وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVRSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA

جامعة باجي مختار – عنابة

Année 2008

Faculté des Sciences de la Terre
Département de géologie

MEMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de

MAGISTER

Option: Géosciences

THEME

Impact des eaux de réalimentation sur la qualité des eaux souterraines de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja (NE Algérien)

Présenté par : HAIED Nadjib

DEVANT LE JURY:

Directeur de mémoire:	**CHAAB Salah**	**Mc. Univ. Badji Mokhtar-Annaba**
Président:	**OUNISSI Makhlouf**	**Pr. Univ. Badji Mokhtar-Annaba**
Examinateurs:	**ASSASSI Fella**	**Mc. Univ. Badji Mokhtar-Annaba**
	SAAIDIA Bachir	**Mc. Univ. Badji Mokhtar-Annaba**

REMERCIMENT

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer ma profonde gratitude, avant tout à dieu tout puissant qui ma aidé et donné le courage pour mener à bien ce travail.

Ma gratitude te mes vifs remerciements vont directement à mon encadreur M^{r}. CHAAB Salah pour assistance, sa patience, sa gentillesse, ses conseils, ses encouragements et son soutien constant. Je remercie tout particulièrement Messieurs les membres de jury qui ont accepter de critiquer ce travail : M^{r}. OUNISSI. M., M^{me}. ASSASSI. F. et M^{r}. SAAIDIA. B.

Mes remerciements à tous les enseignants du department de géologie de l'université de Annaba.

Je tiens également à remercier M^{r}. Abd El Latif technicien au laboratoire de l'institut de Génie Cévile de l'université de Annaba, M^{me}. Djamila et M^{lle}. Dalila techniciennes au laboratoire de département de géologie.

Toute ma gratitude à M^{r}. Ounissi et M^{r}. Ben Slama de l'institut de Biologie d'avoir m'aider à réaliser les analyses chimiques.

Enfin tous ceux qui m'ont soutenu tout au long de ce travail directement ou indirectement.

تأثير مياه إعادة التغذية على نوعية المياه الجوفية لغشاء كتلة الكثبان الرملية لبوثلجة.

الملخص

إن الاستغلال المكثف لغشاء كتلة الكثبان الرملية لبوثلجة ترجم بانخفاض في مستوى المياه الجوفية و تقدم مياه البحر التي أصبح الإحساس بها خاصة في منطقة "الملاحة".
إن إعادة التغذية هو واحد من الإمكانيات لإعادة رفع مستوى المياه الجوفية و إعادة التوازن للغشاء في منطقة تتركز فيها الآبار كمنطقة برج على باي. وضع نموذج هيدروديناميكي من اجل تقييم فرصة إعادة التعدية من جانب الكم (سعايدية. ب، 2006).
إن النموذج الهيدروديسبارسيفى وضع انطلاقا من المعطيات المستخلصة من اجل تقييم انتقال الملوثات و ملاحظة تطور رقعة التلوث المحتمل بواسطة المشتقات البترولية مثلا.

الكلمات المفتاحية : كتلة الكثبان الرملية، بوثلجة، إعادة التغذية، نموذج هيدروديناميكي و هيدروديسبارسيفى، تلوث محتمل، البحيرة السوداء.

IMPACT OF RECHARGE WATER ON THE GROUNDWATER QUALITY OF BOUTELDJA UNCONFINED AQUIFER OF MASSIVE DUNE OF BOUTELDJA.

Abstract

The overexploitation of the aquifer of the massive dune of Bouteldja leads so a lowering of the piezometric level and seawater intrusion which is detected in the "Salines" zone.

The artificial recharge is widely used in developed countries, is one of the means to equilibrate the aquifer and to reduce water level falling. Even in the Bordj Ali Bey zone where the wells are concentrated. A flow model was carried out to evaluate the amount of water that reachs the aquifer and compense the extraction water by wells.

The hydrodipersive model is established to evaluate in one hand the distribution of the sulphate around the lake, and in the other hand to simulate the eventual pollution by the fuel that shows that the concentration reachs the well U3 in the steady state condition at lower concentration.

Key words: Massive dune, Bouteldja, Artificial recharge, hydrodipersive and flow Model, Eventual pollution, Black Lake.

IMPACT DES EAUX DE REALIMENTATION SUR LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES DE LA NAPPE LIBRE DU MASSIF DUNAIRE DE BOUTELDJA.

Résumé

La surexploitation de la nappe du massif dunaire de Bouteldja s'est traduite par un abaissement du niveau piézométrique et une intrusion des eaux marines ressentie surtout dans la zone des Salines.

La réalimentation artificielle est un des moyens pour soutenir le niveau piézométrique et équilibrer la nappe dans une zone où sont concentrés les forages telle que la zone de Bordj Ali Bey. Un modèle hydrodynamique a été établie pour évaluer la l'opportunité de la réalimentation artificielle sur un plan quantitatif (Saaidia. B, 2006).

Un modèle hydrodispersif est établi à partir des données de terrains pour évaluer le transport de masse et visualiser l'évolution du front d'une eventuelle accidentelle pollution par les hydrocarbures par exemple.

Mots clés : Massif dunaire, Bouteldja, Réalimentation artificielle, Modèle hydrodynamique et hydrodipersif, Pollution éventuelle, Lac Noir.

Sommaire :

Introduction..... *1*

Chapitre I : Cadre physique et géologique.

I. 1. Extension de la zone d'étude..... 2
I. 2. Aspect géomorphologique..... 2
I. 3. Géologie..... 4
I. 4. Stratigraphie..... 4
I. 4. 1. Les formations du **s**econdaire..... 4
I. 4. 2. Les formations tertiaires..... 4
I. 4. 3. Quaternaire..... 7
I. 4. 3. 1. Quaternaire ancien..... 7
I. 4. 3. 2. Quaternaire moyen..... 7
I. 4. 3. 3. Quaternaire récent..... 7
I. 5. Géologie et caractéristiques physico-chimiques des dunes..... 7
I. 6. Cadre structural..... 8
I. 7. Paléogéographie..... 10
I. 8. Tectonique..... 10
I. 9. Conclusion..... 11

Chapitre II : Hydroclimatologie.

II. 1. Introduction..... 12
II. 2. Le climat..... 12
II. 3. Les facteurs climatiques..... 12
II. 3. 1. Les précipitations..... 12
II. 3. 1. 1. Précipitations moyennes mensuelles..... 12
II. 3. 1. 2. Les précipitations moyennes annuelles..... 13
II. 3. 2. Les températures..... 13
II. 3. 2. 1. Les températures moyennes mensuelles..... 14
II. 3. 2. 2. Les températures moyennes annuelles..... 15
II. 4. Diagramme ombrothermique..... 16
II. 5. Notion du bilan d'eau..... 17
II. 5. 1. Définition de l'évapotranspiration..... 17
II. 5. 1. 1. Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR)..... 17
II. 5. 1. 2. Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP)..... 18
II. 5. 2. Interprétation du bilan hydrique..... 20
II. 5. 3. Comparaison..... 22
II. 6. Estimation de la lame d'eau écoulée..... 22
II. 6. 1. Le ruissellement..... 22
II. 6. 2. Infiltration efficace..... 23
II. 7. Hydrologie..... 24
II. 7. 1. Introduction..... 24
II. 7. 2. Le bassin versant de l'oued Kebir Est..... 24
II. 7. 3. Hydrographie..... 26
II. 7. 4. Régime de l'Oued Kebir Est à la station hydrométrique de Ain Assel..... 26

II. 7. 5. Tarage de la station de Ain El Assel…….. 27
II. 8. Conclusion…… 27

Chapitre III : Hydrogéologie.

III. 1. Introduction…….. 28
III. 2. Inventaire des points d'eau……... 28
III. 2. 1. Les sources…….. 28
III. 2. 2. Les puits…….. 28
III. 2. 3. Les forages…….. 28
III. 3. Géométrie et structure…….. 30
III. 4. L'alimentation de l'aquifère du massif dunaire de Bouteldja…….. 31
III. 5. Conditions aux limites de la nappe du massif dunaire…… 32
III. 6. Caractéristiques hydrodynamiques de la nappe……... 32
III. 6. 1. L'étude de la transmissivité (T) et du coefficient d'emmagasinement (S)….. 32
III. 6. 2. L'étude du coefficient de perméabilité (K) et de la porosité efficace (n_e)….... 32
III. 6. 3. Répartition spatiale des transmissivités…… 36
III. 6. 4. Détermination et répartition des perméabilités…… 37
III. 6. 5. Interprétation de la carte du substratum (carte isobathe)……. 38
III. 6. 6. Interprétation de la carte d'égale épaisseur de la couche saturée (carte isopache).……... 39
III. 6. 7. Piézomètrie de la nappe libre de Bouteldja…….. 41
III. 6. 8. Estimation des réserves…… 42
III. 7. Etat des ressources en eau dans la Wilaya d'El TARF…… 43
III. 7. 1. Ressources en eaux superficielles…… 43
III. 7. 2. Ressources en eaux souterraines…….. 43
III. 8. Conclusion…… 44

Chapitre IV : Hydrochimie.

IV. 1. Introduction…….. 46
IV. 2. Méthode de prélèvement…….. 46
IV. 3. Caractéristiques physico-chimiques du système aquifère du massif dunaire….. 46
IV. 3. 1. Paramètres physiques……... 46
IV. 3. 1. 1. Le pH…… 46
IV. 3. 1. 2. Température…….. 48
IV. 3. 1. 3. Conductivité……. 48
IV. 3. 1. 4. Résidu sec……. 51
IV. 3. 2. Paramètres chimiques……... 51
IV. 3. 2. 1. Calcul des rapports caractéristiques……. 51
IV. 3. 2. 2. Origine des éléments dissous…… 51
IV. 4. Bilan ionique…… 51
IV. 5. Répartition graphique des analyses chimiques……. 53
IV. 5. 1. Le diagramme en losange ou diagramme de Piper……... 53
IV. 5. 2. Diagramme de Schoëller Berkaloff…….. 53
IV. 6. Interprétation des résultats…… 53
IV. 6. 1. Répartition graphique sur le diagramme de Piper et de Schoëller Berkaloff des résultats d'analyse chimique, période hautes eaux Bouteldja 2000, 2001**,** 2002, 2004 et 2006…… 53

IV. 6. 2. Répartition graphique sur le diagramme de Piper et de Schoëller Berkaloff des résultats d'analyse chimique, période basses eaux Bouteldja 2000 et 2005…….. 64
IV. 7. Faciès chimique et formule ionique des analyses chimiques……... 67
IV. 8. Eau de sables et grès purement siliceux……... 68
IV. 9. Eaux de surface……... 69
IV. 9. 1. Les eaux de l'oued El Kébir……... 69
IV. 10. Conclusion…….. 69

Chapitre V: Etude de pollution des eaux du Lac Noir.

V. 1. Introduction……... 70
V. 2. Moyens et méthodes…….. 70
V. 2. 2. Prélèvements…….. 70
V. 2.3. Mesures in situ……... 71
V. 2.4. Analyse des éléments chimiques …… 71
V. 2.5. Les paramètres de potabilité ou de pollution organique…… 71
V. 3. Les paramètres physico-chimiques (mesure in situ)…….. 71
V. 3. 1. Le potentiel d'hydrogène (pH)……... 71
V. 3. 2. Conductivité électrique…….. 72
V. 3. 3. La salinité…….. 73
V. 4. Les éléments de la pollution…….. 74
V. 4. 1. Les éléments majeurs …… 74
V. 4. 1. 1. Calcium (Ca^{++}) …….. 74
V. 4. 1. 2. Magnésium (Mg^{++})……. 74
V. 4. 1. 3. Chlorure (Cl^{-}) et Sodium (Na^{+})…….. 75
V. 4. 1. 4. Potassium (K^{+})…….. 76
V. 4. 1. 5. Sulfates (SO_4^{--})…… 77
V. 4. 1. 6. Bicarbonates (HCO_3^{-})…… 78
V. 4. 2. Cycle de l'azote…….. 78
V. 4. 2. 1. Ammonium (NH_4^{+})……... 79
V. 4. 2. 2. Nitrites (NO_2^{-})……... 80
V. 4. 2. 3. Nitrates (NO_3^{-})……... 80
V. 4. 3. Les éléments mineurs naturels…….. 81
V. 4. 3. 1. Phosphates (PO_4^{3-})……. 81
V. 4. 4. Les paramètres de pollution organique…… 82
V. 4. 4. 1. La demande biochimique en oxygène (DBO_5) …… 82
V. 5. L'indice de la pollution organique (IPO)…….. 83
V. 6. Les indicateurs de pollution organique …… 83
V. 7. Interprétation……. 85
V. 7. 1. Indice de la pollution organique …….. 85
V. 7. 2. Les indicateurs d'eutrophisation …….. 85
V. 8. Conclusion……. 86

Chapitre VI: Détermination des paramètres hydrodispersifs.

VI. 1. Introduction…..……... 87
VI. 2. L'infiltration……... 87
VI. 2. 1. Les facteurs influençant l'infiltration……. 88

VI. 2. 2. Modélisation du processus d'infiltration……... 88
VI. 2. 2. 1. Relations empiriques…….. 88
VI. 2. 2. 2. Modèles à base physique…… 89
VI. 2. 3. Détermination pratique de la capacité d'infiltration du sol au voisinage du Lac Noir……..…….. 90
VI. 2. 3. 1. Spécification et mise en place de l'infiltromètre…...……... 91
VI. 2. 3. 2. Méthode de calcul……. 91
VI. 2. 3. 3. Interprétation des résultats des essais d'infiltration…….. 91
VI. 2. 3. 4. Détermination de la capacité d'infiltration au voisinage du forage U3 (2005)…..…….. 92
VI. 2. 3. 5. Détermination de la capacité d'infiltration au voisinage du forage BA1 (2005)……..…….. 93
VI. 2. 3. 6. Détermination de la capacité d'infiltration du essai I (2007)……..……. 94
VI. 2. 3. 7. Détermination de la capacité d'infiltration du essai II (2007)..……... 95
VI. 2 .3. 8. Détermination de la capacité d'infiltration du essai III (2007)……..…….. 96
VI. 3. Les paramètres hydrodispersifs..…….. 97
VI. 3. 1. Bases théoriques……..……. 97
VI. 3. 1. 1. Notion concernant le milieu poreux.……... 97
VI. 3. 1. 2. Physique des transferts…… 97
VI. 3. 1. 2. 1. La convection…….. 97
VI. 3. 1. 2. 2. La loi de Darcy…… 98
VI. 3. 1. 2. 3. Porosité cinématique…… 98
VI. 3. 1. 2. 4. Vitesse effective…….. 98
VI. 3. 1. 2. 5. Dispersion…… 98
VI. 3. 1. 2. 6. Dispersion longitudinale…….. 99
VI. 3. 1. 2. 7. Dispersion transversale…… 99
VI. 3. 1. 3. Echanges……... 99
VI. 3. 1. 3. 1. Adsorption-Désorption……. 99
VI. 3. 1. 3. 2. Echanges eau libre-eau liée……. 99
VI. 3. 2. Manipulation……... 99
VI. 3. 3. Détermination graphique des paramètres hydrodispersifs……..……. 100
VI. 4. Conclusion…...…… 107

Chapitre VII: Modélisation de l'impact des eaux de réalimentation.

VII. 1. Introduction …… 108
VII. 2. Généralités ……. 108
VII. 3. Rappel des étapes de l'élaboration du modèle hydrodynamique (Saadia. B, 2006)…… 109
VII. 3. 1. Chois du modèle …… 109
VII. 3. 2. Le schéma du modèle …… 109
VII. 3. 3. Les limites du modèle …… 109
VII. 3. 4. Les épaisseurs …… 109
VII.3. 5. Les paramètres hydrodynamiques …….. 109
VII. 3. 5. 1. Le coefficient de perméabilité …….. 109
VII. 3. 5. 2. Le coefficient de porosité efficace …… 109
VII. 3. 5. 3. Le facteur de drainance…….. 109
VII. 3. 6. La piézométrie …….. 109
VII. 3. 7. Les conditions aux limites ……. 110
VII.3. 7. 1. Les flux naturels souterrains …..…… 110

VII. 3. 7. 2. La recharge de l'aquifère ……... 110
VII. 3. 7. 3. Le débit des forages d'exploitation …… 110
VII. 3. 7. 4. L'infiltration dans les zones d'épondages ……. 110
VII. 4. Modèle de transport de masse……. 110
VII. 4. 1. Considérations théoriques…….. 110
VII. 4. 1. 1. La convection …… 112
VII. 4. 1. 2. La dispersion…….. 112
VII. 4. 1. 2. 1. Définition ……... 112
VII. 4. 1. 2. 2. Coefficient de dispersion…… 112
VII. 4. 1. 3. Les réactions chimiques …… 114
VII. 4. 1. 3. 1. Adsorption linéaire ou non linéaire d'équilibre commandé …….. 114
VII. 4. 1. 3. 2. Adsorption du non équilibre …….. 115
VII. 4. 1. 3. 3. Abaissement radioactive ou biodégradation …….. 115
VII. 4. 2. Simulation de la propagation des sulfates ……. 115
VII. 4. 3. Simulation de la propagation des hydrocarbures ……. 115
VII. 5. Conclusion……. 118

Conclusion générale……... *119*

Bibliographie

Annexes

Liste des figures :

Figure N° 01 : Carte de la situation géographique du massif dunaire de Bouteldja, A.B.H. (in Mouchara. N; 2004)…….. 3

Figure N° 02 : carte schématique des unités géomorphologiques dans la région d'El Tarf, A.B.H. (in Mouchara. N; 2004)…… 5

Figure N° 03 : Extrait de la carte géologique et structurale au 1/500 000 de la chaîne alpine de l'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens (D'après J. M. Vila, 1978)…..……... 6

Figure N° 04 : Coupe géologique du synclinal du Lac Oubeira (in Ramdani. A, 1996), A.B.H. (in Mouchara. N; 2004)……. 8

Figure N° 05 : Esquisse structurale des plaines de Annaba Bouteldja (d'après Sonatrach, 1983, modifier) (in B. Saaidia 2006)…… 9

Figure N° 06 : Carte hypsométrique du Nord Est Algérien (d'après A. Marre 1987) (in Ramdani. A ; 1996)…… 11

Figure N° 07 : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles aux stations des Salines et Ben M'hidi (1990 - 2006)…….... 14

Figure N° 08 : Histogramme des températures moyennes mensuelles aux stations des Salines et Ben M'hidi (1990 - 2006)…….. 15

Figure N° 09 : Diagramme ombrothermique à la station des Salines (1990 – 2006)…….. 16

Figure N° 10: Diagramme ombrothermique à la station de Ben M'hidi (1990 – 2006)…….. 17

Figure N° 11 : Bilan hydrique effectué sur la base des moyennes mensuelles des Précipitations, ETP et ETR (1990 – 2006)…… 21

Figure N° 12 : Bilan hydrique effectué sur la base des moyennes mensuelles des Précipitations, ETP et ETR (1990 – 2006)…… 21

Figure N° 13 : Carte du réseau hydrographique de la Wilaya d'El Tarf…… 25

Figure N° 14 : La courbe de variation mensuelle du débit de l'Oued Kebir Est à la station de Ain Assel (1980-2004)…….. 26

Figure N° 15 : Carte de répartition des forages dans le massif dunaire de Bouteldja……. 29

Figure N° 16 : Coupes hydrogéologique schématique dans le massif dunaire de Bouteldja (d'après les coupes de forages et la géophysique)…….…. 30

Figure N° 17 : Coupes hydrogéologique schématique dans le massif dunaire de Bouteldja (d'après les coupes de forages et la géophysique)……..…….. 31

Figure N°18 : Schémas de dispositifs de perméabilité à charge constante et à charge variable……. 33

Figure N°19 : Carte de répartition des transmissivités en $10^{-3}m^2/s$ de la nappe du massif dunaire de Bouteldja…….. 36

Figure N° 20 : Carte de répartition des perméabilités en $10^{-5}m/s$ de la nappe du massif dunaire de Bouteldja…….. 37

Figure N° 21 : Carte du substratum de la nappe du massif dunaire de Bouteldja d'après la géophysique (d'après les données de Strojexport, 1975, in Hani, 2003)……... 38

Figure N° 22 : Carte d'égale épaisseur de la couche saturée de la nappe du massif dunaire de Bouteldja……... 39

Figure N° 23 : Carte piezométrique de la nappe du massif dunaire de

Bouteldja en Octobre 1994 (Ramdani.A ; 1996)...……. 40
Figure N°24 : Carte piezométrique de la nappe du massif dunaire de Bouteldja en 1982 (Khérici.N ; 1985)...……. 41
Figure N° 25 : Variation spatiale du pH en différentes périodes……... 47
Figure N° 26 : Variation spatiale de la température en différentes périodes….. 49
Figure N° 27 : Variation spatiale de la conductivité en différentes périodes…. 50
Figure N° 28 : Variation satiale du résidu sec en différentes périodes…….. 52
Figure N° 29: Diagramme de Piper des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de hautes eaux 2000……...……. 54
Figure N° 30 : Diagramme de Schoëller Berkaloff des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de hautes eaux 2000…… 55
Figure N° 31 : Diagramme de Piper des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de hautes eaux 2001……...… 56
Figure N° 32 : Diagramme de Schoëller Berkaloff des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de hautes eaux 2001…….……... 57
Figure N° 33 : Diagramme de Piper des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de hautes eaux 2002……...…… 58
Figure N° 34 : Diagramme de Schoëller Berkaloff des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de hautes eaux 2002…..……... 59
Figure N° 35 : Diagramme de Piper des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de hautes eaux 2004……...…… 60
Figure N° 36 : Diagramme de Schoëller Berkaloff des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de hautes eaux 2004..……... 61
Figure N° 37 : Diagramme de Piper des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massifdunaire de Bouteldja période de hautes eaux 2006……...…… 62
Figure N° 38 : Diagramme de Schoëller Berkaloff des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de hautes eaux 2006…..……... 63
Figure N° 39 : Diagramme de Piper des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de basses eaux 2000……...…… 64
Figure N° 40 : Diagramme de Schoëller Berkaloff des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de basses eaux 2000…….…… 65
Figure N° 41 : Diagramme de Piper des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de basses eaux 2005……...…… 66
Figure N° 42 : Diagramme de Schoëller Berkaloff des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de basses eaux 2005……...…….. 67
Figure N° 43 : Carte de situation des points des prélèvements (Extrait de la

carte topographique au 1/25000 établie en 1972)…….. 71
Figure N° 44 : Histogramme de la variation de pH pour les deux campagnes.. 72
Figure N° 45 : Histogramme de la variation de la conductivité pour les deux Campagnes……. 73
Figure N° 46 : Histogramme de la variation de la salinité pour les deux Campagnes…… 73
Figure N° 47 : Histogramme de la variation de la concentration du calcium pour les deux campagnes…… 74
Figure N° 48 : Histogramme de la variation de la concentration du magnésium pour les deux campagnes…….. 75
Figure N° 49 : Histogramme de la variation de la concentration du sodium pour les deux campagnes…….. 76
Figure N° 50 : Histogramme de la variation de la concentration des chlorures pour les deux campagnes…….. 76
Figure N° 51 : Histogramme de la variation de la concentration de potassium pour les deux campagnes…….. 77
Figure N° 52 : Histogramme de la variation de la concentration des sulfates pour les deux campagnes…….. 77
Figure N° 53 : Histogramme de la variation de la concentration des bicarbonates pour les deux campagnes…….. 78
Figure N° 54 : Cycle de l'azote……. 79
Figure N° 55 : Histogramme de la variation de la concentration de l'ammonium pour les deux campagnes…… 79
Figure N° 56 : Histogramme de la variation de la concentration des nitrites pour les deux campagnes…….. 80
Figure N° 57 : Histogramme de la variation de la concentration des nitrates pour les deux campagnes…… 81
Figure N° 58 : Histogramme de la variation de la concentration des phosphates pour les deux campagnes…… 82
Figure N° 59 : Histogramme de la variation de la demande biochimique en oxygène pour les deux campagnes……. 83
Figure N° 60 : Evolution générale du régime d'infiltration et de l'infiltration cumulative au cours du temps…….. 87
Figure N° 61 : Schématisation du processus de l'infiltration selon Green et Ampt (Tiré de Musy et Soutter, 1991)..... 90
Figure N° 62: Photo du Dispositif du double anneau …….. 91
Figure N° 63 : Schéma du Dispositif du double anneau…… 91
Figure N° 64 : Courbe représentative de la capacité d'infiltration en fonction du temps au voisinage du forage U3 (2005)…….. 92
Figure N° 65 : Courbe représentative de la capacité d'infiltration en fonction du temps au voisinage du forage BA1 (2005)…….. 93
Figure N° 66 : Courbe représentative de la capacité d'infiltration en fonction du temps (2007)……. 94
Figure N° 67: Courbe représentative de la capacité d'infiltration en fonction du temps (2007)..…….. 95
Figure N° 68 : Courbe représentative de la capacité d'infiltration en fonction du temps (2007)……. 96
Figure N° 69: Le perméamètre de mesure…….. 100
Figure N° 70 : Graphe de la concentration cumulée en fonction du temps…… 103
Figure N° 71 : Graphe de $\xi\sqrt{N_p}$ en foncton de Np……..... 103

Figure N° 72 : Graphe de la concentration cumulée en fonction du temps…… 106
Figure N° 73 : Graphe de $\xi\sqrt{N_p}$ en foncton de Np……..……... 106
Figure N° 74 : Schéma du site destiné à la simulation de une pollution éventuelle par les hydrocarbures dans la région de Bordj Ali Bey (Extrait de la carte topographique au 1/25000 établie en 1972)…….. 108
Figure N° 75 : Carte de propagation des sulfates à partir du Lac Noir…….. 116
Figure N° 76 : Carte de propagation des hydrocarbures à partir du Lac Noir… 117

Liste des tableaux :

Tableau N°01 : Caractéristiques des stations de mesure…….. 12
Tableau N°02 : Les précipitations moyennes mensuelles (en mm)…….. 13
Tableau N°03 : Les précipitations moyennes annuelles (1990 – 2006)….. 13
Tableau N°04 : Les températures moyennes mensuelles (en °C)……..….. 14
Tableau N°05 : Les Températures moyennes annuelles (1990 – 2006)….. 15
Tableau N°06 : ETR annuelle selon la méthode de Turc……. 18
Tableau N°07 : ETR selon la méthode de Coutagne…… 18
Tableau N°08 : Bilans hydrique de la station des Salines sur une période de 26 ans (1990 – 2006)……. 19
Tableau N°09 : Bilans hydrique de la station de Ben M'hidi sur une période de 10 ans (1990 – 2006)……. 20
Tableau N°10 : Corrélation des climats…… 22
Tableau N°11 : Ruissellement selon la formule de Tixerant- Berkaloff….. 22
Tableau N°12 : Les valeurs de l'infiltration efficace…… 23
Tableau N°13 : Données morphomètriques de l'Oued Kebir Est……. 24
Tableau N°14 : La variation mensuelle du débit de l'Oued Kebir Est à la station de Aîn Assel (période 1980-2004)……... 26
Tableau N°15 : Résultas obtenues pour la perméabilité des échantillons… 34
Tableau N°16 : Résultas obtenues pour la porosité efficace des échantillons……. 35
Tableau N°17 : Calcul du volume d'eau emmagasiné dans la nappe du massif dunaire……. 42
Tableau N°18 : Débit exploitable des différentes nappe souterraines dans la région d'El Tarf…….. 44
Tableau N°19 : relation entre conductivité et minéralisation (Detay, 1997)……. 48
Tableau N°20 : Faciès chimique et formule ionique des analyses Chimiques……... 68
Tableau N°21 : Résultats d'analyse chimique des eaux de l'Oued El Kébir Est prises à la station hydrométrique de Ain El Assel……... 69
Tableau N°22 : paramètres et classes de l'IPO…… 84
Tableau N°23 : Analyse et traitement des données obtenues au fluorimètre (Echantillon I)…… 102
Tableau N°24 : Analyse et traitement des données obtenues au fluorimètre (Echantillon II)…… 105

Liste des annexes :

Annexe N° 01 : Précipitations moyennes mensuelles (Station des Salines).

Annexe N° 02 : Températures moyennes mensuelles (Station des Salines).

Annexe N° 03 : Précipitations moyennes mensuelles (Station de Ben M'hidi).

Annexe N° 04 : Températures moyennes mensuelles (Station de Ben M'hidi).

Annexe N° 05 : Caractéristiques hydrodynamiques de quelques forages inventoriés dans le massif dunaire de Bouteldja.

Annexe N° 06 : Mode opératoire pour les analyses chimiques.

Annexe N° 07 : Mode opératoire du Fluorimètre.

Introduction générale.

Introduction générale

Sur notre planète Terre, l'eau douce accessible correspond à environ 10 % du volume total d'eau douce, soit environ 0,26 % de l'hydrosphère. L'eau souterraine représente la fraction de la ressource en eau la plus importante avec 96 % ; d'où l'intérêt majeur de la préserver contre toute menace de dégradation.

L'Algérie se trouve dans une région du monde la plus défavorisée en matière de disponibilité hydrique. Or non seulement l'explosion démographique et la croissance économique entraînent une demande en eau qui dépasse les ressources disponibles, mais aussi la sècheresse qui touche cette région ces deux dernières décennies.

L'exploitation intensive de la nappe côtière du massif dunaire de Bouteldja est due à une demande en eau toujours croissante des besoins d'alimentation en eau potable et en eau d'irrigation. Ceci se remarque par un abaissement du niveau piézométrique donc par une diminution des stocks.

Afin de renouveler la ressource en eau, en ralentissant l'abaissement du niveau ou mieux encore inverser sa tendance, il est indispensable de réaliser une réalimentation artificielle de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja et précisément au niveau du Lac Noire, cette technique comme elle est très efficace, éventuellement elle a des inconvénients.

L'objectif serait de connaître l'impacte des eaux de cette réalimentation sur la qualité des eaux souterraines de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja.

Ce mémoire s'articule autour de sept chapitres.

Le **premier chapitre** décrit le cadre physique ainsi la description des différentes formations géologique formant les ensembles morpho-structuraux de la région d'étude.

Le **deuxième chapitre** est consacré au traitement des données hydroclimatiques et à l'évaluation des termes du bilan hydrologique.

Dans le **troisième chapitre**, sont définis la géométrie, la structure et la lithologie de la nappe (la réalisation de coupes litho-structurales du réservoir à la base des données de géophysique et des sondages mécaniques).

Le **quatrième chapitre** porte sur l'étude hydrochimique des eaux souterraines et leur évolution. L'importance est donnée à la détermination des faciès chimiques des eaux souterraines.

Le **cinquième chapitre** est destiné à étudier la pollution des eaux du Lac Noir en se basant sur la méthode de l'indice de pollution organique.

Dans **le sixième chapitre** traite de la détermination des paramètres hydrodispersifs au niveau du Lac Noir.

Enfin, **le septième chapitre** est consacré à la simulation de la propagation des sulfates et d'une éventuelle pollution accidentelle par les hydrocarbures dans la zone du Lac Noir et l'étude de son impact sur la qualité des eaux souterraines de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja.

Chapitre I :

Cadre physique et géologique.

I. 1. Extension de la zone d'étude :

La zone d'étude se localise dans la partie orientale de l'Algérie, à l'extrême Est de la plaine alluviale d'Annaba. Elle se situe dans le territoire de la wilaya d'El Tarf, répartie sur les communes de Bouteldja et Berrihane. Elle fait partie du bassin versant de la Mafragh d'une superficie d'environ 2660 Km^2. Dans sa partie Sud et Est cette zone est ceinturée par une zone montagneuse typique du tell algérien.
Le système se compose essentiellement d'une plaine alluviale résultant des dépôts de l'oued Kebir Est et de ces affluents sur une superficie de 40 Km^2 et d'un massif dunaire d'une superficie d'environ 160 Km^2 qui est limité :

- Au Nord par la mer Méditerranéenne.
- Au Sud par la plaine de Bouteldja.
- A l'ouest par la Mafragh
- A l'Est par le massif du Cap Rosa.

I. 2. Aspect géomorphologique :

La région d'étude fait parti du bassin de la Mafragh et se caractérise par les différentes unités géomorphologiques dont les formations quaternaires occupent la partie avale Nord-Ouest, Nord-Est de la zone et sont les plus répandues.
Les différentes unités géomorphologiques sont :

- ***Le complexe alluvial de la vallée de l'oued Kebir Est*** est caractérisé par une série de terrasses à faciès hétérogène (sables, graviers, limons et surtout d'Argiles).
- ***Le cordon dunaire*** est situé au Nord de la plaine alluviale de Bouteldja. Il est caractérisé par une grande extension, il s'étend jusqu'aux pieds des Djebels Bourdim et Hadjar Siah à l'Est.
- ***Les marécages et lacs :*** Leur présence est liée aux différentes phases d'assèchement des zones lacustres de l'Algérie orientale durant le Quaternaire. Elle est due principalement à la réduction progressive des surfaces lacustres avec un remplissage alluvionnaire intensif des zones avales, de nombreux oueds tributaires du bassin comblés surtout au niveau des dépressions internes par les transports solides des différents oueds.
- ***Les marécages de Mekada Mohacène et lac des oiseaux*** : développés dans la basse vallée du Kébir Est, ils forment un delta commun aux principaux oueds drainant la région.
- ***Les oueds*** Bounamoussa à l'Ouest et El Kebir à l'Est, deux grands cours d'eau, rejoignent la mer à l'embouchure sous le nom de la Mafragh (exutoire unique).
- ***Les montagnes*** de la Chafia surplombent la partie aval du bassin et forment une barrière Est-Ouest ou leurs altitude avoisine les 450 m. Par contre, les massifs de plus de 900 m d'altitude sont représentés par le Djebel Bled Gherfie 996 m à l'Ouest, et le Djebel Rhona 1202 m à l'extrême Est (frontière Algéro-Tunisiénne). Les monts de la Chafia sont caractérisés par les grés de la nappe numidienne et représente le principal affleurement.
- ***Les collines*** sont développées à la limite des plaines, au niveau des terrasses déprimées. Au Nord-Est de Bouteldja, ces collines sont représentées par le Hadjar Siah et Dj Bourdim avec des altitudes respectives de 175 m et 177 m. Elles sont dominées par un faciès argilo gréseux numidiens qui forment une limite étanche à la formation sous jacente.

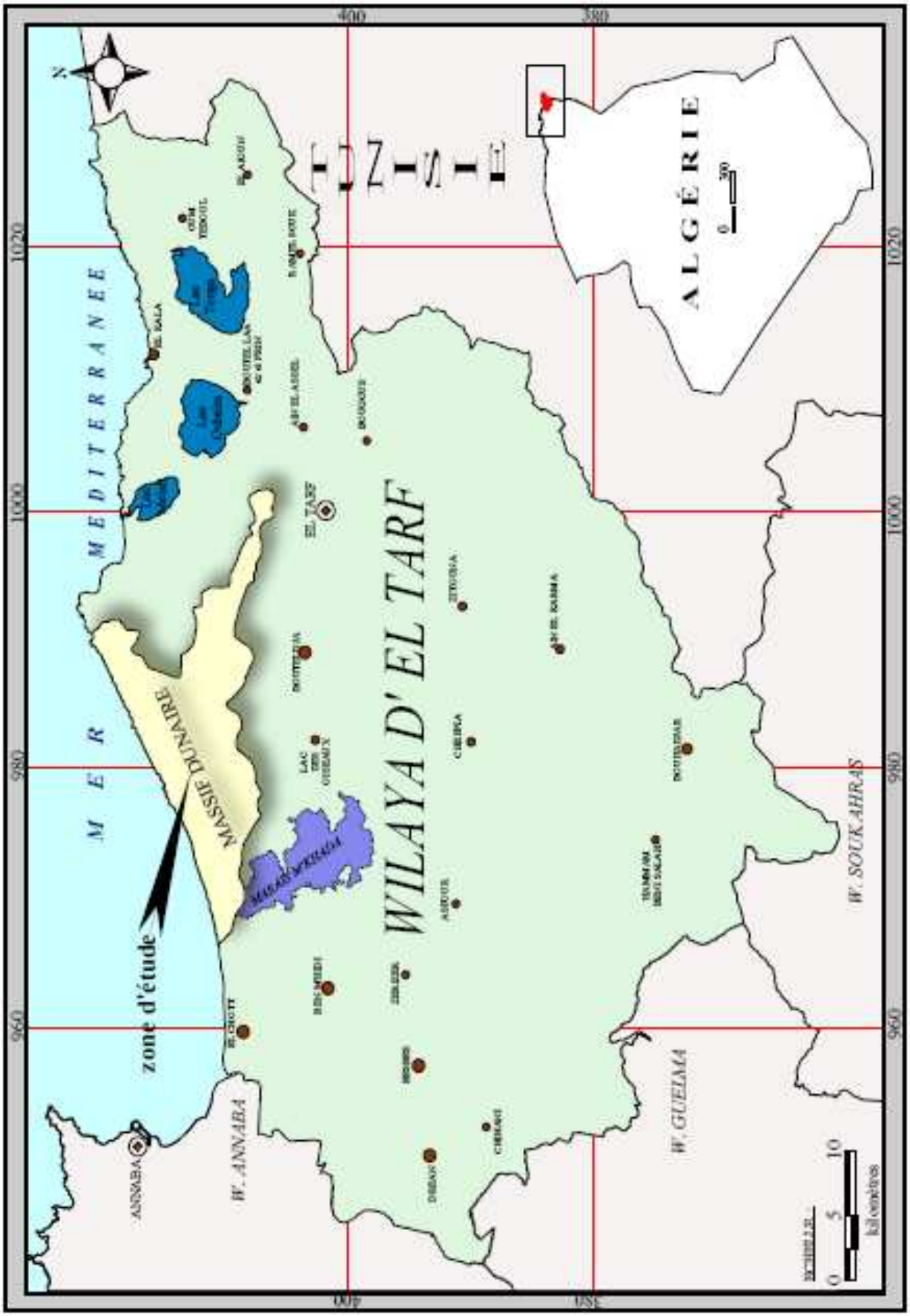


Figure N° 01 : Carte de la situation géographique du massif dunaire de Bouteldja, (A.B.H. Mouchara. N ; 2004).

I. 3. Géologie :

La région d'étude fait partie du grand bassin versant de la Mafragh. Du point de vue structural ce dernier se divise du Nord au Sud et de l'Ouest en Est par :
- Les massifs métamorphiques de l'Edough, formés de schistes cristallins anté-tertiaires et des roches éruptives tertiaires recoupées par de nombreux filons métallifères.
- Le tell littoral (chaîne numidique) est caractérisé par des plis ouest-est, fort accentués.Il est formé de calcaires basiques et nummulitiques, et est situé de part et d'autre des bombements cristallins primaires.
- Le tell inférieur comprenant la chaîne calcaire de Guelma et les collines de flysch argilo gréseux de la Numidie orientale.

I. 4. Stratigraphie :

L'étude stratigraphique du bassin versant de la Mafragh qui englobe la région étudiée, a montré qu'on a deux ensembles de terrains lithologiquement d'âge différents :
- Un ensemble constitué d'affleurements de bordure, caractérisé par des formations allant du Crétacé supérieur au Tertiaire.
- Un ensemble, généralement quaternaire, représenté par les formations dunaires et par les produits de comblement de la dépression alluviale de la plaine de Annaba et de la vallée de l'Oued Kébir. Cet ensemble integre la zone de notre étude.

La région comporte des formations allant du secondaire au quaternaire récent sont décrites ci-dessous.

I. 4. 1. Les formations du secondaire :

- ***Crétacé supérieur (Sénonien) :***

Le seul étage représenté dans le Secondaire, occupe presque la totalité des monts de la Cheffia. Il est caractérisé par un faciès schisteux plus ou moins argileux. Parfois il s'agit aussi de passage de calcaire avec alternance de marnes ou de microbrèches épais de 5 à 10 cm. Quelques forages de reconnaissances répartis dans la cuvette de la Cheffia et réalisés dans le cadre d'une étude géologique au droit de l'emplacement du barrage et de la galerie d'amenée ont recoupé ces faciès.

I. 4. 2. Les formations tertiaires :

- ***Eocène supérieur (Oligocène) :***

Il est présenté par des argiles numidiennes occupant les bas fonds de la plus grande partie de la région, rencontrées dans toute la partie sud de la région d'étude (les Monts de la Cheffia) au Sud Est de Bouteldja. Il est localisé au niveau des Djebeles Koursi, Bourdim, Hadjar Siah, Oum El Agreb. Ce faciès argileux, de couleur verdâtre, brunâtre ou bleu sombre, comprend parfois des intercalations de lentilles gréseuses pouvant aller d'un cm à 30 cm d'épaisseur. Localement, quartziteux et renfermant parfois de petits nodules de pyrites, l'ensemble des formations peut atteindre plus de 100 m d'épaisseur. Ces argiles, formant la base de la série numidienne, ont été datées de l'Oligocène moyen à supérieur (J. C. Lahondère, 1987).
Au dessus de ces formations argileuses viennent se superposer les grès numidiens en position allochtone d'âge aquitanien (H. Rouvier in Ramdani, 1996), à granulométrie bien réglée (du grain grossier au grain fin).

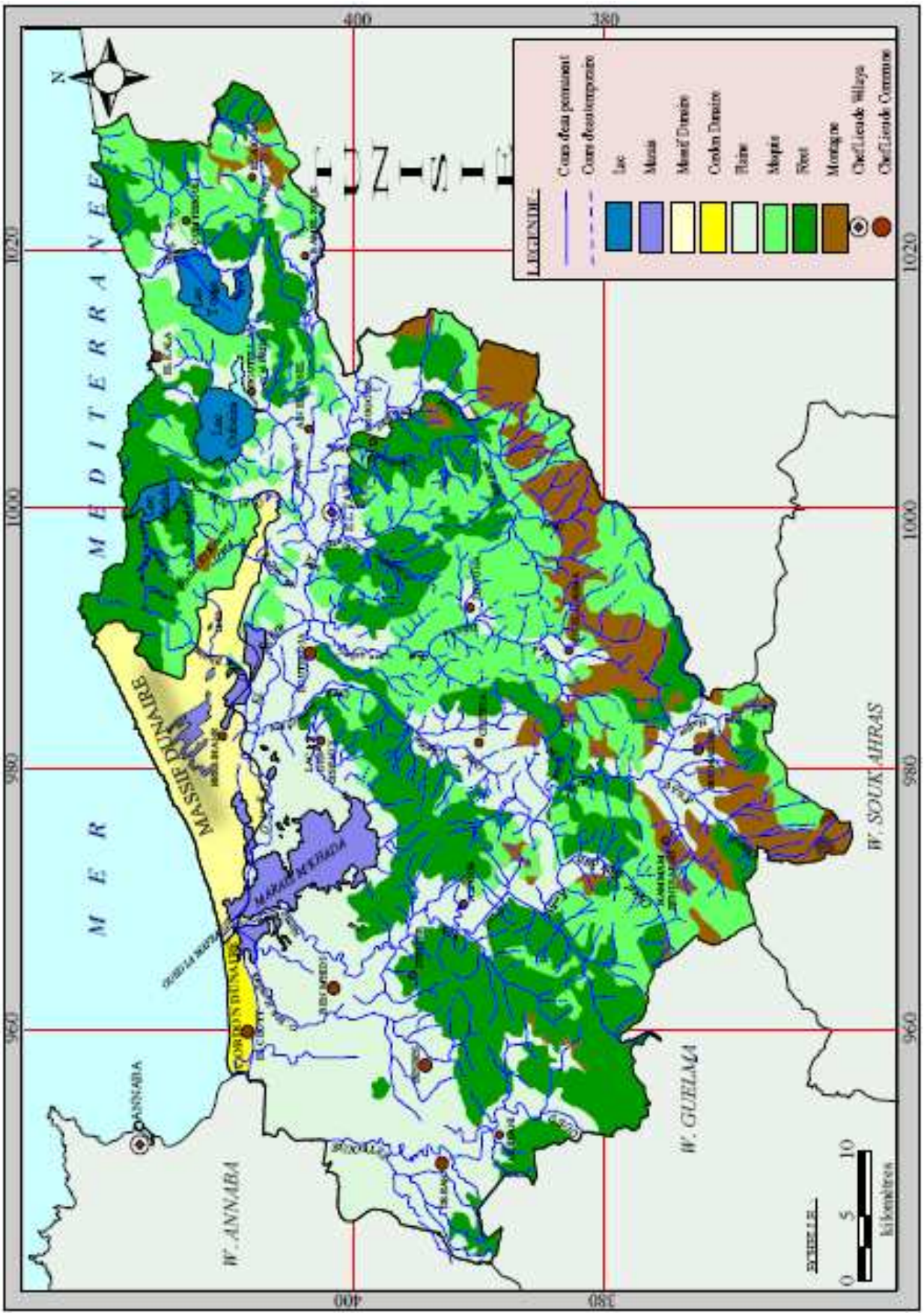
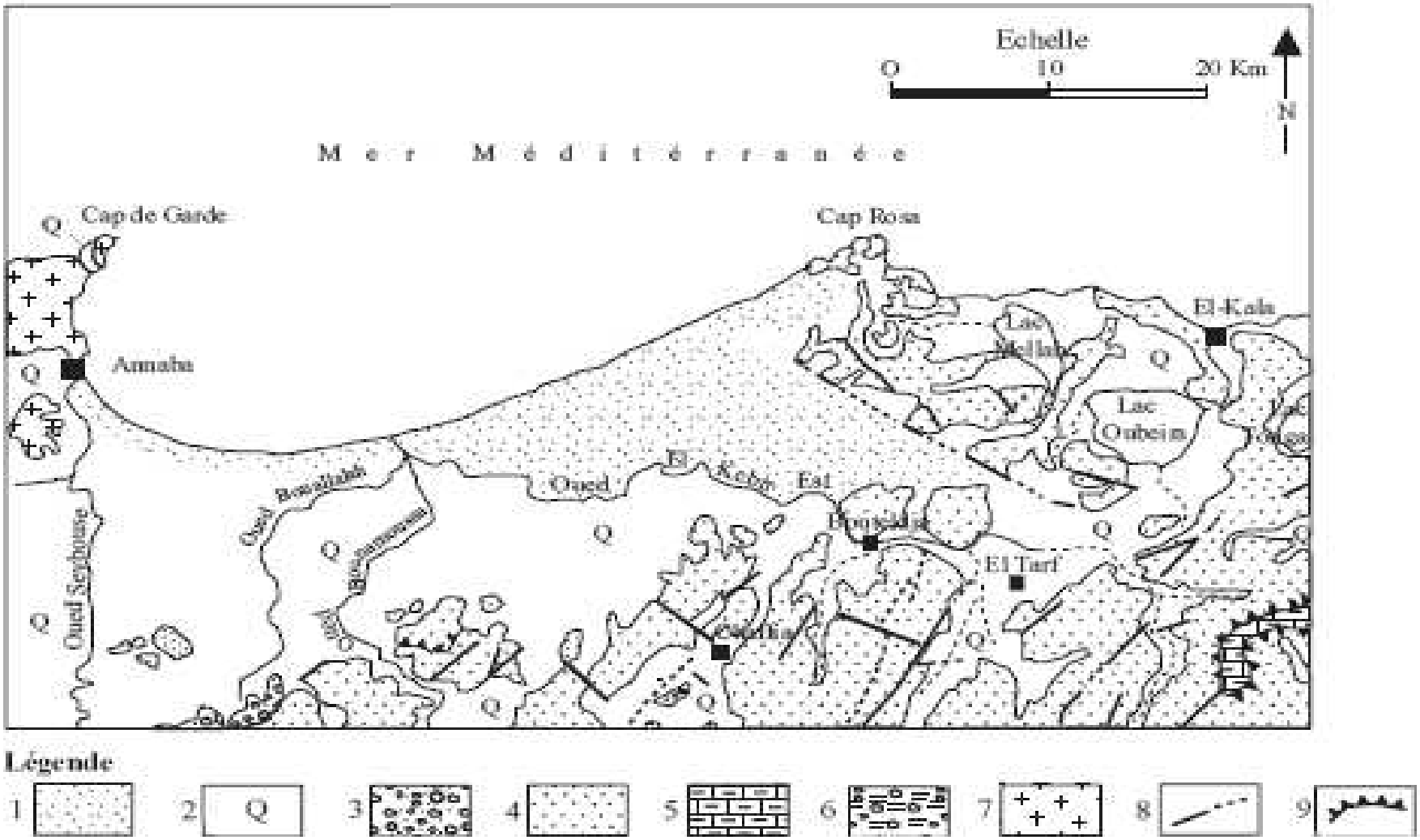


Figure N° 02 : Carte schématique des unités géomorphologiques dans la région d'El Tarf, (A.B.H. Mouchara. N ; 2004).



