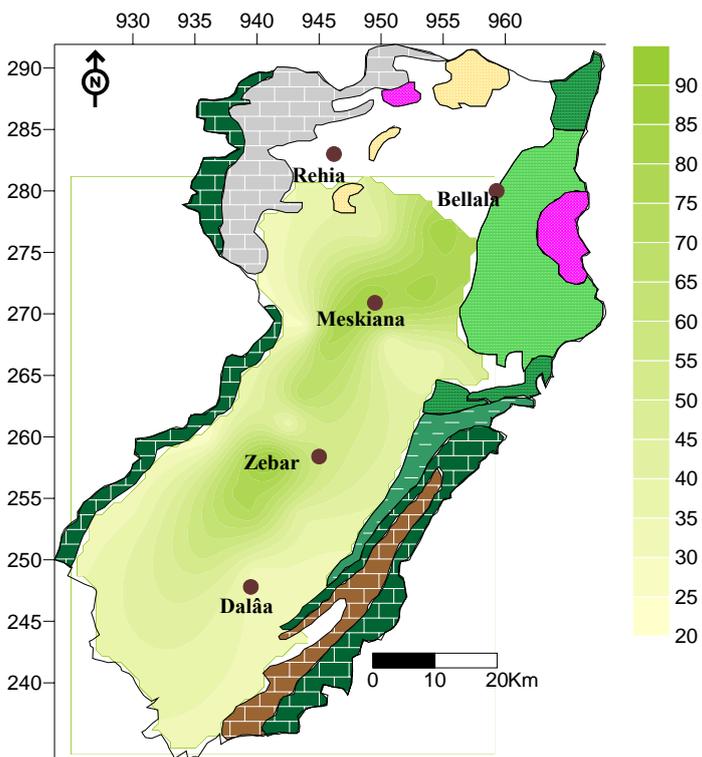
ANNEXE V
(POLLUTION DES EAUX SOUTERRAINES)



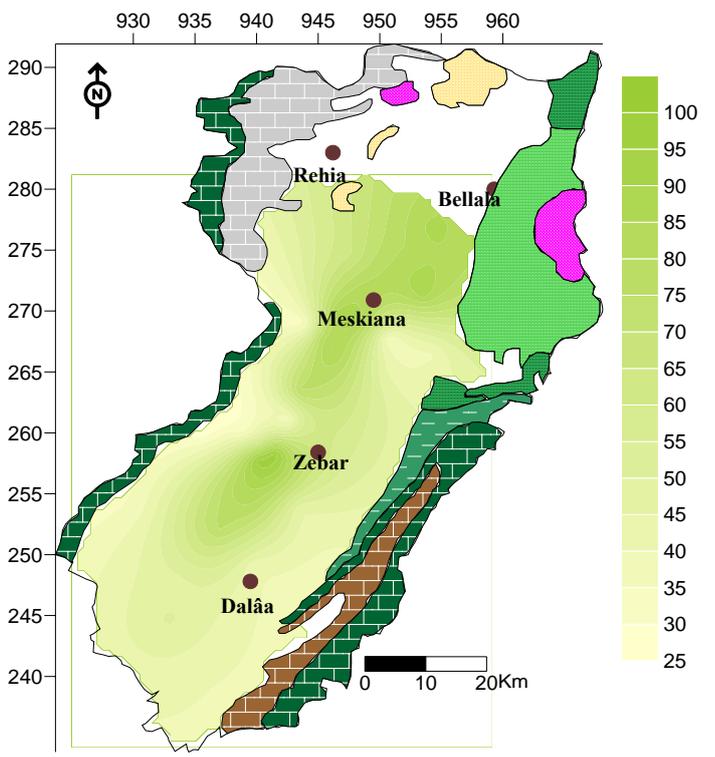
Carte des nitrates (mg/l), nappe de Meskiana mars 2003.



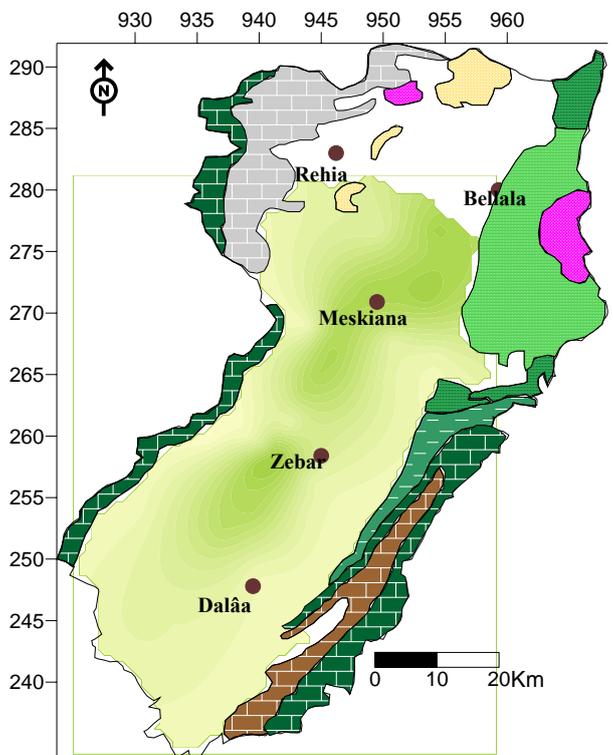
Carte des nitrates (mg/l), nappe de Meskiana juillet 2003.