1 : Dunes de sables ; 2 : Alluvions quaternaires ; 3 : Moi-pliocène continenetale ; 4 : Grès du numiden ; 5 : Eocène ;
6 : Sénonien marneux à microbrèches ; 7 : Roches métamorphiques du socle du Djebel Edough ;
8 : Principales failles (établies ou superposées) ; 9 : Charillages.

<u>Figure N° 03 :</u> Extrait de la carte géologique et structurale au 1/500 000 de la chaîne alpine de l'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens (D'après J. M. Vila, 1978).

Ces grès de nature quartzeuse, à grains plus ou moins consolidés de couleur rouge à jaunâtre sont épais de près de 150 m, et bien représentés au Sud de la région d'étude, à l'Est dans le djebel Bourdim et au Nord-Est dans le Djebel Koursi. Ils ceinturent les formations alluvionnaires et surtout dunaires.

I. 4. 3. Quaternaire :

Les formations dunaires et alluvionnaires d'âge quaternaire constituent la roche réservoir du système aquifère de Bouteldja :

I. 4. 3. 1. Quaternaire ancien : Il est caractérisé par des molasses calcaires marines et dunaires, d'âge sicilien (L. Joleaud).

I. 4. 3. 2. Quaternaire moyen :

- ***Pléistocène ancien :*** Correspond aux alluvions de hautes terrasses, formée de sables et de cailloux roulés.
- ***Pléistocène moyen :*** Correspond aux alluvions de moyennes terrasses assez caillouteuses et plus ou moins argileuses à la base avec une texture fine au sommet.
- ***Pléistocène récent :*** Correspond aux alluvions de basses terrasses qui sont plus limoneuses que sableuses.

I. 4. 3. 3. Quaternaire récent : Il englobe les formations récentes et actuelles du lit majeur de l'oued et est constitué de matériaux variés à savoir : limons, sables, cailloux et argiles.

- des aires lacustres dominées par un faciès sablo limoneux.
- des formations sableuses d'origine marine. Il s'agit d'un cordon dunaire qui affleure de la Mafragh jusqu'à El Kala.

I. 5. Géologie et caractéristiques physico-chimiques des dunes :

Les dépôts du matelas dunaire sont le produit principal de l'érosion intense des massifs argilo gréseux numidiens et gneissiques charriés vers la mer, dégradés en sable, puis ramenés à l'intérieur par les vents.
Les niveaux d'argiles, provenant du massif numidien, s'intercalent dans les niveaux sableux. La délapidification progressive des grés numidiens et des formations métamorphiques a donc donné des sables qui à l'état pur renferment 80 à 90 % de silice. C'est ce qui dégage de la carte géologique et structurale établit par G. M. Vila (1980) qui montre un lambeau du socle de l'Edough au Nord de Bouteldja. Le sable est donc siliceux, fin et renferme une quantité plus ou moins forte d'argile. Il devient très argileux au pied de la chaîne numidienne. La présence de feroxyde donne au sable sa coloration rouge, brune ou jaune (source de Bouglès).
Les travaux réalisés dan la région (Khérici, 1985 ; Ramdani, 1996 ; Hani, 2003) permettent de distinger :

- des sable blancs ou jaune clair généralement perméables situés au centre du massif dunaire ;
- des sables plus perméables que les précédents ;
- des sables dont les grains sont enrobés d'une fine pellicule d'argile et de ce fait moins perméable que les bancs localisés surtout en bordures des reliefs gréseux ;

- des sables rouges, localisés à l'Ouest et au Sud Ouest, plus perméables que les précédents ;
- des vases sablo-limoneuses déposées au fond des marigots "nechaas" de couleur noire en relation avec la décomposition des végétaux.

Les analyses granulométriques effectuées dans le massif dunaire montrent une granulométrie fine à moyenne dont 75 à 85 % de grains ont un diamètre de 0.15 à 0.5 mm. Les essais de perméabilité effectués par Soletanche (in Ramdani, 1996 et Hani 2003) dans la région de Bouglès sur le sondage BG1 et BG25, montrent que les sables rouges à fraction argileuse sont caractérisés par une perméabilité de 10^{-6} m/s.
Par contre les sables jaune foncé ont une perméabilité de l'ordre de 10^{-4} m/s et constituent donc un très bon réservoir aquifère.

I. 6. Cadre structural :

La région d'étude est structuralement divisée en deux ensembles :
1- Les monts gréseux de Cheffia et leur prolongement jusqu'au Cap Rosa.
2- La terminaison orientale de la plaine d'Annaba occupée par le marécage de Mekada, pôle subside d'un vaste fossé d'effondrement comblé au cours du Mio-pliocène et du Quaternaire.
D'après la carte géologique et structurale de J. M. Villa (1978) nous remarquons l'existence d'un ensemble des terrains accidentés (plis, faille,…) au niveau de la nappe numidienne, formant de petits chevauchements. Les argiles jouent un rôle plastique sur les plans faillés. Les résultas de ces accidents représentent deux ensembles, l'un inférieur et l'autre supérieur. Le premier est composé de synclinaux et d'anticlinaux et le second est formé par le synclinale du lac Oubeira. Le lac s'est installé dans une large cuvette synclinale, bordée au Nord de plis en genou du Dj Bouliff et au Sud par le chevauchement du Dj Aich Lahmar sur le Dj Hellilif.
Le remplissage argileux de cette cuvette, généralement réparti sur tous les massifs, a pu se maintenir en créant au-dessus des grès, une couverture imperméable permettant le ruissellement des eaux vers le lac (figure N° : 04).
La bordure Sud Ouest du massif de Cap Rosa est liée à une faille normale de direction nord-ouest et sud-est. Cette dernière est postérieure à la mise en place des nappes et recoupe en oblique toutes les structures de la nappe numidienne.
La présence d'un grand nombre de sources le long de cet accident est un argument indiquant que cette faille a subit un rejeu au Quaternaire selon Vila. J. M.

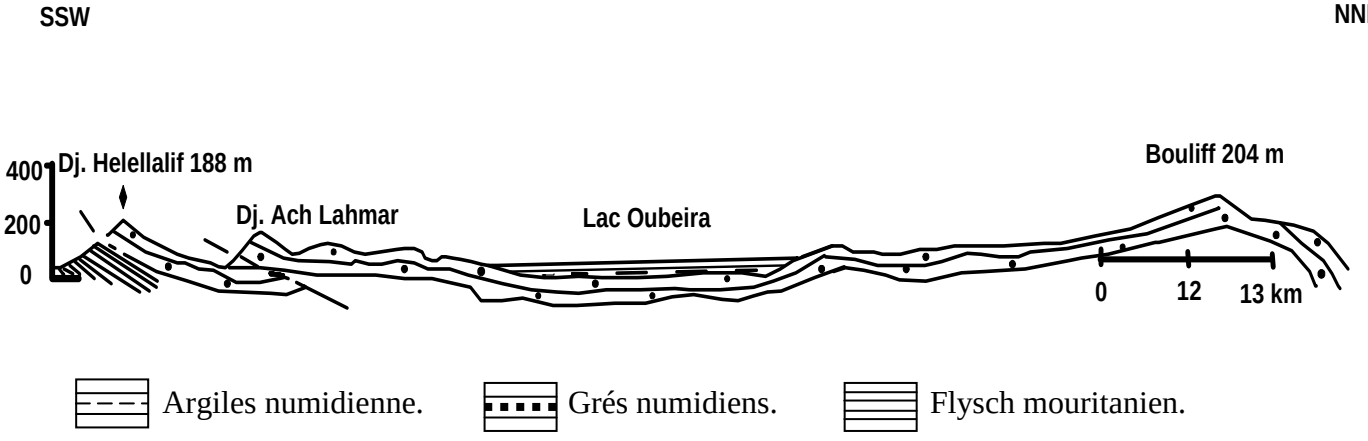


Figure N° 04 : Coupe du synclinal du Lac Oubeira (in Ramdani. A, 1996).

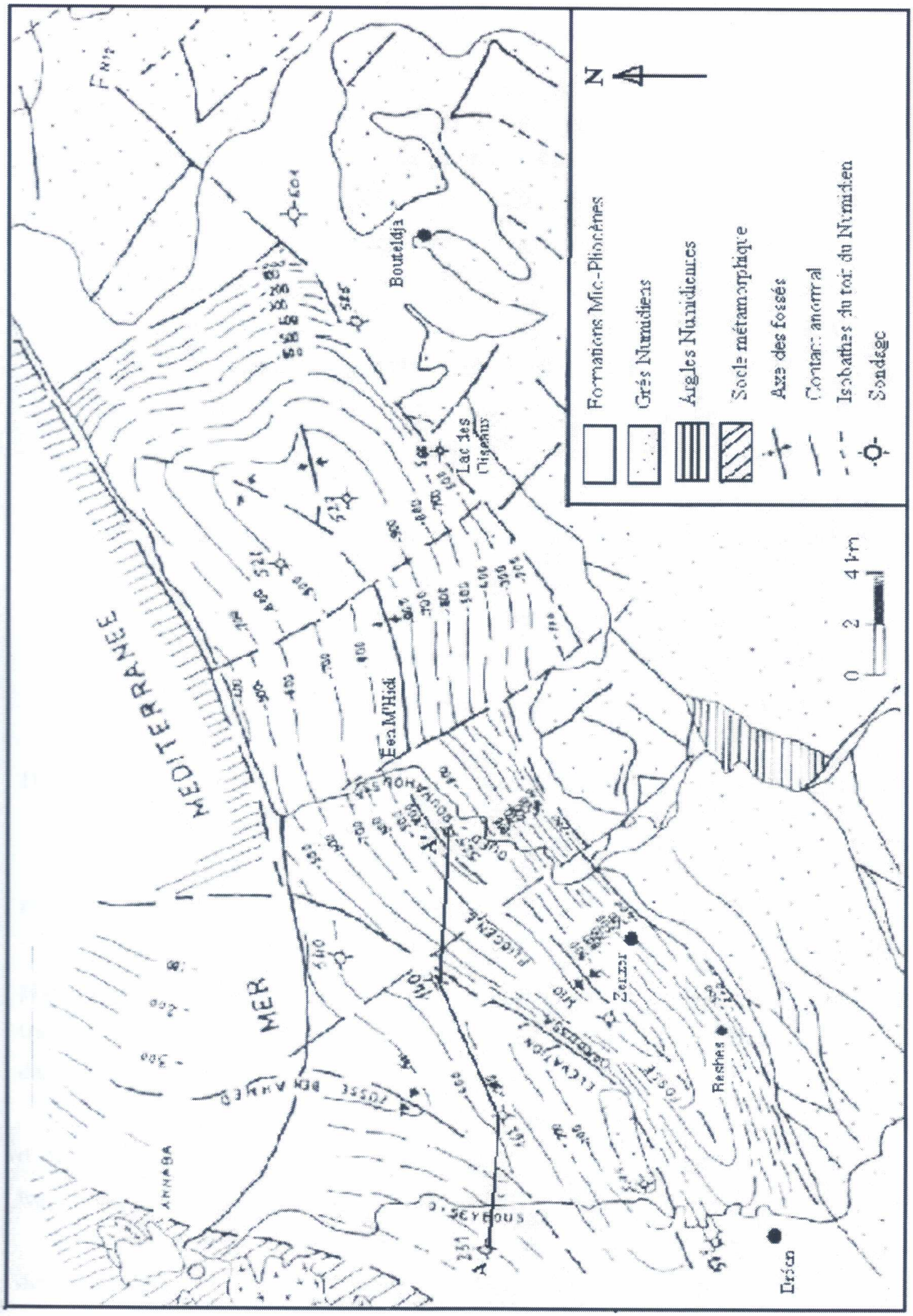


Figure N° 05 : Esquisse structurale des plaines de Annaba Bouteldja (d'après Sonatrach, 1983, modifiée) (in Saaidia. B ; 2006).

Le massif dunaire est cloisonné par un réseau de fractures sud ouest – nord est et nord ouest – sud est (figure N° : 05).

I. 7. Paléogéographie :

C'est au cours du Quaternaire (pléistocène ancien et moyen), que le creusement des vallées de l'Est Algérien a vu le jour avec la mise en place du réseau hydrographique.
A la fin du miocène le commencement du jeu de failles bordières.
A l'Est de Bouteldja et au Sud de la plaine de Tarf un puits a recoupé des marnes bleue pliocènes (Alain Marre 1987), ce qui met en évidence l'existence de cette zone au moment de la transgression pliocène.
L'avancement de la mer méditerranéenne jusqu'à la vallée d l'oued Kébir a formé ce qu'on appelle un détroit.
Le retrait progressif de la mer durant le Quaternaire récent et la formation d'un cordon dunaire littoral ont favorisé la création de lagunes marines. Ces dernières se sont transformées peu à peu en zones marécageuses et lacs où se décantent les sédiments Argilo-limoneux durant la période sèche.
- Une régression marine engendre la formation des sables dunaires rubéfiés qui se déposent en bordure de mer sous l'action du vent du Nord Ouest.
Parallèlement au niveau du bassin a eu un démantèlement des dépôts numidiens sous forme d'éboulis.
A la fin de cette phase, une lapidification des sables par un ciment calcaire a donné naissance à des grés dunaires désignés par Hilly (1962) : des arénites calcaires ou calcarénites.
- Durant la phase transgression, les dunes rubéfiées formées au cours de la régression se façonnent en sables rouges. Au niveau aussi des oueds, les terrasses continuent à se construire mais avec un matériel moins grossier.
- Un second cycle de régression suivi d'une transgression moins remarquable a permis la mise en place des dunes récentes et actuelles.
Au niveau des plaines littorales, existe un long transit de sable. Les cours d'eau transportent généralement les matériaux les plus fins qui constituent le sommet des terrasses.
Le couvert végétal qui s'est installé a fixé et favorisé l'engraissement des dunes par freinage de la vitesse du vent mettant aussi fin à leur mouvement (dunes mortes).

I. 8. Tectonique :

La région d'étude n'a pas connu une néotectonique aussi importante, les conséquences de cette néotectonique sont les suivants :

- une altitude modeste presque toujours inférieure à 1000 m (figure N° : 06) ;
- de plaines larges dans lesquelles les dépôts fins sont venus s'accumuler derrière les cordons dunaires ;
- une érosion faible et de ce fait c'est la nappe des grés numidiens qui affleure partout ;
- une variété lithologique moins grande qu'à l'Ouest ;
- la mise en place des dépôts dunaires s'est produite en différentes phases ;

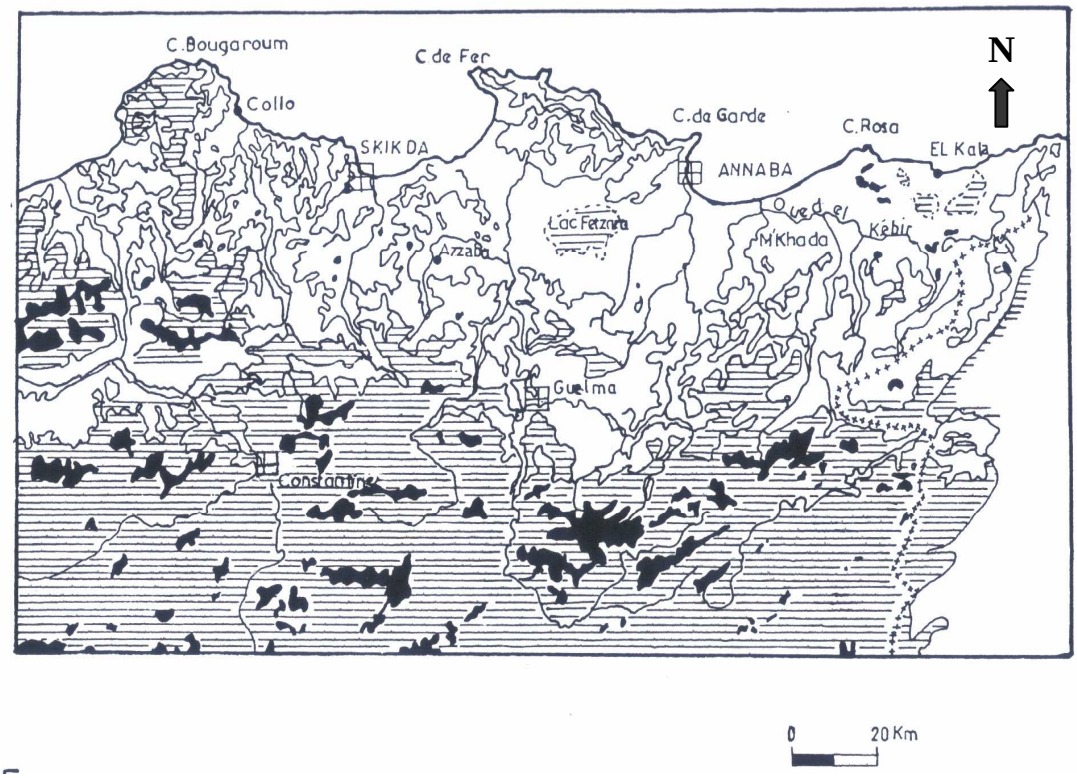


Figure N° 06 : Carte hypsométrique du Nord Est Algérien (d'après A. Marre 1987) (in Ramdani. A ; 1996)

Légende :

- Altitude comprise entre 200 et 500 m.
- Altitude comprise entre 500 et 1000 m.
- Altitude supérieure à 1000 m.

I. 9. Conclusion :

D'après cette présentation géologique et structurale de la région d'étude, il ressort que :

- les principales sources du massif dunaire sont alignées suivent un réseau de fractures de direction Sud Ouest - Nord Est et Sud Est - Nord Ouest ;
- le Quaternaires est représenté sur une grande majorité des terrains dans la région. Le processus de sédimentation est le résultat des cycles de transgression-régression ;
- les argiles et les grès numidiens se localisent au niveau des collines et des montagnes et représentent des terrains de très faible perméabilité ;
- les dunes, constituées de matériels sableux, représentent des zones d'alimentation et de stockage des eaux souterraines du massif dunaire de Bouteldja.

Chapitre II :

Hydroclimatologie.

II. 1. Introduction:

L'étude hydro climatique est basée sur la détermination des termes du bilan hydrique notamment les précipitations, les températures, l'évapotranspiration, le ruissellement et l'infiltration. Cette étude est nécessaire pour bien comprendre les mécanismes d'échange et de circulation des eaux superficielles.
Au cours de notre étude, on s'est basé sur les données climatiques de deux stations:les Salines, et Ben M'hidi qui couvrent une période de 16 ans; dont les caractéristiques sont portées dans le tableau ci-dessous.

Tableau N° 01 : Caractéristiques des stations de mesure.

Station	X	Y	Z(m)	Période d'observation	Equipement	Période de fonctionnement
Les salines	955.800	403.802	03	1990-2006	Pluviomètre Evaporométre Thermomètre Hygromètre Anémomètre Héliographe	Avant 1950
Ben M'hidi	961.620	397.300	07	1990-2006	Pluviomètre Evaporométre Thermomètre Hygromètre	Avant 1950

II. 2. Le climat :

Le massif dunaire de Bouteldja est soumis à un climat méditerranéen, caractérisé par deux saisons d'inégales durées :
- Un hiver doux et humide allant de Septembre à Mai.
- Un été chaud et sec relativement court durant les mois de Juin, Juillet et Août.

II. 3. Les facteurs climatiques :

II. 3. 1. Les précipitations :

Les précipitations sont un facteur essentiel caractérisant le climat d'une région et sont un des éléments principaux du bilan hydrique. Elles jouent un rôle prépondérant dans le comportement hydraulique des cours d'eaux et dans l'alimentation éventuelle des nappes souterraines. Constituants à moyen terme de véritables ressources mobilisables.

II. 3. 1. 1. Précipitations moyennes mensuelles :

Les précipitations moyennes mensuelles sont calculées à partir des données des hauteurs des précipitations de chaque mois sur une période de 16 ans (1990-2006) pour les deux stations. Les variations mensuelles et pluriannuelles des précipitations sont résumées dans le tableau N° 02 :

Tableau N° 02 : Les précipitations moyennes mensuelles (mm).

Mois / Stations	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai.	Juin	Juill.	Août	Total
Les salines	37.3	61.8	86.9	123.0	102.6	78.6	49.7	64.2	43.1	12.2	3.0	13.2	**676.17**
Ben M'hidi	39.4	45.4	86.0	106.7	98.9	79.9	40.0	61.8	36.3	6.5	1.9	9.4	**618.69**

- L'histogramme des précipitations moyennes mensuelles (figure N° : 07) de la station des Salines et la station de Ben M'hidi montre une hétérogénéité importante des précipitations d'un mois à l'autre avec un maximum de l'ordre de 123.06 mm aux Salines et 106.73 mm à Ben M'hidi durant le mois de Décembre, et avec un minimum de 3.03 mm à la station des Salines et 1.99mm à la station de Ben M'hidi pendant le mois de Juillet.

II. 3. 1. 2. Les précipitations moyennes annuelles :

Les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre de 676.17 mm pour les Salines et 618.69 mm pour Ben M'Hidi. Les variations interannuelles sont reportées dans le tableau qui suit :

Tableau N° 03 : Les précipitations moyennes annuelles (1990 – 2006)

Année	P (mm) les Salines	P (mm) Ben M'hidi
90-91	689.3	689.3
91-92	684.6	684.6
92-93	644.1	718.7
93-94	519.7	550.9
94-95	548.3	594.7
95-96	807.0	656.7
96-97	422.8	322.2
97-98	941.0	809.6
98-99	841.0	751.8
99-00	559.6	435.2
00-01	550.7	514.0
01-02	460.3	408.1
02-03	842.1	783.0
03-04	708.0	531.8
04-05	987.7	875.4
05-06	612.5	573.8

II. 3. 2. Les températures :

La température est un des facteurs caractérisant le climat d'une région et est un paramètre important dans l'estimation de l'évapotranspiration.

II. 3. 2. 1. Les températures moyennes mensuelles :

Les températures moyennes mensuelles mesurées aux stations des Salines et de Ben M'hidi (1990-2006), sont données dans le tableau ci-dessous :

Tableau N° 04 : Les températures moyennes mensuelles (°C).

Mois / Station	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai.	Juin	Juill.	Août
Les salines	22.6	19.8	15.3	13.2	11.0	11.3	13.2	15.1	18.6	22.6	25.0	26.1
Ben M'hidi	23.5	20.2	15.4	12.4	10.6	11.0	13.3	15.0	18.5	22.1	24.8	26.1

- L'histogramme des températures moyennes mensuelles (figure N° : 08) nous montre une différence assez proche entre les températures des deux stations. On remarque aussi que le mois le plus chaud est le mois d'Août (avec une température de l'ordre de 26.13 °C aux Salines et de 26.14 °C à Ben M'hidi). Le mois le plus froid est le mois de Janvier avec 11.06 °C à la station des Salines et 10.69 °C à la station de Ben M'hidi.

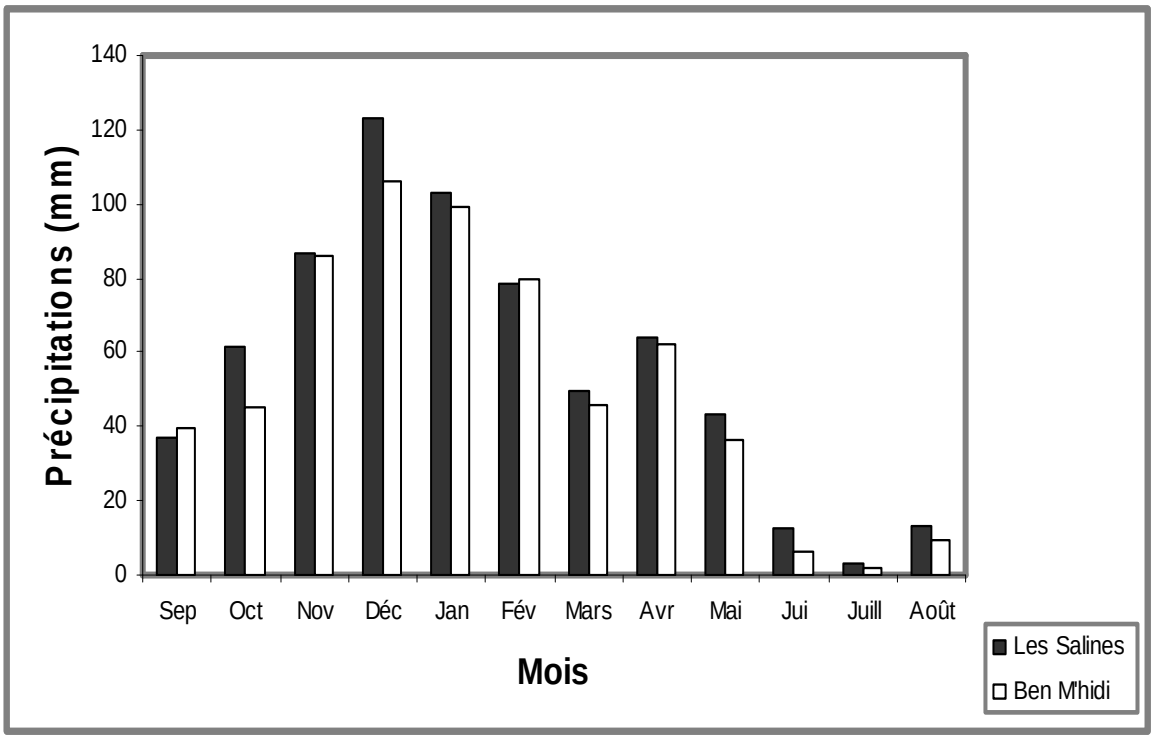


Figure N° 07 : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles aux stations des Salines et Ben M'hidi (1990 - 2006).

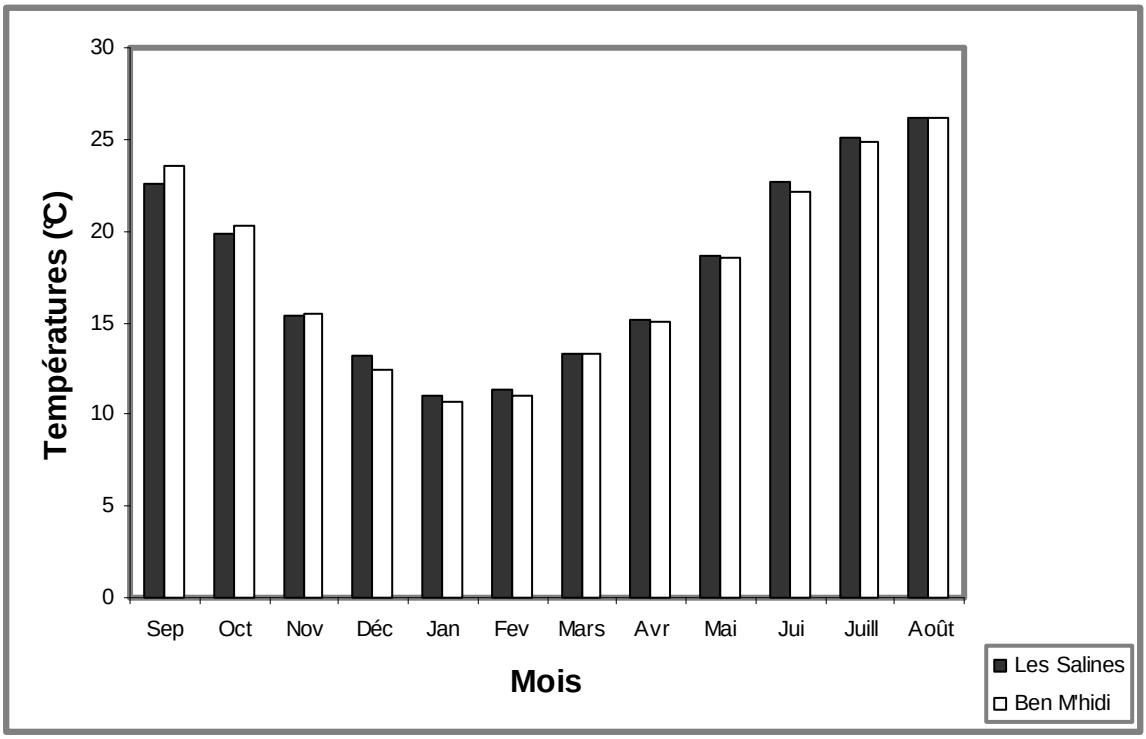


Figure N° 08 : Histogramme des températures moyennes mensuelles aux stations des Salines et Ben M'hidi (1990 - 2006).

II. 3. 2. 2. Les températures moyennes annuelles :

La température moyenne annuelle sur une période de 16 ans pour les deux stations de mesure sont reportées dans le (tableau N° 05*)* et sont respectivement de 17.87 °C pour les Salines et 17.80 °C à Ben M'Hidi.

Tableau N° 05 : Les Températures moyennes annuelles (1990 – 2006)

Année	P (mm) les Salines	P (mm) Ben M'hidi
90-91	17.70	17.33
91-92	17.16	17.28
92-93	17.83	17.94
93-94	16.93	17.82
94-95	18.30	18.01
95-96	18.58	17.68
96-97	18.15	17.45
97-98	18.01	17.33
98-99	17.94	17.66
99-00	18.27	17.76
00-01	17.96	18.15
01-02	17.71	17.57
02-03	18.54	18.58
03-04	17.68	17.51
04-05	17.38	18.21
05-06	17.75	18.34

II. 4. Diagramme ombrthermique :

Le diagramme ombro thermique est établit, en combinant les températures et les précipitations moyennes mensuelles (avec : P=2T) pour déterminer les périodes sèches et humides.

D'après ces diagrammes mentionnés en figure N° : 09 et 10, on peut déterminer deux périodes bien distinctes :

- Une saison sèche et chaude qui s'étale du début du mois de Mai (18.69 °C aux Salines et 18.58 °C à Ben M'hidi) jusqu'à la fin du mois de Septembre (22.60 °C aux Salines) et au début du mois d'Octobre (20.29 °C à Ben M'hidi).
- Une saison humide qui s'étend de début d'Octobre à Ben M'hidi et la fin de Septembre aux Salines jusqu'au mois de Mai.

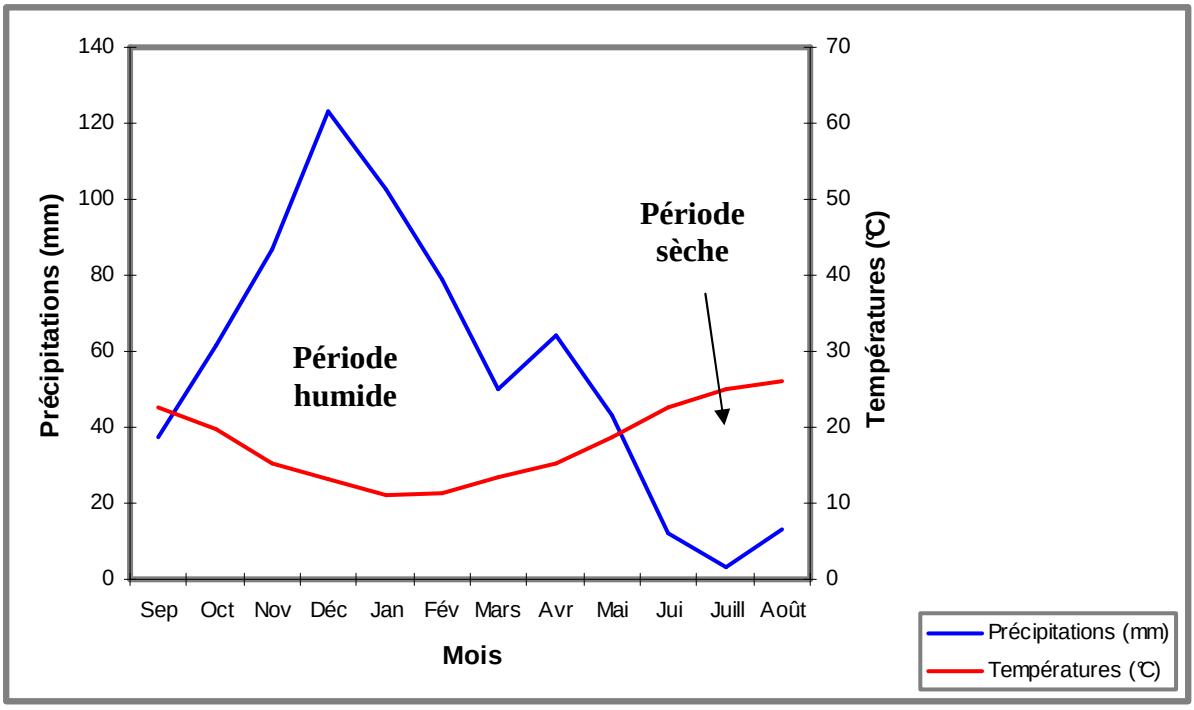


Figure N° 09 : Diagramme ombrothermique à la station des Salines (1990 – 2006)

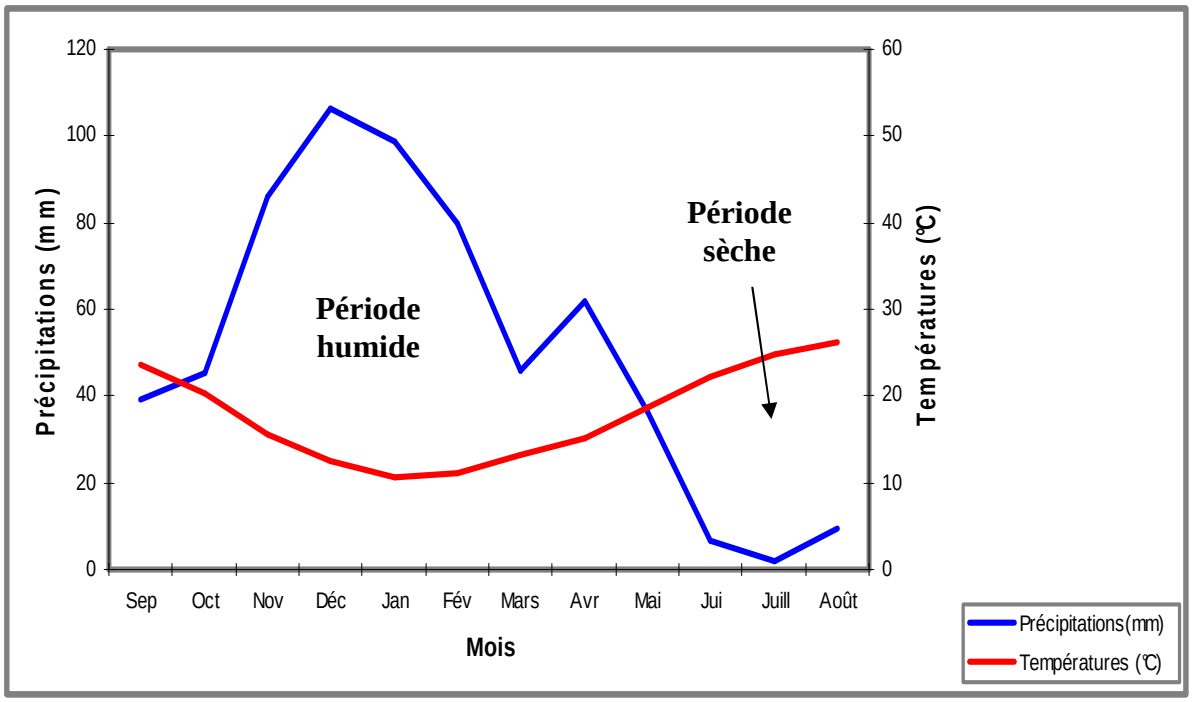


Figure N° 10 : Diagramme ombrothermique à la station de Ben M'hidi (1990 – 2006)

II. 5. Notion du bilan d'eau :

Le bilan de l'eau global a pour but principal d'établir une équation d'équilibre entre les apports et les pertes qui influent directement sur la variation des réserves. Ainsi pour déterminer le bilan de la zone d'étude, il est indispensable d'évaluer ses composantes (infiltration, ruissellement et évapotranspiration). Pour cela, on va se baser sur les données des stations des Salines et Ben M'hidi qui possèdent respectivement des séries d'observations homogènes et continues sur une période de 16 ans (1990 - 2006).

II. 5. 1. Définition de l'évapotranspiration :

L'évapotranspiration constitue un élément important du bilan hydrologique. Elle représente la quantité d'eau qui s'évapore et retourne vers l'atmosphère sous forme de vapeur. Elle résulte de la combinaison de deux phénomènes l'un physique (évaporation) et l'autre biologique qui est lie au couvert végétal (transpiration)
Le phénomène d'évapotranspiration réelle et potentielle peut être mesuré directement sur le terrain à partir d'un bac d'évaporation ou d'un évaporomètre, grâce également à des lysimètres ou calculé par des formules empiriques telles que celle de Turc ou de Thornthwaite.

II. 5. 1. 1. Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR) :

L'ETR est la quantité d'eau généralement exprimée en mm évaporée ou transpirée par : le sol, les végétaux et les surfaces libres d'un bassin versant (mers, lacs, cours d'eau…) et se manifeste de fait en conditions naturelles dans un site donne compte tenu de la demande climatique de l'air et de la disponibilité en eau du sol. Pour le calcul de L'ETR on utilise trois formules :

Formule de Turc.
Formule de Coutagne.

Formule de Thornthwaite.

a. Formule de Turc :

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{\left(0.9 + \frac{P^2}{L^2}\right)}}$$

: $L=300+25t+0.05t^2$

Avec :

ETR : Evapotranspiration réelle annuelle en mm.

P : Précipitation annuelle en mm.

T : Température moyenne annuelle en °C.

L : Pouvoir évaporant.

Les résultas sont portés dans le tableau ci-dessus :

Tableau N° 06 : ETR annuelle selon la méthode de Turc.

Paramètre / Station	P (mm)	T (°C)	L	ETR (mm/an)
Les Salines	676.1	17.8	762.7	520.7
Ben M'hidi	618.6	17.8	760.8	495.1

b. Formule de Coutagne :

$$ETR = P - \lambda P^2$$

Cette formule n'est valable que si la quantité des précipitations répond à la condition suivante :

$$\frac{1}{8\lambda} < P < \frac{1}{2\lambda} \qquad \text{pour} \qquad \lambda = \frac{1}{0.8 + 0.14T}$$

Avec :

ETR : L'évapotranspiration réelle en mm.

P : Précipitation moyenne annuelle en mm.

T : Température moyenne annuelle en °C.

- Ces valeurs permettent de déterminer les valeurs de L'ETR pour les deux stations pour les quelles on a mis le tableau suivant.

Tableau N° 07 : ETR selon la méthode de Coutagne.

Paramètre / Station	P (m)	T (°C)	λ	ETR (mm/an)
Les Salines	0.67617	17.87	0.3	539.01
Ben M'hidi	0.61869	17.80	0.3	503.86

II. 5. 1. 2. Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP) :

L'évapotranspiration potentielle est la quantité maximale de vapeur d'eau susceptible d'être reprise par l'atmosphère si l'eau disponible pour l'évapotranspiration n'était un facteur

limitant. Pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle on applique la formule de Thornthwaite.

$$ETP = 16.\left(10\frac{T}{I}\right)^{a}.K$$

$$\text{Avec : } i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1.5}, \qquad I = \sum_{t}^{12} i \ , \qquad a = \frac{1.6I}{100 + 0.5}$$

ETP : Evapotranspiration potentielle du mois considéré en mm.
T : Température moyenne du mois considéré en °C.
K : Coefficient d'ajustement mensuel.
I : Indice thermique mensuel.

- Les résultats obtenus sont portés dans les tableaux suivants :

Tableau N° 08 : Bilan hydrique de la station des Salines sur une période de 16 ans (1990 – 2006)

Mois / Paramètre	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Fev.	Mars.	Avr.	Mai	Jui	Juil	Aout	Total
P(mm)	37.33	61.83	86.94	123.06	102.68	78.69	49.76	64.23	43.13	12.25	3.03	13.24	**676.17**
T (°C)	22.60	19.81	15.36	13.23	11.06	11.39	13.29	15.17	18.69	22.68	25.04	26.13	**17.87**
I	9.60	7.88	5.38	4.30	3.28	3.43	4.33	5.28	7.22	9.66	11.20	11.94	**83.50**
K	1.05	0.91	0.75	0.70	0.73	0.78	1.02	1.15	1.32	1.33	1.33	1.24	**12.31**
ETP (mm)	103.90	70.75	36.60	26.00	19.53	22.02	38.20	54.87	92.26	132.46	158.77	160.03	**915.39**
ETR (mm)	37.33	61.83	36.60	26.00	19.53	22.2	38.20	54.87	92.26	63.12	3.03	13.24	**468.03**
RFU (mm)	0	0	50.34	100	100	100	100	100	50.87	0	0	0	**601.21**
EXC (mm)	0	0	0	47.40	83.15	56.67	11.56	9.36	0	0	0	0	**208.14**
DA (mm)	66.57	8.92	0	0	0	0	0	0	0	69.34	155.74	146.79	**447.36**

Tableau N° 09 : Bilan hydrique de la station de Ben M'hidi sur une période de 16 ans (1990 – 2006)

Mois / Paramètre	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Fev.	Mars.	Avr.	Mai	Jui	Juil	Aout	Total
P(mm)	39.43	45.47	86.0	106.73	98.92	79.91	46.01	61.85	36.36	6.53	1.99	9.49	**618.69**
T (°C)	23.57	20.29	15.48	12.43	10.69	110.6	13.31	15.09	18.58	22.19	24.83	26.14	**17.80**
I	10.23	8.17	5.44	3.91	3.12	3.28	4.34	5.24	7.16	9.34	11.06	11.95	**83.24**
K	1.05	0.91	0.75	0.70	0.73	0.78	1.02	1.15	1.32	1.33	1.33	1.24	**12.31**
ETP (mm)	112.85	74.34	37.34	23.32	18.46	20.99	38.52	54.65	91.79	128.0	157.24	161.06	**918.56**
ETR (mm)	39.43	45.47	37.34	23.32	18.46	20.99	38.52	54.65	91.79	51.10	1.99	9.49	**432.55**
RFU (mm)	0	0	48.66	100	100	100	100	100	44.57	0	0	0	**593.23**
EXC (mm)	0	0	0	32.07	80.46	58.92	7.49	7.20	0	0	0	0	**186.14**
DA (mm)	73.42	28.87	0	0	0	0	0	0	0	76.90	155.25	151.57	**486.01**

II. 5. 2. Interprétation du bilan hydrique :

L'établissement du bilan hydrique a pour but de connaître les différents paramètres (ETP, ETR, RFU, DA, EXC) , qui nous aident à comprendre le fonctionnement des systèmes hydrologique (Laborde , 1982) .

D'après le bilan hydrique dans les deux stations calculées par la méthode de Thornthwaite nous constatons que la RFU (réserve facilement utilisable) commence à se reconstituer à partir du mois de Novembre pour atteindre son maximum (100 mm) de Décembre à Avril pour les deux stations. Pendent cette période il y a un surplus d'eau se manifestant par un écoulement. Elle diminue à partir du mois de Mai jusqu'à ce qu'elle soit totalement épuisée au mois de Juin accompagnée par l'apparition du déficit agricole (DA) qui se poursuit jusqu'à Octobre.

L'ETP atteint son maximum au mois d'Août (160.03 mm aux salines et 161.06 mm à Ben M'hidi) et son minimum au mois de Janvier respectivement pour les deux stations(19.53 mm et 18.46 mm) , l'Excédent à partir du mois de Décembre et s'étale jusqu'au mois de Mars avec un maximum au mois de Janvier (84.75 mm aux salines et 80.46 mm à Ben M'hidi), l'épuisement du stock commence au mois d'Avril et se termine au mois de Juillet avec un déficit agricole maximum au mois d'Août imposant une irrigation .

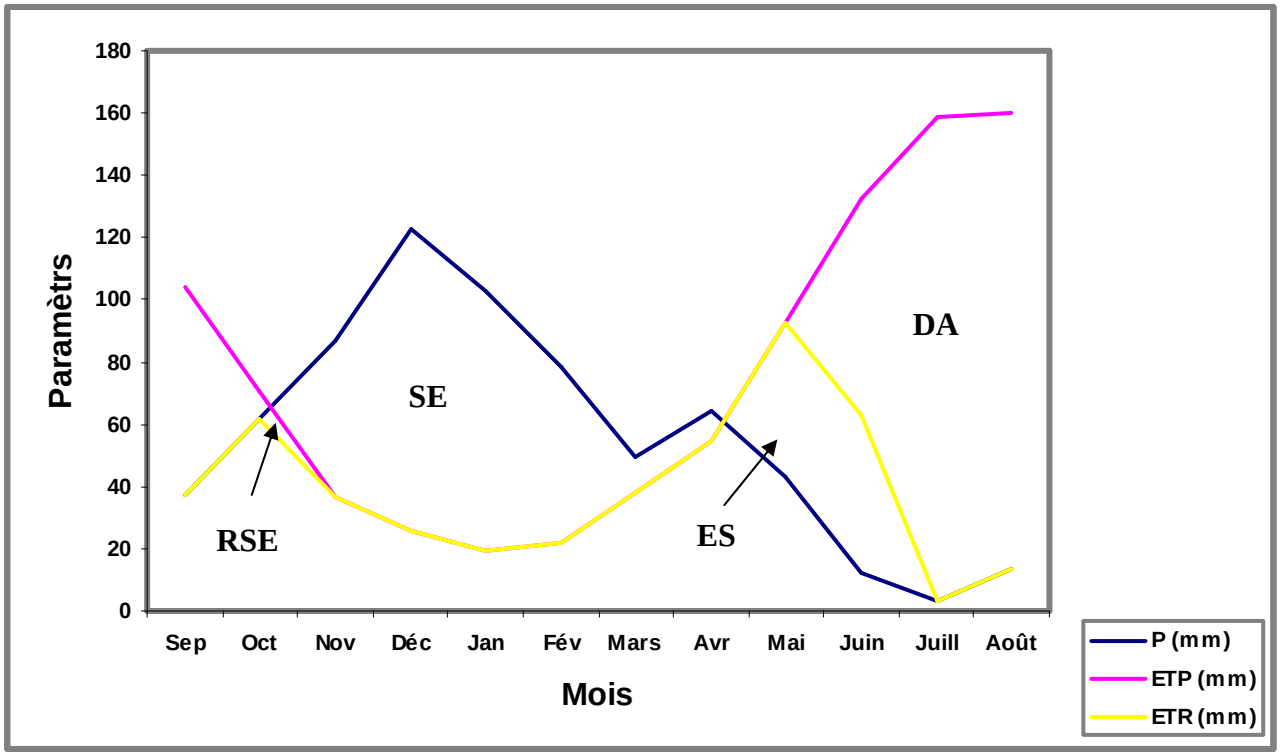


Figure N° 11 : Bilan hydrique calculé à la station des Salines sur la base des moyennes mensuelles des Précipitations, ETP et ETR (1990 – 2006)

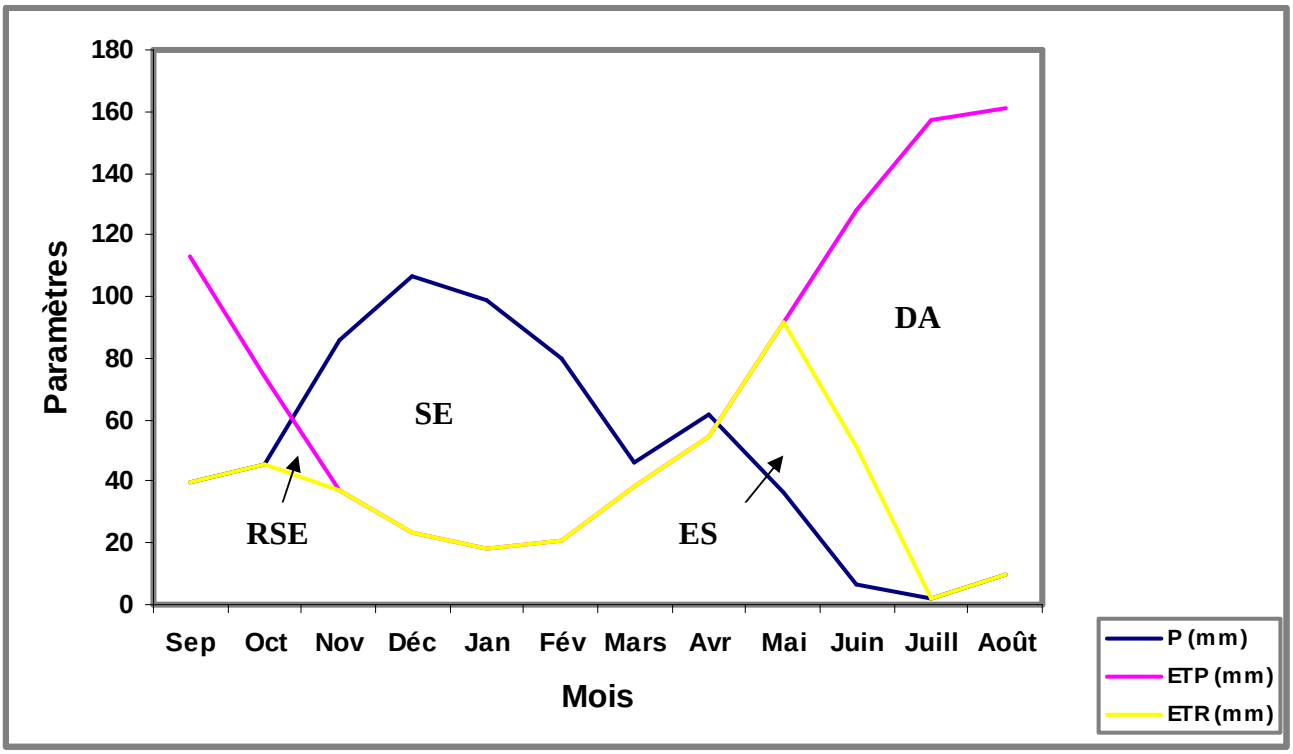


Figure N° 12 : Bilan hydrique calculé à la station de Ben M'hidi sur la base des moyennes mensuelles des Précipitations, ETP et ETR (1990 – 2006)

RSE :**Recharge du sol** SE :**Surplus d'eau** ES :**Epuisement du stock** DA :**Déficit agricol**

II. 5. 3. Comparaison :

L'utilité de la comparaison réside dans les écarts décelés lors de l'application des trois méthodes (tableau N° 10) pour aboutir à une meilleure approche de L'ETR.
Ce qui par la suite fera ressortir la formule la mieux appropriée à la région d'étude.
La formule de Thornthwaite convient aux régions humides de la zone tempérée, contrairement à celle de Turc qui présente un caractère universel.
L'ETR est surestimée pour tous les mois de l'année par ailleurs, Thornthwaite et Coutagne présentent des résultats assez similaires, la méthode de Thornthwaite s'avère plus adaptée, en plus il y a similitude des conditions dans lesquelles a été émise avec celle qui règnent dans notre région d'étude, un coefficient de correction K permet de mieux l'ajuster.
A noter qu'il n'y a pratiquement pas une grande différence entre les résultats des deux stations.

Tableau N° 10 : Corrélation des climats.

Station / Méthode	Les salines	Ben M'hidi
Thornthwaite	468.03	432.55
Coutagne	539.01	503.86
Turc	520.75	495.15

II. 6. Estimation de la lame d'eau écoulée :

II. 6. 1. Le ruissellement :

Pour déterminer le bilan hydrologique, l'évaluation du ruissellement est impérative pour estimer l'importance de l'érosion mécanique et chimique qui affecte la surface du sol.

- Formule de Tixerant-Berckaloff

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

Avec :
P : Précipitation moyenne en m.
R : Ruissellement en m.
ETP : Evaporation potentiel en m

Tableau N° 11 : Ruissellement selon la formule de Tixerant-Berckaloff.

Paramètre / Station	P (m)	ETP (m)	R (m)
Les Salines	0.676	0.915	**0.122**
Ben M'hidi	0.618	0.918	**0.093**

- A l'issue de cette étude climatologique, on peut établir le bilan hydrologique à partir des différents facteurs déjà calculés.

$$P= ETR+ R +Ie$$

Avec :

P : Précipitations moyennes annuelles en mm/an.
ETR : Evapotranspiration réelle en mm /an.
Ie : Infiltration efficace en mm/an.

II. 6. 2. Infiltration efficace :

La formule de l'infiltration efficace est la suivante :

$$Ie=P-ETR-R.$$

Tableau N° 12 : Les valeurs de l'infiltration efficace.

Paramètre / Station	P (mm/an)	ETR (mm/an)	R (mm/an)	Ie (mm/an)
Les Salines	676.17	468.03	122.97	**85.17**
Ben M'hidi	618.69	432.55	93.55	**92.59**

- **Station des Salines :**

- 69.21 % des précipitations s'évapotranspirent.
- 18.18 % en ruissellement de surface.
- 12.59 % infiltration efficace.

- **Station de Ben M'hidi :**

- 69.91 % des précipitations s'évapotranspirent.
- 15.12 % en ruissellement de surface.
- 14.96 % infiltration efficace.

N. B :
Les résultats de ruissellement sont propres aux deux régions, des Salines et de Ben M'hidi, puisque ce paramètre est nul dans la région de Bouteldja.

II. 7. Hydrologie:

II. 7. 1. Introduction :

L'étude hydrologique a pour but de connaître le régime des cours d'eau, leur alimentation, la variation de leur débit et l'influence qu'ils ont sur l'alimentation des nappes souterraines.
La région de Bouteldja, située dans la partie Nord Est de l'Algérie, fait partie du bassin versant de la Mafraghe dont le principal cours d'eau est le Kebir Est.

II. 7. 2. Le bassin versant de l'oued Kebir Est :

Le bassin versant de l'oued Kebir Est en amont de la station hydrométrique de Ain El Assel possède une orientation générale sud est, nord ouest.
Les données morphomètriques de l'oued Kebir Est au site de la station de Ain El Assel sont représentées dans le tableau N° 13.

Tableau N° 13 : Données morphomètriques de l'oued Kebir Est.

Paramètre	Valeur
Superficie du bassin versant (Km^2)	680
Périmètre (Km)	115
Indice de compacité	1.23
Longueur de Thalweg (Km)	59
Altitude Min du bassin versant (m)	30
Altitude Max du bassin versant (m)	1202
Altitude moyenne du bassin versant (m)	398

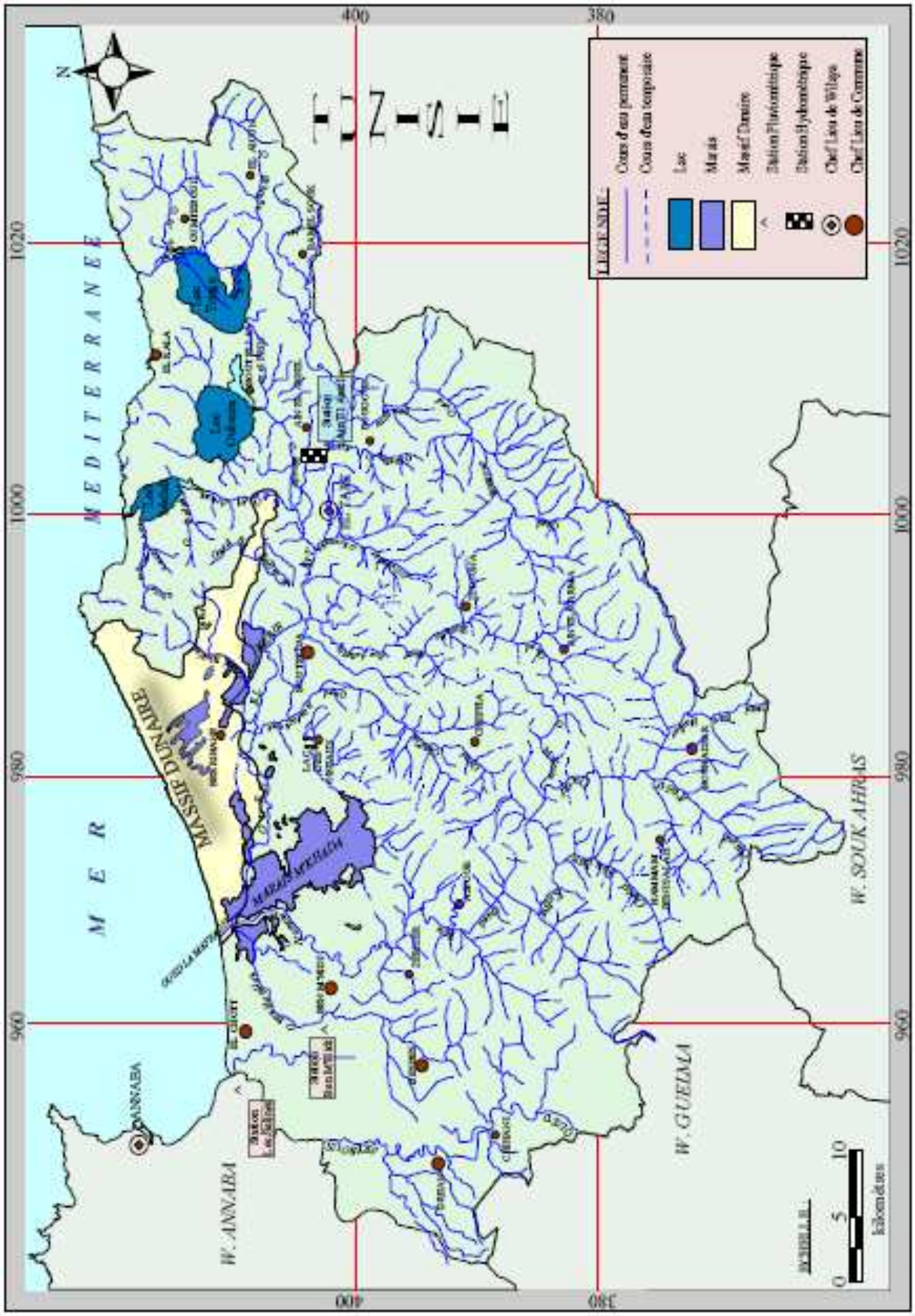


Figure N° 13 : Carte du réseau hydrographique de la wilaya d'El Tarf, (A.B.H. Mouchara. N ; 2004).

II. 7. 3. Hydrographie :

En amont de la station hydrographique de Ain El Assel, les Oueds Ballota et Bougous constituent deux grands affluents de l'oued Kebir Est qui reçoit respectivement en rive gauche les Oueds Guergour, Boulathan et Bouhalloufa, mais avant de se jeter à la mer, il se réunit avec Oued Bounamoussa à l'embouchure sous le nom de la Mafragh. (Exutoire unique). (Voir Figure N° 14)

II. 7. 4. Régime de l'Oued Kebir Est à la station hydrométrique de Ain Assel :

L'oued Kebir Est est jaugé à la station de Ain Assel, ce dernier contrôle la totalité des entrées dans le bassin depuis 1967.
Le tableau N°14 montre la variation mensuelle du débit de l'oued Kebir Est à la station de Ain Assel (période 1980-2004)

Tableau N° 14 : La variation mensuelle du débit de l'oued Kebir Est à la station de Ain El Assel (période 1980-2004).

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juill.	Août	Moyenne Annuelle Des D'bits (m^3/s)
Débit (m^3/s)	0.14	1.06	2.58	2.86	8.03	6.09	16.12	30.35	0.77	0.49	0.14	0.08	**5.72**

Source : ANRH Annaba.

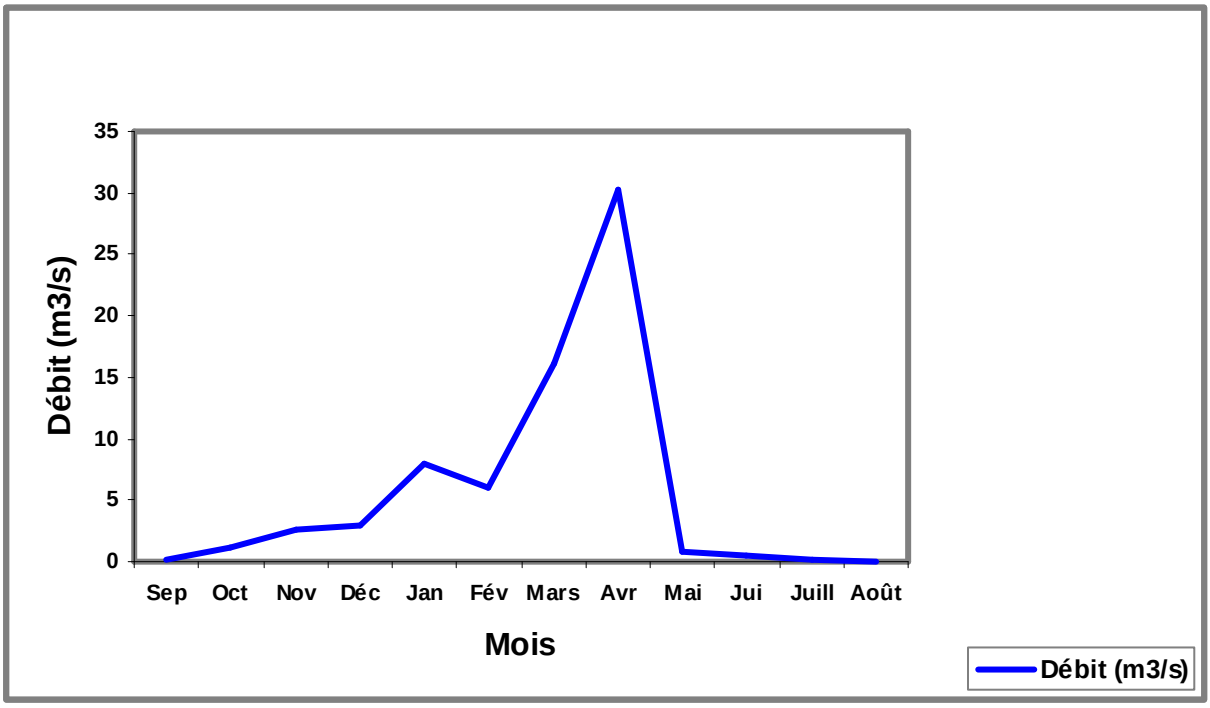


Figure N° 14 : La courbe de variation mensuelle du débit de l'Oued Kebir Est à la station de Ain Assel (1980-2004)

Le régime de l'oued est caractérisé par un écoulement très faible et il est directement lié aux apports pluviométriques.

La courbe de la figure N° 14 montre que les forts débits correspondent à la période allant de Janvier à Avril (avec un débit maximal de 30.35 m^3/s dans le mois d'Avril), alors que les faibles débits correspondent au mois d'Août avec un débit minimal de 0.08 m^3/s. Les apports moyens annuels de l'oued Kebir à la station de Ain El Assel sont de l'ordre de 5.72 m^3/s, soit un volume annuel moyen de 180 Hm^3.

II. 7. 5. Tarage de la station de Ain El Assel :

La station de Ain El Assel a été mise en place dans le cadre des études générales des Oueds Algériens a servie comme une station de référence appartenant à un réseau de base. Elle est équipée d'un limnigraphe et d'une échelle de 0 à 10 m.
La chambre de prise de pression se trouve à 84 cm du zéro de l'échelle.
La courbe de tarage a été établie à partir des différentes mesures de débits :

- Débit d'étiage.
- Débit de crue.
- Lecture directe sur l'échelle et les enregistrements du limnigraphe.

Ce tarage a permis d'établir une relation Q = f (h) entre la hauteur de l'eau et le débit à la station.

II. 8. Conclusion :

La région d'étude est soumise à un climat Méditerranéen, caractérisé par des précipitations annuelles relativement élevées de 676.17 mm/ an au niveau de la station des Salines et 618.69 mm/an dans la station de Ben M'Hidi. Ce climat est marquée par une évapotranspiration de 69.21 % (station des Salines) et 69.91 % (station de Ben M'hidi) des précipitations.
L'infiltration efficace est de 12.59 % aux Salines et 14.96 % à Ben M'hidi, ce qui traduit par conséquent une recharge importante de la nappe dunaire.

L'oued Kebir Est est le principal cours d'eau dans la région d'étude et qui est caractérisé par un apport annuel de l'ordre de 5.72 m^3/s, soit un volume annuel moyen de 180 Hm^3.

Ce volume important pourrait jouer un rôle essentiel dans l'alimentation de la nappe du massif dunaire de Bouteldja.

Chapitre III :

Hydrogéologie.

III. 1. Introduction :

L'étude hydrogéologique a pour objectif de déterminer le rôle des matériaux constituants le sous-sol et de définir la structure et la géométrie de la nappe, les caractéristiques des gisements, les modalités de l'écoulement et des conditions aux limites (entrées et sorties d'eau), et la détermination des caractéristiques hydrodynamiques de la nappe (tels que : la Transmissivité, Coefficient d'emmagasinement, la Perméabilité, …etc.). La structure hydrogéologique du système aquifère de la région du massif dunaire de Bouteldja pourrait être schématisée de la façon suivante :

1- Une nappe libre, exploitée par un grand nombre de forages et composée essentiellement de sables.
2- Une nappe profonde reconnue par les forages profonds et par les compagnes géophysiques et constituée de graviers.

III. 2. Inventaire des points d'eau :

La nappe est captée par les puits, les sources, et par les forages.

III. 2. 1. Les sources :

On remarque que dans la région d'étude, les sources (source Bougles, Diteri, Bourdim et source Espagniole) sont visiblement concentrées à l'Est prés des massifs gréseux et des dépressions sableuses et sont liées à la présence d'un massif nu ou couvert par les sables dunaires.

III. 2. 2. Les puits:

Presque dans toute la région le captage de la nappe superficielle se fait par les puits, surtout aux niveaux des agglomérations rurales éparses pour leurs besoins quotidiens. Il existe plus de 200 puits (source APC Berrihane).

III. 2. 3. Les forages :

Généralement les forages captent la nappe. Au niveau du massif de Bouteldja et vu la bonne qualité des eaux, il existe un grand nombre de forage pour l'A.E.P qui sont concentrés au sud-est du massif dunaire.

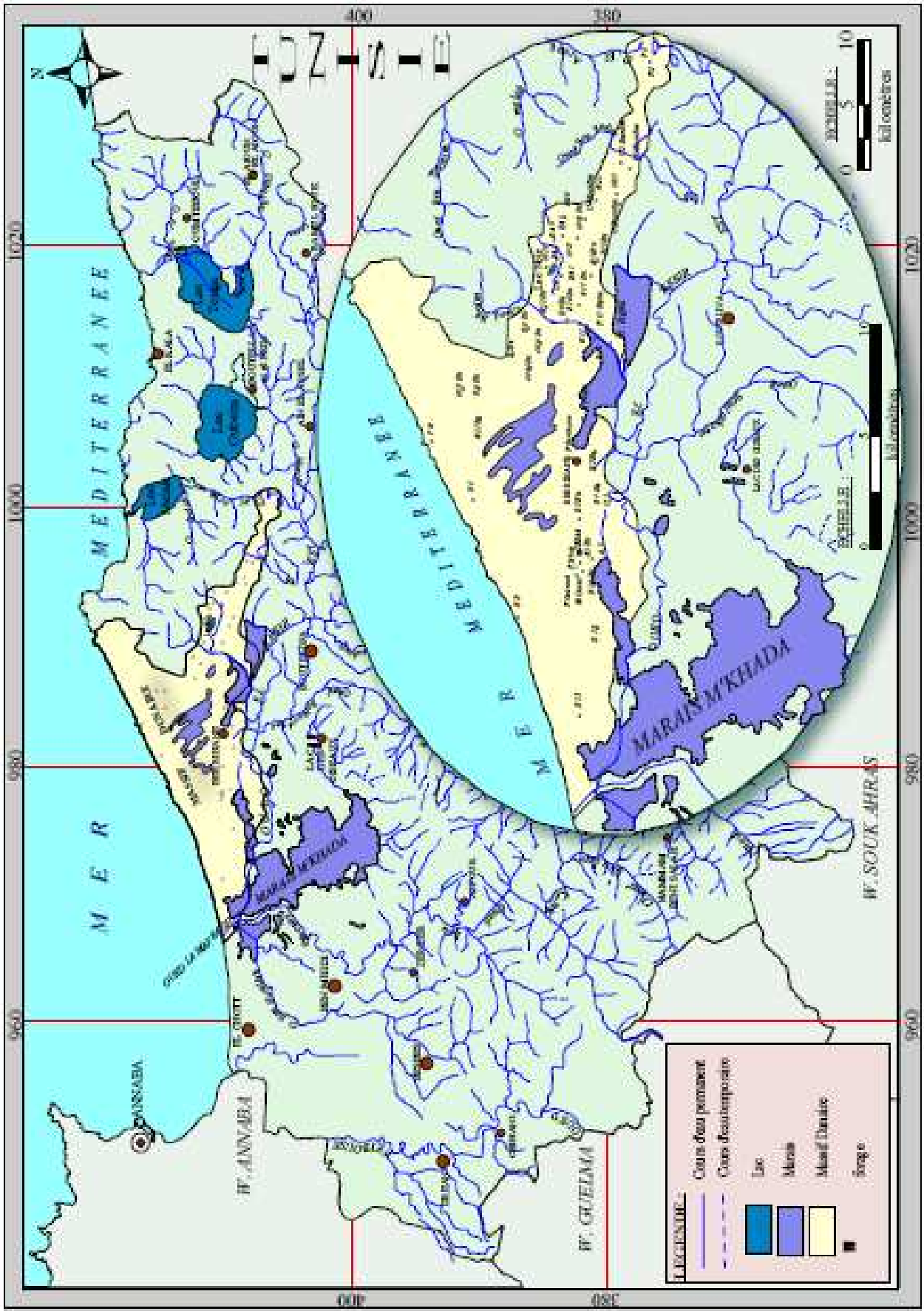


Figure N° 15 : Carte de répartition des forages dans le massif dunaire de Bouteldja, (A.B.H. Mouchara. N ; 2004).

III. 3. Géométrie et structure :

Pour mettre en évidence la nature de l'aquifère libre du massif dunaire et la morphologie du substratum, deux coupes hydrogéologiques ont été établies à partir des fiches techniques des forages et de la géophysique :

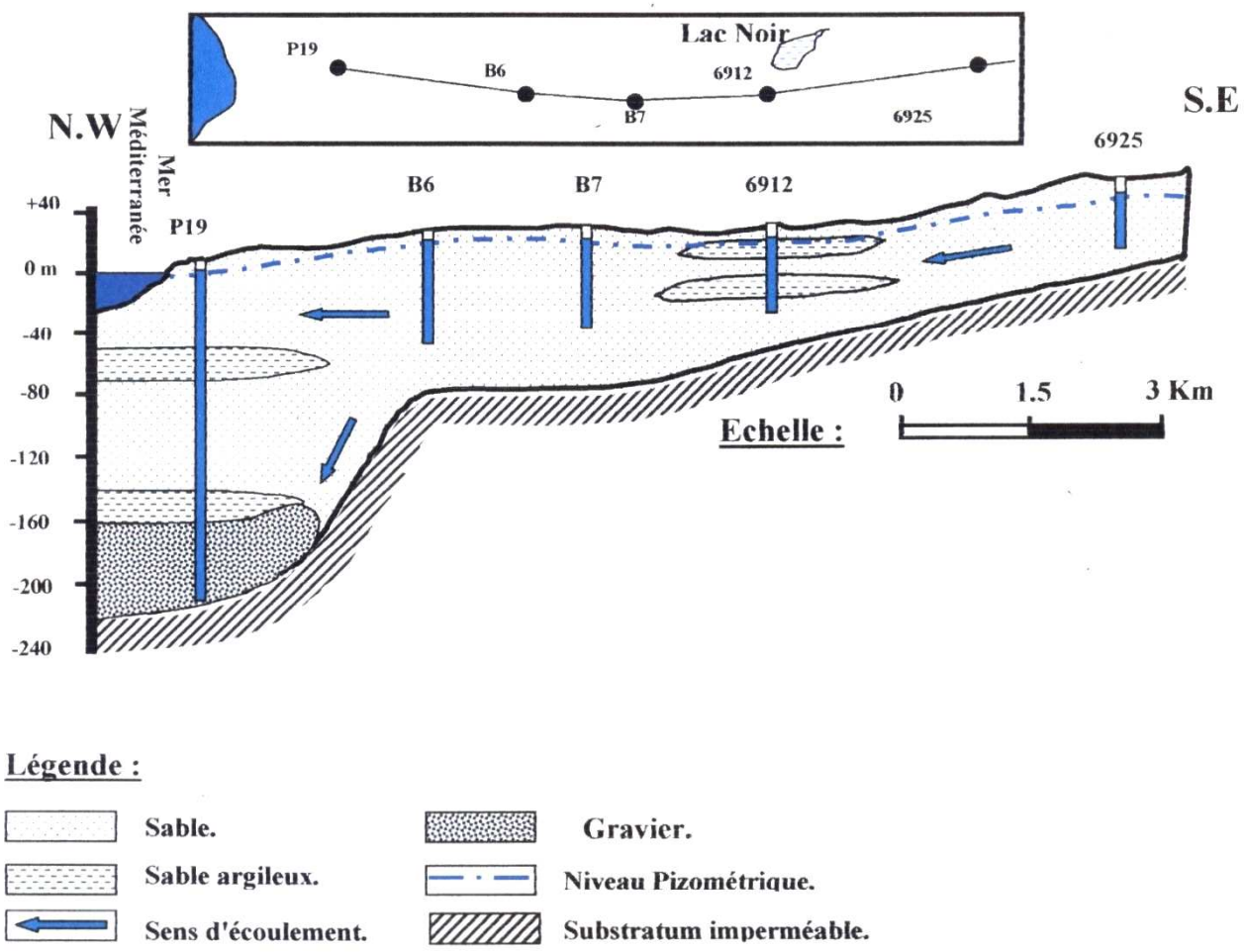


Figure N° 16 : Coupe hydrogéologique schématique dans le massif dunaire de Bouteldja.

Cette coupe montre la prédominance des sables avec des intercalations des lentilles sablo argileuses. La puissance effective de la couche aquifère des dunes varie de 20 m à l'Est à 220 à l'Ouest, et un substratum argilo-gréseux imperméable. Plus au Nord (P 19) les passages latéraux de faciès forment deux nappes. En profondeur nous retrouvons la nappe des graviers sur laquelle repose la formation sableuse, avec quelques lentilles d'argile.

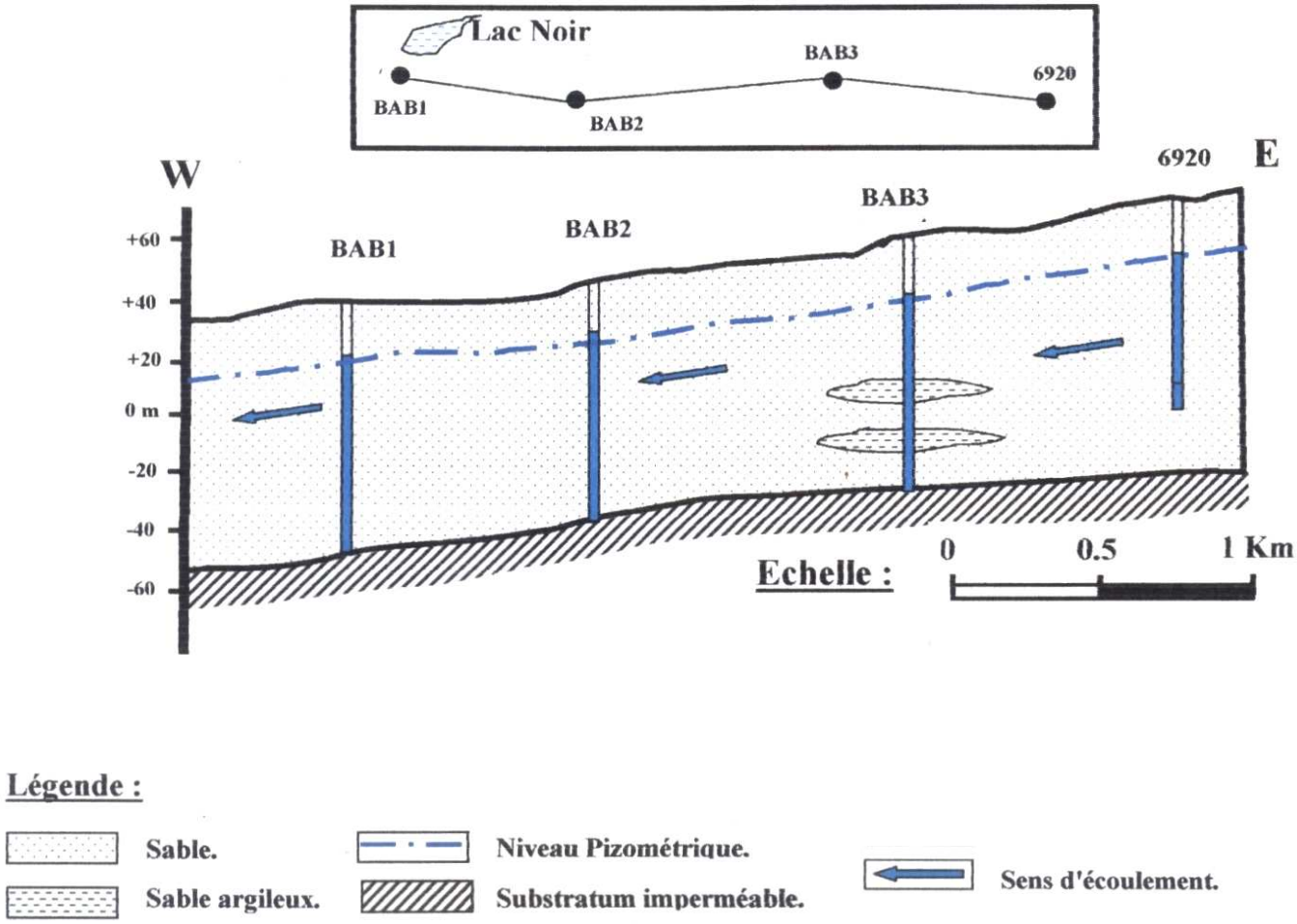


Figure N° 17 : Coupe hydrogéologique schématique dans le massif dunaire de Bouteldja.

Cette coupe découvre le secteur de Bordj Ali Bey (BAB), (zone du Lac Noire) qui est constituée de sables fins et moyens de couleur beige.
Elle renferme des intercalations de lentilles d'argiles au niveau du forage (BAB3).
L'analyse des colonnes stratigraphiques des forages (BAB1, BAB2, BAB3 et 6920) montre que l'épaisseur de l'aquifère sableux varie de 53 m (BAB3), à 63 m (6920) et à 85 m (BAB1 et BAB2). Ces sables reposent sur un substratum constitué de sables fins beiges argileux au niveau des deux premiers forages et des marnes grises compactes imperméables au niveau du troisième forage.

III. 4. L'alimentation de l'aquifère du massif dunaire de Bouteldja:

L'alimentation de cette nappe se fait essentiellement :

- à partir des pluies abondante de la saison pluvieuse.
- à partir des écoulements souterrains de la nappe de grés numidiens (infiltration et ruissellement) qui sont visibles par les sources au pied du massif gréseux dans sa limite Est.

III. 5. Conditions aux limites de la nappe du massif dunaire :

Au Nord, les eaux souterraines du massif dunaire se déversent dans la mer le long du littoral.

Au Sud, la terrasse du Kébir Est, limitée par le Djebel Bourdim et la Mafragh, constitue un deuxième exutoire de la nappe dunaire, aussi compte tenu des changements latéraux de faciès liés au contact des dunes avec les terrasses alluvionnaires, la nappe dunaire admet aussi une limite de fuite vers les marécages.

A l'Est, la nappe dunaire est en contact avec des grés numidiens peu argileux, la limite devient perméable, par contre les grés pratiquement argileux constituent en profondeur une limite imperméable.

Le substratum de nature argilo-greseux, sur lequel reposent les formations éoliennes s'enfonce du sud-est vers le nord et sud-ouest.

III. 6. Caractéristiques hydrodynamiques de la nappe :

On peut déterminer les paramètres hydrodynamiques de la nappe soit par la réalisation d'essai de pompage soit par de tests au laboratoire.

III. 6. 1. L'étude de la transmissivité (T) et du coefficient d'emmagasinement (S) :

L'interprétation des données de pompage d'essai réalisé dans la nappe dunaire de Bouteldja a permis d'identifier la zone la plus transmissive qui se localise dans le bassin de l'oued El Bhaim et dans le secteur Bouglès, Bourdim. D'une manière générale les valeurs de transmissivité sont comprises entre 10^{-6} et $1.3\ 10^{-3}$ m^2/s.
L'analyse de ces données a permis aussi de déterminer le coefficient d'emmagasinement dont les valeurs sont de l'ordre de 11.5% en moyenne. Ce qui correspond au valeur d'une nappe libre.

III. 6. 2. L'étude du coefficient de perméabilité (K) et de la porosité efficace (n_e) :

a) La détermination de la perméabilité au laboratoire : (Mouchara 2004)

-Deux méthodes sont des applications de la loi de Darcy et sont utilisées au laboratoire :

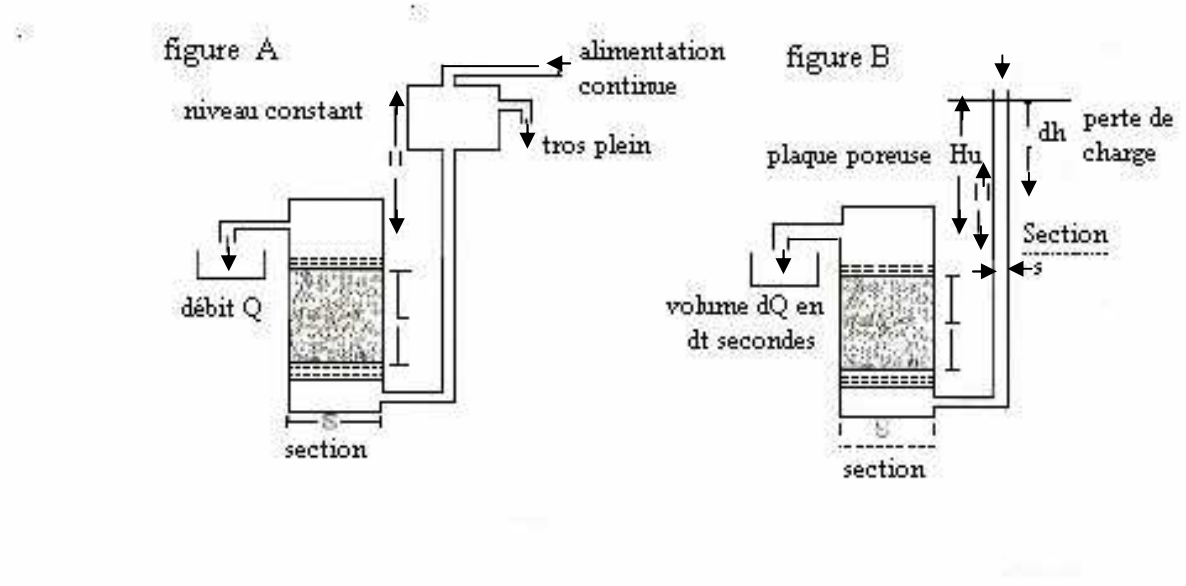


Figure N° 18 : Schémas des dispositifs de perméabilité à charge constante et à charge variable.

Le dispositif de la figure (18A) permet la mesure du coefficient de perméabilité (K) sous une charge constante, et il est utilisé pour les sols perméables (ce qui est le cas du sable du massif dunaire).

Alors que, le dispositif (18B) est employé pour les sols peu perméables.

Perméamètre à charge constante (Fig. 18A) :
Ce Perméamètre est composé d'une enceinte étanche dans la quelle est placée un échantillon du sol (sable) de section S et de longueur L.
Les deux extrémités de l'échantillon sont reliées à deux tubes par l'intermédiaire de pierres poreuses, nous maintenons à l'aide du trop plein la différence de charge H entre les deux faces de l'échantillon constante et l'on mesure la quantité V_0 d'eau qui est passé pendant un temps donné t.
D'après la loi de Darcy, nous avons :

$$Q = K \times i \times S \Rightarrow \frac{V_0}{t} = K \times \frac{H}{L} \times S \Rightarrow K = \frac{V_0 \times L}{H \times S \times t}$$

Nous avons pris les données suivantes :

L=11.7 cm = 0.117 m (L : longueur du cylindre contenant l'échantillon)
D=10.2 cm = 0.102 m (D : diamètre du cylindre contenant l'échantillon)

$$S = \Pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 3.14\,(0.051)^2 = 0.0082\,\mathrm{m}^2$$

S : surface du cylindre contenant l'échantillon)
H=0.725m
H : la différence de charge entre les deux faces de l'échantillon)
Le tableau N° 15 contient les résultats obtenus :

Tableau N° 15 : Résultats obtenus pour la perméabilité des échantillons :

N°de l'échantillon	X	Y	V ($10^{-5}m^3$)	T (s)	H (m)	K (m/s)
1	979.8	406.9	29.5	71	0.725	**$8.18\ 10^{-5}$**
2	985	407.1	48.5	120	0.725	**$7.95\ 10^{-5}$**
3	985.9	407.8	31	123	1.16	**$3.10\ 10^{-5}$**
4	988.1	409.6	51.5	90	0.725	**$1.13\ 10^{-4}$**
5	990.8	408.6	51.4	69	0.725	**$1.47\ 10^{-4}$**
6	991.8	408.4	55.6	120	0.725	**$9.12\ 10^{-5}$**
7	992.9	408.5	37.5	90	0.725	**$8.20\ 10^{-5}$**
8	993.2	409.05	20	51	1.16	**$4.82\ 10^{-5}$**
9	993.2	409.5	21.2	90	0.725	**$4.63\ 10^{-5}$**
10	991.8	408.9	42	92	0.725	**$8.98\ 10^{-5}$**
11	991.9	408.8	35	92	0.725	**$7.48\ 10^{-5}$**
12	991.9	408.9	21	120	0.725	**$1.43\ 10^{-5}$**
13	991.8	408.9	24	100	0.725	**$4.72\ 10^{-5}$**

b) La détermination de la porosité efficace (n_e) :

La détermination de la porosité efficace s'est effectuée par égouttage d'un échantillon de sable saturé en eau et contenu dans un récipient de capacité définie. Le volume recueilli après un temps donné va servir au calcul de la porosité efficace selon la relation suivante :

$$n_e = \frac{V_e}{V_t}(\%)$$

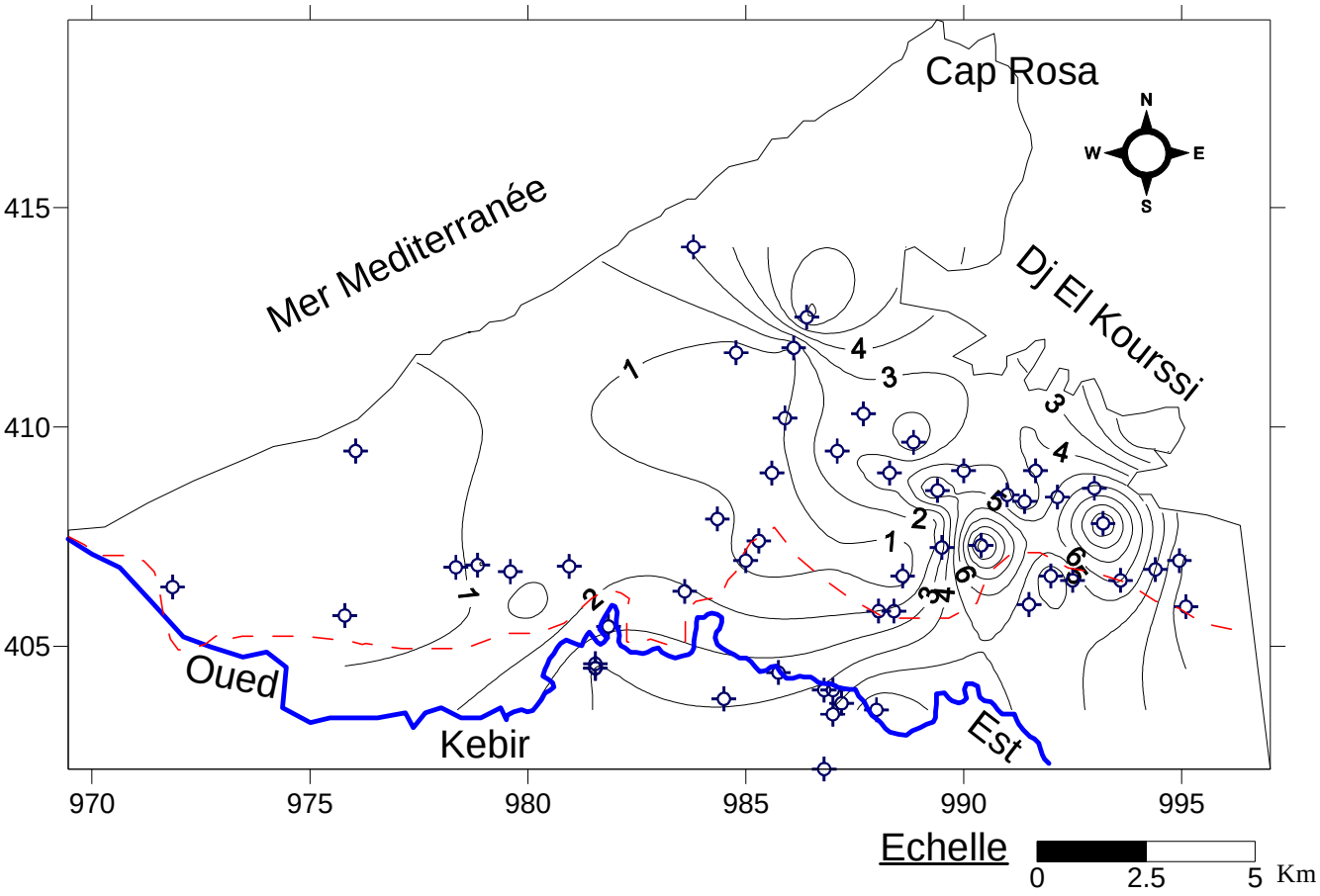
Le tableau N° 16 contient les résultats obtenus :

Tableau N°16 : Résultats obtenus pour la porosité efficace des échantillons.

N° de l'échantillon	X	Y	$V_{versé}$ (ml)	$V_{égouté}$ (ml)	n_e (%)
1	979.8	406.9	70	14	**20%**
2	985	407.1	77	9	**11.68%**
3	985.9	407.8	80	8	**10%**
4	988.1	409.6	68	15	**22.05%**
5	990.8	408.6	72	12	**16.66%**
6	991.8	408.4	64	18	**28.12%**
7	992.9	408.5	66	14	**21.21%**
8	993.2	409.05	69	13	**18.84%**
9	993.2	409.5	75	12	**16.16%**
10	991.8	408.9	75	20	**26.66%**
11	991.9	408.8	78	10	**12.82%**
12	991.9	408.9	100	15	**15%**
13	991.8	408.9	65	18	**27.69%**

D'après l'analyse des deux tableaux on remarque que :
- Les valeurs de la perméabilité varient entre 1.43 10^{-5} et 1.47 10^{-4}
- Les valeurs de la porosité efficace varient entre 10 et 30%

Ces valeurs ne concernent que la zone du Lac Noir et correspondent à la zone non saturée.



Légende :

: Oued Kebir Est.

: Ligne de contact massif dunaire nappe des graviers.

Figure N° 19 : Carte de répartition des transmissivités en $10^{-3}m^2/s$ de la nappe du massif dunaire de Bouteldja.

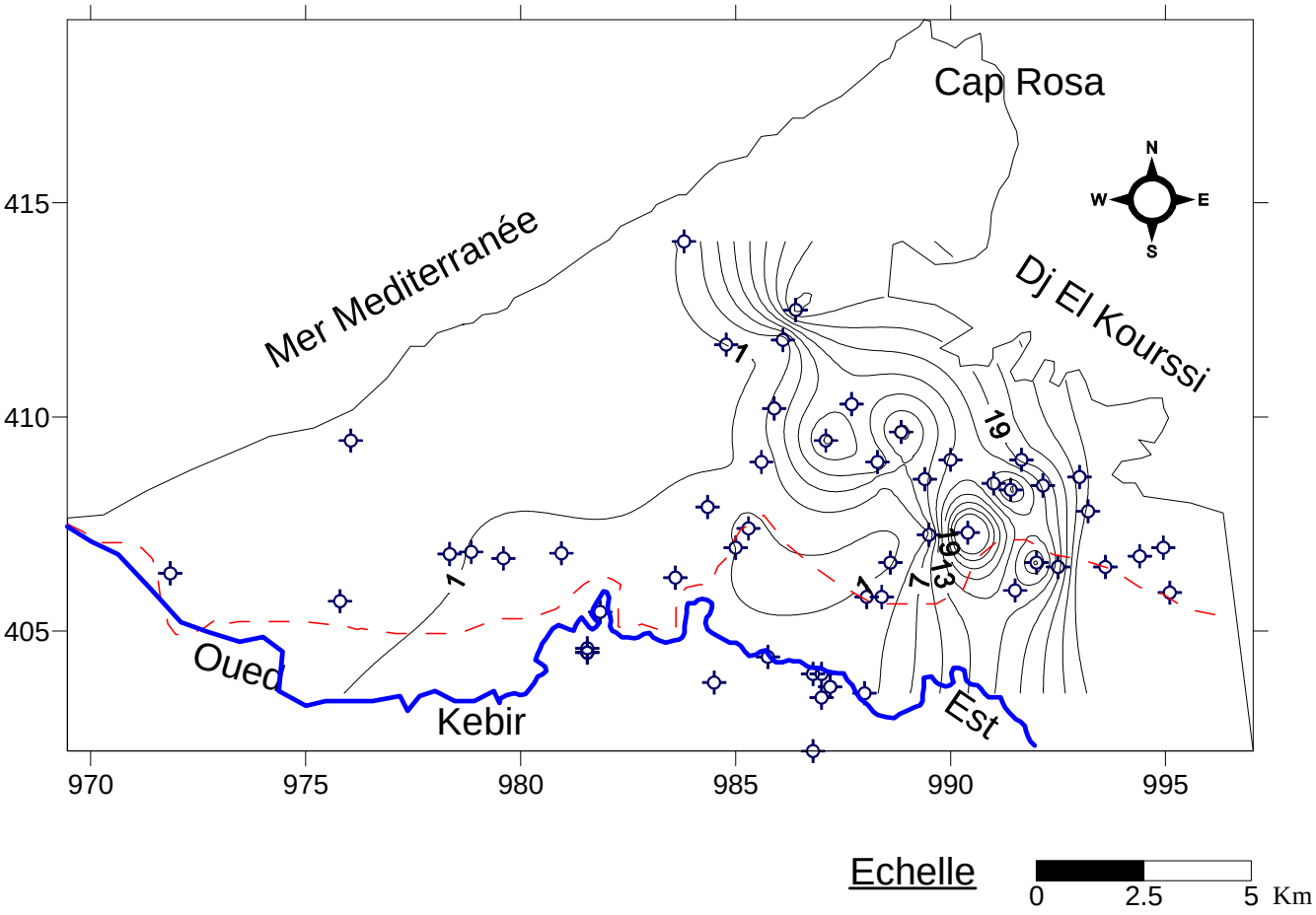
III. 6. 3. Répartition spatiale des transmissivités :

Les valeurs consignées dans l'annexe N° 05 ont permis l'établissement d'une carte (Figure N° 19) sur la quelle s'individualise une zone préférentielle qui présente les meilleures valeurs de transmissivités et de perméabilités.

Cette zone correspond à la partie Sud Est du massif dunaire qui s'avère productive au vu du grand nombre de forage.

L'analyse de cette carte des transmissivités montre une variabilité du paramètre transmissif lié à la variation de la perméabilité des formations alluviales traversées par le lit de l'oued principal et qui constitue la zone franche avec les dunes.

Sur cette carte, nous remarquons que les valeurs de transmissivités comprises entre 1 et $3.10^{-3}m^2/s$ se répartissent d'oued Kébir Est au Nord Est de la zone d'étude. Au Sud, Sud Est par contre les transmissivités s'améliorent et passent de 3 à $1.1.10^{-2}\ m^2/s$.



Légende :

: Oued Kebir Est.

: Ligne de contact massif dunaire nappe des graviers.