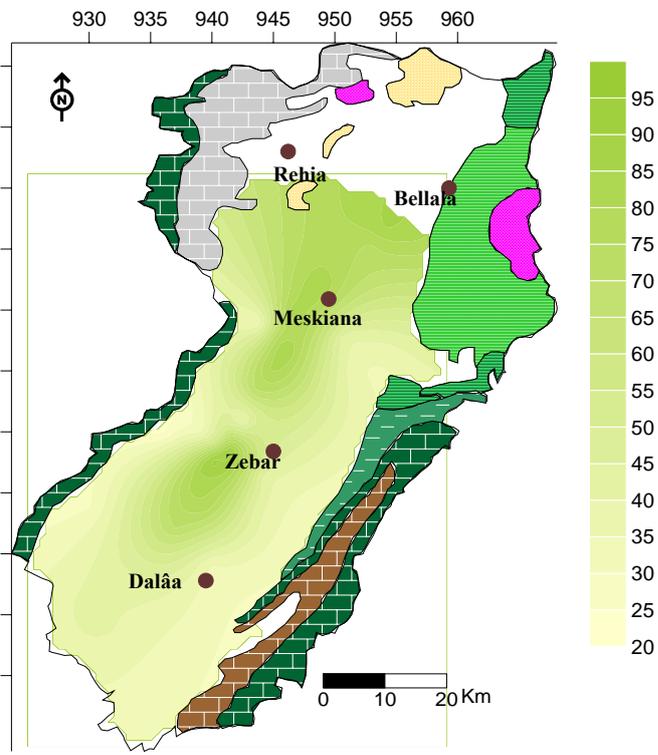
Carte des nitrates (mg/l), nappe de Meskiana mars 2004.



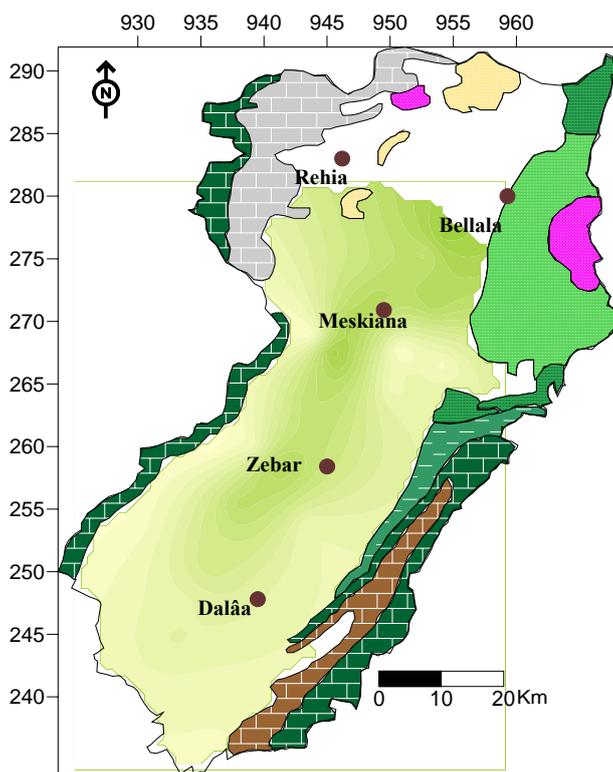
Carte des nitrates (mg/l), nappe de Meskiana juillet 2004.



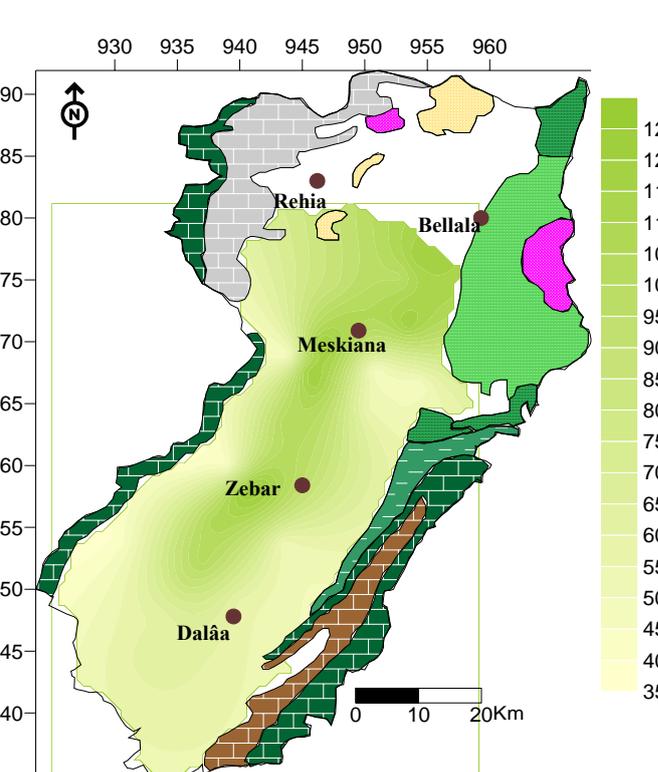
Carte des nitrates (mg/l), nappe de Meskiana mars 2002.



Carte des nitrates (mg/l), nappe de Meskiana juillet 2002.



Carte des nitrates (mg/l), nappe de Meskiana décembre 2004.



Carte des nitrates (mg/l), nappe de Meskiana novembre 2005.