Figure N° 20 : Carte de répartition des perméabilités en 10^{-5}m/s de la nappe du massif dunaire de Bouteldja

III. 6. 4. Détermination et répartition des perméabilités :

Détermination des perméabilités :

La Transmissivité étant égale au produit de la perméabilité par la puissance de l'aquifère. La perméabilité est donc définie comme étant le rapport entre la transmissivité et l'épaisseur saturée de la couche aquifère. C'est par cette relation à partir de la superposition de la carte des transmissivités et celle des épaisseurs mouillées qu'il a été possible de déterminer la variation des coefficients de perméabilités à travers la nappe dunaire (Ramdani. A ; 1996).

Répartition des coefficients de perméabilités :

L'étude de la carte des perméabilités élaborée à partir d'un grand nombre de valeurs de coefficients de perméabilités (figure N°.20), fait ressortir que les perméabilités augmentent d'Ouest en Est, et révèle trois zones distinctes :

- Une zone dont les valeurs inférieures à 2.10^{-5} occupe la partie Ouest ;

- Une zone centrale qui s'étend de Mouaissia à Righia au Sud jusqu'à Hennaya à la mer au Nord avec des valeurs comprises entre 2 et 8.10^{-5}m/s ;
- Une zone Sud Est, inscrite dans le triangle Righia, Bourdim et Bordj Ali Bey, caractérisée par des perméabilités comprises entre 1 et 3.10^{-4}m/s.

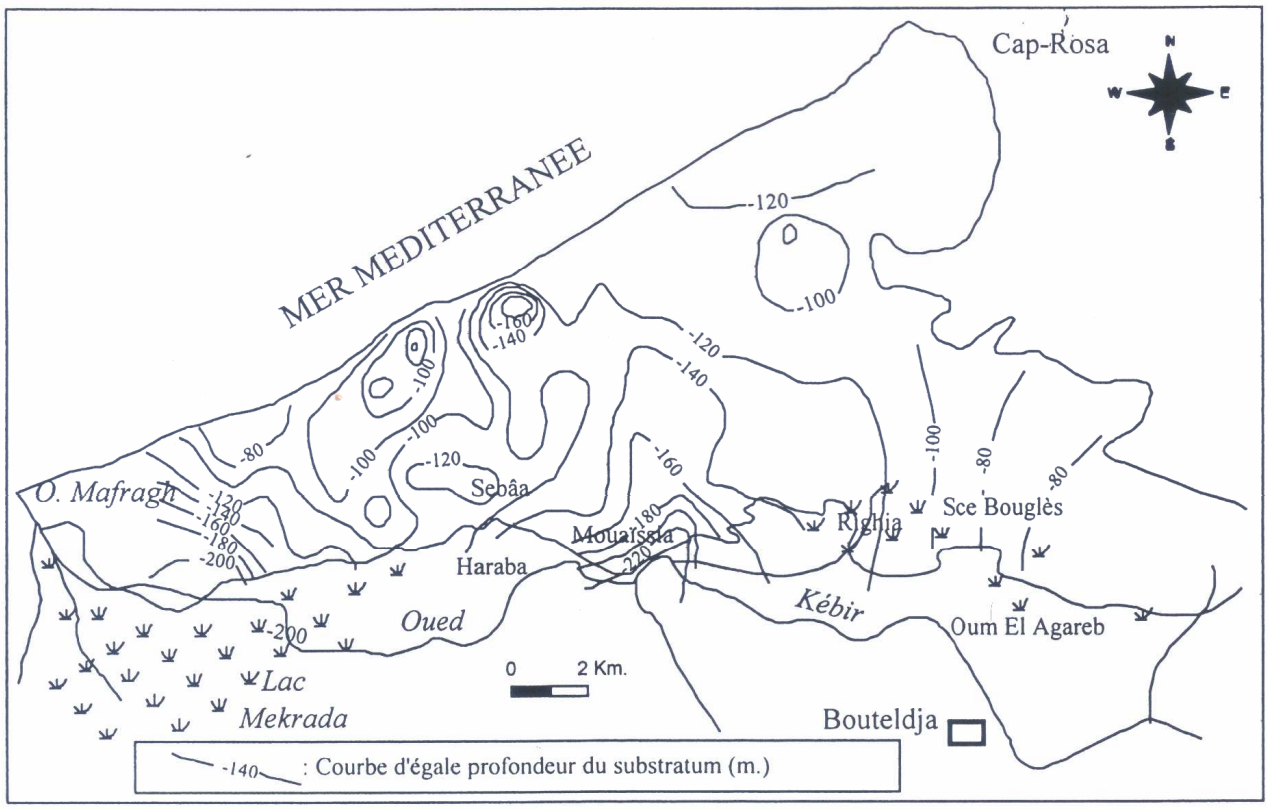
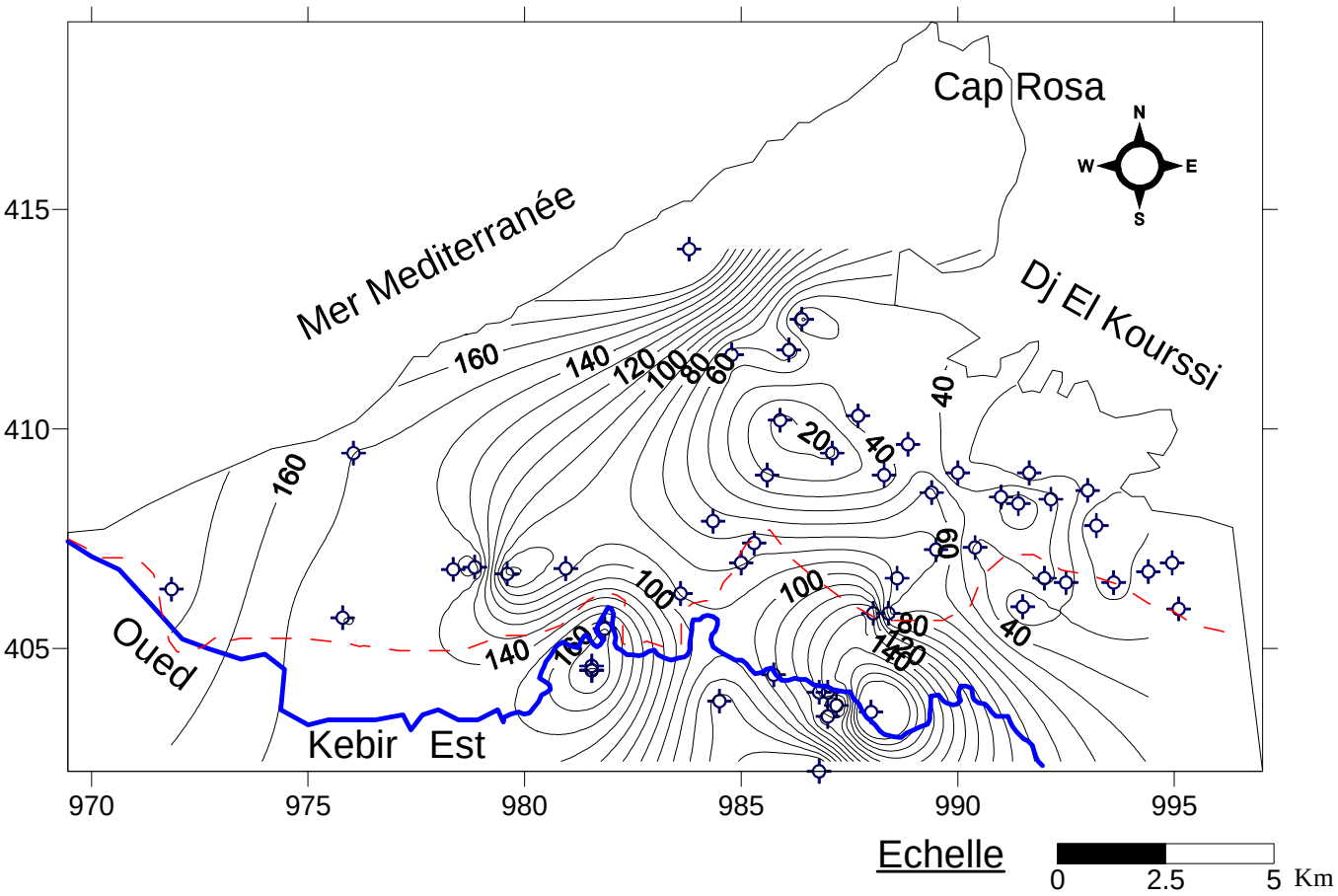


Figure N° 21 : Carte du substratum de la nappe du massif dunaire de Bouteldja d'après la géophysique (d'après les données de Strojexport, 1975, in Hani, 2003) .

III. 6. 5. Interprétation de la carte du substratum (carte isobathe) :

La morphologie interne du substratum est déterminée à partir des coupes litho stratigraphiques et des forages parfaits. La carte isobathe montre une morphologie complexe avec deux principales cuvettes : l'une au Nord et l'autre au Sud du massif dunaire. Ce sont deux zones favorables à l'implantation des forages :

- **La zone Nord :** L'espacement des courbes est plus ou moins régulier, indiquant des pentes faibles du centre vers le Nord. La profondeur augmente de 80 m (BAB4) jusqu'à 220 m (P19). Cette structure est due à l'existence d'un affaissement du substratum, donc un réservoir plus épais.
- **La zone Sud :** Les courbes sont serrées, est donc abrupte, le substratum descend de 80 m à 150 m. Allant vers le Sud Ouest, l'espacement des courbes est important, indiquant une pente moins raide.



Légende :

: Oued Kebir Est.

: Ligne de contact massif dunaire nappe des graviers.

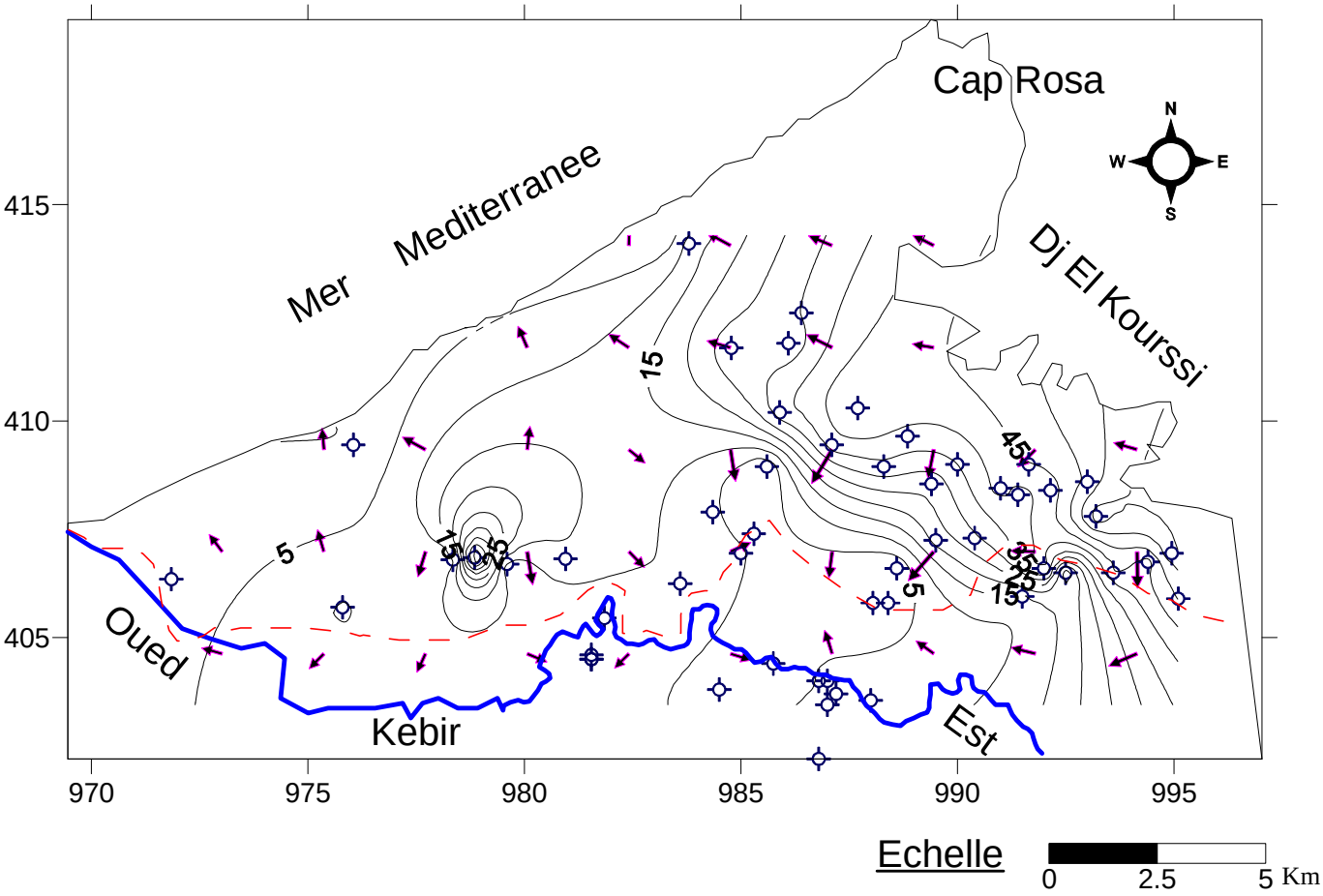
Figure N° 22 : Carte d'égale épaisseur de la couche saturée de la nappe du massif dunaire de Bouteldja.

III. 6. 6. Interprétation de la carte d'égale épaisseur de la couche saturée (carte isopache) :

La carte du substratum et la carte piézomètrique des basses eaux ont permis de tracer la carte d'égale épaisseur de la couche saturée de l'aquifère libre du massif dunaire de Bouteldja (Figure N° 22).

Cette carte visualise la répartition spatiale des épaisseurs. Elle nous montre en effet, trois zones bien distinctes :

- La zone sud-ouest localisé au niveau de Haraba, Mouaissia et Oued Dieb avec une épaisseur saturée entre 120 et160m.
- La zone centrale allongée selon deux axes nord-ouest, nord-est dont les épaisseurs varient respectivement de 100 à 160m et de 60 à120m.
- La zone est, sud-est (Bourdim, Dj.Siah, Oum El Agreb et Dj Kourssi).
  Dans cette zone le substratum argilo-gréseux numidien se trouve entre 60 et 100 m de profondeur. Les proportions d'argile demeurent très importantes, ce qui limite par conséquent la fraction de la couche saturée.
  Les épaisseurs de la nappe ne dépassent pas les 60 m.



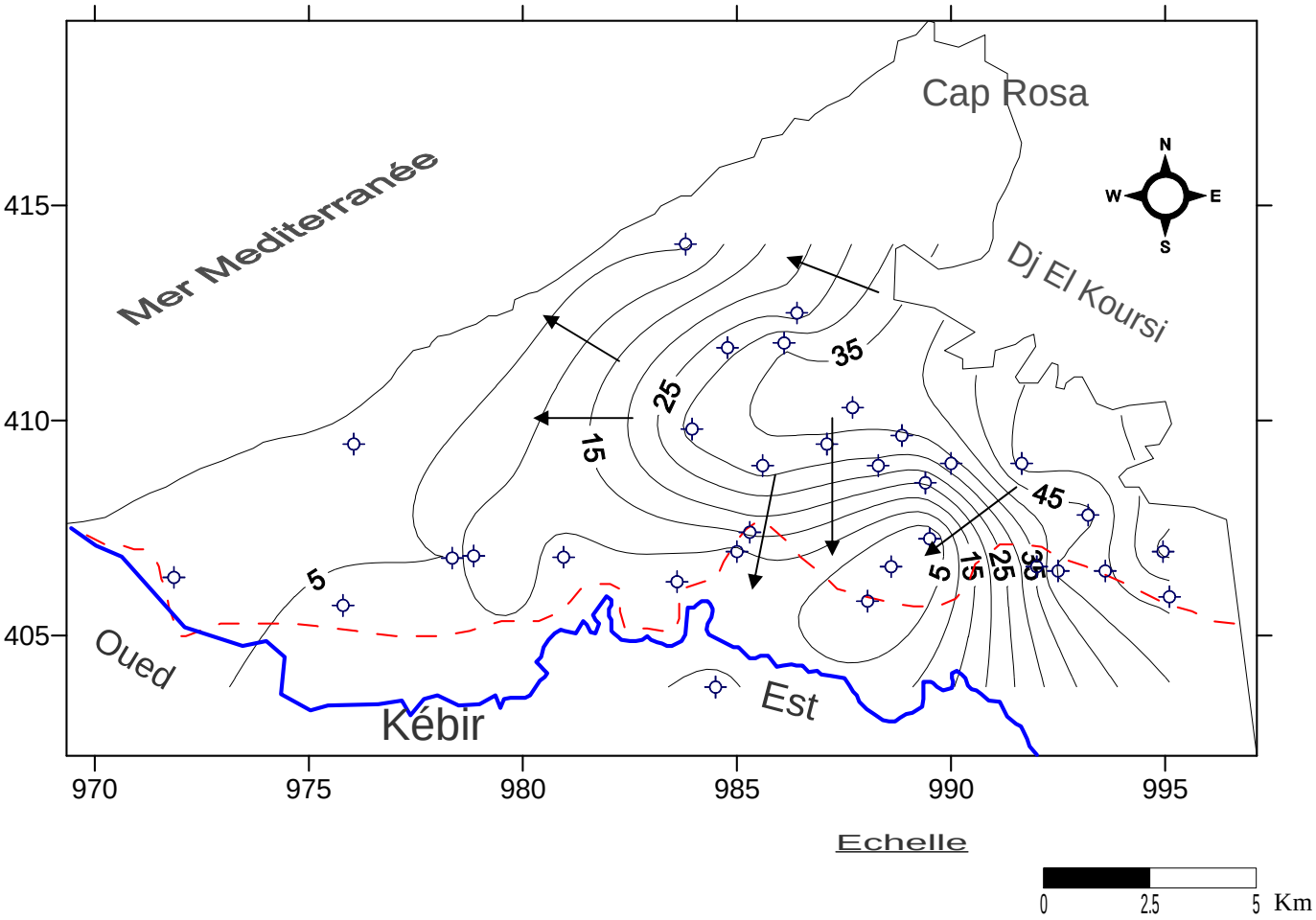
Légende :

: Oued Kebir Est.

: Sens d'écoulement.

: Ligne de contact massif dunaire nappe des graviers.

Figure N° 23 : Carte piezométrique de la nappe du massif dunaire de Bouteldja en Octobre 1994 (Ramdani. A ; 1996).



Légende :

: Oued Kebir Est.

: Sens d'écoulement.

: Ligne de contact massif dunaire nappe des graviers.

Figure N°24 : Carte piezométrique de la nappe du massif dunaire de Bouteldja en 1982 (Khérici. N ; 1985).

III. 6. 7. Piézomètrie de la nappe libre de Bouteldja :

Les points ayant fait l'objet de mesures par l'ANRH en Mai et en Octobre 2002, sont groupés dans un espace très réduit et se localise bien loin de notre zone d'étude ce qui ne permet pas de faire des extrapolations fiables. Nous nous sommes donc basés sur les cartes piezométriques du mois d'Octobre 1994. (Ramdani 1996) et de 1982 (Khérici. N 1985).

Ces cartes montrent que l'écoulement souterrain est dérigé vers la mer au Nord et vers les terrasses de l'oued Kebir au Sud.

On observe un écoulement vers la zone sud-est, caractérisée par les apports venant des reliefs greso-argileux. Cette zone d'extension, limitée par rapport au Nord dont la circulation des eaux est beaucoup plus orientée, reste soumise à un écoulement important et rapide compte tenu de l'alimentation de la nappe qui se fait principalement par les précipitations.

On note que l'exploitation intensive a modifié la morphologie de la nappe. L'allure des courbes piézomètriques est caractérisée par plusieurs axes de drainages liés aux pompages excessifs.

Le gradient hydraulique est d'autant plus fort que les courbes sont plus serrées, c'est notamment le cas de la partie sud, sud-est correspondant aux sous bassins de Bouglès et Bhaim. Ce resserrement est dû essentiellement à une faible perméabilité.

Par contre, au centre, au nord, nord-ouest, les courbes isopièzes sont espacées traduisant un faible gradient et une bonne perméabilité.

Le manque de points de mesure dans la partie Ouest de la zone d'étude, ne nous permet pas de connaître l'allure de la piézomètrie.

III. 6. 8. Estimation des réserves :

L'estimation des réserves des nappes libres repose essentiellement sur l'étude des fluctuations du niveau piézomètrique dans les nappes.

Les réserves régulatrices représentent la quantité d'eau libre emmagasinée par les terrains aquifères au cours d'une recharge importante par alimentation naturelle.

Les réserves régulatrices sont en rapport étroit avec les variations du niveau piézomètrique des nappes, ce sont celles qui alimentent et régularisent le débit d'écoulement des eaux souterraines aux exutoires naturelles.

Les réserves permanentes correspondent aux réserves profondes, déterminant le volume d'eau libre stockée dans la couche aquifère délimitée à la base par le substratum, elles sont pas affectées par les fluctuations piézomètriques et dont le volume est considéré comme constant.

L'estimation des réserves permanentes repose sur le calcul du volume d'eau emmagasiné dans la tranche de la couche aquifère durant la période sèche, lorsque le niveau piézomètrique est au plus bas, d'après la carte d'égale épaisseur des sables saturée (Figure N° 22), nous avons pu établir le volume d'eau par la formule suivante :

$$W = V \times I_e \Rightarrow W = s \times e \times I_e$$

Avec :

W : Volume d'eau emmagasiné (m^3).

s : Surface de la zone (m^2).

e : Epaisseur moyenne de la couche aquifère (m).

I_e : Porosité efficace des sables, qui est de l'ordre de 12% d'après G.Castany.

Les résultats obtenus sont mentionnés sur le tableau suivant :

Tableau N° 17 : calcul du volume d'eau emmagasiné dans la nappe du massif dunaire.

Epaisseur moyenne de la tranche saturée (m)	Superficie calculée (m^2)	Volume d'eau (m^3)	Volume d'eau (Hm^3)	Volume d'eau emmagasiné (m^3)	Volume d'eau emmagasiné (Hm^3)
115	$620.6\ 10^5$	$75682.1\ 10^5$	7568.21	$90818.52\ 10^5$	908.18

Le volume de la réserve permanente qui peut être emmagasiné par la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja est estimé à 908.18 Hm^3.

III. 7. Etat des ressources en eau dans la Wilaya d'El TARF :

III. 7. 1. Ressources en eaux superficielles :

Située à l'extrême Nord Est du pays, la wilaya d'El Tarf se distingue par la particularité de son climat pluvieux et humide grâce à sa position géographique en bord de mer et la présence de plusieurs lacs Tonga, Oubeira, El Mellah et des Oiseaux.

Les précipitations annuelles varient de 600 à 1200 mm voir même 1500 mm, considérées parmi les plus importantes précipitations dans le pays, permettent un apport hydrique global de près de 700 millions de m^3 ce qui dénotent la position privilégiée de la wilaya. Cependant seule une partie de cette ressource soit 228 millions de m^3 et retenue ; ce qui représente 30% du volume total reçu.

III. 7. 2. Ressources en eaux souterraines :

Les ressources en eau souterraines dans les régions d'Annaba et d'El Tarf proviennent essentiellement de l'exploitation de huit nappes dont la répartition des besoins est décrite dans le tableau N° 18 :

Tableau N° 18 : Débits exploitables des différentes nappes souterraines dans la région d'El Tarf.

	Forages existants					
Nappe Sollicitée	**Nombre de forages**	**Volume Théorique Hm^3/an**	**Affectation Hm^3/an**			**Communes desservies**
			AEP	**IRR**	**IND**	
Nappe dunaire Bouteldja	50+3 Sources	33	**32.5**	**0.4**	**0.1**	**2f. IRR :** 0.4 Hm^3/an **1f. IND :** 0.1 Hm^3/an **26F. AEP :** Annaba 16.7 Hm^3/an **21F. AEP:** El Kala, Berrihane, El Tarf, Aîn Assel, Bouteldja et Ben M'hidi.
Nappe côtière D'El Kala	02	0.6	**0.6**	-	-	**1F. AEP :** El Kala, El Melha. **1F. AEP :** Souk R'guibet.
Nappe côtière d'Oum Teboul	07	1.84	**1.95**	**0.25**	-	**2F. AEP:** Oum Teboul. **1F. AEP:** Oued El Hoit. **2F. AEP:** El Aioun. **2F. IRR.**
Nappe alluviale El Tarf-Ain Assel	0.8	2.6	**2.6**	-	-	**8F. AEP :** El Tarf, Ain Assel, Bougous.
Nappe des grès	03	0.56	**0.56**	-	-	**3F. AEP :** Bougous, ramel Souk, Ain Assel.
Nappe alluviale Bouteldja	12	7.65	**7.4**	-	**0.25**	**6F. AEP :** Annaba 3.78 Hm^3/an **5F. AEP:** Chaffia 2.72 Hm^3/an **1F. IND:** Conserverie 0.25 Hm^3/an
Nappe alluviale Bounamoussa	08	3.85	**3.85**	-	-	**8F. AEP :** Assfour, Ben M'hidi, Zerizer.
Nappe alluviale Seybouse	129	44	**24.5**	**17.5**	**2**	**33F. AEP :** Besbes, Dréan, Echatt. **90F. IRRG.** **6F. ND:** conserverie
Total	219	94.1	**73.6**	**18.15**	**2.36**	-

Source : DHW El Tarf.

III. 8. Conclusion :

La confrontation des différentes cartes sur lesquelles la distribution des paramètres (épaisseur, transmissivité et perméabilité), nous a permis sur le plan hydrodynamique de distinguer deux zones de meilleures potentialités :

- La zone Sud Est qui va de Mouaissia à Bordj Ali Bey regroupe un grand nombre de forages présentant de meilleurs débits.

- La zone centrale principalement aux alentours des forages 6906, 6907, b6, b7 et b8.

Les coupes hydrogéologiques montrent que la nappe du massif dunaire est libre, reposant sur un substratum argilo-gréseux imperméable en contact avec la nappe alluvionnaire profonde dont l'horizon aquifère est constitué essentiellement de graviers.

Il semble que le système aquifère du massif dunaire est en relation directe avec la mer au Nord et avec la nappe alluvionnaire de l'oued Kebir Est au Sud, suivent un axe d'écoulement préférentiel Nord Est, Sud Ouest.

Chapitre IV :

Hydrochimie.

IV. 1. Introduction :

L'étude hydro chimique permet d'évaluer la qualité des eaux après la détermination des caractéristiques physiques et chimiques, de classer ces eaux selon leur chimisme, et d'orienter leur utilisation.

Dans ce chapitre on s'est basé sur les données des compagnes d'analyses chimiques des eaux de la nappe effectuées par l'ADE (laboratoire centrale d'ADE, Annaba) en Septembre 2000, Mai (2000, 2001, 2002, 2004 et 2006) et Octobre 2005.

La fiabilité des analyses chimiques a été contrôlée à l'aide de la balance ionique (bi) exprimée par la formule suivante :

$$BI = \left(\frac{\sum r^+ - \sum r^-}{\sum r^+ + \sum r^-} \right) \times 100 \Rightarrow BI \leq 6\,\%$$

Avec :

BI : Balance ionique. (%)

$\sum r^+$: La somme des cations exprimées en meq/l.

$\sum r^-$: La somme des anions exprimées en meq/l.

Les analyses pour lesquelles la balance ionique est supérieure à 6% ne seront pas pris en considération, considérant que toute analyse est erronée.

L'interprétation des analyses physico-chimiques de ces eaux va nous permettre de connaître leur qualité et sachant que les eaux superficielles vont être utilisées pour la recharge artificielle de la nappe.

IV. 2. Méthode de prélèvement :

La méthode de prélèvement utilisée par le Laboratoire Centrale de l'Algérienne des eaux (ADE) de Annaba est la suivante :

Les paramètres physico-chimiques (température, pH, Eh et conductivité) sont mesurés in situ au moyen d'appareillage de terrain avec des sondes sélectives (pH –mètre, conductimètre). Les échantillons ont été prélevés dans des flacons en polyéthylènes(deux flacons par échantillon , l'un pour l'analyse des sels nutritifs après addition de quelques gouttes de chloroforme, l'autre pour l'analyse des éléments majeurs (après addition de quelques gouttes d'acide nitrique).

En fin ces flacons sont conservés dans une glacière pour la journée, les échantillons d'eau ont été conservés à basse température (4°C) et les analyses ont été effectuées après 4 à5 jours.

IV. 3. Caractéristiques physico-chimiques du système aquifère du massif dunaire :

IV. 3. 1. Paramètres physiques :

IV. 3. 1. 1. Le pH :

Le pH est une mesure de la concentration en protons (ion hydrogène ou H^+ou plutôt H_3O^+) en solution (en unité pH), la mesure du pH donne des renseignements importants sur la nature des eaux.

La fluctuation de pH est observée en fonction des périodes avec une valeur maximum de 5 et un minimal de 8.
A partir de ces résultats on peut distinguer que le pH des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja est légèrement acide à neutre.

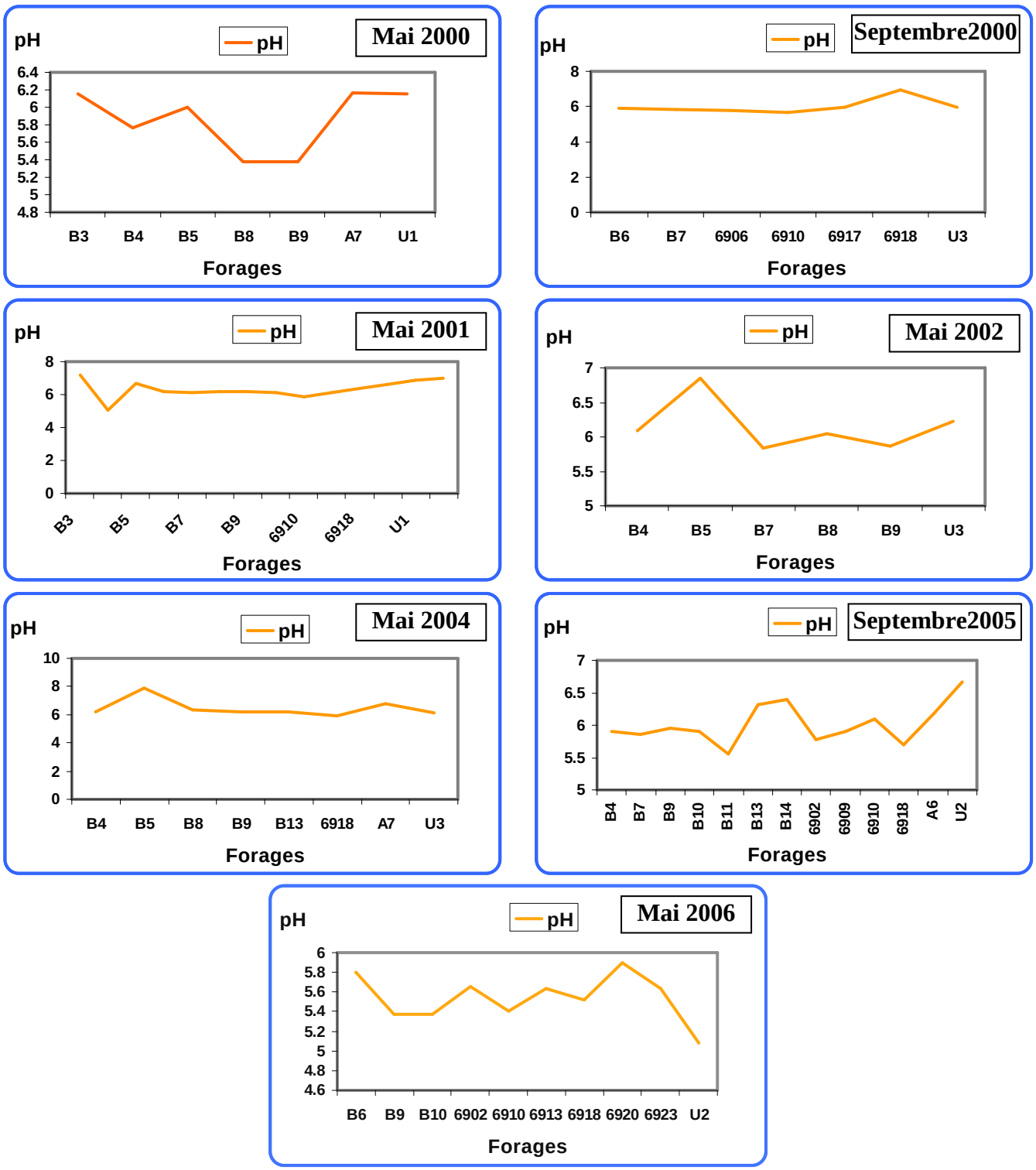


Figure N° 25 : Variation spatiale du pH en différentes périodes.

IV. 3. 1. 2. Température :

La température de l'eau joue un rôle dans la solubilité des sels et surtout des gaz, dans la dissolution des sels dissous donc sur la conductivité électrique. La mesure de la température doit s'effectuer in situ. La température du massif dunaire varie entre 17.5°C à 22.5°C.

IV. 3. 1. 3. Conductivité :

La conductivité est l'inverse de la résistivité, et elle caractérise la propriété pour un liquide à laisser passer le courant électrique.
Pratiquement la mesure de la conductivité présente un grand intérêt car elle permet de suivre les moindres perturbations atteignant les nappes souterraines.
Par ailleurs, la conductivité d'une eau reflète assez fidèlement sa minéralisation. Elle augmente avec la teneur en sels dissous et varie en fonction de la température. La variation de la conductivité donne des informations importantes sur l'évolution de la qualité de l'eau.
Par rapport à la conductivité, la minéralisation de l'eau peut être considérée de la façon suivante :

Tableau N° 19 : relation entre conductivité et minéralisation (Detay, 1997).

Conductivité en µs/cm, à 20°C	minéralisation
- inférieur à10.	- eau de minéralisation très faible.
- comprise entre 100 et 200.	- eau de minéralisation faible.
- comprise entre 200 et 400.	- eau de minéralisation peu accentuée.
- comprise entre 400 et 600.	- eau de minéralisation moyenne.
- comprise entre 600 et 1000.	- eau de minéralisation importante.
- supérieur à 1000.	- eau de minéralisation excessive.

Les valeurs de la conductivité des eaux de la zone étudiée sont comprises entre 130 et 285 µs/cm. Ces valeurs montrent clairement que les eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja ont une minéralisation faible à accentuée.

Les valeurs de la conductivité qui ne dépassent pas 250 µs/cm sont dues aux apports pluvieux qui diluent les eaux, par contre les fortes valeurs (> 250 µs/cm) sont dues à présence des lentilles d'argile.

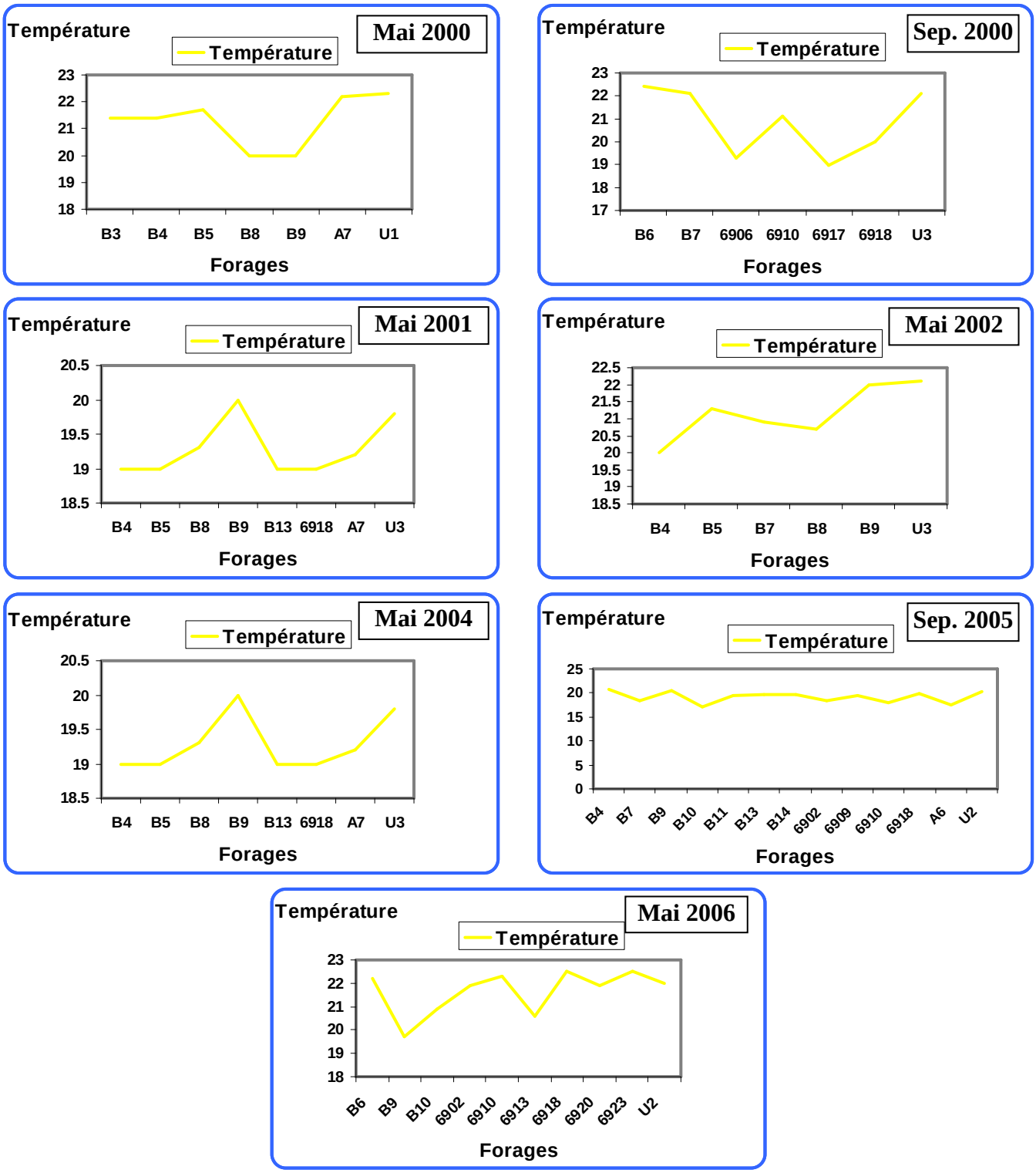


Figure N° 26 : Variation spatiale de la température en différentes périodes.

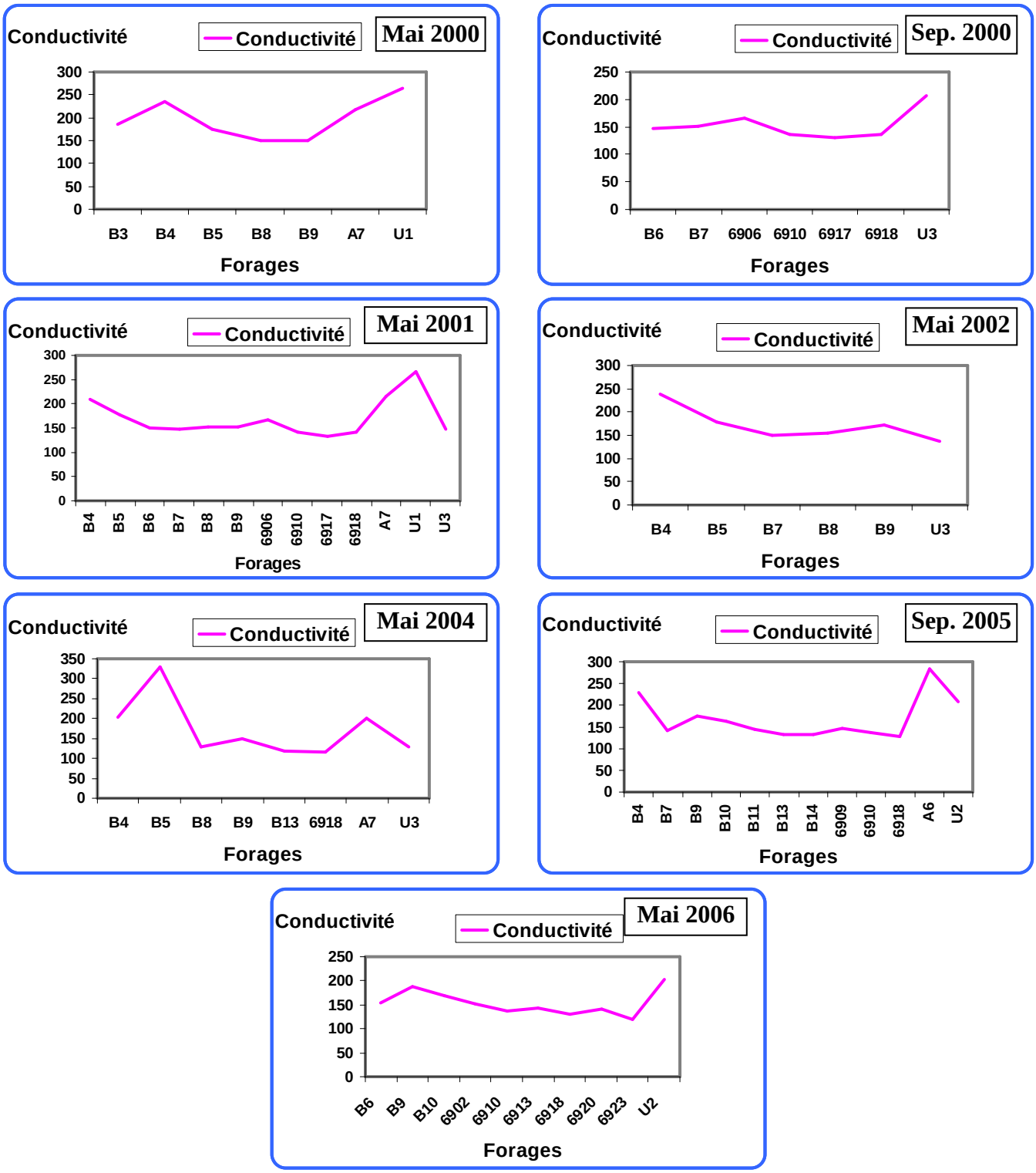


Figure N° 27 : Variation spatiale de la conductivité en différentes périodes.

IV. 4. 1. 4. Résidu sec :

Le résidu sec est défini comme étant la somme des éléments solides dissous dans l'eau de la nappe. La détermination de ce paramètre des eaux non filtrées permet d'évaluer la teneur en matière dissoute et en suspension. La mesure après filtration correspond aux matières dissoutes. Les valeurs obtenues permettent d'apprécier la minéralisation de l'eau : pour des valeurs inférieurs à 600 mg/l, l'acceptabilité par le consommateur est bonne, au dessus de 1200 mg/l, l'eau devient désagréable.

Les valeurs du résidu sec varient entre 50 et 200 mg/l.

La faiblesse du résidu sec s'explique par le fait que les eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja circulent rapidement dans des terrains essentiellement siliceux.

IV. 3. 2. Paramètres chimiques :

IV. 3. 2. 1. Calcul des rapports caractéristiques :

Ce calcul se base sur le rapport de certains éléments donnés en milli équivalents. Les plus utilisés sont : Cl/SO_4, Ca/Mg.

Augmentation du rapport Cl/SO_4, cela est dû à la rapidité de dissolution des chlorures, en effet cette rapidité est proportionnelle au déficit de saturation. Le rapport Cl/SO_4 de l'ensemble des échantillons généralement inférieur à l'unité marque la prédominance des chlorures sur les sulfates généralement réduits par les matières carbonées intercalées dans les niveaux dunaires et ce malgré l'apport d'ions SO_4^{-2} dû à l'oxydation des pyrites.

Diminution du rapport Ca/Mg, cette diminution est dû au fait que l'apport de Ca par dissolution de $Ca\ CO_3$ cesse rapidement, puisque les eaux sont saturées dés l'origine.

IV. 3. 2. 2. Origine des éléments dissous :

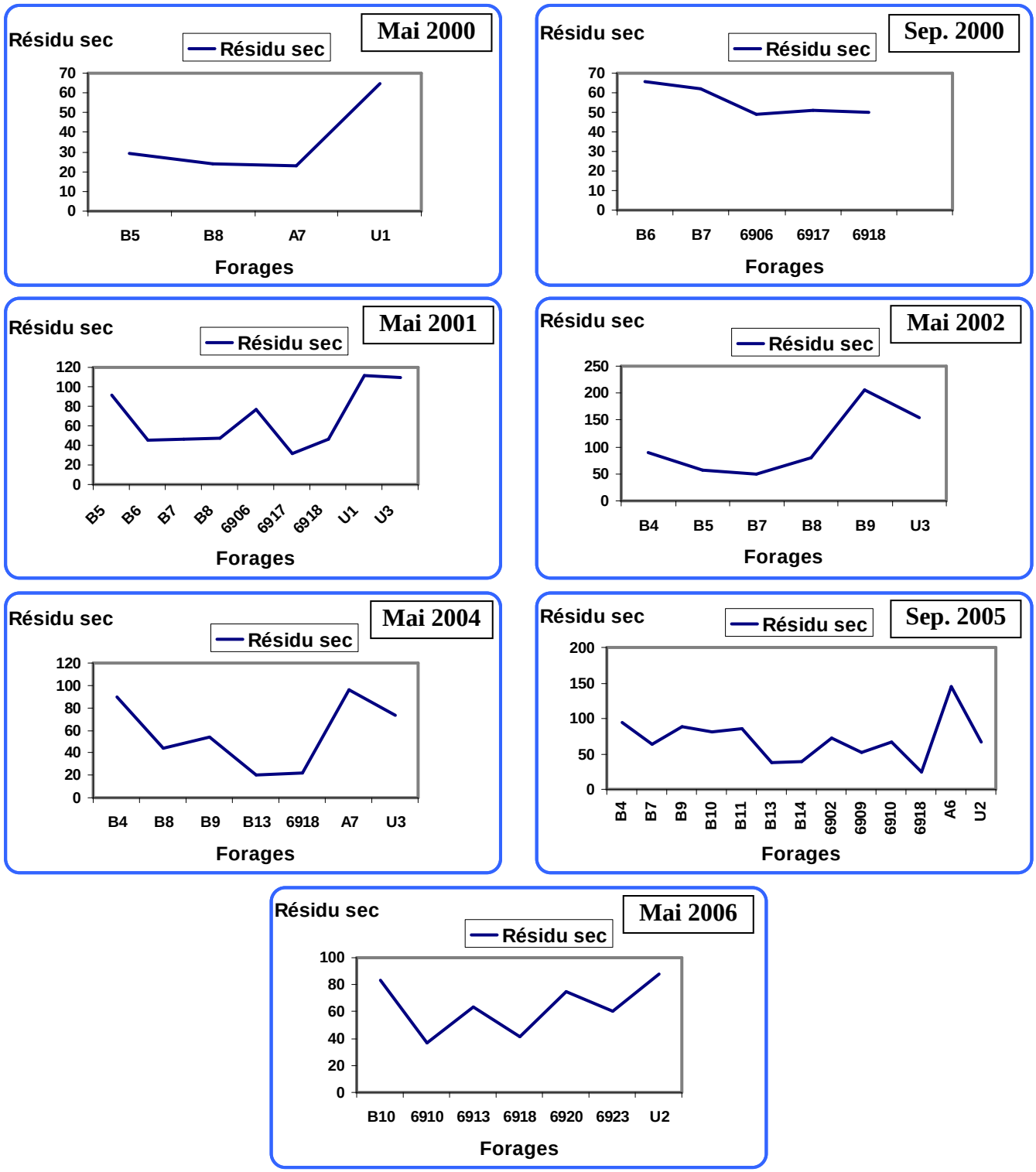
- Les chlorures peuvent provenir :

- du lessivage des formations lithologiques par les apports pluviométriques.
- une origine marine surtout pour les forages situés en bordure de la mer.
- des eaux usées domestiques.

- Les sulfates proviennent principalement du gypse et de l'anhydrite.
- Les nitrates et les nitrites se trouvent dans les couches superficielles par infiltration des eaux de surface. Le taux des nitrates dans le massif dunaire de Bouteldja est très faible.

IV. 4. Bilan ionique :

Pour établir le bilan ionique, il suffit de calculer les milli équivalents par litre de chaque élément partant des teneurs en mg/l. Les valeurs ainsi obtenues représentent les quantités en réaction (reacting values) désignées par la lettre « r ». Pour que la neutralité de la solution soit respectée, la somme des anions devrait ainsi égale à celle des cations. Pour que les résultats soient considérés comme valables, la différence entre la somme respective des quantités en réaction (%) des anions et des cations ne doit pas dépasser 6 %.



<u>Figure N° 28 :</u> Variation spatiale du résidu sec en différentes périodes.

IV. 5. Répartition graphique des analyses chimiques :

Les résultats des analyses chimiques exprimés sous la forme ionique, peuvent être portés sur des diagrammes qui permettent de comparer les eaux entre elles, et de les classer en familles chimiques. Les représentations les plus utilisées sont :

- Le diagramme en losange ou diagramme de Piper.
- Le diagramme semi-logarithmique Schoeller-Berkaloff.

IV. 5. 1. Le diagramme en losange ou de Piper :

Nous portons dans chacun des triangles du diagramme les quantités en réaction en pourcent calculées dans ce cas par rapport à la somme des ions de même signe et non par rapport à la concentration totale.

La composition chimique de l'eau pour les éléments majeurs est représentée par un point dans chaque triangle, un pour les cations (Ca^{+}, Mg^{++}, Na^{+} et K^{+}) et un autre pour les anions ($HCO_3^{-} + CO_3^{--}$, SO_4^{--} et cl^{-}). La translation de ces deux points et leurs intersections converge vers un point unique sur le losange et contribue ainsi à définir le type de cette eau.

IV. 5. 2. Diagramme de Schoëller Berkaloff :

Le diagramme de Schoëller Berkaloff permet de représenter le faciès chimique de plusieurs 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 indiquant la concentration de chaque élément.

Un groupe d'eau de concentration chimique 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.

IV. 6. Interprétation des résultats :

IV. 6. 1. Répartition graphique sur le diagramme de Piper et de Schoëller Berkaloff des résultats d'analyse chimique, période hautes eaux Bouteldja 2000, 2001, 2002, 2004 et 2006 :

La représentation graphique de l'analyse chimique des points d'eau de la nappe du massif dunaire, période hautes eaux (2000, 2001, 2002, 2004 et 2006) nous a permis de déterminer une dominance des chlorures pour les anions et sodique pour les cations (Figures N° 29-38).

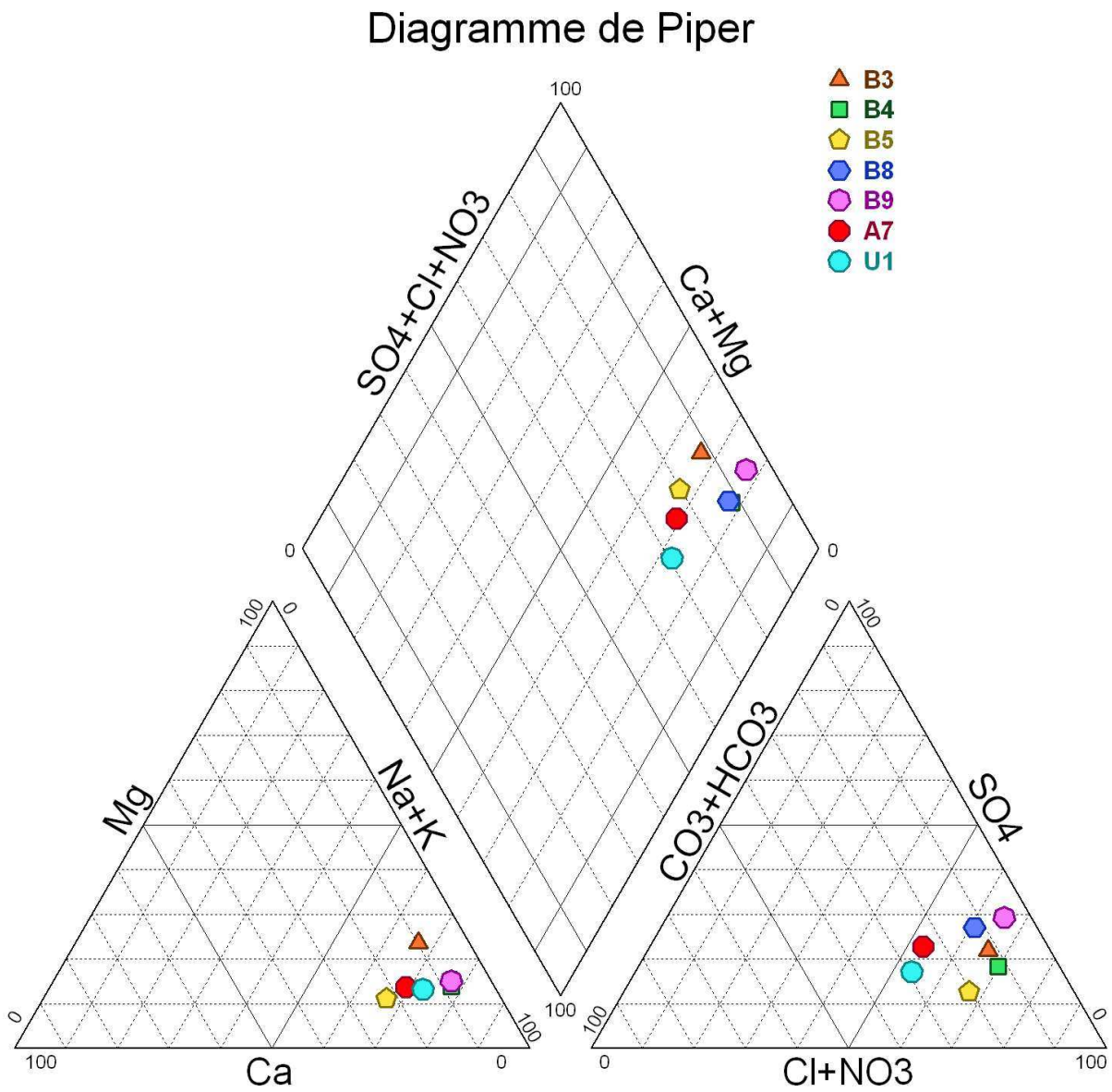


Figure N° 29 : Diagramme de Piper des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de hautes eaux 2000.

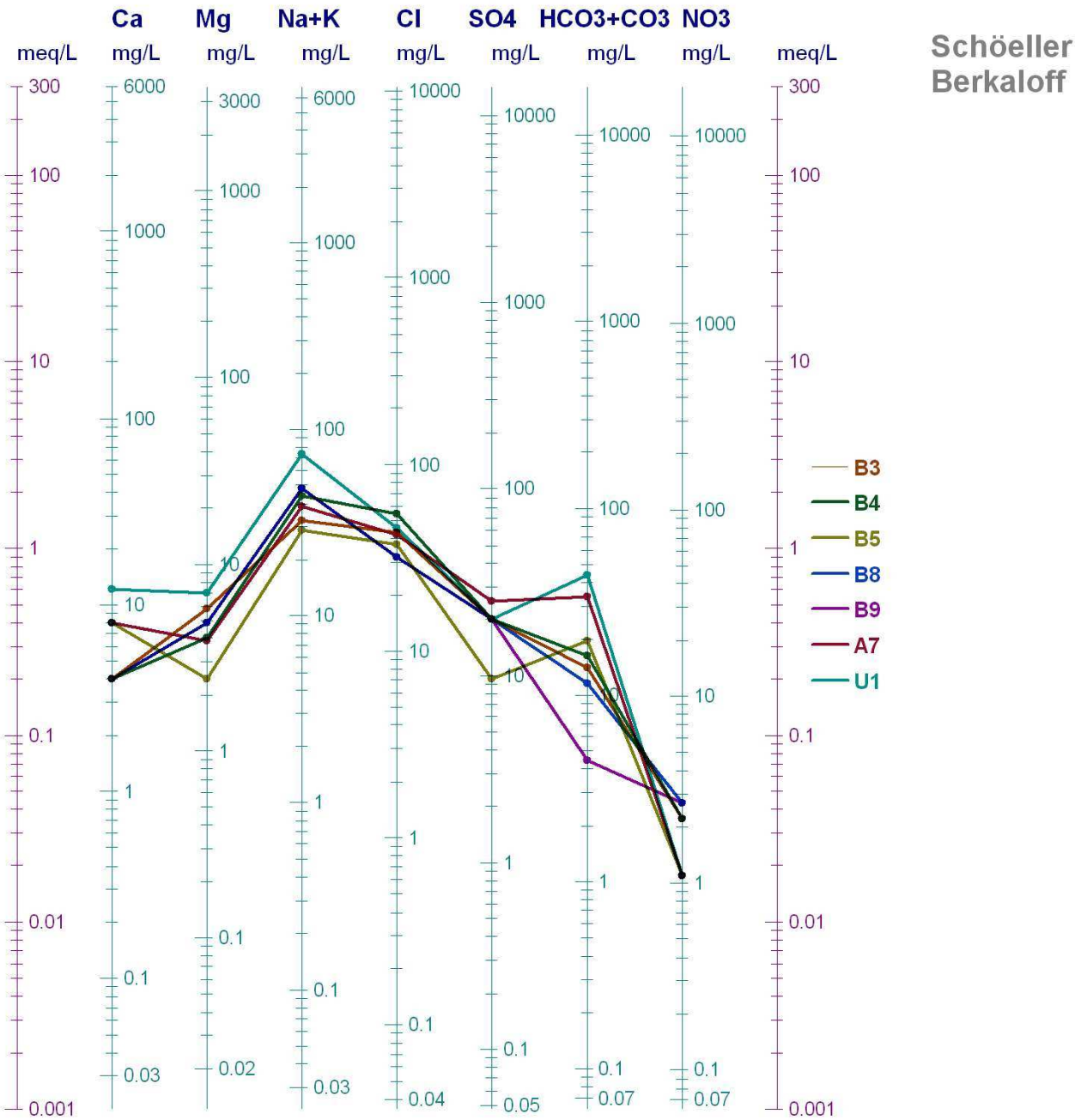


Figure N° 30 : Diagramme de Schoëller Berkaloff des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de hautes eaux 2000.

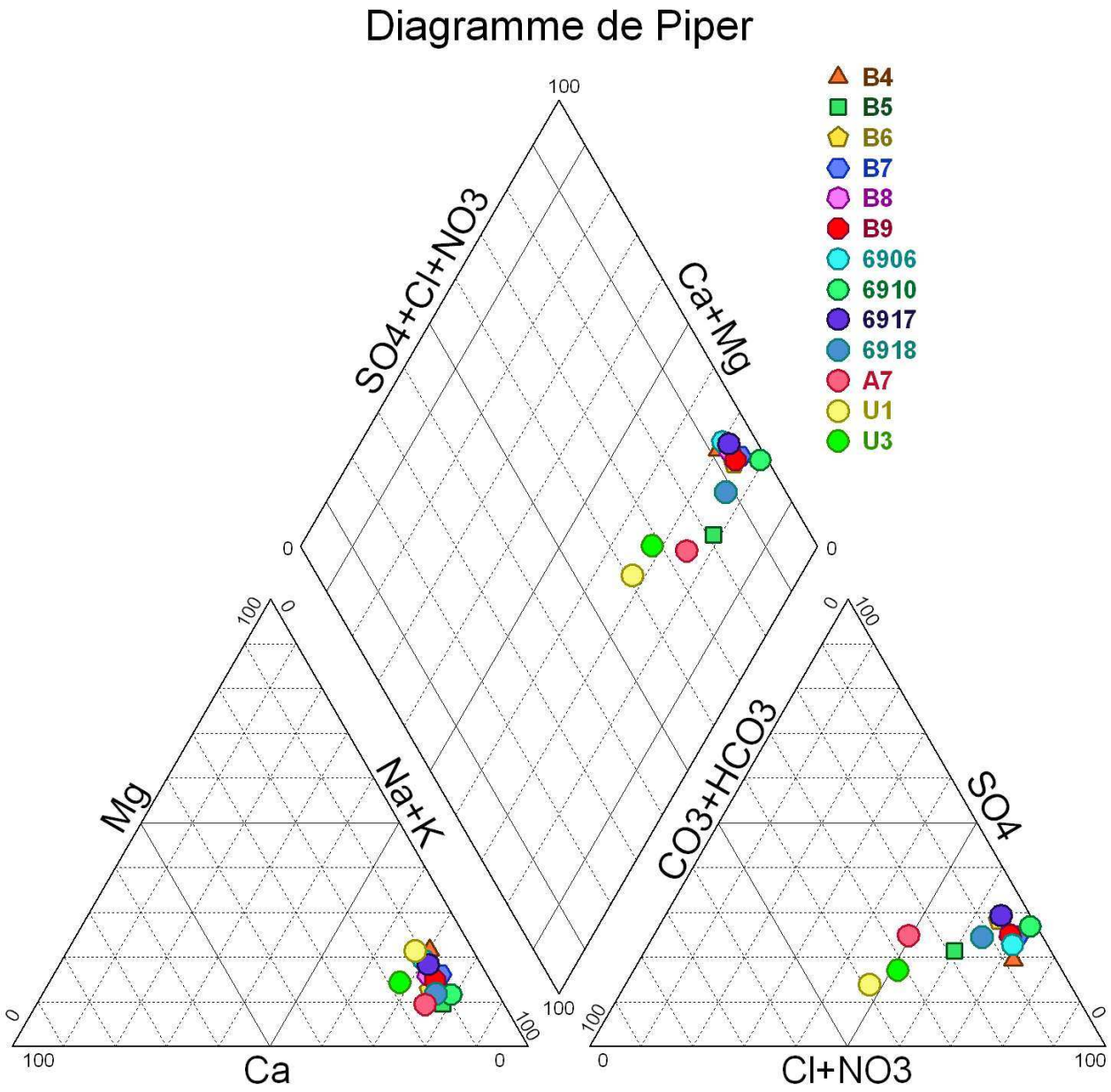


Figure N° 31 : Diagramme de Piper des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de hautes eaux 2001.

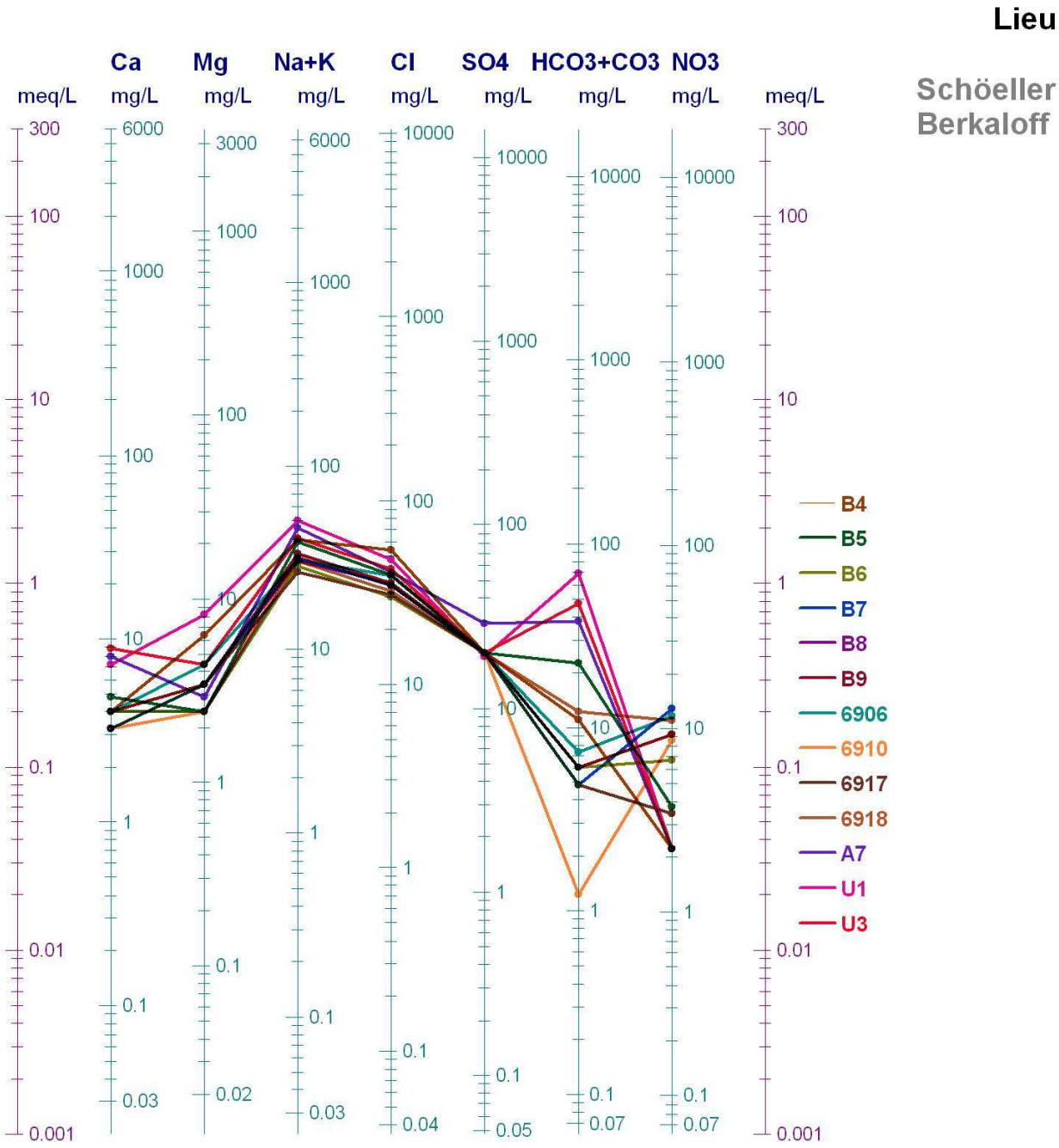


Figure N° 32 : Diagramme de Schoëller Berkaloff des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de hautes eaux 2001.

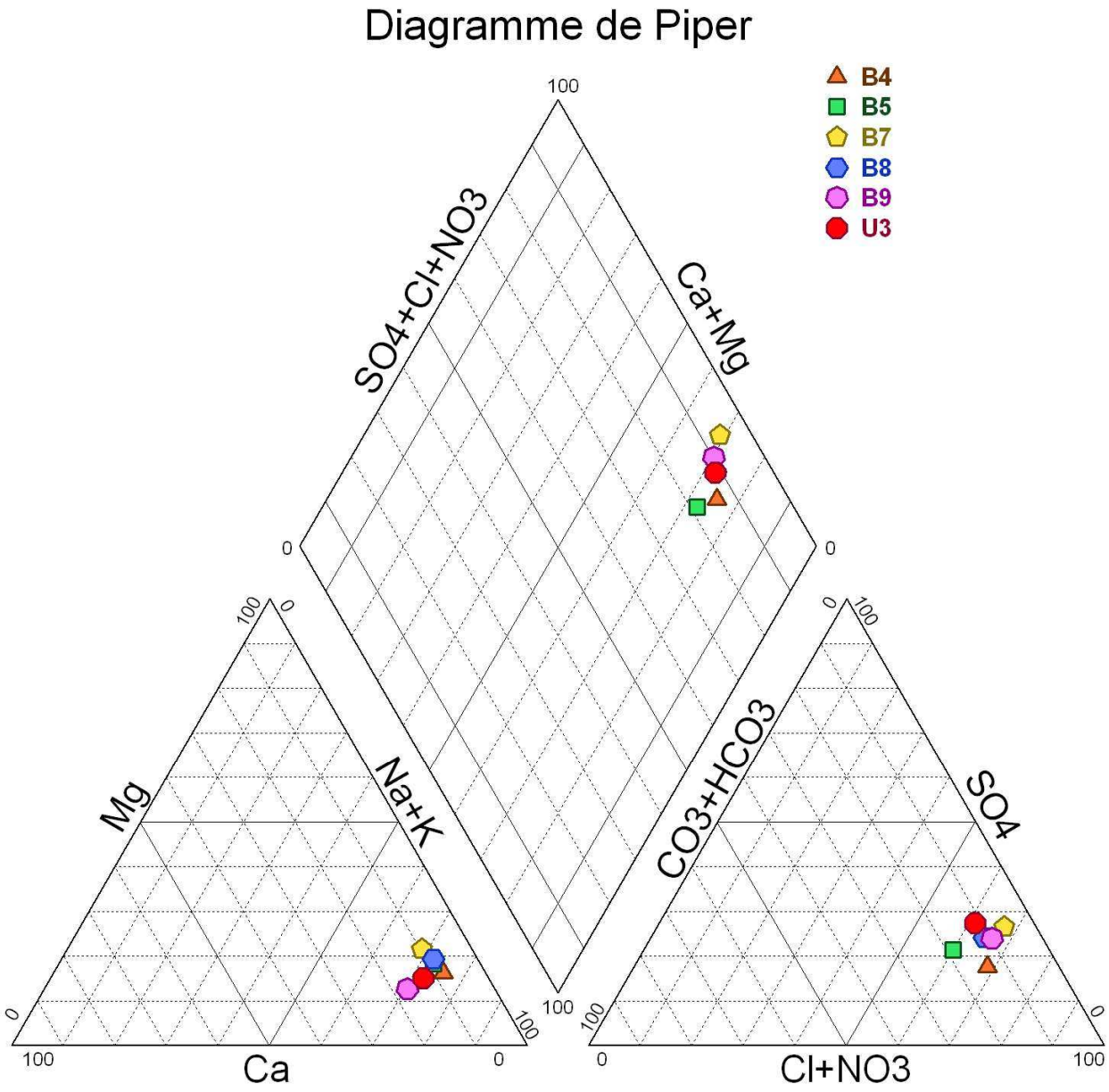


Figure N° 33 : Diagramme de Piper des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de hautes eaux 2002.

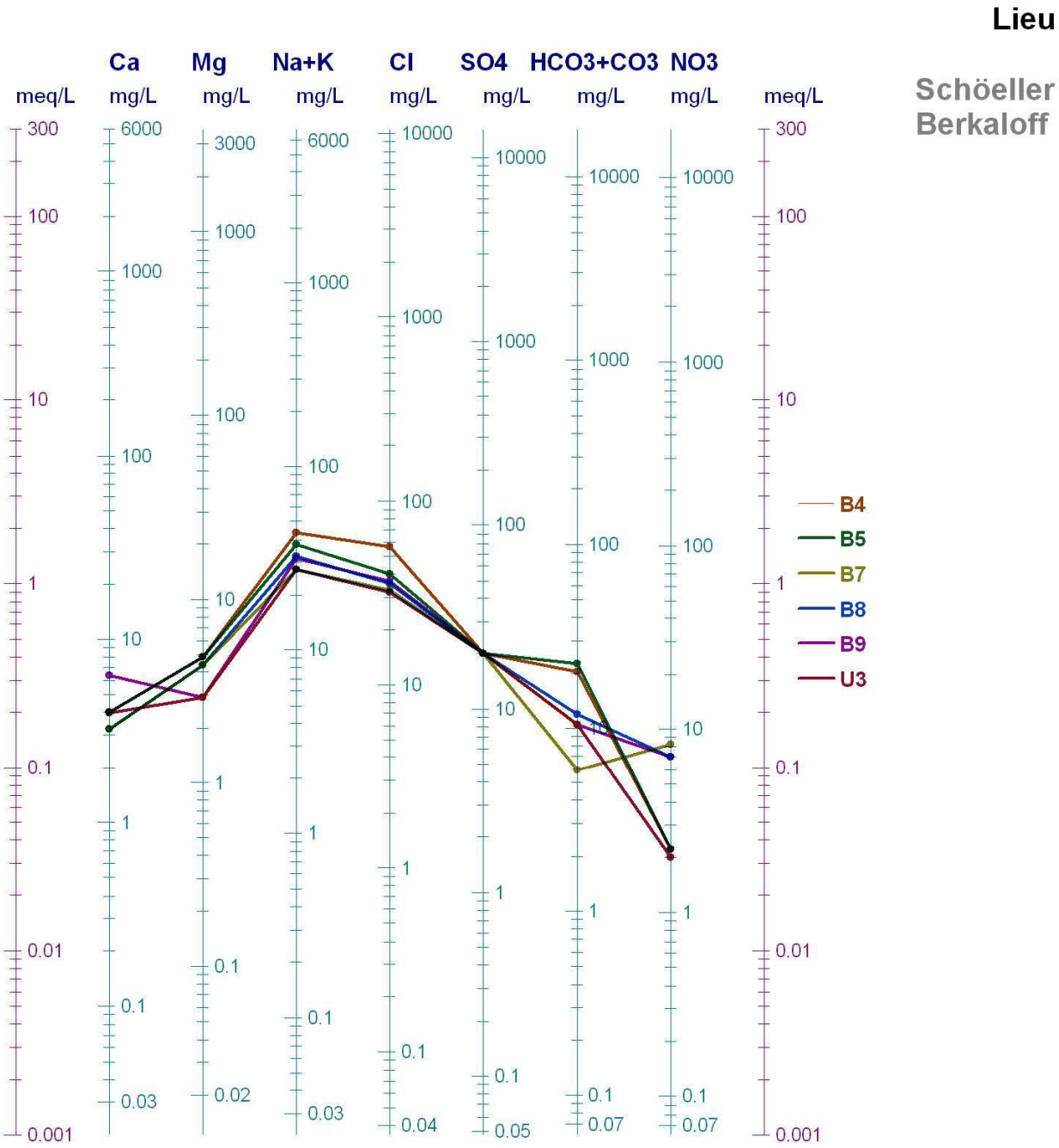


Figure N° 34 : Diagramme de Schoëller Berkaloff des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de hautes eaux 2002.

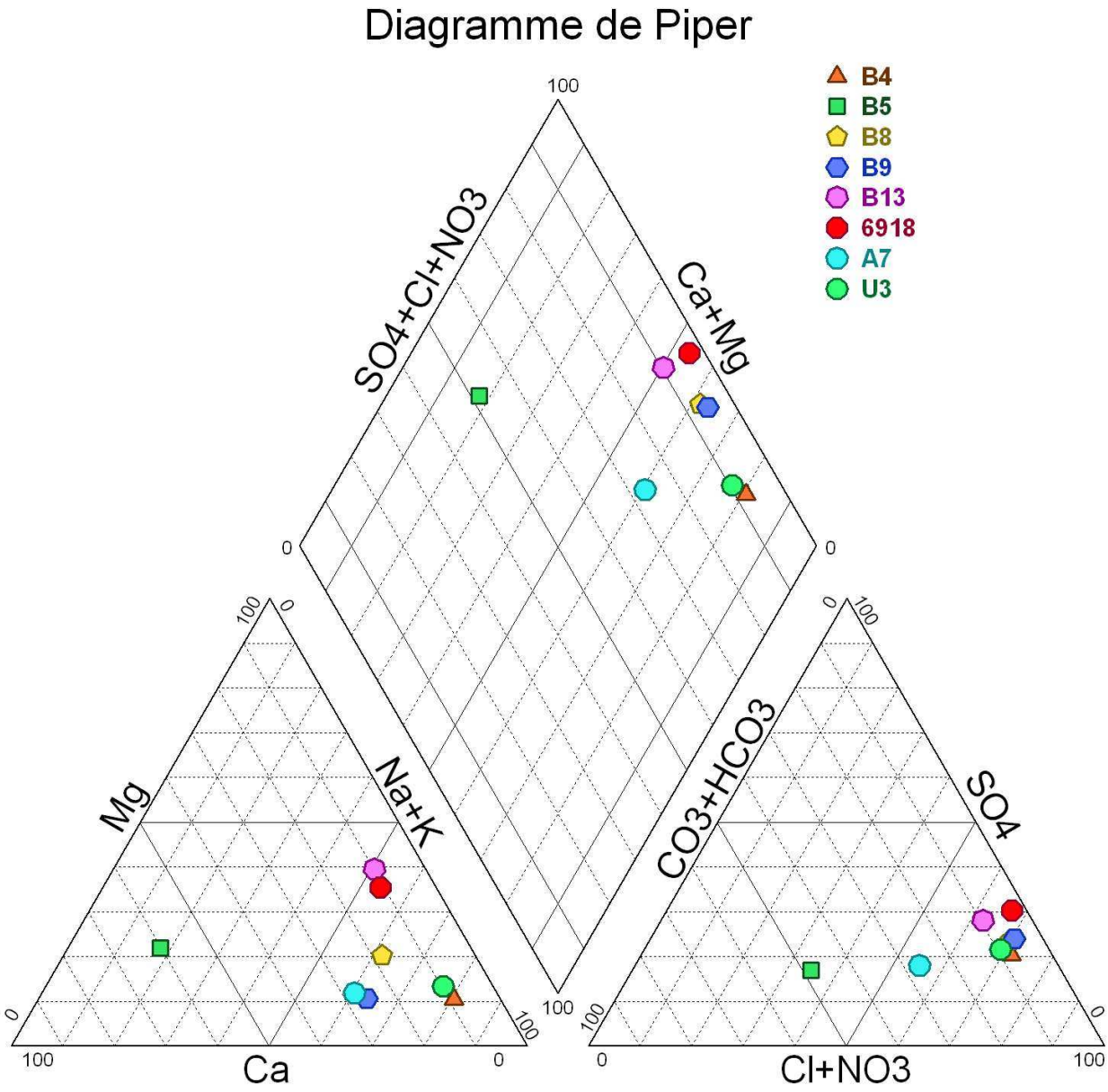


Figure N° 35 : Diagramme de Piper des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de hautes eaux 2004.

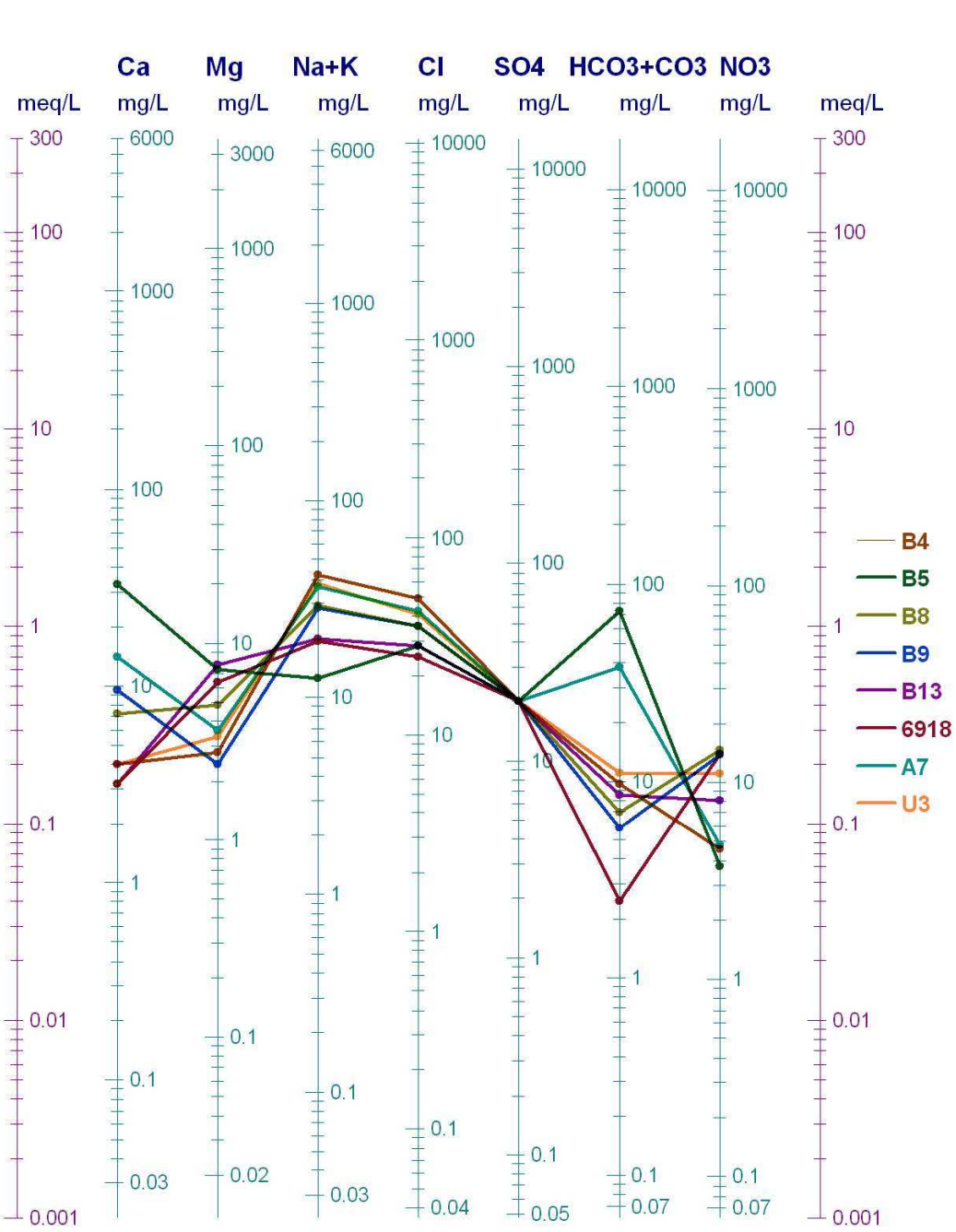


Figure N° 36 : Diagramme de Schoëller Berkaloff des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de hautes eaux 2004.

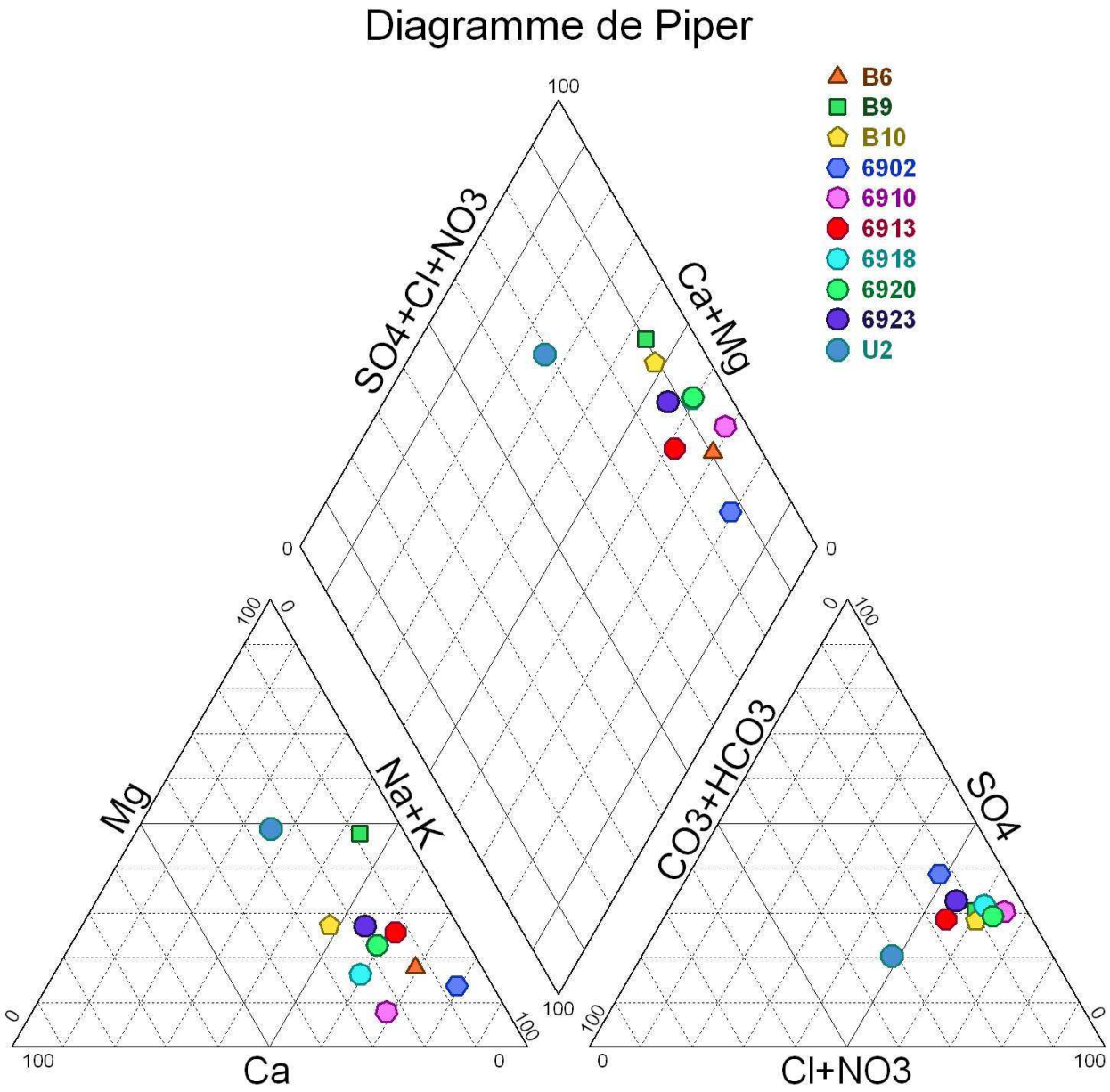


Figure N° 37 : Diagramme de Piper des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de hautes eaux 2006.

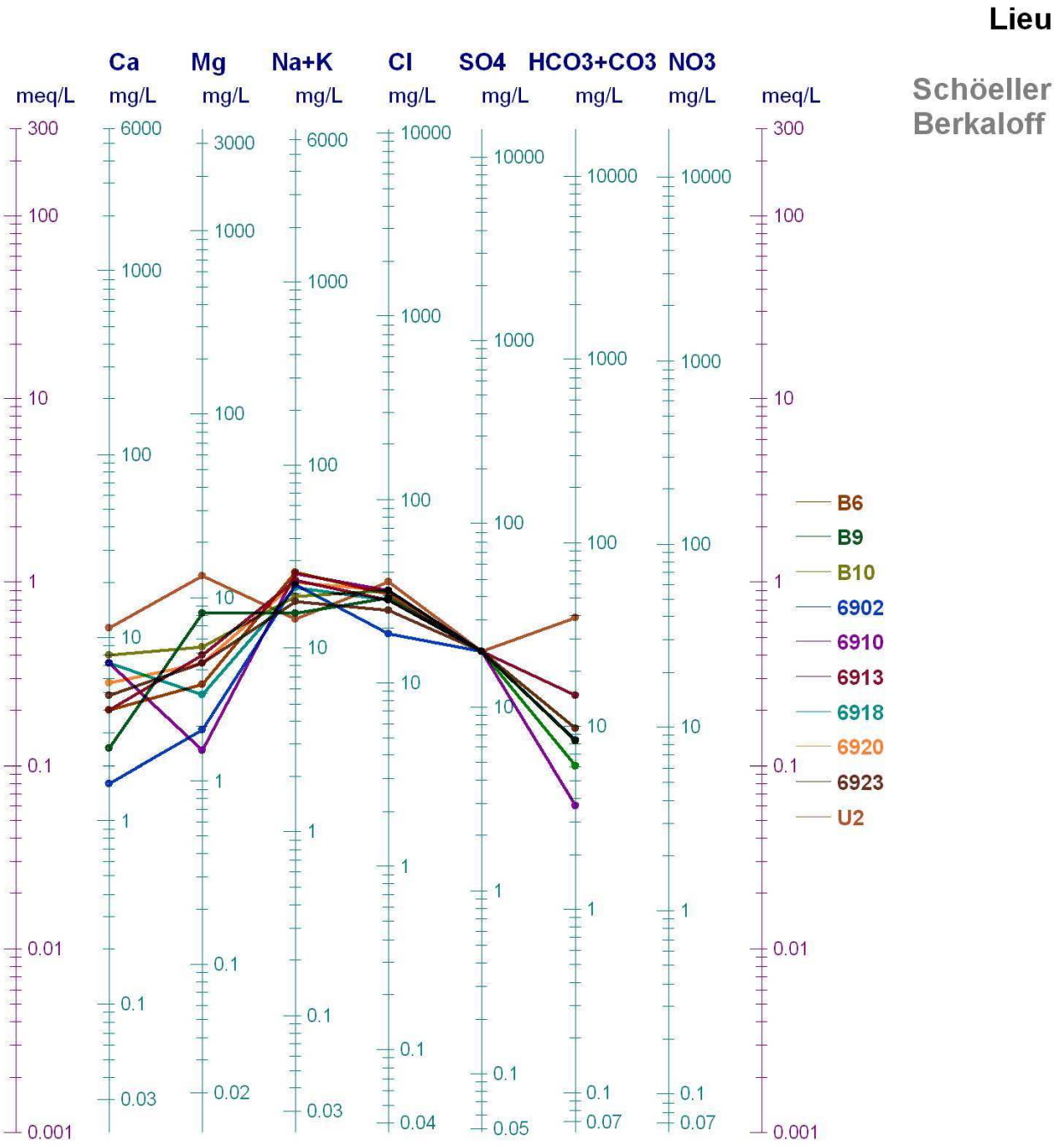


Figure N° 38 : Diagramme de Schoëller Berkaloff des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de hautes eaux 2006.

IV. 6. 2. Répartition graphique sur le diagramme de Piper et de Schoëller Berkaloff des résultats d'analyse chimique, période basses eaux Bouteldja 2000 et 2005 :

C'est pratiquement les mêmes anions et cations qui prédominent en l'occurrence le sodium et les chlorures à quelques exceptions prés (Figures N° 39-42).

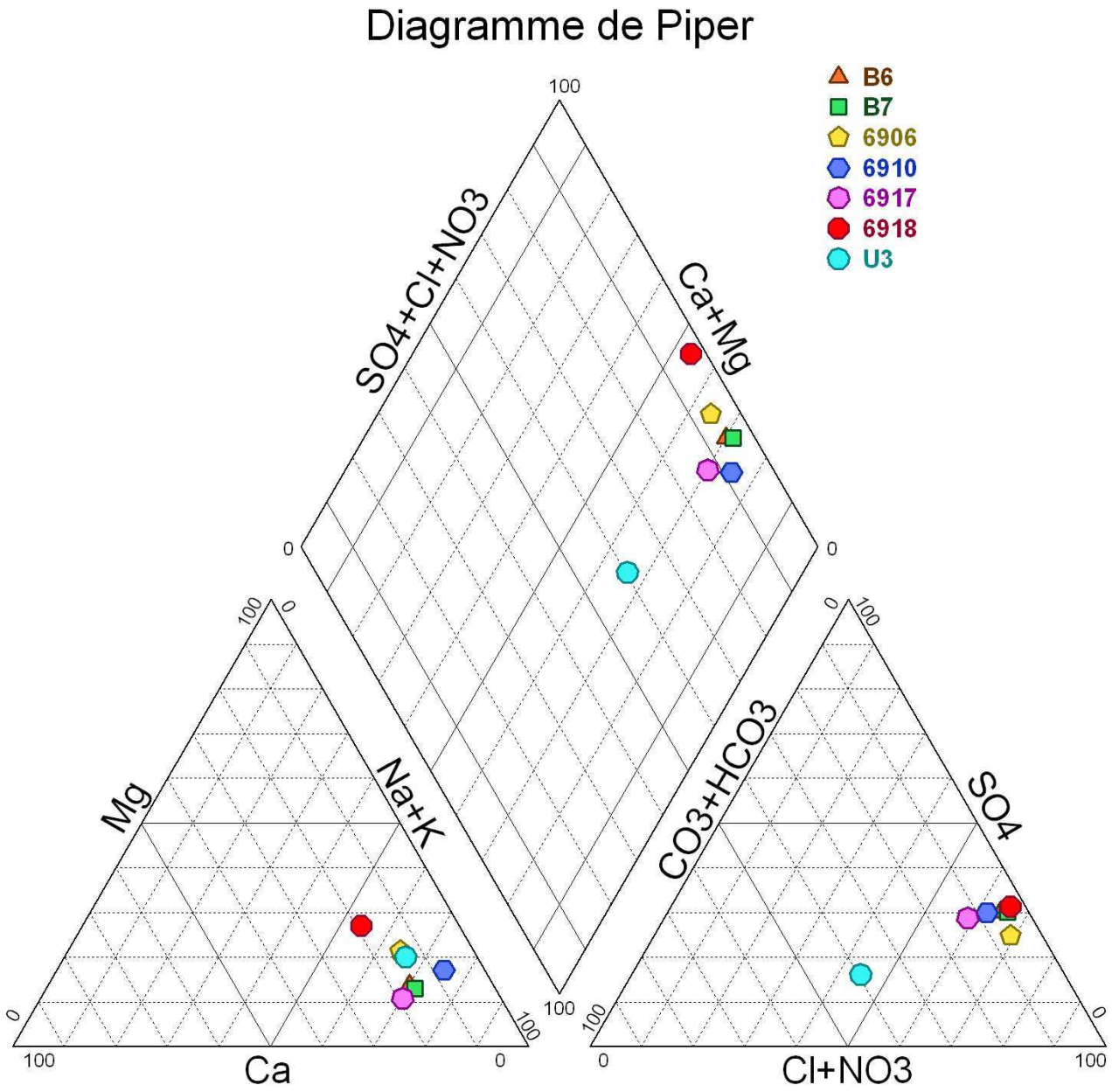


Figure N° 39 : Diagramme de Piper des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de basses eaux 2000.

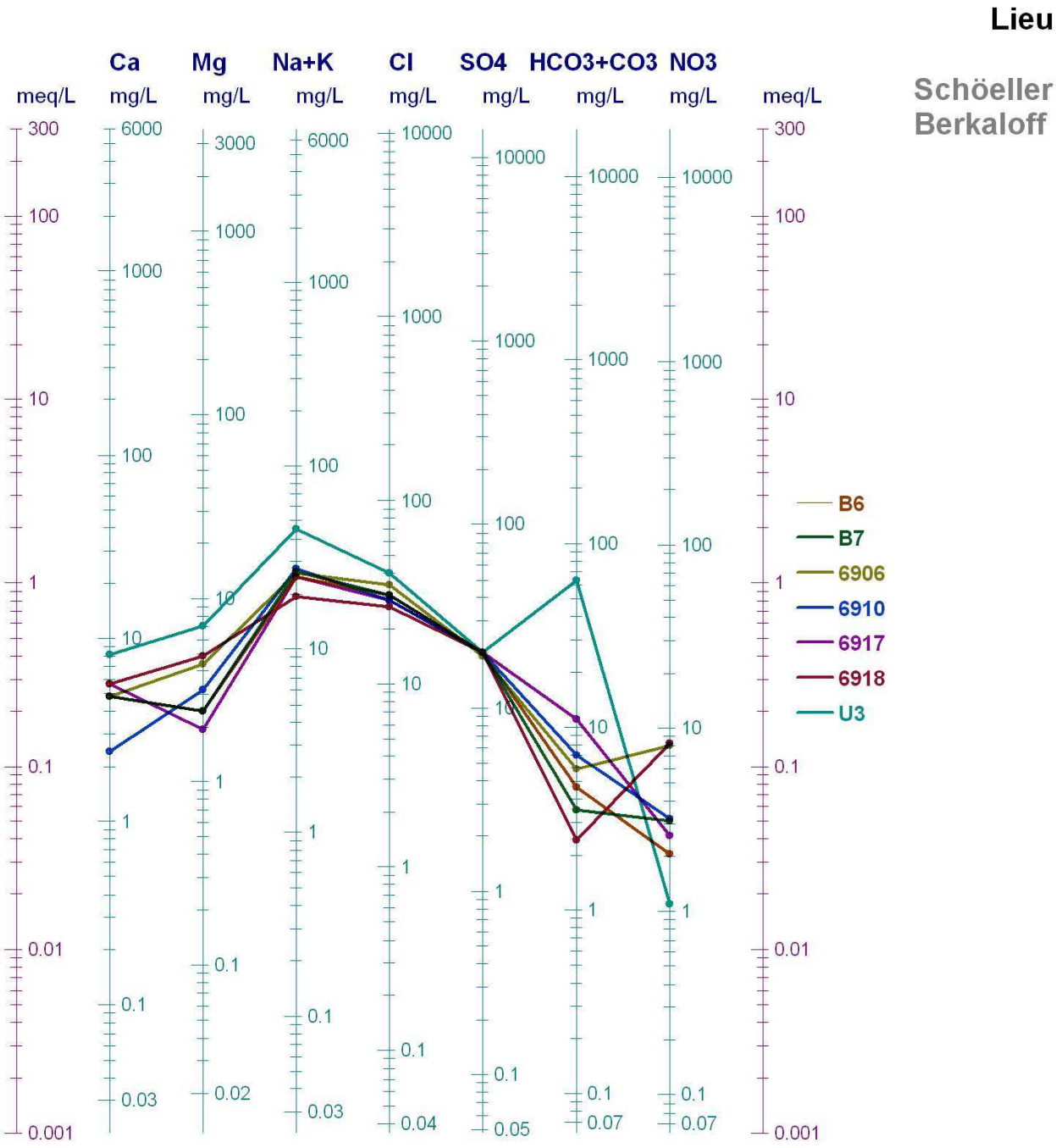


Figure N° 40 : Diagramme de Schoëller Berkaloff des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de basses eaux 2000.

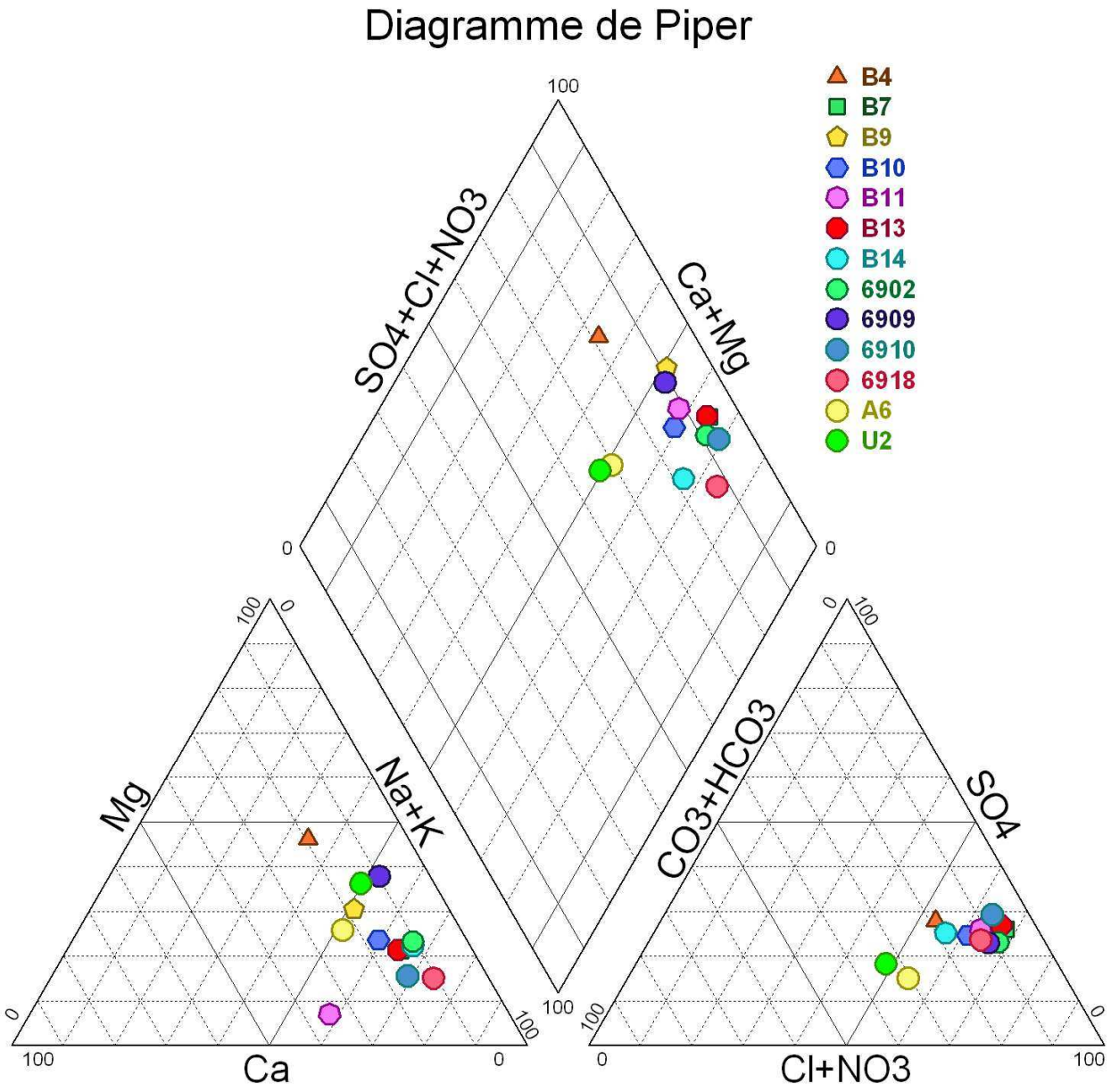


Figure N° 41 : Diagramme de Piper des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de basses eaux 2005.

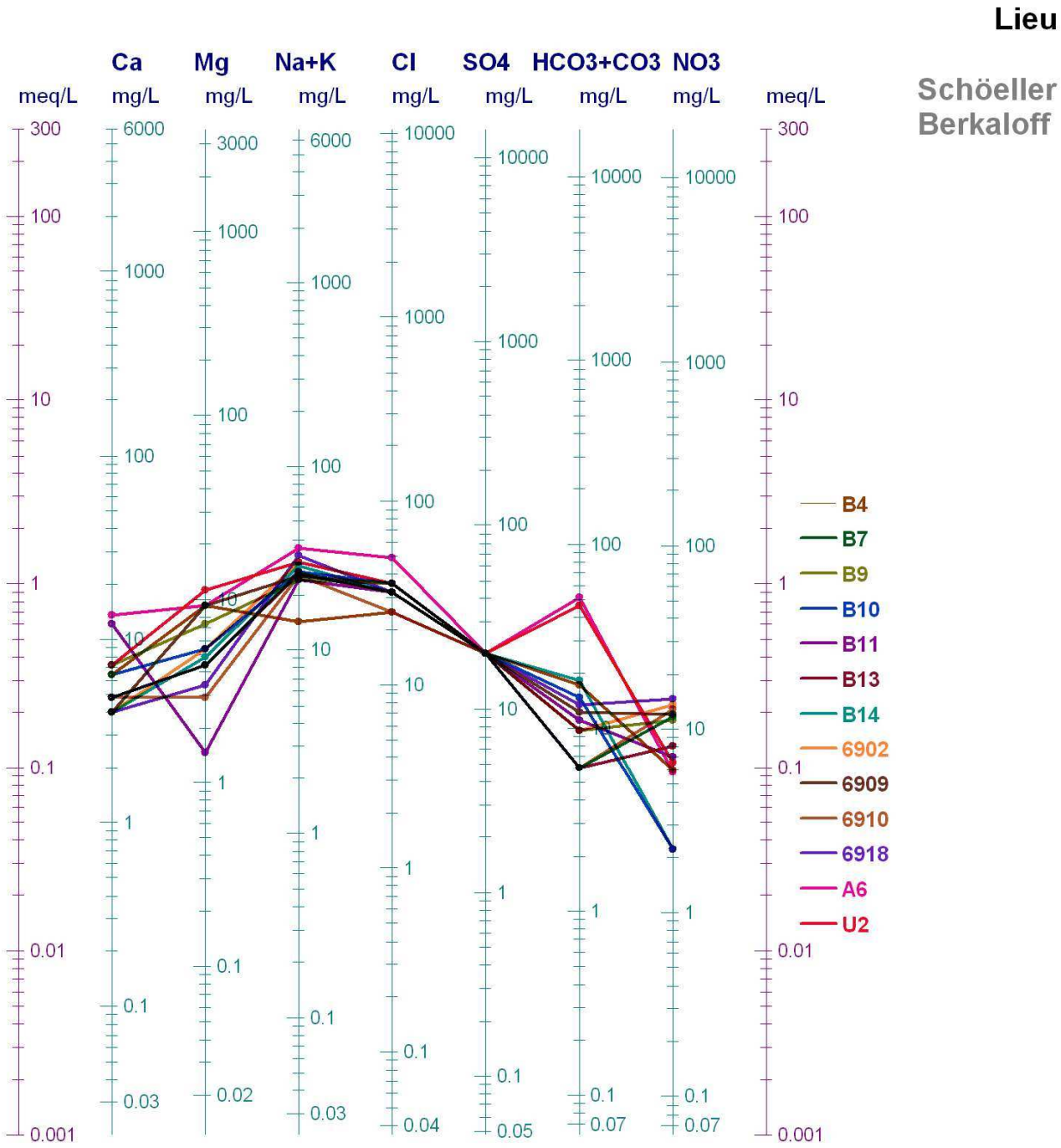


Figure N° 42 : Diagramme de Schoëller Berkaloff des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de basses eaux 2005.

IV. 7. Faciès chimique et formule ionique des analyses chimiques :

Les concentrations exprimées en mg/l des deux périodes (hautes et basses eaux), sont transformées en quantités en réaction pourcent (r%) par rapport à la concentration de (Na^+ + K^+), Ca^{++} et Mg^{++}, Cl^-, SO_4^{--} et HCO_3^-.

Les comparaisons ioniques reposent essentiellement sur l'établissement de la prédominance de tel ou tel ion.

La formule ionique étant obtenue, en classant de gauche à droite, par ordre décroissant les (r%) des cations et ceux des anions (tableau N° 20).

Tableau N° 20: Faciès chimique et formule ionique des analyses chimiques.

Forages	Formule ionique	Période	Faciès chimique
B3, B4, B5, B8, B9, A7 et U1.	$r\%Cl^- > r\%SO_4^- > r\%HCO_3^-$, $r\%(Na^{++}+K^+) > r\%Mg^{++} > r\%Ca^{++}$	Hautes eaux 2000.	Chloruré-sodique.
B4, B5, B6, B7, B8, B9, 6906, 6910, 6917, 6918, A7, U1 et U3.	$r\%Cl^- > r\%SO_4^- > r\%HCO_3^-$, $r\%(Na^{++}+K^+) > r\%Mg^{++} > r\%Ca^{++}$	Hautes eaux 2001.	Chloruré-sodique.
B4, B5, B7, B8, B9 et U3.	$r\%Cl^- > r\%SO_4^- > r\%HCO_3^-$, $r\%(Na^{++}+K^+) > r\%Mg^{++} > r\%Ca^{++}$	Hautes eaux 2002.	Chloruré-sodique.
B4, B5, B8, B9, B13, 6918, A7 et U3.	$r\%Cl^- > r\%SO_4^- > r\%HCO_3^-$, $r\%(Na^{++}+K^+) > r\%Mg^{++} > r\%Ca^{++}$	Hautes eaux 2004.	Chloruré-sodique.
B6, B9, B10, 6902, 6910, 6913, 6918, 6920, 6923 et U2.	$r\%Cl^- > r\%SO_4^- > r\%HCO_3^-$, $r\%(Na^{++}+K^+) > r\%Mg^{++} > r\%Ca^{++}$	Hautes eaux 2006.	Chloruré-sodique.
B6, B7, 6906, 6910, 6917, 6918 et U3.	$r\%Cl^- > r\%SO_4^- > r\%HCO_3^-$, $r\%(Na^{++}+K^+) > r\%Mg^{++} > r\%Ca^{++}$	Basses eaux 2000.	Chloruré-sodique.
B4, B7, B9, B10, B11, B13, B14, 6902, 6909, 6910, 6918, A6 et U2.	$r\%Cl^- > r\%SO_4^- > r\%HCO_3^-$, $r\%(Na^{++}+K^+) > r\%Mg^{++} > r\%Ca^{++}$	Basses eaux 2005.	Chloruré-sodique.

D'après la formule ionique et les diagrammes de Piper et de Schoëller Berkaloff, la majorité des eaux ont une dominance en chlorures (Cl^-) et en Sodium (Na^+).
Le classement de ces deux éléments confère aux eaux un faciès chloruré sodique dominant dans le massif dunaire de Bouteldja. Toute fois on remarque des faciès chimiques secondaires.

La teneur en chlorures où l'origine peut être liée à plusieurs facteurs (Origine des éléments dissous).

Selon Thomas, 2001 les chlorures (Cl^-) ne sont quasiment fixés par aucun sédiment, aucune roche, et ne se concentre que dans la mer. A l'opposé, très peu présent dans les roches continentales (les évaporites), donc la présence de fortes teneurs en chlorures dans tel aquifère sableux perméable est due probablement aux précipitations, et à l'influence de l'embrun marin sur le sable, qui va regagner la nappe par lessivage.

IV. 8. Eau de sables et grès purement siliceux :

Les eaux des grès et des sables purement siliceux se comportent d'une manière différente de celles des sables ordinaires, surtout dans la région à forte pluviométrie ayant permis un lessivage complet. L'absence de carbonates, en particulier, donne des eaux à résidu sec très faible. Caractéristique du sable dunaire de Bouteldja (98% à 99% de silice d'après les analyses réalisées (par Mr Saaidia. B, 2006) sur quelques échantillons par

diffractométrie au rayon X. Comme les ions Ca^{++} ne se trouvent qu'en très petite quantité, il y a plus de CO_2 agressif, et les eaux peuvent avoir un pH faible de l'ordre de 5.

IV. 9. Eaux de surface :

IV. 9. 1. Les eaux de l'oued El Kébir Est :

Les analyses chimiques des eaux de l'Oued El Kébir Est prises à la station hydrométrique de Ain El Assel ont donné une eau bicarbonatée calcique à tendance sulfatée.

Tableau N° 21 : Résultats d'analyse chimique des eaux de l'Oued El Kébir Est prises à la station hydrométrique de Ain El Assel.

Paramètre	Unité	Résultat	Observation
pH		7.93	
Température	°C	19.4	
Conductivité à 25°C	µs/cm	480	
Oxygène dissous	Mg/l	6.28	
Résidu sec à 105°C	Mg/l	357	
Turbidité	NTU	37	Hors Norme
Matière en suspension	Mg/l	34	Hors Norme
Dureté totale	Mg/l	210	
Nitrites	Mg/l	<0.04	
Nitrates	Mg/l	1.72	
Calcium	Mg/l	57.71	
Magnésium	Mg/l	16.04	
Fer	Mg/l	0.603	Hors Norme
Bicarbonates	Mg/l	151.28	
Chlorures	Mg/l	50.39	
Sulfates	Mg/l	115.20	
Silice	Mg/l	<2.2	
Salinité	g/l	0.2	

Source : Laboratoire centrale d'analyse ADE Annaba (in Mouchara, 2004).

IV. 10. Conclusion :

L'étude hydro chimique des eaux superficielles et souterraines du système aquifère du massif dunaire de Bouteldja nous a permis d'apprécier leur qualité chimique, qui constitue un point essentiel pour notre étude sur la région.

Les eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja présentent un faciès chloruré sodique.

L'eau du massif dunaire se caractérise par une faible minéralisation comprise entre 100 et 285 mg/l.

L'eau de l'Oued El Kebir Est est de bonne qualité (pas de pollution chimique). Alors que la nappe offre une eau douce, d'excellente qualité pour l'AEP et l'irrigation.

Chapitre V :

Etude de la pollution des eaux du Lac Noir.

V. 1. Introduction :

La zone du Lac Noir est une zone propice à une alimentation artificielle, l'étude hydrodynamique a montré sa faisabilité.

Cependant, l'impact de la qualité des eaux de réalimentation sur la nappe phréatique est très important et c'est ce que nous a amenés à faire l'analyse des eaux et vérifier la concentration des éléments susceptibles de polluer la nappe.

V. 2. Moyens et méthodes :

Une étude de pollution d'un cours d'eau ou d'une nappe souterraine n'est bien adaptée, au niveau du choix des stations, de la période et de la méthode, que si les paramètres à mesurer et les exigences à remplir sont définis au préalable.

Les questions qu'il est nécessaire de se poser pour mettre au point une stratégie permettant d'améliorer l'état des cours d'eau ou des nappes sont les suivants :

1. Y a-t-il un problème de pollution ?
2. De quelle nature ? (dommages et effets écologiques)
3. Comment le cerner ?
4. Quelle approche utiliser ?

Pour répondre à des telles questions, fournir des résultats reproductibles et mettre en évidence les besoins d'assainissement, les études doivent comprendre les étapes suivantes :

1. Délimitation de la région ou du système ;
2. Choix des paramètres à mesurer, pour mètre en évidence les modifications induites par les activités humaines ;
3. Définition des méthodes d'études, normalisation des méthodes d'analyses ;
4. Elaboration des critères d'appréciation, pour interpréter les données recueillies et pour mettre les déficits en évidence ;
5. Analyse des déficits pour les reconnaître, en déterminer les causes et apprécier l'efficacité des mesures possibles ;
6. Information simple et connaissante des décideurs et du public, pour faire avancer la cause de la protection des eaux au sens large du terme ;

V. 2. 2. Prélèvements :

Comme le Lac Noir est découpé en deux à cause de l'abaissement de sont niveau qui est due aux faibles précipitations de l'année 2006-2007. C'est pour cette raison qu'on à pris deux échantillons au cours de deux périodes, celles des hautes et des basses eaux.

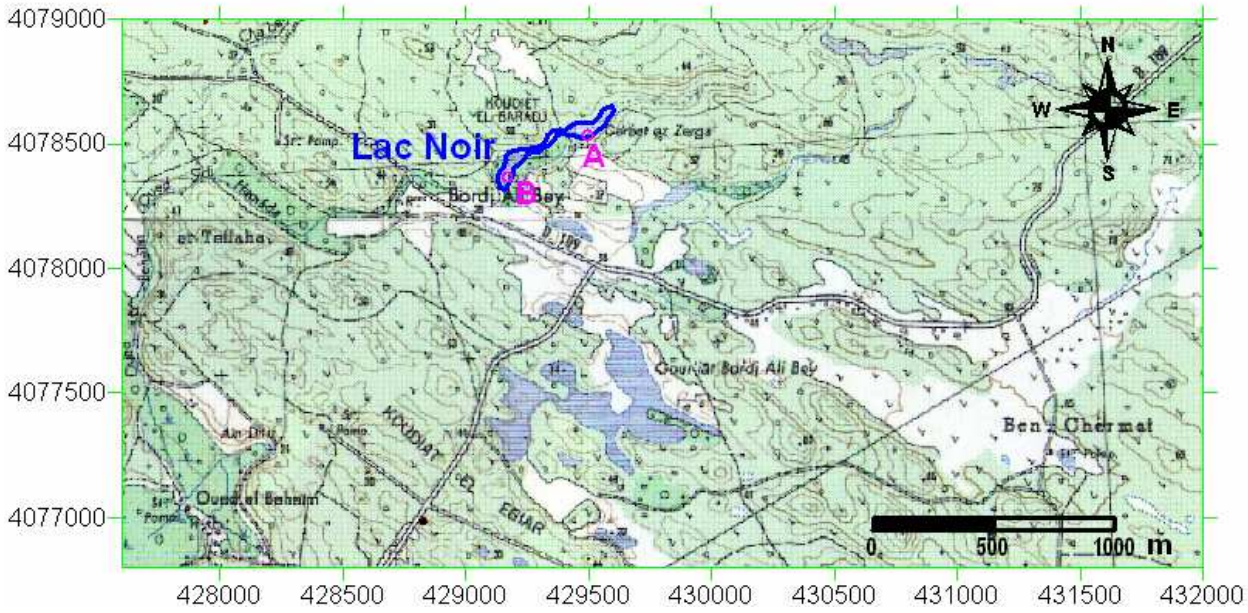


Figure N° 43 : Carte de situation des points des prélèvements (Extrait de la carte topographique au 1/25000 établie en 1972).

A et B : Les points de prélèvement.

V. 2.3. Mesures in situ :

Trois paramètres physico-chimiques (pH, Salinité et conductivité) sont mesurés in situ immédiatement après le prélèvement de l'échantillon à l'aide d'un appareil multiparamètre.

V. 2.4. Analyse des éléments chimiques :

Une analyse des éléments chimiques a été effectuée pour cette étude. Les éléments majeurs (Ca^{++}, Mg^{++}, Na^{+}, K^{+}, Cl^{-}, $SO4_4^{--}$et HCO_3^{-}) et les sels nutritifs (NO_3^{-}, NO_2^{-}, NH_4^{+}, et PO_4^{--}).

V. 2.5. Les paramètres de potabilité ou de pollution organique :

La demande biochimique en oxygène (DBO_5).

V. 3. Les paramètres physico-chimiques (mesure in situ) :

Il s'agit des paramètres facilement mesurables et utiles pour la détermination de l'état chimique des polluants dans l'eau.

V. 3. 1. Le potentiel d'hydrogène (pH) :

C'est un paramètre qui détermine l'acidité ou l'alcalinité d'une eau. Plusieurs paramètres peuvent influencer le pH tels que la température et les phénomènes biologiques (photosynthèse et dégradation de la matière organique). La solubilité du CO_2 diminue lorsque la température augmente de sorte que le pH s'élève dans le même temps.
A l'inverse la solubilité du CO_2 augmente lorsque la température diminue, ce qui conduit à une baisse du pH. Le déversement des eaux usées se traduit le plus souvent par une baisse de pH, puisque la matière organique présente favorise l'activité microbienne et augmente la production du CO_2. La nitrification de l'ammonium agit dans le même sens.

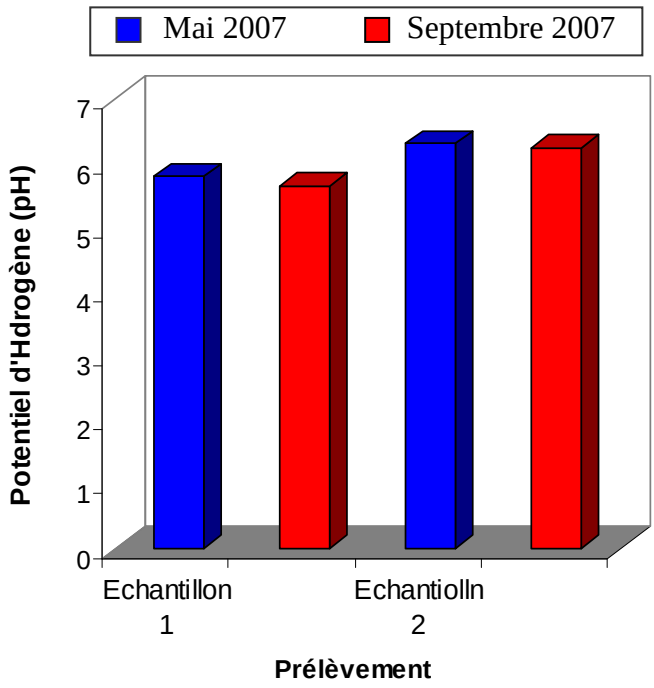


Figure N° 44 : Histogramme de la variation de pH pour les deux campagnes.

D'après les résultats on remarque que les valeurs de pH varient entre 5.5 et 6.5 indiquant une légère acidité de ces eaux. Elles montrent clairement une augmentation du pH d'une campagne à l'autre, cela est dû à l'augmentation de la température qui diminue la solubilité du CO_2.

V. 3. 2. Conductivité électrique :

Bon indicateur pour la teneur en sels dissous, la conductivité électrique est facile à mesurer. Elle dépend avant tout de la nature géochimique des formations aquifères en particulier les substances rendues solubles par l'altération des roches. La conductivité électrique est fonction pour l'essentiel, de la dureté de l'eau (Calcium, Magnésium et Bicarbonates). Parmi les sels libérés dans les eaux par l'activité humaines. Il faut retenir d'abords des nutriments, comme les nitrates, les nitrites, l'ammonium et les phosphates et de l'utilisation de précipitants dans les stations d'épurations (Sodium, chlorures).

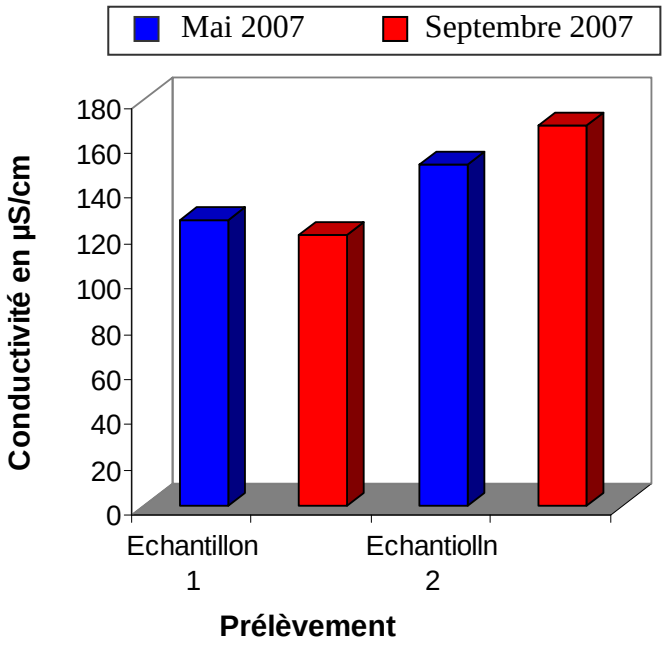


Figure N° 45 : Histogramme de la variation de la conductivité pour les deux campagnes.

On constate que ces eaux ont une faible conductivité, ces valeurs augmentent à la deuxième compagne par rapport à la première.

V. 3. 3. La salinité :

La salinité est proportionnelle à la conductivité et que cette dernière est une norme indicatrice de sa concentration.

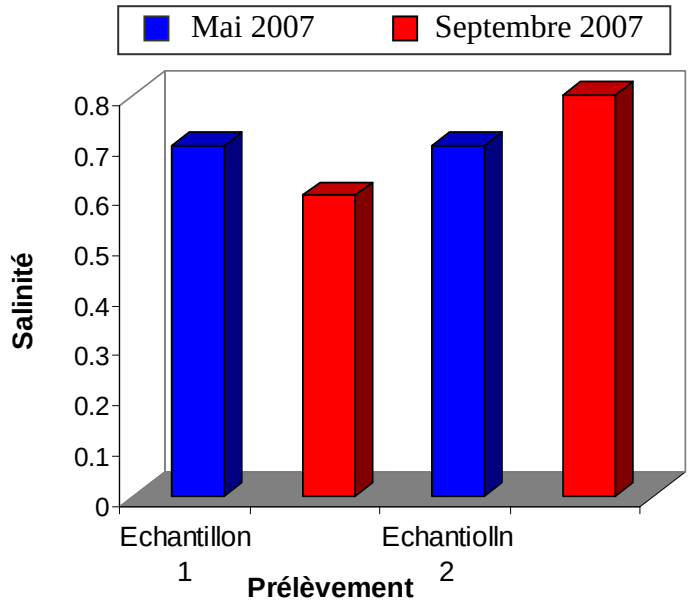


Figure N° 46 : Histogramme de la variation de la salinité pour les deux campagnes.

V. 4. Les éléments de la pollution :

V. 4. 1. Les éléments majeurs :

V. 4. 1. 1. Calcium (Ca^{++}) : la présence des ions Ca^{++} dans l'eau est liée principalement à deux origines naturelles : Soit la dissolution des formations carbonatées ($CaCO_3$), soit la dissolution des formations gypseuses ($CaSO_4$).

$CaCO_3 = Ca^{++} + CO_3^{--}$…….. (1).

$CaSO_4, 2H_2O = Ca^{++} + SO_4^{--} + 2H_2O$ ……. (2).

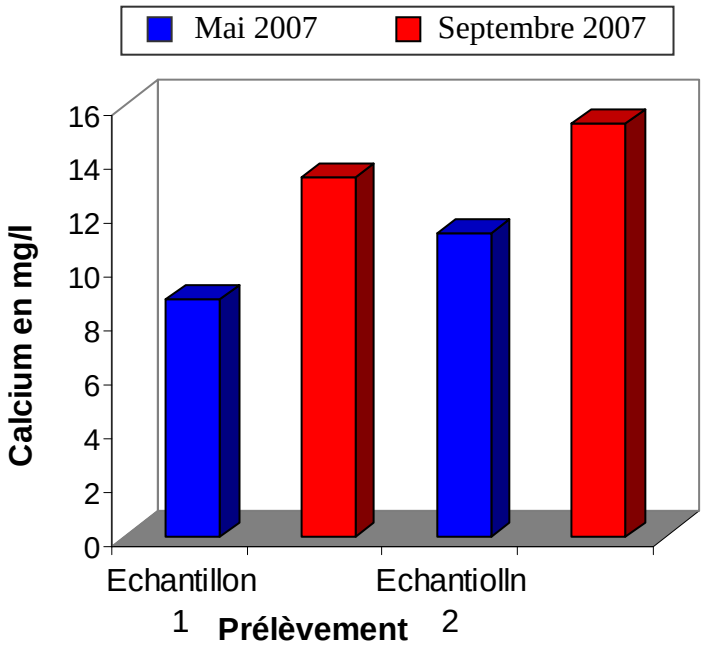


Figure N° 47 : Histogramme de la variation de la concentration du calcium pour les deux campagnes.

Les concentrations de calcium sont inférieures à la norme pour les deux échantillons et les deux compagnes.

V. 4. 1. 2. Magnésium (Mg^{++}) : Ses origines sont comparables à celle du calcium, car il provient de la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en magnésium (magnésite et dolomie).

Magnésite : $MgCO_3 = Mg^{++} + CO_3^{--}$…… (3).

Dolomie : $CaMg(CO_3)_2 = Ca^{++} + Mg^{++} + 2CO_3^{--}$…….. (4).

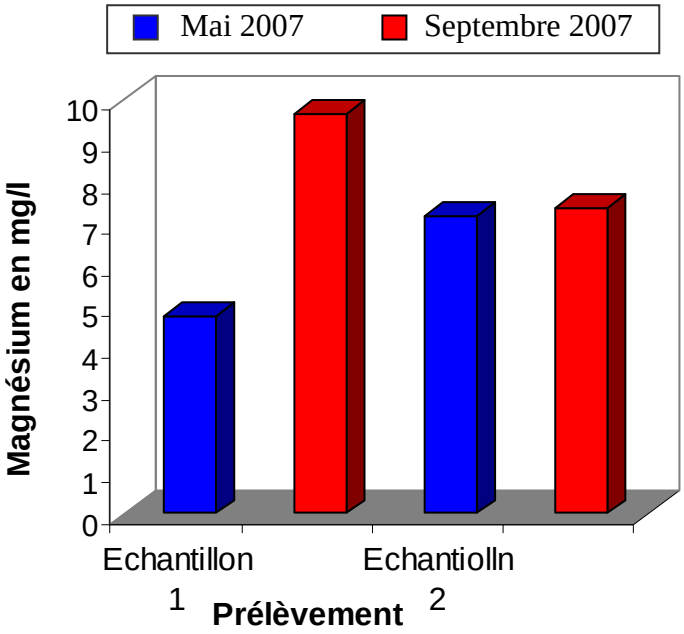


Figure N° 48 : Histogramme de la variation de la concentration du magnésium pour les deux campagnes.

L'évolution des teneurs est identique à celle du calcium. Tous les points de prélèvements présentent des concentrations en Mg^{++} inférieures aux normes de potabilité.

V. 4. 1. 3. Chlorure (Cl^-) et Sodium (Na^+) : L'origine de ces éléments est liée principalement à la dissolution des formations salifères et à l'effet de la salinité marine. La dissolution des minéraux salifères se fait selon la relation suivante :

$NaCl = Na^+ + Cl^-$

Puisque les eaux du Lac sont essentiellement celles de la nappe (le Lac Noire est allimenté par une source), le contact de ces eaux souterraines avec l'air atmosphérique favorise une concentration par évaporation des sels dissous, et plus particulièrement celle du Na Cl.

Notant que les teneurs de Na dépassent les normes.

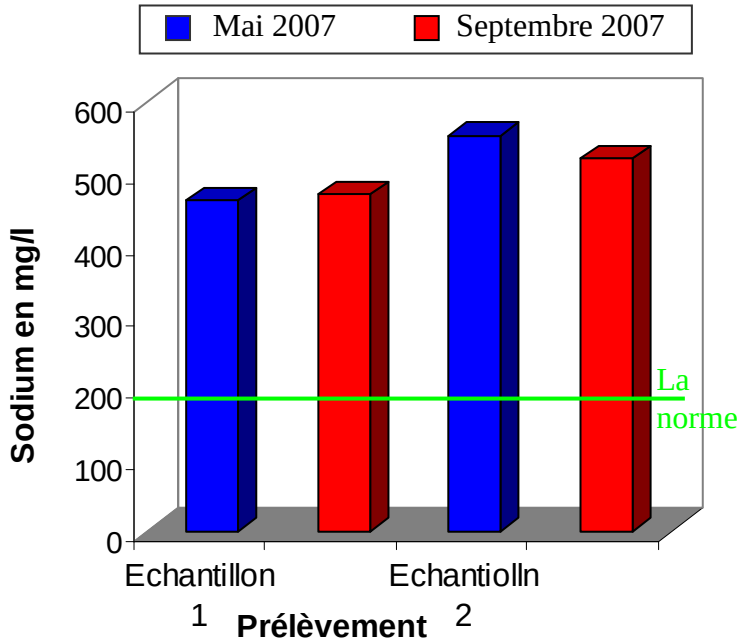


Figure N° 49 : Histogramme de la variation de la concentration du sodium pour les deux campagnes.

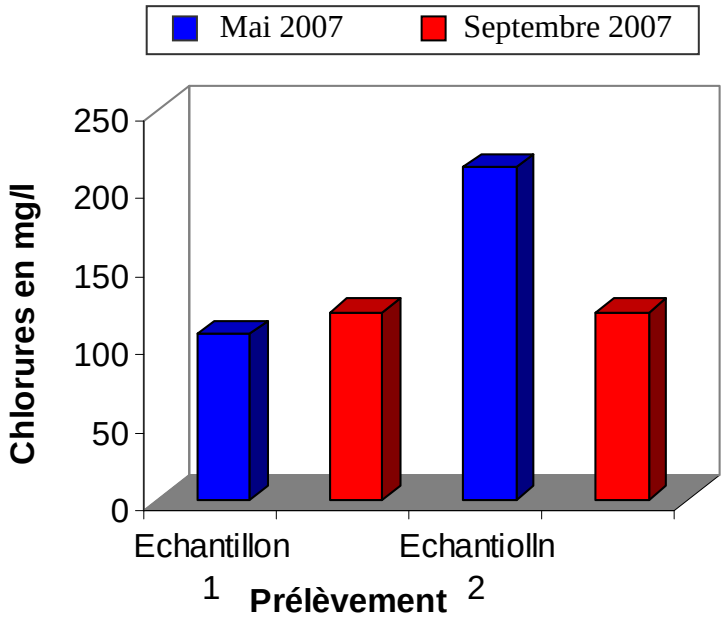


Figure N° 50 : Histogramme de la variation de la concentration des chlorures pour les deux campagnes.

V. 4. 1. 4. Potassium (K^+) : Le potassium provient de l'altération des formations silicatées (gneiss, schiste), des argiles potassiques et de la dissolution des engrais chimiques (NPK).

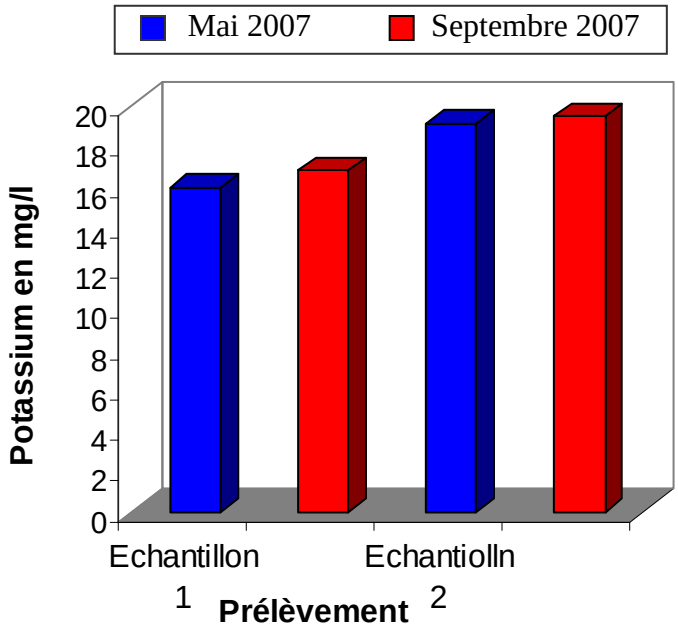


Figure N° 51 : Histogramme de la variation de la concentration de potassium pour les deux campagnes.

Les teneurs de potassium qui sont sous la norme, confirment que la région du Lac Noir n'est pas du tout exposée à n'importe quelle condition citée, favorisant l'augmentation de la concentration de potassium.

V. 4. 1. 5. Sulfates (SO_4^{--}) : La présence des ions sulfates dans l'eau est liée à la dissolution des formations gypseuses selon la relation (2).

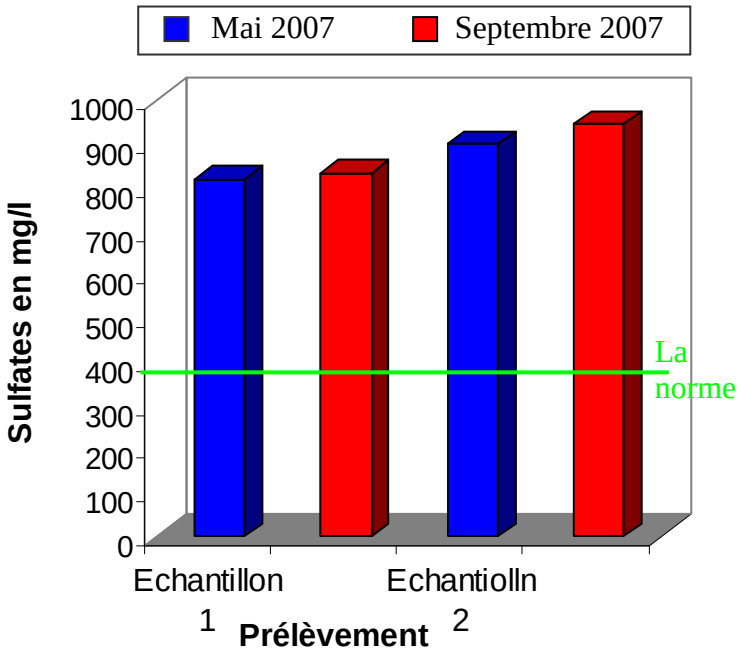


Figure N° 52 : Histogramme de la variation de la concentration des sulfates pour les deux campagnes.

Dans notre cas Les teneurs en SO_4 sont très élevées et dépassent les normes à cause de la tourbe qui constitue le lit du Lac Noir.

Les eaux en contact avec ces matières carbonées réductrices, non seulement seront privées d'oxygène, mais encore renfermeront de l'H_2S par réduction de leurs sulfates. C'est ce que l'on peut observer au niveau des eaux du lac, ou la présence d'un trouble blanc jaune fait penser à un précipité de soufre élémentaire.

Contre partie de la réduction des sulfates, l'oxydation des matières carbonées conduira à des teneurs au dessus de la normale en CO_2 libre et, en l'absence de bases susceptibles de saturer le CO_2 d'équilibre, les eaux resteront agressives.

V. 4. 1. 6. Bicarbonates (HCO_3^-) : La présence des bicarbonates dans l'eau est due à la dissolution des formations carbonatées par des eaux chargées en gaz carbonique.
La somme des équations de dissolution est donnée comme suit :

$$CaCO_{3\,(S)} + H_2O_{\,(L)} + CO_{2\,(g)} = 2HCO_3^- + Ca^{++}{}_{(aq.)} \ldots\ldots\ldots\ldots (6).$$

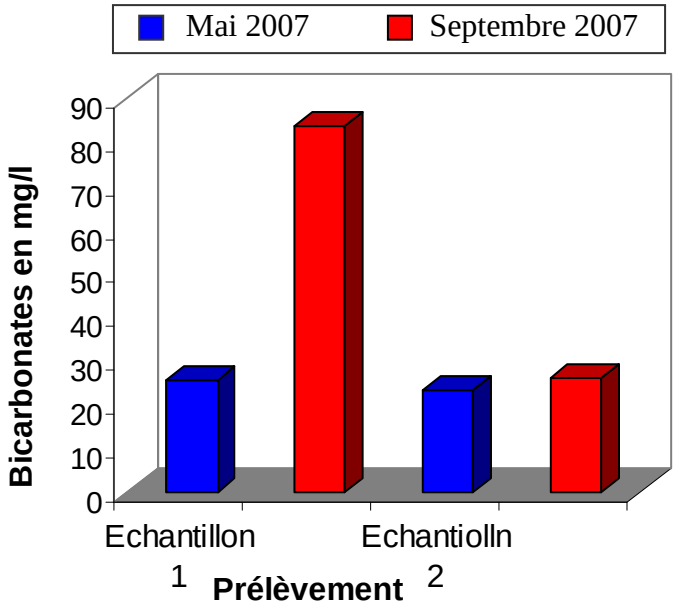


Figure N° 53 : Histogramme de la variation de la concentration des bicarbonates pour les deux campagnes.

La valeur des bicarbonates est en générale dans les normes, mais elle crois d'une campagne à l'autre à cause de l'évaporation des eaux qui entraînera l'augmentation des concentrations.

V. 4. 2. Cycle de l'azote:

L'azote est présent dans la nature sous trois formes chimiques (nitrates, nitrite et ammonium).
Le cycle de l'azote est caractérisé par trois réservoirs : azote organique (acides aminés, protéines…), azote minéral (NO_3^-…) et composés gazeux (N_2, NH_3, N_2O…) et est régi par des processus chimiques et biologiques permettant le passage d'une forme azotée à l'autre.
Le transfère de la forme ammonium vers les nitrites et les nitrates se fait par oxydation, cette réaction est rapide en présence de l'oxygène. La forte teneur en CO_2 et la faible teneur en oxygène accroissent la concentration en ammonium dans l'eau.

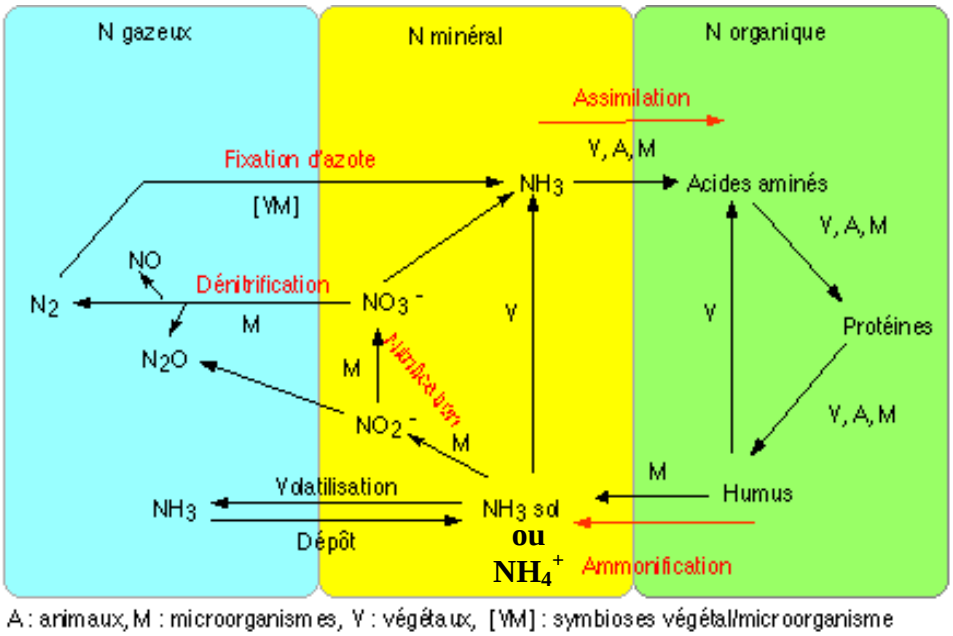


Figure N° 54 : Cycle de l'azote.

V. 4. 2. 1. Ammonium (NH_4^+) :

Les concentrations en ammonium fournissent des informations sur la pollution des eaux suite au déversement des eaux usées ménagères ou à l'érosion et au lessivage des sols agricoles.

L'ammonium n'est pas très stable au plan chimique entre le prélèvement et l'analyse en laboratoire, il faut compter avec une importante dégradation biologique durant le transport ; cette transformation est particulièrement sensible pour de faibles concentrations. Il faut alors garantir une réfrigération appropriée de l'échantillon lors du prélèvement et du transport.

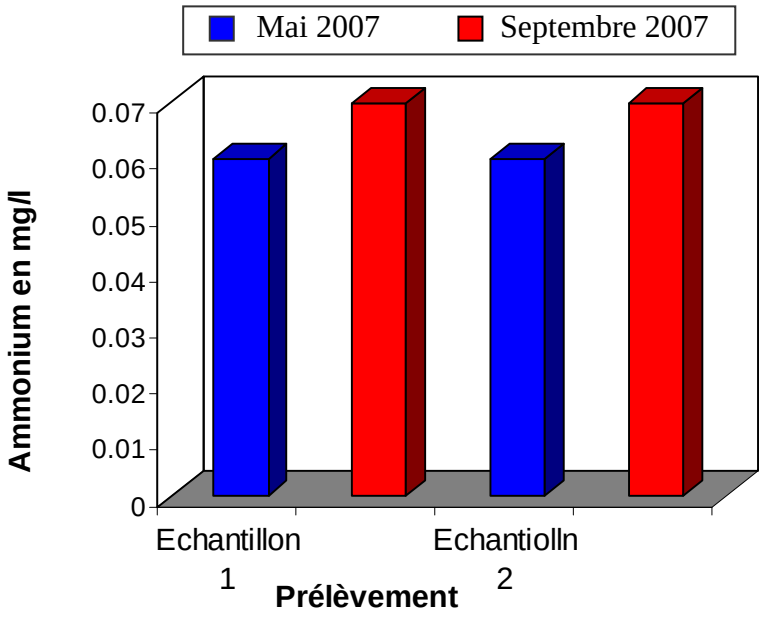
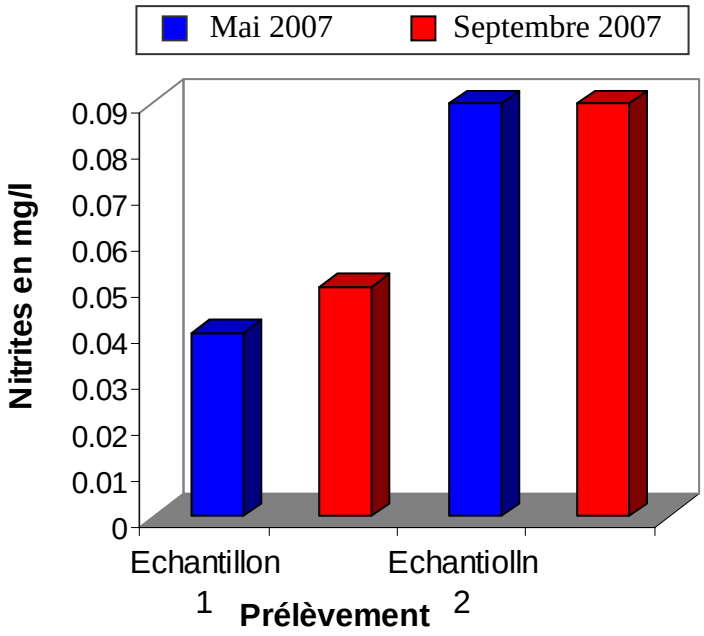


Figure N° 55 : Histogramme de la variation de la concentration de l'ammonium pour les deux campagnes.

L'allure de l'histogramme de variation de l'ammonium montre que les teneurs sont comprises entre 0.06 et 0.07 mg/l, ces concentrations sont toujours dans les normes.

V. 4. 2. 2. Nitrites (NO_2^-) :

Les nitrites sont instables au plan biochimique. Entre le remplissage des flacons et l'analyse au laboratoire, il faut compter avec une importante dégradation biologique durant le transport. En présence de fortes concentrations en ammonium, les nitrites peuvent également apparaître par nitrification, c'est la raison pour laquelle les échantillons doivent être réfrigérés (< 4°C) et analysés rapidement après prélèvement.
Les nitrites sont très toxiques pour la faune. Des concentrations élevées en nitrites peuvent être observées par suite de la transformation biologique de l'ammonium en nitrates ou, en condition anaérobies lors de la dénitrification des nitrates en NO_2^- ou N_2 gazeux.



<u>Figure N° 56 :</u> Histogramme de la variation de la concentration des nitrites pour les deux campagnes.

On constate que les teneurs en nitrites sont faibles et varient entre 0.04 et 0.09 mg/l.

V. 4. 2. 3. Nitrates (NO_3^-) :

Représente la forme la plus oxygénée de l'azote, c'est une forme très soluble. Pour le cas où l'oxygène vient à manquer, les nitrates agissent néanmoins comme des accepteurs d'électrons (oxydants) et formes des composés réduits d'azotes qui eux sont toxiques : nitrites et ammonium.

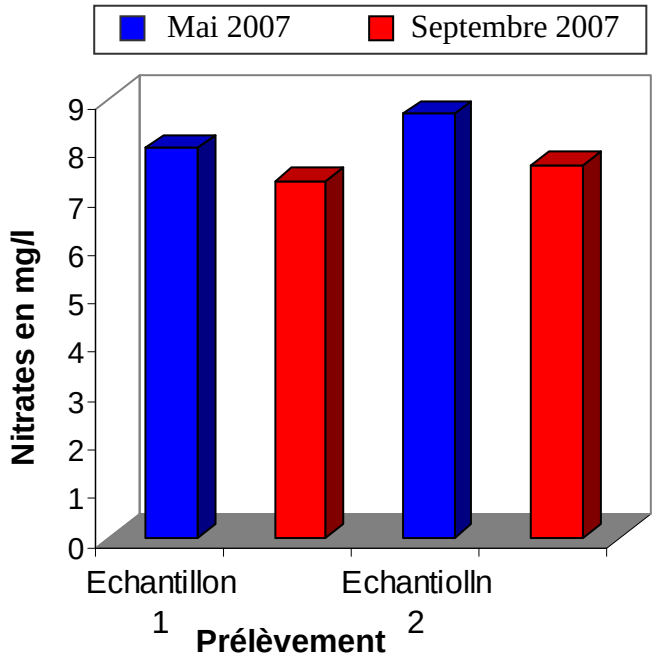


Figure N° 57 : Histogramme de la variation de la concentration des nitrates pour les deux campagnes.

L'histogramme fait apparaître que la concentration en NO_3^- dans les eaux du Lac Noir est relativement faible et à peu prés constante pendant les deux compagnes par rapport aux normes de l'OMS, 1994 (NO_3<50 mg/l).

V. 4. 3. Les éléments mineurs naturels :

V. 4. 3. 1. Phosphates (PO_4^{3-}) :

Les phosphates peuvent se trouver sous différentes formes oxydées, méta HPO_3, pyro $H_4P_2O_7$ et ortho H_3PO_4, en milieu aqueux, les formes méta et pyro tendant vers la forme ortho pour des pH de 5 à 8. Les réactions chimiques entre les différentes formes de phosphates sont données par :

$$PO_4^{3-} + 3H^+ \longleftrightarrow HPO_4^{3-} + 2H^+ \longleftrightarrow H_2PO_4^{3-} + H^+ \longleftrightarrow H_3PO_4 \quad \text{……. (7).}$$

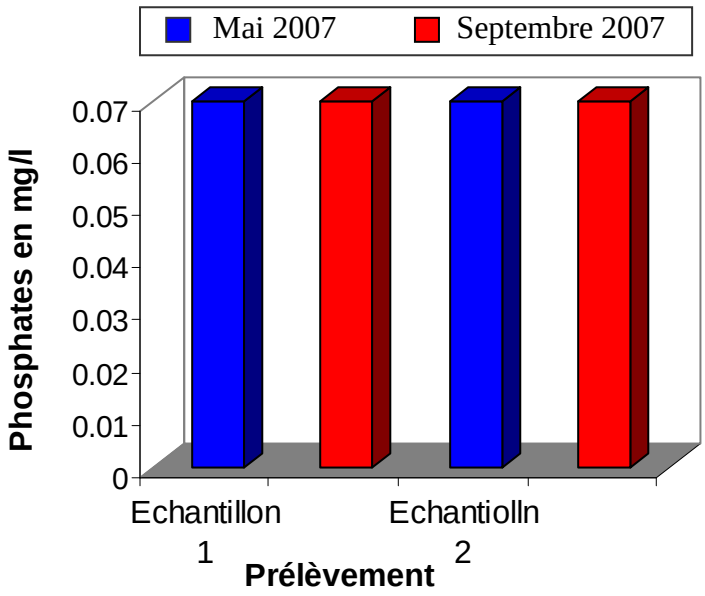


Figure N° 58 : Histogramme de la variation de la concentration des phosphates pour les deux campagnes.

Les valeurs restent toujours dans les normes et les teneurs sont stables d'une campagne à l'autre.

V. 4. 4. Les paramètres de pollution organique :

V. 4. 4. 1. La demande biochimique en oxygène (DBO_5) :

L'oxydation des composés organiques biodégradables par des micro-organismes entraîne une consommation d'oxygène, donc la mesure de cette DBO permet d'évaluer la qualité d'une eau ou son degré de pollution. La dégradation complète des matières organiques peut être relativement longue, l'oxydation des dérivés ammoniacaux et des nitrites en nitrates absorbe également de l'oxygène.

Les valeurs de la DBO_5 varient selon les types d'eau :

- de 0 à 10 mg/l : eau naturelle.
- de 10 à 50 mg/l : eau usée épurée.
- de 50 à 400 mg/l : eau usée domestique.
- > 400 mg/l : eau usée industrielle.

Les phénomènes d'autoépuration dans les eaux superficielles entraînent la dégradation de la charge organique polluante par les micro-organismes. L'activité de ces derniers tend à consommer de l'oxygène et c'est cette diminution de l'oxygène dans le milieu qui est mesurée par la DBO_5. En effet, à 20 °C la dégradation des matières organiques commence immédiatement. Il a été conventionnellement retenu d'exprimer la DBO_5 en mg/l d'oxygène consommé pendant 5 jours à 20 °C.

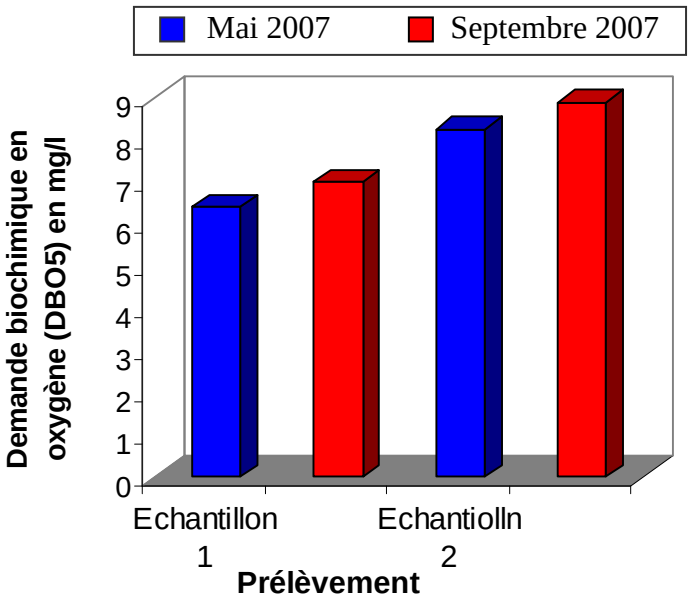


Figure N° 59 : Histogramme de la variation de la demande biochimique en oxygène pour les deux campagnes.

Le graphe montre que les valeurs de la DBO_5 ne dépassent pas les 10 mg/l ce qui confirme que les eaux du Lac Noir sont des eaux naturelles.

V. 5. L'indice de la pollution organique (IPO) :

L'indice de la pollution organique des eaux du Lac Noir nous renseigne sur leur qualité et leur impact sur les eaux de la nappe.
A l'aide du logiciel **Aquakit**, deux petits programmes Aquexmono et Aquexmulti établis à partir d'un tableur Excel permettent d'extraire les données d'Aquakit et de les présenter en graphiques pour faciliter les interprétations.

V. 6. Les indicateurs de pollution organique :

Les indicateurs de pollution regroupent les phosphates et les ions dérivés de l'azote qui provoquent des pollutions organiques.

Un indice de pollution organique IPO, calculé à partir des concentrations de ces ions, permet de classer l'eau analysée sur une échelle à 5 niveaux de pollution. L'indice le plus élevé correspond à une pollution nulle ou très faible, représentée conventionnellement par une couleur bleue.

On inclut habituellement dans le calcul de l'IPO, la demande biologique en O_2 à 5 jours (DBO_5).

Tableau N° 22 : paramètres et classes de l'IPO.

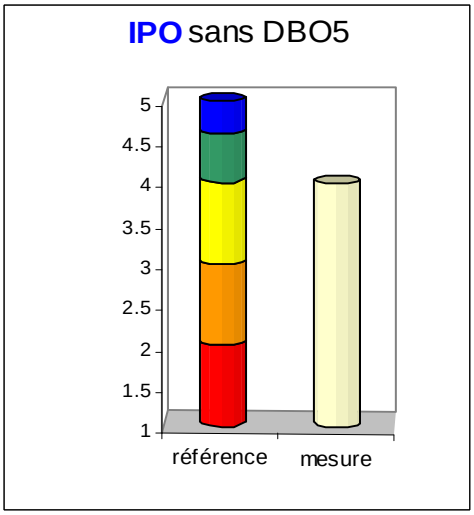
Classe	NH_4^+ (mg N/l)	NO_2^- (µg N/l)	PO_4^{3-} (µg P/l)	DBO_5 (mg O_2/l)	Couleur	IPO	Pollution organique
Classe 5	< 0.1	< 6	< 16	< 2		5 – 4.6	Nulle
Classe 4	0.1 – 0.9	6 – 10	16 – 75	2 – 5		4.5 – 4.0	Faible
Classe 3	1.0 – 2.4	11 – 50	76 – 250	5.1 – 10		3.9 – 3.0	Modérée
Classe 2	2.5 – 6.0	51 – 150	251– 900	10.1 – 15		2.9 – 2.0	Forte
Classe 1	> 6	> 150	> 900	> 15		1.9 – 1.0	Très forte

Les résultats du calcul de l'IPO sont dans les tableaux et les figures suivants sachant que chaque paramètre est représenté individuellement.

Echantillon I :

Indicateurs de pollution			
		Classe	**Pollution**
NH_4^+ (µg N /l)	47	5	Nulle
NO_2^- (µg N /l)	12	3	Modéré
PO_4^{3-}(µg P /l)	23	4	Faible
DBO_5 (mg O_2/l)	6.4	3	Modéré
IPO:	avec DBO5 :	3.75	Modérée
	sans DBO5:	4.00	Faible

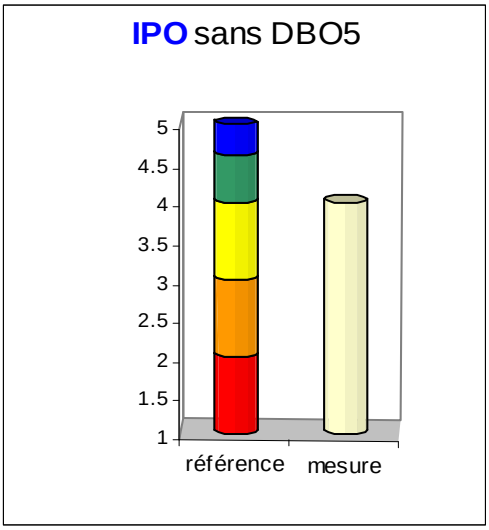
Indicateurs d'eutrophisation			
		Classe	**Eutrophisation**
NO_3^- (mg N /l)	1.8		
PO_4^{3-}(µg P /l)	23	4	Faible



Campagne 01 : Mai 2007.

Indicateurs de pollution			
		Classe	**Pollution**
NH_4^+ (µg N /l)	54	5	Nulle
NO_2^- (µg N /l)	27	3	Modéré
PO_4^{3-}(µg P /l)	23	4	Faible
DBO_5 (mg O_2/l)	7.0	3	Modéré
IPO:	avec DBO5 :	3.75	Modérée
	sans DBO5:	4.00	Faible

Indicateurs d'eutrophisation			
		Classe	**Eutrophisation**
NO_3^- (mg N /l)	2.0		
PO_4^{3-}(µg P /l)	23	4	Faible

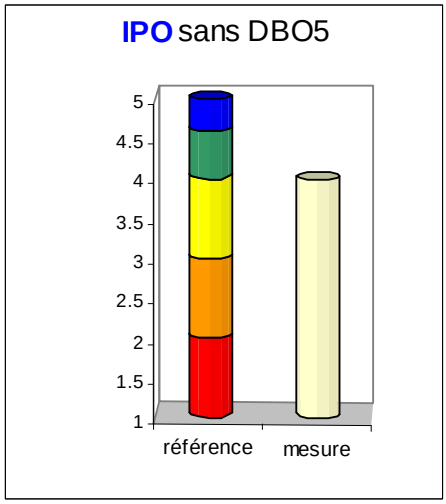


Campagne 02 : Septembre 2007.

Echantillon II :

Indicateurs de pollution			
		Classe	**Pollution**
NH_4^+ (µg N /l)	47	5	Nulle
NO_2^- (µg N /l)	15	3	Modéré
PO_4^{3-}(µg P /l)	23	4	Faible
DBO_5 (mg O_2/l)	8.3	3	Modéré
IPO:	avec DBO5 :	3.75	Modérée
	sans DBO5:	4.00	Faible

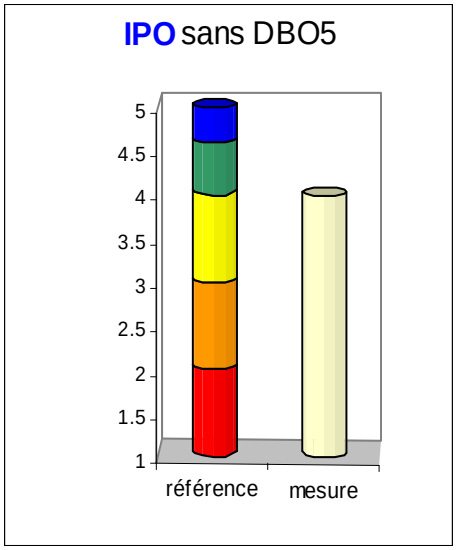
Indicateurs d'eutrophisation			
		Classe	**Eutrophisation**
NO_3^- (mg N /l)	1.7		
PO_4^{3-}(µg P /l)	23	4	Faible



Campagne 01 : Mai 2007.

Indicateurs de pollution			
		Classe	**Pollution**
NH_4^+ (µg N /l)	54	5	Nulle
NO_2^- (µg N /l)	27	3	Modéré
PO_4^{3-}(µg P /l)	23	4	Faible
DBO_5 (mg O_2/l)	8.9	3	Modéré
IPO:	avec DBO5 :	3.75	Modérée
	sans DBO5:	4.00	Faible

Indicateurs d'eutrophisation			
		Classe	**Eutrophisation**
NO_3^- (mg N /l)	1.7		
O_4^{3-}(µg P /l)	23	4	Faible



Campagne 02 : Septembre 2007.

V. 7. Interprétation :

V. 7. 1. Indice de la pollution organique :

L'indice de la pollution organique montre clairement que la pollution organique des eaux du Lac Noir est faible à modérée. Ceci est dû au fait que la région du Lac Noir est loin de toute activité humaine.

V. 7. 2. Les indicateurs d'eutrophisation :

Ces indicateurs regroupent les nitrates et surtout les phosphates : ils représentent le stade final de la dégradation des polluants contenant de l'azote et du phosphore dans une rivière ou un lac. Ils n'ont pas un caractère toxique direct pour les êtres vivants de la rivière ou du lac, mais ils peuvent provoquer un déséquilibre de l'écosystème en favorisant un développement anarchique des plantes aquatiques.

Ces indicateurs sont faibles dans les eaux du Lac Noir ce qui n'a pas conduit à un déséquilibre de l'écosystème qui se marque par le fort développement des plantes.

V. 8. Conclusion :

L'étude des paramètres physiques, chimiques et biologiques a permis de connaître la qualité des eaux du Lac Noir ainsi que leur degré de pollution.

Les résultats d'analyse des éléments majeurs ont montré que ces eaux présentent des teneurs en sulfates et en sodium très élevées, et dépassent la norme.

La méthode des indices de pollution organique a été retenue pour la détermination de la pollution organique, cette dernière a montré que les eaux du Lac Noir ont une pollution organique faible à modérée.

Chapitre VI :

Détermination des paramètres hydrodispersifs.

VI. 1. Introduction :

La détermination des paramètres hydrodispersifs et des caractéristiques d'infiltration sont indispensables à l'évaluation des quantités d'eau infiltrée, mais aussi à l'établissement d'un modèle hydrodispersif dans le but d'évaluer l'impact d'une pollution éventuelle surtout au niveau d'une zone prédisposée à l'alimentation artificielle.

VI. 2. L'infiltration :

L'infiltration qualifie le transfert de l'eau à travers les couches superficielles du sol venant de la surface. L'eau d'infiltration remplit en premier lieu les interstices du sol en surface et pénètre par la suite dans le sol sous l'action de la gravité et des forces de succion. L'infiltration influence de nombreux aspects de l'hydrologie, du génie rural ou de l'hydrogéologie. Afin d'appréhender le processus d'infiltration, on peut définir :

- *Le régime d'infiltration i(t)*, nommé aussi taux d'infiltration, qui désigne le flux d'eau pénétrant dans le sol en surface. Il est généralement exprimé en mm/h. Le régime d'infiltration dépend avant tout du régime d'alimentation (irrigation, pluie), de l'état d'humidité et des propriétés du sol.

L'infiltration cumulative, notée I(t), est le volume total d'eau infiltrée pendant une période donnée. Elle est égale à l'intégrale dans le temps du régime d'infiltration (Figure N° 60).

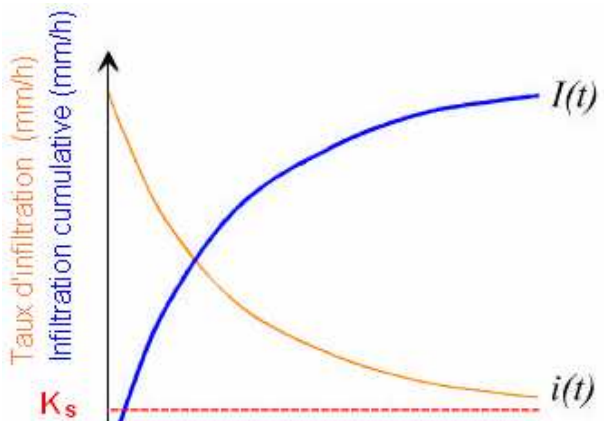


Figure N° 60 : Evolution générale du régime d'infiltration et de l'infiltration cumulative au cours du temps

$$I(t) = \int_{t=t_0}^{t} i(t) \times dt$$

Avec :

- *I(t)* : infiltration cumulative au temps t [mm],
- *i (t)* : régime ou taux d'infiltration au temps t [mm/h].

- La *conductivité hydraulique à saturation* K_s est un paramètre essentiel de l'infiltration. Il représente la valeur limite du taux d'infiltration si le sol est saturé et homogène. Ce paramètre entre dans de nombreuses équations pour le calcul de l'infiltration.
- La *capacité d'infiltration* ou capacité d'absorption (ou encore infiltrabilité) représente le flux d'eau maximal que le sol est capable d'absorber à travers sa surface, lorsqu'il reçoit une pluie efficace ou s'il est recouvert d'eau. Elle dépend, par le biais de la conductivité hydraulique, de la texture et de la structure du sol, mais également des conditions aux limites, c'est à dire, la teneur en eau initiale du profil et la teneur en eau imposée en surface.

- La *percolation* désigne l'écoulement plutôt vertical de l'eau dans le sol (milieu poreux non saturé) en direction de la nappe phréatique, sous la seule influence de la gravité. Ce processus suit l'infiltration et conditionne directement l'alimentation en eau des nappes souterraines.
- La *pluie nette* représente la quantité de pluie qui ruisselle strictement sur la surface du terrain lors d'une averse. La pluie nette est déduite de la pluie totale, diminuée des fractions interceptées par la végétation et stockée dans les dépressions du terrain.

VI. 2. 1. Les facteurs influençant l'infiltration :

L'infiltration dépend de plusieurs facteurs, les plus significatifs sont :

⇒ . *la nature du sol* (structure, texture, porosité, perméabilité) - Les caractéristiques de la matrice du sol influencent les forces de capillarité et d'adsorption dont résultent les forces de succion, qui elles-mêmes, régissent en partie l'infiltration.

⇒ . *la couverture du sol* - La végétation influence positivement l'infiltration en ralentissant l'écoulement de l'eau à la surface, lui donnant ainsi plus de temps pour pénétrer dans le sol. D'autre part, le système radiculaire améliore la perméabilité du sol. Enfin, le feuillage protège le sol de l'impact de la pluie et

diminue par voie de conséquence le phénomène de battance.

⇒ *La topographie et la morphologie* - La pente par exemple agit à l'opposé de la végétation. En effet, une forte pente favorise les écoulements au dépend de l'infiltration.

⇒ . *Le débit d'alimentation* (intensité de la précipitation, débit d'irrigation).

⇒ *La teneur en eau initiale du sol* (conditions antécédentes d'humidité) - L'humidité du sol est un facteur essentiel du régime d'infiltration, car les forces de succion sont aussi fonction du taux d'humidité du sol. Le régime d'infiltration au cours du temps évolue différemment selon que le sol est initialement sec ou humide. L'humidité d'un sol est généralement appréhendée en étudiant les précipitations tombées au cours d'une certaine période précédant un événement pluvieux.

Finalement, les facteurs les plus influents, pour une même topographie, sont le type de sol, sa couverture et son taux initial d'humidité.

VI. 2. 2. Modélisation du processus d'infiltration :

Parmi les nombreux modèles existants, on peut retenir deux grandes approches, à savoir:

⇒ une approche basée sur des relations empiriques, à 2, 3 ou 4 paramètres,

⇒ une approche à base physique.

VI. 2. 2. 1. Relations empiriques :

Les relations empiriques expriment une décroissance de l'infiltration en fonction du temps à partir d'une valeur initiale (soit exponentiellement, soit comme une fonction quadratique du temps) qui tend vers une valeur limite, en général *Ks* mais pouvant être proche de zéro. Citons à titre d'exemple deux formules empiriques :

La formule de Horton - La capacité d'infiltration s'exprime comme suit :

$$i(t) = i_f + (i_0 - i_f) \times e^{-\gamma.t}$$

Avec :

i(t) : capacité d'infiltration au temps t [cm/h],

i_o : capacité d'infiltration respectivement initiale dépendant surtout du type de sol [cm/h],

i_f : capacité d'infiltration finale [mm/h],

t : temps écoulé depuis le début de l'averse [h],

γ : constante empirique, fonction de la nature du sol [min-1].

L'utilisation de ce type d'équation, quoique répandue, reste limitée, car la détermination des paramètres, i_0, i_f, et γ présente certaines difficultés pratiques.

La formule de l'Institut d'Aménagement des Terres et des Eaux de l'EPFL - La relation est légèrement différente de celle de Horton (seulement deux paramètres). Elle est du type :

$$i(t) = i_f + a \times e^{-b.t}$$

Avec :

i(t) : capacité d'infiltration au temps *t* [mm/h],

i_f : capacité d'infiltration finale [mm/h],

a et *b* : coefficients d'ajustement.

Cette relation a l'avantage de permettre la recherche de relations fonctionnelles, d'une part entre la capacité limite (ou finale) d'infiltration et la texture du sol, d'autre part entre le paramètre *a* et l'humidité volumique. On lève ainsi l'indétermination sur certains paramètres par l'intervention de caractéristiques objectives.

D'autres formules peuvent être utilisées pour déterminer le régime d'infiltration de l'eau du sol. Elles font toutes appel à des coefficients empiriques à évaluer en fonction du type de sol rencontré.

VI. 2. 2. 2. Modèles à base physique :

Ces modèles décrivent d'une manière simplifiée le mouvement de l'eau dans le sol, en particulier au niveau du front d'humidification et en fonction de certains paramètres physiques. Les deux modèles suivants sont les plus connus :

Le modèle de Philip - Philip a proposé une méthode de résolution de l'équation de l'infiltration verticale pour certaines conditions initiales et limites. Ce modèle introduit la notion de *sorptivité* qui représente la capacité d'un sol à absorber l'eau lorsque l'écoulement se produit uniquement sous l'action du gradient de pression. La sorptivité *S* est définie par la lame infiltrée *I* en écoulement horizontal. Elle dépend des conditions initiales et des conditions aux limites du système. Elle est fonction des teneurs en eau initiale du sol θ_i et imposée en surface θ_0.

$$i(t) = \frac{S}{2\sqrt{t}} + K_0$$

Avec :

i(t) : capacité d'infiltration au temps *t* [cm/s] ;

t : temps de l'infiltration en s ;

S : Sorptivité en $cm.s^{-0.5}$;

K_0 : composante gravitaire fonction de la conductivité hydraulique à saturation en cm/s

Le modèle de Green et Ampt - Un autre modèle tout aussi connu que le précédent est celui de Green et Ampt. Ce modèle repose sur des hypothèses simplificatrices qui impliquent une schématisation du processus d'infiltration (Figure N° 61).

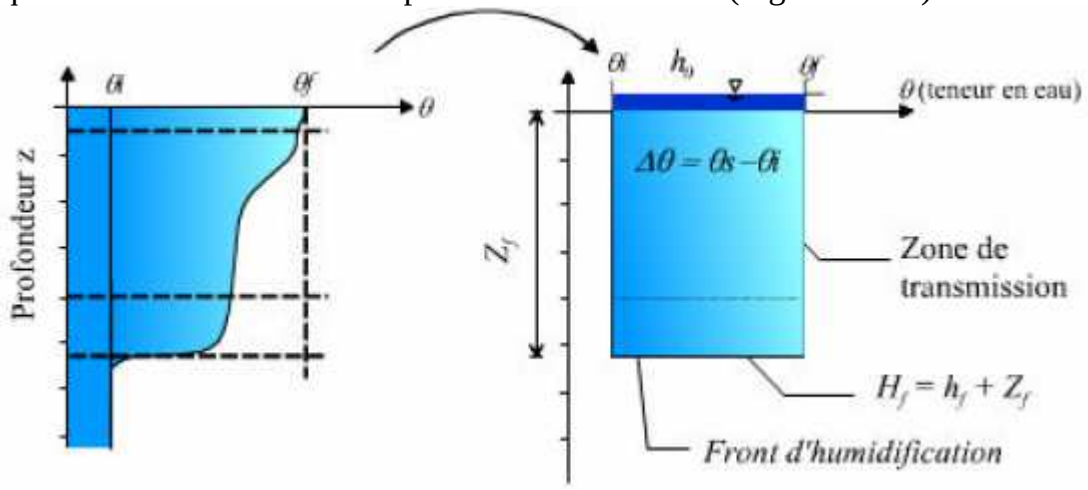


Figure N° 61 : Schématisation du processus de l'infiltration selon Green et Ampt (Tiré de Musy et Soutter, 1991).

$$i(t) = K_s\left(1 + \frac{h_0 - h_f}{z_f(t)}\right)$$

Avec :

i(t) : capacité d'infiltration au temps *t* [mm/h] ;
K_s : conductivité hydraulique à saturation [mm/h]
h_0 : charge de pression en surface [mm]
h_f : charge de pression au front d'humidification [mm]
z_f : profondeur atteinte par le front d'humidification [mm]

Il est basé sur la loi de Darcy et inclut les paramètres hydrodynamiques du sol tels que les charges hydrauliques totales, au niveau du front d'humidification (H_f est la somme de la hauteur d'eau infiltrée depuis le début de l'alimentation - Z_f - et de la charge de pression au front d'humidification - h_f) et en surface ($H_0 = h_0$ = charge de pression en surface).Une des hypothèses du modèle de Green et Ampt stipule que la teneur en eau de la zone de transmission est uniforme. L'infiltration cumulative *I(t)* résulte alors du produit de la variation de teneur en eau et de la profondeur du front d'humidification. Ce modèle s'avère satisfaisant dans le cas de son application à un sol dont la texture est grossière. Cette méthode reste cependant empirique puisqu'elle nécessite la détermination expérimentale de la valeur de la charge de pression au front d'humidification.

VI. 2. 3. Détermination pratique de la capacité d'infiltration du sol au voisinage du Lac Noir :

La détermination de la capacité d'infiltration nécessite l'utilisation de l'infiltromètre à double anneau disponible au niveau du département de géologie.

VI. 2. 3. 1. Spécification et mise en place de l'infiltromètre :

Le dispositif utilisé sur le terrain, consiste à bien enfoncer deux tubes cylindriques, normalisés selon les spécifications données sur la figure N° 62, dans le sol jusqu'à une profondeur suffisante. Le rôle du cylindre externe est de maintenir la verticalité de l'écoulement. Si le sol est perturbé on le dame avec une masse. Une fois les tubes en place, on trace un repère à l'intérieur du tube interne à l'aide d'un marqueur indélébile; cette marque correspond au niveau initial H_0 de l'eau versée dans ce tube à l'instant t=0 (le début de l'expérience). Après un temps t, de préférence assez court au début de la mesure, plus ou moins régulier, verser attentivement de l'eau dans le tube à l'aide d'un cylindre gradué jusqu'au niveau du repère. Le volume d'eau versé correspondra au volume infiltré pendent l'intervalle de temps indiqué, on répète en fin cette dernière étape jusqu'à ce que le volume d'eau ajouté devient constant.

Figure N° 62 : Photo du Dispositif du double anneau

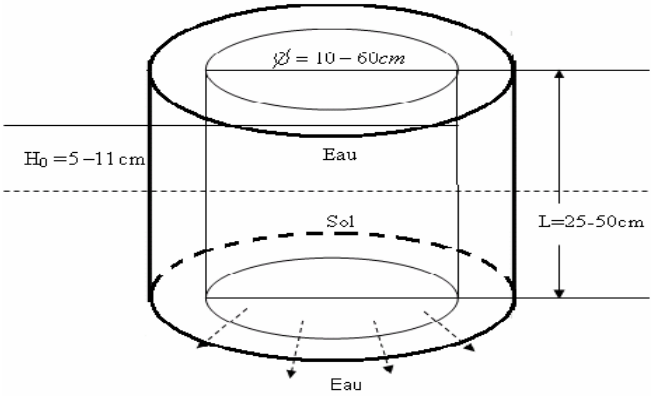


Figure N° 63 : Schéma du Dispositif du double anneau

Remarque : le dispositif d'infiltration (Figure N° 63) est équipé d'un dispositif de mesure doté d'un flotteur, placé au centre du tube. Au fur et à mesure que l'eau s'infiltre, on lit directement sur règle graduée la hauteur de l'eau infiltrée depuis le début de l'expérience.

VI. 2. 3. 2. Méthode de calcul :

Les résultats de mesures sont inscrits sur des fiches techniques dans les quelles sont mentionnés les termes suivants :
Capacité d'infiltration : c'est le rapport de la hauteur infiltrée en (cm) et le temps cumulé en (heure).
Infiltration cumulée : c'est la hauteur infiltrée cumulée.

VI. 2. 3. 3. Interprétation des résultats des essais d'infiltration:

Le modèle empirique de Horton prédit un déclin exponentiel de la capacité d'infiltration d'un sol entre une valeur initiale i_0 et une valeur finale i_f avec une constante empirique γdépendant du type de sol.

Nous avons opté pour ce modèle dont les paramètres i_0, i_f et γsont déterminés expérimentalement en portant la capacité d'infiltration en ordonnée et le temps t en abscisse arithmétique. La constante γ peut être estimée par la relation suivante :

$$\gamma = \frac{i_0 - i_f}{I_f}$$

Où I_f l'aire comprise entre la courbe représentative de *i* en fonction de *t*, soit *i(t)*, entre i_0 et i_f.

VI. 2. 3. 4. Détermination de la capacité d'infiltration au voisinage du forage U3 (2005):

Les mesures obtenues par l'infiltromètre nous ont permis de tracer le graphe de la capacité d'infiltration en fonction du temps t.

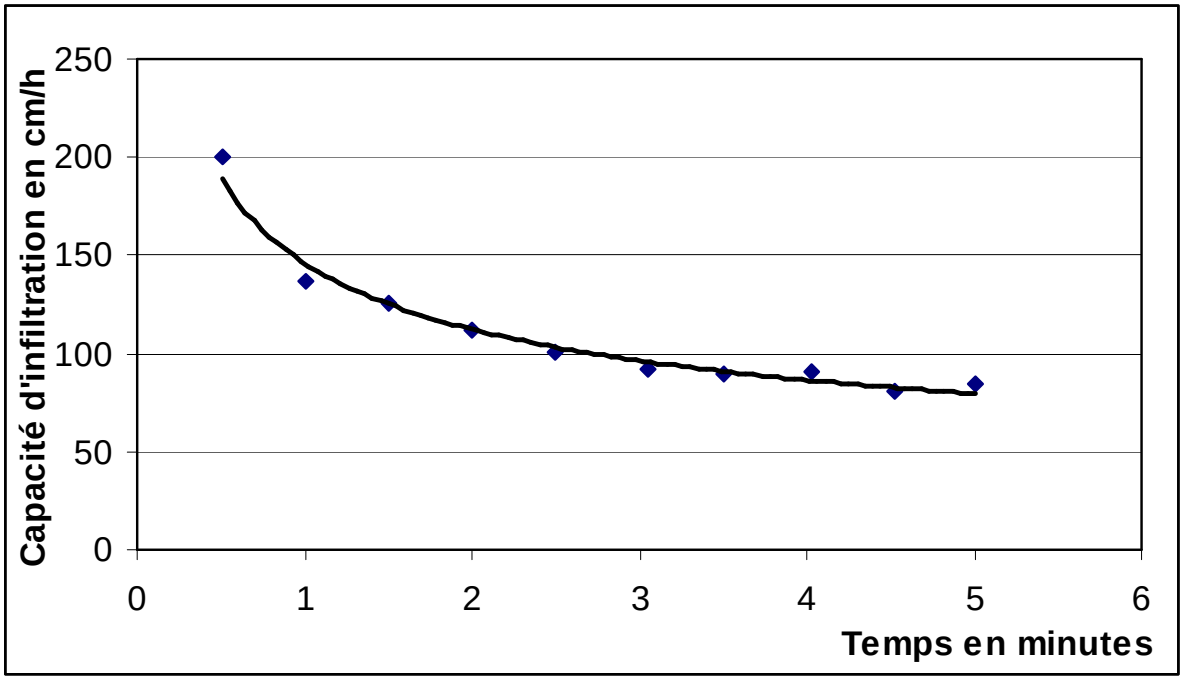


Figure N° 64 : Courbe représentative de la capacité d'infiltration en fonction du temps au voisinage du forage U3 (2005).

L'échelle utilisée est :

1cm ⟶ 45.45cm/h
1cm ⟶ 0.55min

i_0 = 250 cm/h , i_f = 76.08 cm/h , I_f =?

On calcul I_f par planimétrage, on a changé l'échelle ; (0.55/60).45.45=0.416cm.
Alors ; $1cm^2$ ⟶ 0.416cm

⇨ I_f = 3.49cm

$8.4cm^2$ ⟶ 3.49cm

$\gamma = (i_0 - i_f) / I_f = (250 - 76.08) / 3.49 = 49.83.$

$i(t) = i_f + (i_0 - i_f) \times e^{-\gamma.t}$ $\quad i(t) = 76.08 + (250 - 76.08)\, e^{-(49.83.\ 0.083)} = 250\, e^{-4.13}$

$$\boxed{i(t) = 250\, e^{-4.13}\ cm/h}$$

VI. 2. 3. 5. Détermination de la capacité d'infiltration au voisinage du forage BA1 (2005):

A une trentaine de mètre du forage BA1 nous avons installé l'infiltromètre dont les mesures nous ont permis de tracer le graphe de la capacité d'infiltration en fonction du temps t (Figure N° 65).

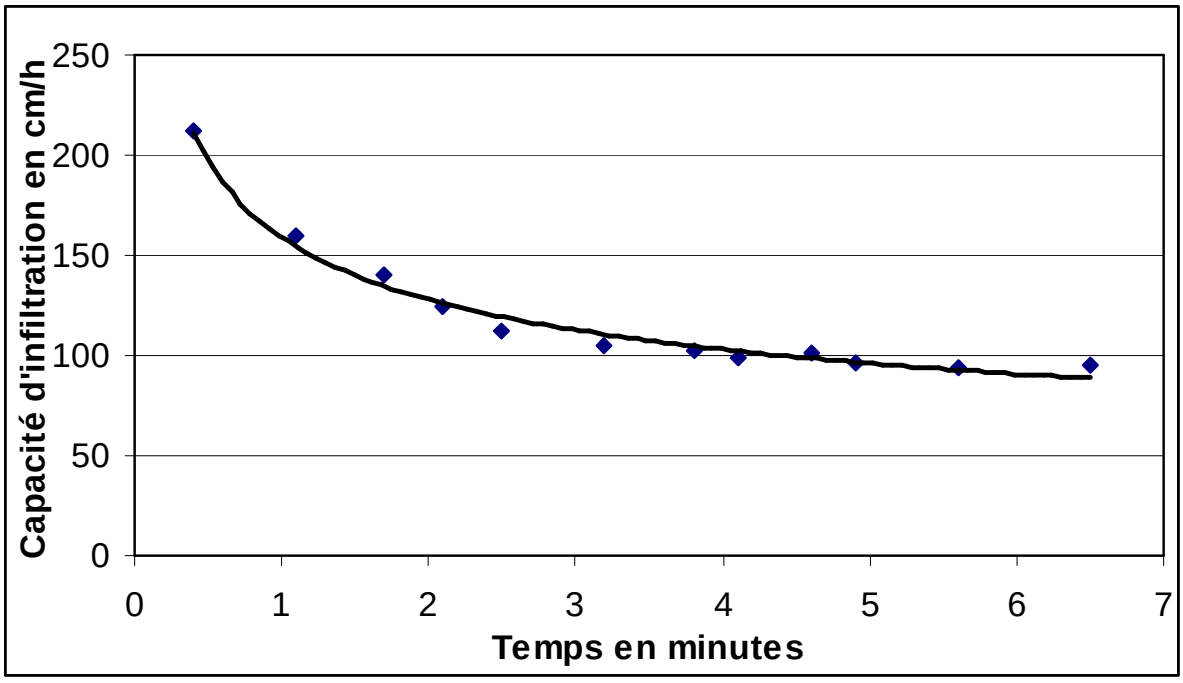


Figure N° 65 : Courbe représentative de la capacité d'infiltration en fonction du temps au voisinage du forage BA1 (2005).

L'échelle utilisée est :

1cm ⟶ 11.11cm/h
1cm ⟶ 6.66min

i_0 = 23.75 cm/h , i_f = 10 cm/h , I_f =?

On calcul I_f par planimétrage, on a changé l'échelle ; (6.66 /60).11.11 = 1.233cm.
Alors ; $1cm^2$ ⟶ 1.233cm

⇨ I_f = 2.866cm

$2.325cm^2$ ⟶ 2.866cm

$\gamma = (i_0 - i_f) / I_f = (23.75 - 10) / 2.866 = 4.79.$

$i(t) = i_f + (i_0 - i_f) \times e^{-\gamma.t}$ $\quad i(t) = 10 + (23.75 - 10)\, e^{-(4.79.\ 1.208)} = 23.75\, e^{-5.78}$

$i(t) = 23.75\ e^{-5.78}$ cm/h

D'après ces résultats nous remarquons que la capacité d'infiltration du deuxième site localisé au voisinage du forage BA1 (Figure N° 65) est supérieure à celle du premier celui situé au voisinage du forage U3 (Figures N° 64). Cette différence est due au fait que la profondeur à l'eau de la nappe au voisinage du forage BA1 est plus importante, par contre la lithologie du terrain reste la même.

VI. 2. 3. 6. Détermination de la capacité d'infiltration du essai I (2007) :

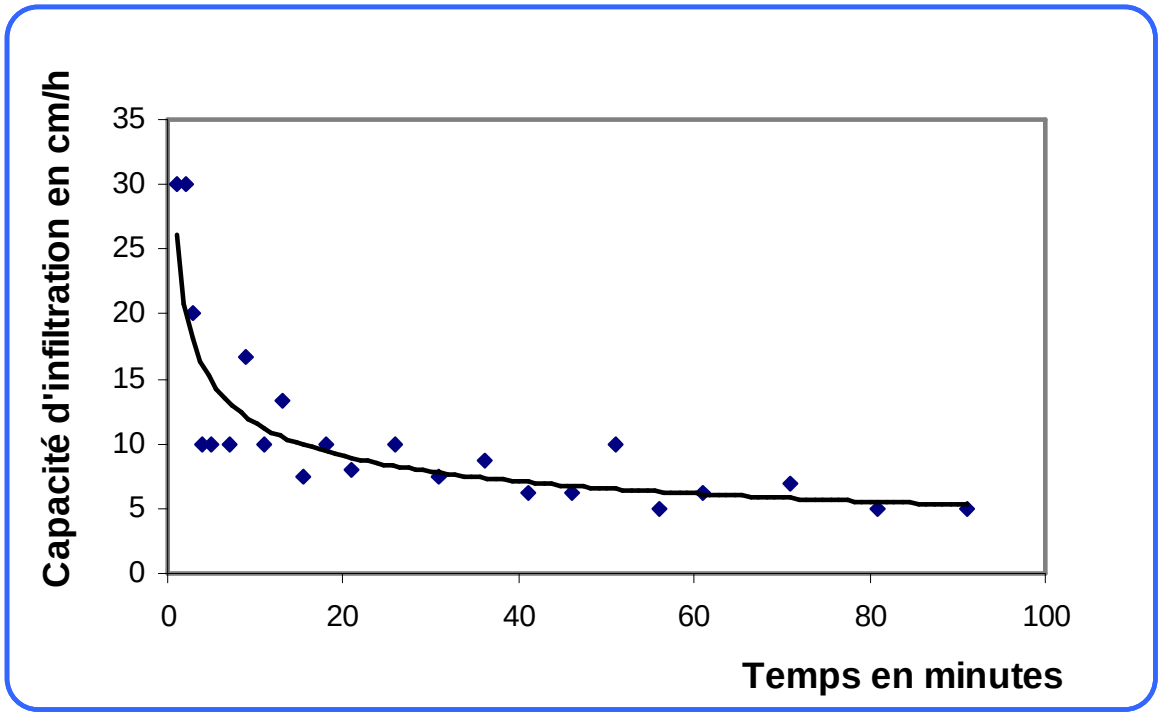


Figure N° 66 : Courbe représentative de la capacité d'infiltration en fonction du temps.

L'échelle utilisée est :

1 cm ⟶ 5.55 cm/h

1 cm ⟶ 8.51 min

i_0 = 31 cm/h , i_f = 4.44 cm/h , I_f =?

On calcul I_f par planimétrage, on a changé l'échelle ; (8.51/60) x 5.55 = 0.787 cm.

Alors ; 1 cm^2 ⟶ 0.787 cm

⇨ I_f = 4.87 cm

6.2 cm^2 ⟶ 4.87 cm

$\gamma = (i_0 - i_f) / I_f = (31 - 4.44) / 4.87 = 5.45\ h^{-1}$.

$i(t) = i_f + (i_0 - i_f) \times e^{-\gamma.t}$ $\quad i(t) = 4.44 + (31 - 4.44)\ e^{-(5.54 \times 1.49)} = 31\ e^{-8.12}$ cm/h.

$i(t) = 31\ e^{-8.12}$ cm/h.

VI. 2. 3. 7. Détermination de la capacité d'infiltration du essai II (2007) :

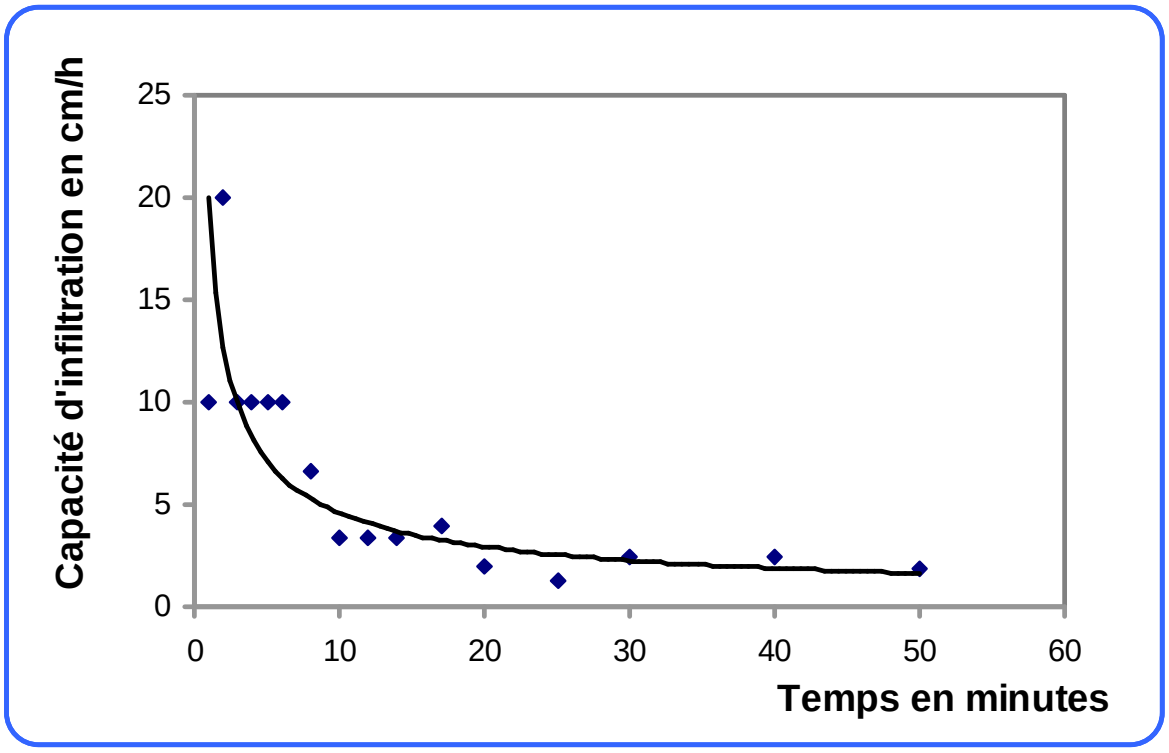


Figure N° 67 : Courbe représentative de la capacité d'infiltration en fonction du temps.

L'échelle utilisée est :

1 cm ⟶ 3.57 cm/h

1 cm ⟶ 5.26 min

i_0 = 28 cm/h , i_f = 1.42 cm/h , I_f =?

On calcul I_f par planimétrage, on a changé l'échelle ; (5.26/60) x 3.57 = 0.312 cm.

Alors ; 1 cm^2 ⟶ 0.312 cm

⇨ I_f = 2.05 cm

6.6 cm^2 ⟶ 2.05 cm

$\gamma = (i_0 - i_f) / I_f = (28 - 1.42) / 2.05 = 12.96\ h^{-1}$.

$i(t) = i_f + (i_0 - i_f) \times e^{-\gamma.t}$ $i(t)$ = 1.42 + (28 – 1.42) $e^{-(12.96 \text{ x } 0.83)}$ = 28 $e^{-10.75}$ cm/h.

$i(t)$ = 28 $e^{-10.75}$ cm/h.

VI. 2 .3. 8. Détermination de la capacité d'infiltration du essai III (2007) :

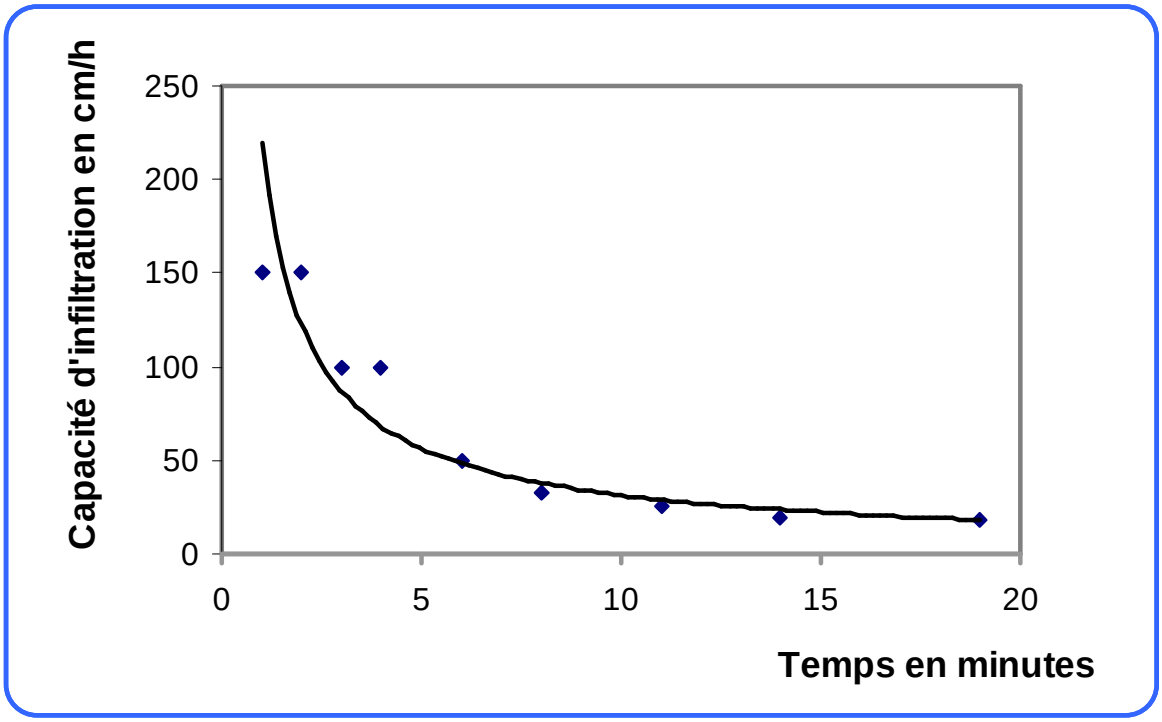


Figure N° 68 : Courbe représentative de la capacité d'infiltration en fonction du temps.

L'échelle utilisée est :

1 cm ⟶ 40 cm/h
1 cm ⟶ 1.85 min

i_0 = 436 cm/h , i_f = 12 cm/h , I_f =?

On calcul I_f par planimétrage, on a changé l'échelle ; (1.85/60) x 40 = 1.233 cm.
Alors ; 1 cm^2 ⟶ 1.233 cm

⇨ I_f = 14.42 cm

11.7 cm^2 ⟶ 14.42 cm

$\gamma = (i_0 - i_f) / I_f = (436 - 12) / 14.42 = 29.40\ h^{-1}$.

$i(t) = i_f + (i_0 - i_f) \times e^{-\gamma.t}$ $i(t) = 12 + (436 - 12)\ e^{-(29.4 \text{ x } 0.31)} = 436\ e^{-9.11}$ cm/h.

$i(t) = 436\ e^{-9.11}$ cm/h.

D'après ces résultats nous remarquons que la capacité d'infiltration du troisième essai est supérieure à celle du premier et du deuxième essai respectivement. Cette différence est due au fait que l'essai *III* est réalisé à une profondeur de 60 cm (au sein des sables pure qui ne contiennent pas de particules fines de matière organique), par contre le premier essai réalisé au voisinage du Lac Noir à peine 50 cm a une capacité d'infiltration supérieure à celle du deuxième essai puisque la couche contenant les particules fines est plus mince et devient épaisse en s'éloignant du Lac (site du deuxième essai 8 m du Lac).

VI. 3. Les paramètres hydrodispersifs :

Les eaux souterraines constituent une ressource de qualité généralement supérieure à celle des eaux de surface grâce à la protection naturelle des couches du sol sous jacentes et aux propriétés filtrantes des terrains. Cependant, l'accroissement des causes de pollution (rejets d'usines, excès d'engrais ou de pesticides, …etc.) est tel que l'enfouissement de l'eau dans le sous sol n'est plus un gage suffisant de pureté.

La migration des produits nocifs, matières organiques et sels dissous, entraînés par l'eau en mouvement, est régie par la convection, la dispersion (diffusion moléculaire et dispersion mécanique), par les échanges physiques avec le milieu et les réactions chimiques et biologiques. Les deux premiers phénomènes sont la cause du déplacement des produits dans la nappe, les suivants sont plutôt une cause de destruction, ou au moins de retard, mais leur influence relative tend à s'atténuer avec l'accroissement des quantités de polluants déversés dans les aquifères.

Le mouvement de l'eau dans un milieu poreux (transfert ou déplacement de l'eau) est régi par des phénomènes de convection et de dispersion, indépendant de tout transport de matière par l'eau (par exemple, migration de soluté), convection et dispersion de l'eau entraînant la migration et la dispersion des matières transportées.

La connaissance de la vitesse effective de l'eau et de la dispersivité du milieu sur l'eau est le préalable nécessaire à l'évaluation de sa porosité effective et de sa dispersivité (qui pourrait éventuellement différer alors quelque peu) sur des substances transportées.

Avant de passer à la détermination des paramètres hydrodispersifs, il est indispensable de présenter un rappel théorique.

VI. 3. 1. Bases théoriques :

L'objectif de cette analyse est de rappeler les bases théoriques de l'écoulement d'eau et du transport de soluté dans le milieu poreux.

VI. 3. 1. 1. Notion concernant le milieu poreux :

Le milieu poreux est l'ensemble de grains solides ou d'agrégats autour desquels existant des espaces vides appelés pores qui peuvent être interconnectés ou non.

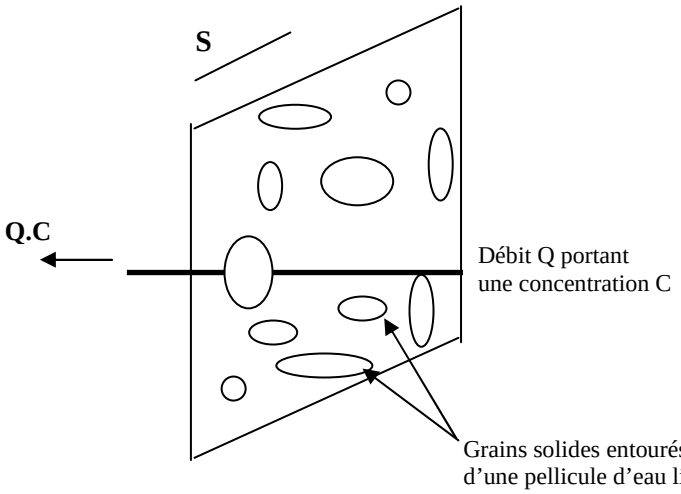
VI. 3. 1. 2. Physique des transferts :

VI. 3. 1. 2. 1. La convection :

La convection représente l'entraînement des éléments en solution dans le mouvement du fluide qui se déplace. Le soluté est transporté par le mouvement général de l'eau à la vitesse, définie par la loi de Darcy.

VI. 3. 1. 2. 2. La loi de Darcy :
La loi de Darcy indique que l'écoulement d'un liquide (débit) à travers un milieu poreux se fait dans la direction de la force motrice : le gradient de charge hydraulique agissant sur le liquide. Le débit dépend aussi d'une caractéristique fondamentale du sol : la conductivité hydraulique.

VI. 3. 1. 2. 3. Porosité cinématique :
La section réelle S_r au travers de laquelle le flux d'éléments dissous passe est inférieure à la section géométrique S car il faut tenir compte de l'existence des grains solides et d'une fraction d'eau dite « immobile » qui ne participe pas à l'écoulement. On définit donc une porosité dite cinématique qui correspond à la fraction d'eau mobile dans le milieu poreux, et qui est bien sûr inférieure à la porosité totale ; c'est le rapport de la section réelle d'écoulement à la section totale.



Flux de convection en kg/unité de temps

$$\Phi_{conv} = Q.C = (\omega_c.S)\ u.C$$

Φ : le flux d'eau traversant la section S (en m^3/unité de temps).
C : la concentration (en kg/m^3).
ω_c : la porosité cinématique.
u : la vitesse de l'eau (en m/s).

VI. 3. 1. 2. 4. Vitesse effective :
La vitesse moyenne u du fluide participant à l'écoulement (moyenne effectuée sur la portion **ωΔs** de la section totale **Δs**) est appelée vitesse effective ou encore vitesse moyenne de pore. Elle diffère fondamentalement de la vitesse apparente de Darcy qui est une vitesse fictive ramenée à la section totale **Δs**, et conduisant au même débit.
Entre ces deux vitesses, existe la relation :

$$u.(\omega\Delta s) = q = v\Delta s$$

Ou :
q : le débit transitant par le tube de courant, d'où :

$$u = v/\omega$$

v : vitesse de Darcy.
ω : porosité cinématique.
u : vitesse effective.

VI. 3. 1. 2. 5. Dispersion :
La notion de dispersion a été introduite par Bear (1972). La dispersion hydrodynamique est un phénomène par lequel une substance migre dans le sol. En se déplaçant, l'espèce chimique se dilue (effet de mélange) et s'étale pour occuper un volume plus grand avec une concentration corrélativement décroissante (effet de dilution).

Cette propagation est provoquée, d'une part, par le déplacement des molécules et, d'autre part par la dispersion cinématique.
La dispersion hydrodynamique est en fonction de la nature du sol et des caractéristiques du transport du soluté.

VI. 3. 1. 2. 6. Dispersion longitudinale :
L'étalement du pic au sein du tube de courant est causé par la dispersion longitudinale.

VI. 3. 1. 2. 7. Dispersion transversale :
Les échanges latéraux entre filets liquides voisins sont dûs à la dispersion transversale (plus particulièrement sous l'effet de la tortuosité, et quelquefois, en cas de faible vitesse, de la diffusion moléculaire).
La diffusion moléculaire contribue à la mise en œuvre de la dispersion cinématique par échange de particules entre filets de courant voisins, dont les trajectoires et vitesse sont différents.

VI. 3. 1. 3. Echanges :

VI. 3. 1. 3. 1. Adsorption-Désorption :
Des échanges de soluté peuvent s'effectuer entre le liquide et les grains solides sous l'effet de différences de concentration.
Une solution à forte concentration va prendre une partie de son soluté qui sera fixé par les grains solides (adsorption). En contrepartie, si ultérieurement la concentration du fluide diminue, l'eau plus pure qui arrivera au contact des grains risque de récupérer une partie de traceur (désorption).

VI. 3. 1. 3. 2. Echanges eau libre-eau liée :
A cette adsorption-désorption classiquement envisagée peut se superposer un phénomène de même type et dont l'ampleur dans bien des cas peut prendre le pas sur la fixation par les grains. La diffusion moléculaire est la cause d'échanges de soluté entre mobile, vecteur du polluant ou de la substance traçante, et l'eau plus ou moins immobile au voisinage des grains.

VI. 3. 2. Manipulation :
Les essais de traçage sont effectués au laboratoire de génie civil à l'aide de perméamétrie comme le montre la figure N° 69.

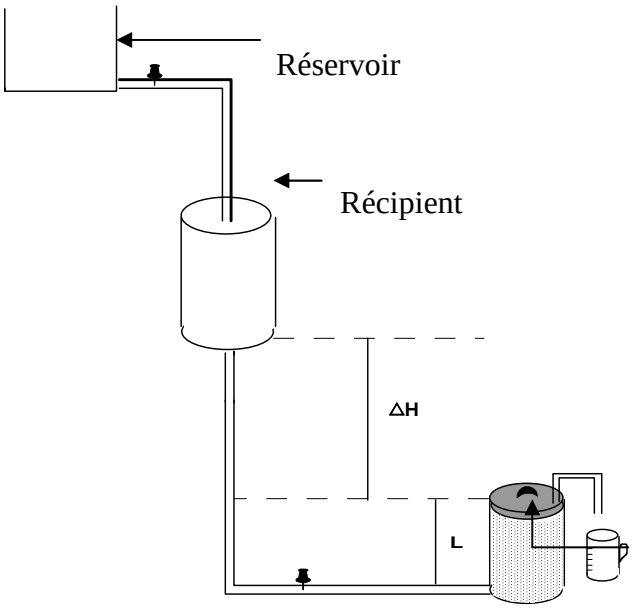


Figure N° 69 : Le perméamètre de mesure.

Au début, le dispositif est complètement saturé avec de l'eau claire c'est-à-dire, sans fluorésceine. Au moment où la fluorésceine est versé et qui correspond au temps t = 0, nous prélevons des échantillons à différents pas de temps et ceci jusqu'à ce qu'il y'ait disparition de la coloration de la fluorésceine.

VI. 3. 3. Détermination graphique des paramètres hydrodispersifs :

Pour l'interprétation des résultats des tests de traçage à la fluorésceine nous avons utilisé la relation suivante :

$$\overline{C} = \frac{C - C_0}{C^0 - C_0} = 0.5(1 - erf(\xi))$$

C : concentration relative sans dimension ;
C : concentration au temps t>0 g/l ;
C^0 : concentration initiale d'injection t=0 g/l ;
C_0 : concentration de l'échantillon sans le traceur g/l ;
Erf : fonction erreur de Gauss

Avec $$\xi = \frac{n_e.l - v.t}{2\sqrt{n_e.D.t}}$$

Où n_e : porosité effective
l : la longueur du cylindre
v : vitesse effective de Darcy
t : temps
D : paramètre de la dispersion $D = \alpha_L.v$;

Cette relation représente la solution approchée de l'équation différentielle de la dispersion :

$$n_e \frac{\delta c}{\delta t} + v\frac{\delta c}{\delta x} = \frac{\delta}{\delta}\left(D\frac{\delta c}{\delta x}\right)$$

En posant $N_p = \frac{t}{\Delta t}$ où Np représente le numéro de l'échantillon et Δt le pas de temps. La deuxième équation devient :

$$\xi = \frac{n_e.l - \frac{4V}{\pi d^2}.N_p}{2\sqrt{n_e.D.\Delta t.N_p}} \qquad \text{car la vitesse} \qquad v = \frac{4V_e}{\pi d^2 \Delta t}$$

Où Ve : volume recueilli en cm^3
d : diamètre du cylindre
Δt : pas de temps

Le traitement des données d'analyse au fluorimètre a permis de dresser les tableau ci-après et de tracer deux graphes : Le premier représente la concentration cumulée en fonction du temps C(g/l)=f(t) et le deuxième ζ=ξ.SNp

Ainsi :

$$\zeta = \xi\sqrt{N_p} = inverf(1 - 2\overline{C}).\sqrt{N_p} == \zeta^0\left(1 - \frac{N_p}{N_p^0}\right).$$

Avec $\zeta^0 = \frac{l}{2}\sqrt{\frac{n_e}{D.\Delta t}}$ et $N_p^0 = \frac{\pi.d^2.l.n_e}{4.V_e}$

Tableau N° 23 : Analyse et traitement des données obtenues au fluorimètre (Echantillon I).

Temps	Δt	C(g/l)	C g/l (cumulé)	C - C_0 g/l	$\frac{C}{C^0}$	1 - 2$\frac{C}{C^0}$	ξ=erfinv(1-2$\frac{C}{C^0}$)	sqrt Np	Np	ζ=ξ * sqrt Np
600	600	0.0004	0.0004	0.0004	0.004	0.992	1.875	1	1	1.875
1200	600	0.0006	0.001	0.001	0.01	0.98	1.645	1.41421356	2	2.32638131
1800	600	0.0009	0.00193	0.00193	0.0193	0.9614	1.465	1.73205081	3	2.53745443
2400	600	0.0014	0.0033	0.0033	0.033	0.934	1.3	2	4	2.6
3000	600	0.0026	0.0059	0.0059	0.059	0.882	1.105	2.23606798	5	2.47085512
3600	600	0.0039	0.00982	0.00982	0.0982	0.8036	0.913	2.44948974	6	2.23638414
4200	600	0.0048	0.0146	0.0146	0.146	0.708	0.745	2.64575131	7	1.97108473
4800	600	0.0056	0.02015	0.02015	0.2015	0.597	0.59	2.82842712	8	1.668772
5400	600	0.0061	0.02625	0.02625	0.2625	0.475	0.45	3	9	1.35
6000	600	0.0065	0.03275	0.03275	0.3275	0.345	0.315	3.16227766	10	0.99611746
6600	600	0.0077	0.04048	0.04048	0.4048	0.1904	0.17	3.31662479	11	0.56382621
7200	600	0.0085	0.049	0.049	0.49	0.02	0.018	3.46410162	12	0.06235383
7800	600	0.0084	0.0574	0.0574	0.574	-0.148	-0.132	3.60555128	13	-0.47593277
8400	600	0.008	0.06543	0.06543	0.6543	-0.3086	-0.281	3.74165739	14	-1.05140573
9000	600	0.0067	0.07208	0.07208	0.7208	-0.4416	-0.416	3.87298335	15	-1.61116107
9600	600	0.0055	0.07759	0.07759	0.7759	-0.5518	-0.536	4	16	-2.144
10200	600	0.0045	0.08205	0.08205	0.8205	-0.641	-0.648	4.12310563	17	-2.67177245
10800	600	0.0034	0.08546	0.08546	0.8546	-0.7092	-0.747	4.24264069	18	-3.16925259
11400	600	0.0022	0.08769	0.08769	0.8769	-0.7538	-0.82	4.35889894	19	-3.57429713
12000	600	0.002	0.0897	0.0897	0.897	-0.794	-0.895	4.47213595	20	-4.00256168
12600	600	0.002	0.09168	0.09168	0.9168	-0.8336	-0.978	4.58257569	21	-4.48175903
13200	600	0.0012	0.09285	0.09285	0.9285	-0.857	-1.036	4.69041576	22	-4.85927073
13800	600	0.0011	0.09399	0.09399	0.9399	-0.8798	-1.1	4.79583152	23	-5.27541468
14400	600	0.0011	0.0951	0.0951	0.951	-0.902	-1.17	4.89897949	24	-5.731806

Avec $C^0 = 0.1$ g/l et $C_0=0$

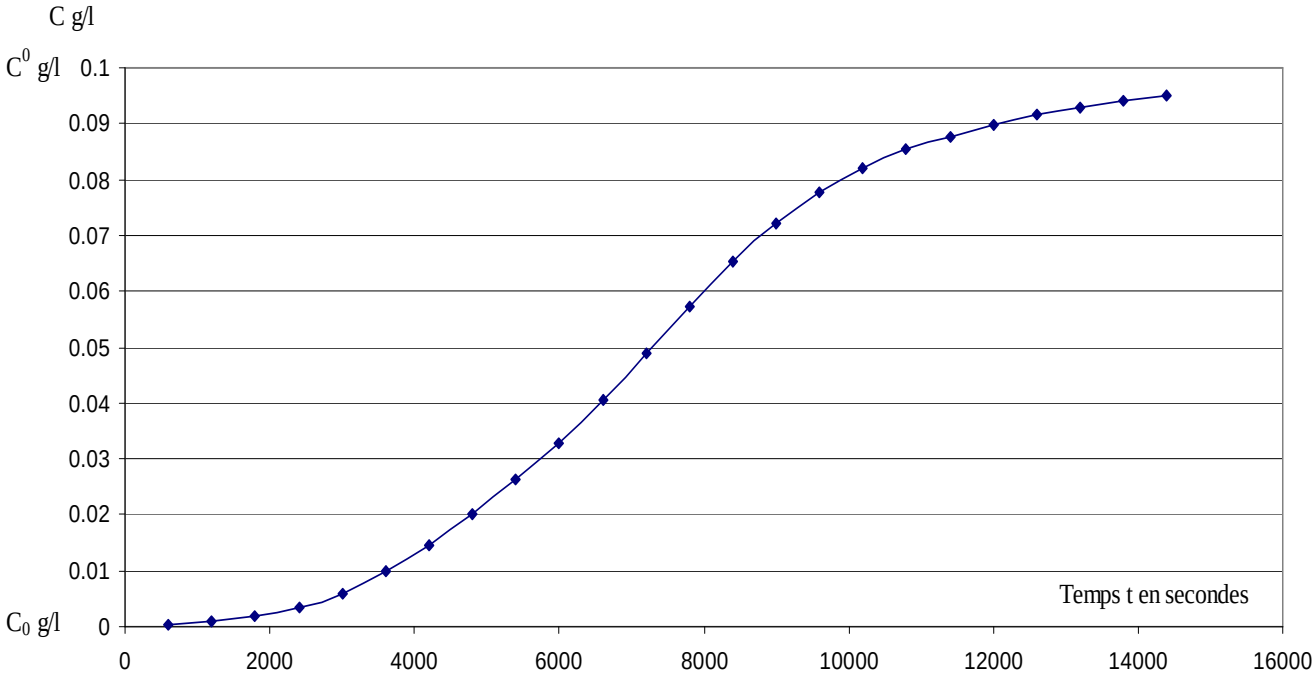


Figure N° 70 : Graphe de la concentration cumulée en fonction du temps.

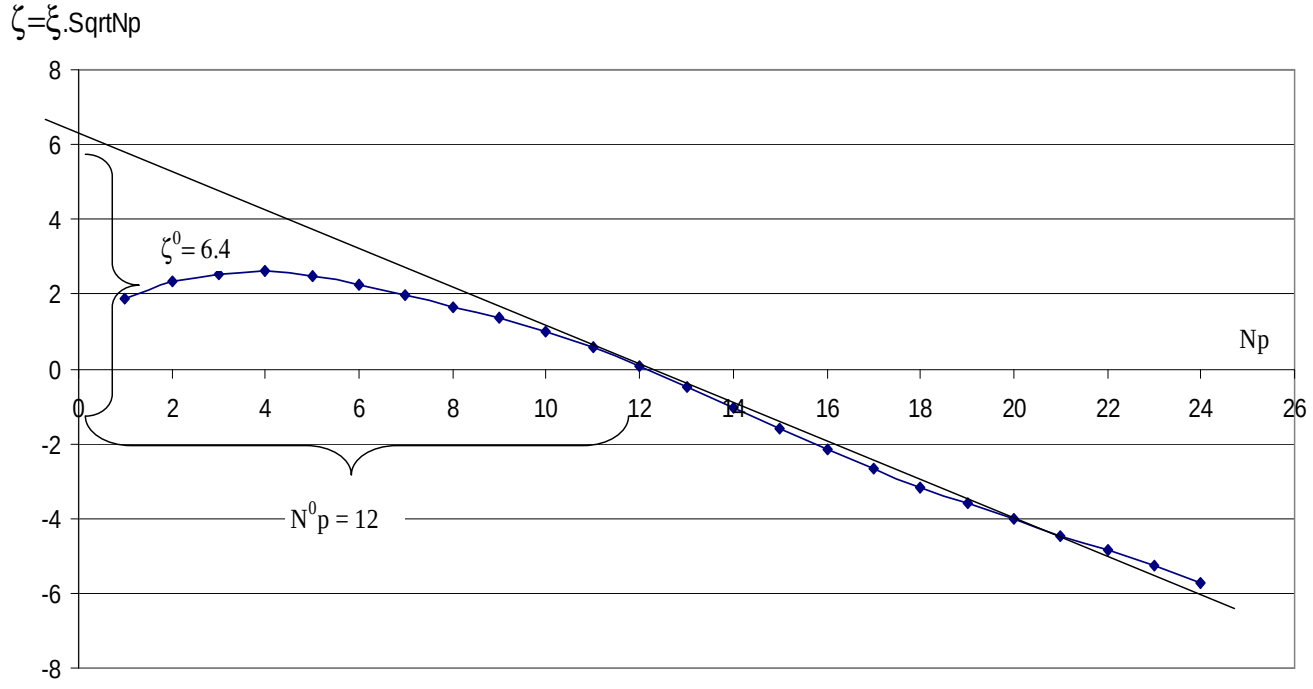


Figure N° 71 : Graphe de $\xi\sqrt{N_p}$ en foncton de Np.

Donc $D = \frac{V_e}{\pi.d^2.l.\Delta t} \times \frac{N_p^0}{\left(\zeta^0\right)^2}$ et $n_e = \frac{4.V_e}{\pi.d^2.l.} \times N_p^0$.

L'application numérique donne :

$$n_e = \frac{4\times 2\times 10^{-5}}{3.14\times(0.105)^2\times 0.11}\times 12 = 0.25 \quad \text{ou } 25\,\%$$

$$v = \frac{4\times 2\times 10^{-5}}{3.14\times(0.105)^2\times 600} = 3.85\times 10^{-6} \text{ m/s}$$

$$D = \frac{2\times 10^{-5}}{3.14\times(0.105)^2\times 0.11\times 600}\times\frac{12}{6.4^2} = 2.56\times 10^{-6} \text{ m}^2/s$$

Sachant que le paramètre de la dispersion est égale au produit de la vitesse de Darcy *v* et de la dispersivité longitudinale α_l:

$D = v.\alpha_l$ donc $\alpha_l = \frac{D}{v} = \frac{2.56\times 10^{-6}}{3.85\times 10^{-6}} = 0.67$ m

Tableau N° 24 : Analyse et traitement des données obtenues au fluorimètre (Echantillon II).

Temps	Dt	C(g/l)	C g/l (cumulé)	C - C_0 g/l	$\frac{C}{C^0}$	1 - 2$\frac{C}{C^0}$	x=erfinv(1-2$\frac{C}{C^0}$)	sqrt Np	Np	z=x * sqrt Np
300	300	0.00033	0.00033	0.00033	0.0033	0.9934	1.921	1	1	1.921
600	300	0.00103	0.00136	0.00136	0.0136	0.9728	1.562	1.41421356	2	2.209001584
900	300	0.00136	0.00272	0.00272	0.0272	0.9456	1.36	1.73205081	3	2.355589098
1200	300	0.00155	0.00427	0.00427	0.0427	0.9146	1.216	2	4	2.432
1500	300	0.00193	0.0062	0.0062	0.062	0.876	1.09	2.23606798	5	2.437314095
1800	300	0.00221	0.00841	0.00841	0.0841	0.8318	0.975	2.44948974	6	2.388252499
2100	300	0.00263	0.01104	0.01104	0.1104	0.7792	0.866	2.64575131	7	2.291220635
2400	300	0.00287	0.01391	0.01391	0.1391	0.7218	0.767	2.82842712	8	2.169403605
2700	300	0.00301	0.01692	0.01692	0.1692	0.6616	0.677	3	9	2.031
3000	300	0.0037	0.02062	0.02062	0.2062	0.5876	0.58	3.16227766	10	1.834121043
3300	300	0.00433	0.02495	0.02495	0.2495	0.501	0.48	3.31662479	11	1.591979899
3600	300	0.00504	0.02999	0.02999	0.2999	0.4002	0.372	3.46410162	12	1.288645801
3900	300	0.0059	0.03589	0.03589	0.3589	0.2822	0.256	3.60555128	13	0.923021127
4200	300	0.0066	0.04249	0.04249	0.4249	0.1502	0.134	3.74165739	14	0.50138209
4500	300	0.00683	0.04932	0.04932	0.4932	0.0136	0.012	3.87298335	15	0.0464758
4800	300	0.00687	0.05619	0.05619	0.5619	-0.1238	-0.11	4	16	-0.44
5100	300	0.00669	0.06288	0.06288	0.6288	-0.2576	-0.232	4.12310563	17	-0.95656051
5400	300	0.00656	0.06944	0.06944	0.6944	-0.3888	-0.358	4.24264069	18	-1.51886537
5700	300	0.00603	0.07547	0.07547	0.7547	-0.5094	-0.488	4.35889894	19	-2.12714268
6000	300	0.00511	0.08058	0.08058	0.8058	-0.6116	-0.61	4.47213595	20	-2.72800293
6300	300	0.00437	0.08495	0.08495	0.8495	-0.699	-0.731	4.58257569	21	-3.34986283
6600	300	0.00309	0.08804	0.08804	0.8804	-0.7608	-0.832	4.69041576	22	-3.90242591
6900	300	0.00267	0.09071	0.09071	0.9071	-0.8142	-0.936	4.79583152	23	-4.48889831
7200	300	0.00199	0.0927	0.0927	0.927	-0.854	-1.03	4.89897949	24	-5.04594887
7500	300	0.00132	0.09402	0.09402	0.9402	-0.8804	-1.1	5	25	-5.5
7800	300	0.00107	0.09509	0.09509	0.9509	-0.9018	-1.169	5.09901951	26	-5.96075381
8100	300	0.00085	0.09594	0.09594	0.9594	-0.9188	-1.233	5.19615242	27	-6.40685594
8400	300	0.00072	0.09666	0.09666	0.9666	-0.9332	-1.296	5.29150262	28	-6.8577874
8700	300	0.00065	0.09731	0.09731	0.9731	-0.9462	-1.364	5.38516481	29	-7.3453648
9000	300	0.0006	0.09791	0.09791	0.9791	-0.9582	-1.44	5.47722558	30	-7.88720483
9300	300	0.00059	0.0985	0.0985	0.985	-0.97	-1.535	5.56776436	31	-8.5465183
9600	300	0.00057	0.09907	0.09907	0.9907	-0.9814	-1.665	5.65685425	32	-9.41866233

Avec $C^0 = 0.1$ g/l et $C_0=0$

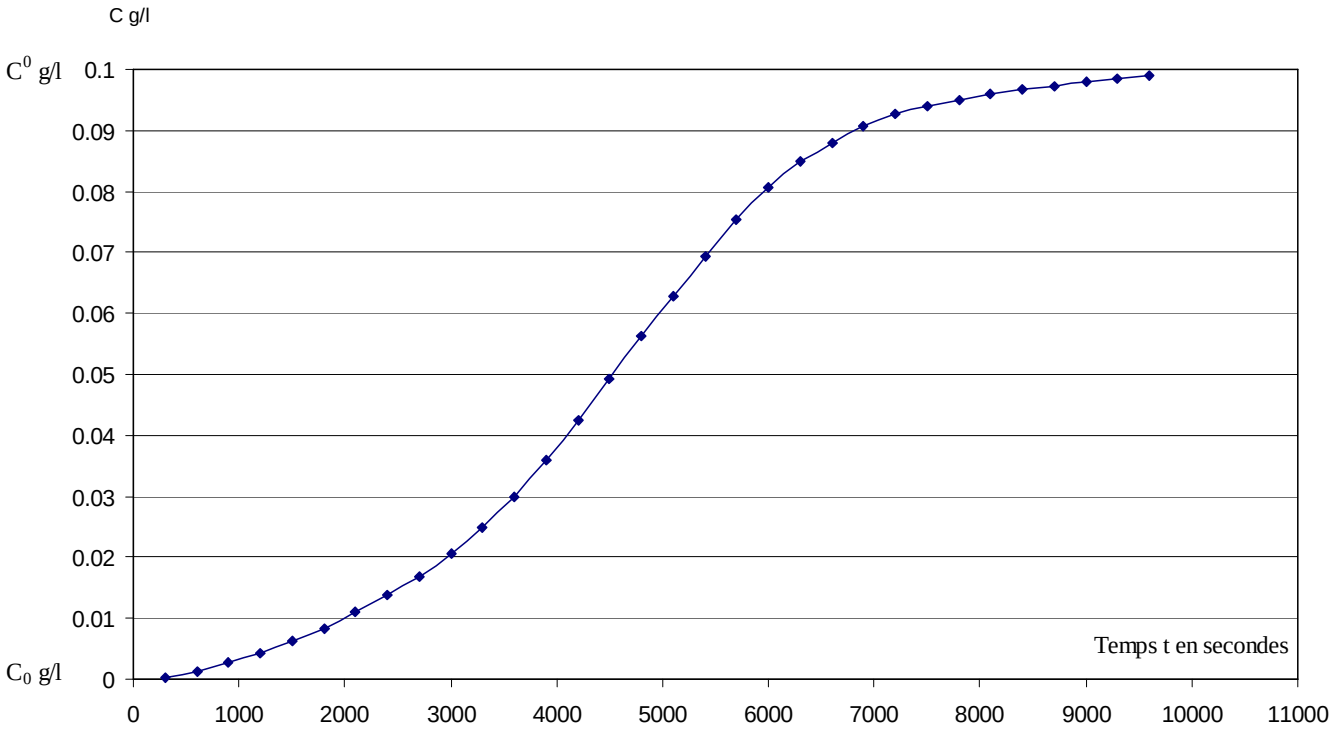


Figure N° 72 : Graphe de la concentration cumulée en fonction du temps.

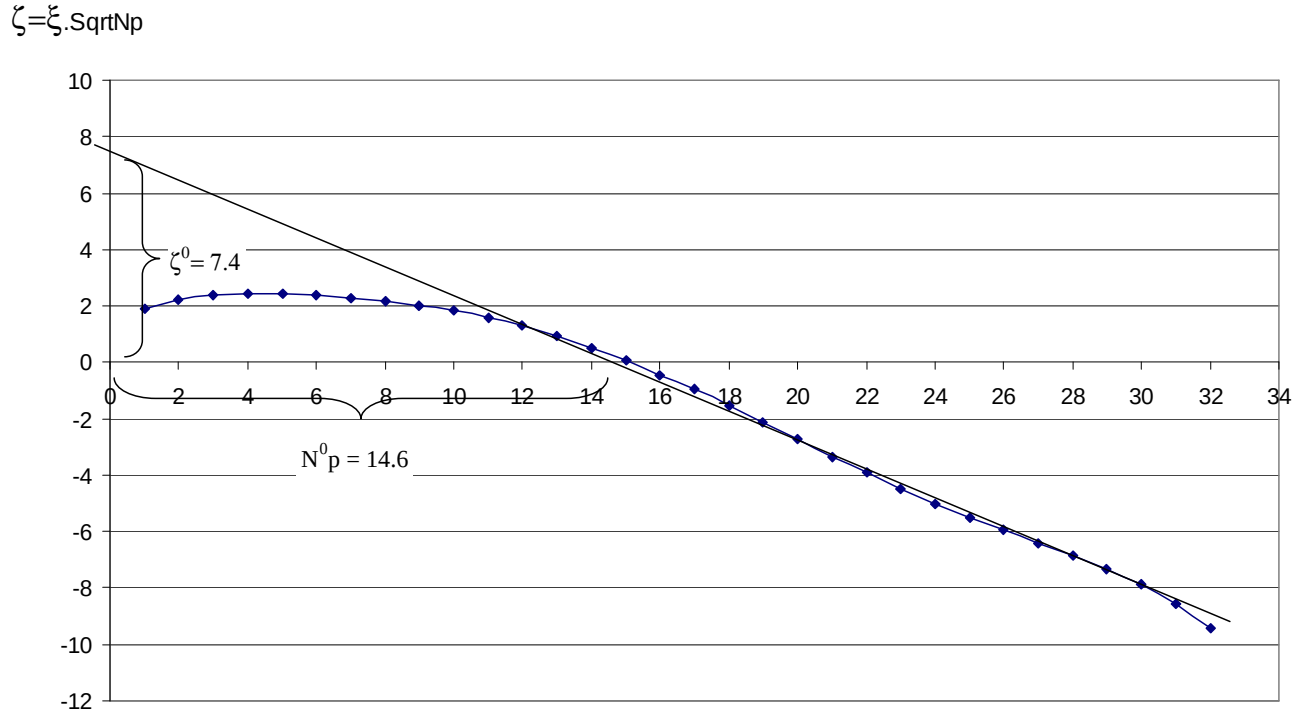


Figure N° 73 : Graphe de $\xi\sqrt{N_p}$ en foncton de Np.

Donc $D = \frac{V_e}{\pi.d^2.l.\Delta t} \times \frac{N_p^0}{\left(\zeta^0\right)^2}$ et $n_e = \frac{4.V_e}{\pi.d^2.l.} \times N_p^0$.

L'application numérique donne :

$$n_e = \frac{4 \times 2.5 \times 10^{-5}}{3.14 \times (0.105)^2 \times 0.11} \times 14.6 = 0.38 \quad \text{ou } 38\,\%$$

$$v = \frac{4 \times 2.5 \times 10^{-5}}{3.14 \times (0.105)^2 \times 300} = 9.63 \times 10^{-6} \text{ m/s}$$

$$D = \frac{2.5 \times 10^{-5}}{3.14 \times (0.105)^2 \times 0.11 \times 300} \times \frac{14.6}{7.4^2} = 5.83 \times 10^{-6} \text{ m}^2/s$$

Sachant que le paramètre de la dispersion est égale au produit de la vitesse de Darcy *v* et de la dispersivité longitudinale α_l:

$D = v.\alpha_l$ donc $\alpha_l = \frac{D}{v} = \frac{5.83 \times 10^{-6}}{9.63 \times 10^{-6}} = 0.61\,\text{m}$

A partir de ces résultats, en peut constater que le traceur utilisé (la Fluorésceine) se disperse avec une vitesse faible. Ce qui dénote de la faible dispersivité du sol au voisinage du Lac Noir.

VI. 4. Conclusion :

La détermination de l'infiltration ainsi que les paramètres hydrodispersifs, nous a permis de constater que :

- l'infiltration au voisinage du Lac Noire est moyenne à forte.
- La dispersion dans la zone du Lac est faible.

D'une façon générale, le Lac Noir pourrait être utilisé comme un bassin d'infiltration pour la réalimentation de la nappe. Le colmatage du lit du Lac a montré des valeurs de dispersion assez faible ce qui pourrait ralentir la pollution accidentelle de la nappe.

Chapitre VII :

Modélisation de l’impact des eaux de réalimentation.

VII. 1. Introduction :

Les modèles mathématiques de simulation des écoulements souterrains (modèles hydrodynamiques) et de la propagation des polluants (modèles hydrodispersifs) sont devenus des outils dynamiques et performants dans la gestion de l'eau.

Dans notre cas, le modèle numérique de simulation de la propagation des polluants, réalisé à la base du modèle hydrodynamique, (Saaidia. B, 2006) est établi afin d'évaluer l'impact des eaux de réalimentation sur la qualité des eaux souterraines de la nappe du massif dunaire de Bouteldja, ainsi que la simulation d'une pollution accidentelle éventuelle par les hydrocarbures dans la zone du Lac Noir.

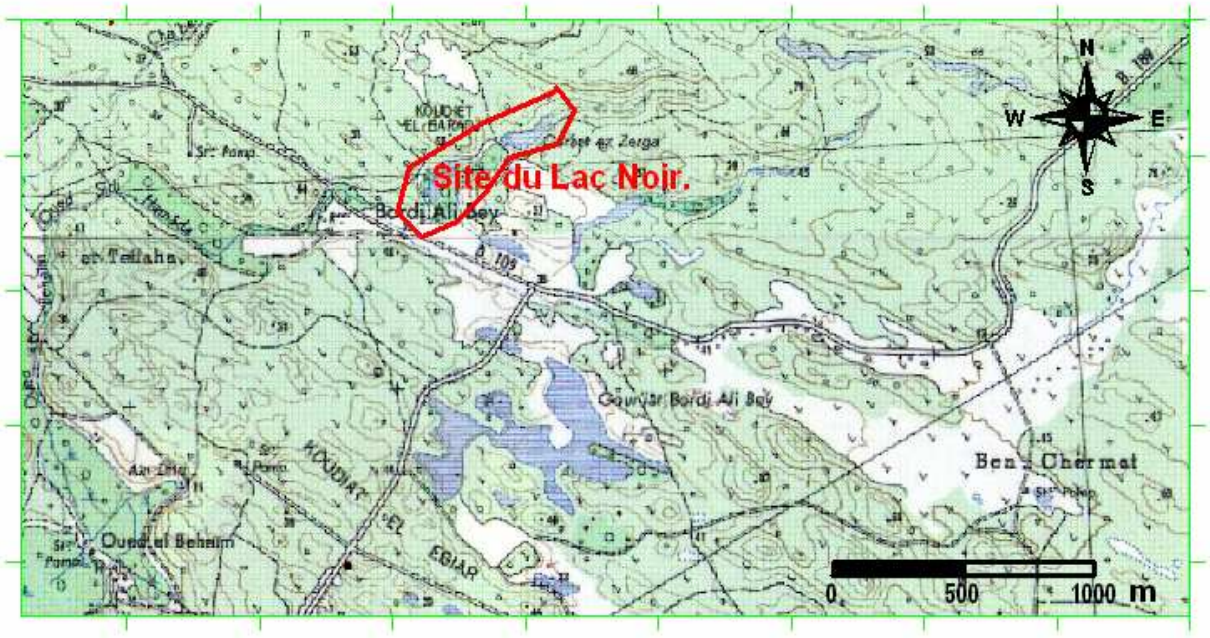


Figure N° 74 : Schéma du site destiné à la simulation de une pollution éventuelle par les hydrocarbures dans la région de Bordj Ali Bey (Extrait de la carte topographique au 1/25000 établie en 1972).

VII. 2. Généralités :

D'une manière générale, un modèle mathématique est une schématisation déterministe ou probabiliste d'un système aquifère, par une formulation mathématique des relations entre la (ou les) impulsion (s) et la (ou les) réponse (s) du système : avec ou sans prise en compte de ses paramètres physiques (Castany. G et Margat. J, 1977).

Pour arriver à choisir le modèle le plus apte à représenter les comportements du système aquifère et auquel on puisse attribuer un degré de confiance suffisant, il est nécessaire que les données traduisent aussi fidèlement que possible le système aquifère réel. Or, dans la réalité, il est souvent nécessaire d'ajouter aux données « objectives » des hypothèses qu'il faut évidement justifier du mieux possible mais qui doivent toujours être considérer comme telles.

VII. 3. Rappel des étapes de l'élaboration du modèle hydrodynamique (Saadia. B, 2006) :

VII. 3. 1. Chois du modèle :

Le modèle de simulation de l'alimentation artificielle par épandage sur les deux sites du Lac Noir et Garaet Bordj Ali Bey est réalisé par le célèbre logiciel Visual Modflow (Waterloo Hydrogeologic release 3.0).

VII. 3. 2. Le schéma du modèle :

Le maillage du modèle est composé de 3872 mailles carrées de 50 m de coté. Elles sont toutes actives.

VII. 3. 3. Les limites du modèle :

Le modèle a des limites hydrodynamiques latérales ouvertes car la simulation est locale et ne concerne qu'une portion de l'aquifère libre de Bouteldja. La nappe est libre avec un mur imperméable formant sa limite inférieure.

VII. 3. 4. Les épaisseurs :

A l'aide de la piézométrie de mars 2005 et la profondeur du substratum, le programme calcule les épaisseurs. Les fortes épaisseurs sont de l'ordre de 145 m et 95 m au Nord Oust et au Sud Est successivement.

VII.3. 5. Les paramètres hydrodynamiques :

Les paramètres hydrodynamiques sont représentés par la perméabilité K, la porosité efficace n_e et le coefficient de drainance C.

VII. 3. 5. 1. Le coefficient de perméabilité :

Les valeurs du coefficient de perméabilité introduites dans le modèle sont de l'ordre de $K = 10^{-4}$ m/s et $K = 10^{-5}$ m/s.

VII. 3. 5. 2. Le coefficient de porosité efficace :

La valeur du coefficient de porosité efficace n_e est de l'ordre de 0.1.

VII. 3. 5. 3. Le facteur de drainance :

Le facteur de drainance est calculé par le programme Visual Modflow, il dépend de l'épaisseur et de la perméabilité de la couche semi-perméable qui colmate le lit du Lac.

$$C = \frac{k_0}{m_0} \times \Delta x \times \Delta y$$

Avec :

C : Facteur de drainance, soit $2.5.10^{-2}$ m^2/s ;

K_0 : coefficient de perméabilité verticale de la couche formant le lit de la zone d'épandage $K_0 = 10^{-5}$ m/s ;

m_0 : épaisseur de la couche filtrante du lit de la zone d'épandage ;

$\Delta x.\Delta y$: superficie de la maille soit 2500 m^2.

VII. 3. 6. La piézométrie :

La piézométrie de Mai 2005 a été utilisé lors des différentes simulations.

VII. 3. 7. Les conditions aux limites :

VII.3. 7. 1. Les flux naturels souterrains :

La piézométrie de la nappe libre de Bouteldja montre que l'écoulement souterrain se fait de l'est vers l'oust. Les flux entrants par la frontière Est de la zone modéliser, sont simulés par des puits d'injections, alors que les flux sortants vers la frontière Ouest, sont simulés par des puits de pompage.

VII. 3. 7. 2. La recharge de l'aquifère :

La recharge de l'aquifère se fait essentiellement par l'infiltration des pluies efficaces qui est de l'ordre de 228 mm/an. La plus grande partie de cette quantité s'infiltre durant la période humide de l'année.

VII. 3. 7. 3. Le débit des forages d'exploitation :

Les 12 forages en exploitation se situent au voisinage des sites de la zone de Bordj Ali Bey dont le débit global est de 306 l/s, et le débit de la source d'Oued Behaim, localisée au Sud Oust, est estimé à 20 l/s.

VII. 3. 7. 4. L'infiltration dans les zones d'épondages :

La lame d'eau dans les mailles centrales est de 1 m au centre, alors que dans les mailles de bordure, elle n'est que de 0.5 m.

VII. 4. Modèle de transport de masse :

Le choix du modèle MT3DMS pour la simulation de la propagation des sulfates et des hydrocarbures à partir du site de la réalimentation était fait car ce modèle est destiné à la simulation du transport de masse basé sur la convection, dispersion et les réactions chimiques des contaminants dans les systèmes d'eau souterraines et qui nécissite au préalable l'établissement du modèle d'écoulement donc de Modflow.

VII. 4. 1. Considérations théoriques :

La contamination des eaux souterraines est régie par les mécanismes de transport de masse. L'équation différentielle partielle décrivant le trajet et le transport des contaminants dans les systèmes aquifères à régime transitoire en trois dimensions peut être écrite comme suit:

$$\frac{\partial(\theta C^k)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\theta D_{ij}\frac{\partial C^k}{\partial x_j}\right) - \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\vartheta v_i C^k\right) + q_s C_s^k + \sum R_n \qquad (1)$$

Où :

C^k : est la concentration du contaminant dissout dans les eaux souterraines ;

θ : est la porosité du milieu poreux ;

t : est le temps ;

x_i : est la distance selon les coordonnées cartésiennes ;

D_{ij} : est le coefficient de dispersion hydrodynamique ;

v_i : est l'infiltration ou la vitesse linéaire de l'eau interstitielle ;

q_s : est le débit par unité de volume de la couche aquifère représenté par une injection (positif) et un prélèvement (négatif) ;

C_s^k : est la concentration de l'eau injectée ou prélevée ;

$\sum R_n$: est le terme spécifique des réactions chimiques.

La partie gauche de l'équation (1) peut être développée comme suit :

$$\frac{\partial(\theta C^k)}{\partial t} = \theta \frac{\partial C^k}{\partial t} + C^k \frac{\partial \theta}{\partial t} = \theta \frac{\partial C^k}{\partial t} + q_s^{'} C^k \qquad (2)$$

Où : $q_s^{'} = \partial\theta / \partial t$ est le taux de changement d'emmagasinement des eaux souterraines (unité, T^{-1}).

Le terme spécifique des réactions chimiques peut être exprimé comme suit:

$$\sum R_n = -\rho_b \frac{\partial \overline{C}}{\partial t} - \lambda_1 \theta C^k - \lambda_2 \rho_b \overline{C^k} \qquad (3)$$

Où :

ρ_b : est la densité du milieu poreux ;

$\overline{C^k}$: est la concentration du contaminant k absorbée par le milieu poreux ;

λ_1 : est la constante de premier ordre pour la phase dissoute ;

λ_2 : est la constante de premier ordre pour la phase absorbée (solide).

La substitution des l'équations (2) et (3) dans l'équation (1), nous donne :

$$\theta \frac{\partial C}{\partial t} + \rho_b \frac{\partial \overline{C}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\theta D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j}\right) - \frac{\partial}{\partial x_i}(\theta v_i C) + q_s C_s - q_s^{'} C - \lambda_1 \theta C - \lambda_2 \rho_b \overline{C} \qquad (4)$$

L'équation (4) peut être écrite de la manière suivante :

$$R\theta \frac{\partial C}{\partial x_i}\left(\theta D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j}\right) - \frac{\partial}{\partial x_i}(\theta v_i C) + q_s C_s - q_s^{'} C - \lambda_1 \theta C - \lambda_2 \rho_b \overline{C} \qquad (5)$$

Où R est le facteur de retard, qui est un facteur sans dimension défini comme:

$$R = 1 + \frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial \overline{C}}{\partial C} \qquad (6)$$

L'équation de transport est liée à l'équation d'écoulement par la loi de Darcy:

$$v_i = \frac{q_i}{\theta} = -\frac{K_i}{\theta} \frac{\partial h}{\partial x_i} \qquad (7)$$

Où :

K_i : est un composant principal du tenseur de la conductivité hydraulique ;

H : est la charge hydraulique.

La charge hydraulique est obtenue à partir de la solution de l'équation tridimensionnelle d'écoulement d'eaux souterraines:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left(K_i \frac{\partial h}{\partial x_i}\right) + q_s = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \qquad (8)$$

Où S_s est le coefficient d'emmagasinement spécifique de la couche aquifère.

VII. 4. 1. 1. La convection :

Le terme convection de l'équation de transport, $\partial(\theta v_i C)/\partial x_i$, décrit le transport des contaminants miscibles à la même vitesse que les eaux souterraines. Pour plusieurs problèmes de transport de contaminant à grande échelle, le terme de convection domine. Pour mesurer le degré de convection, un nombre de Peclet sans dimensions est habituellement employé, qui est défini comme :

$$P_e = \frac{|v|L}{D} \qquad (9)$$

Où :

$|v|$: est le vecteur de la grandeur de la vitesse d'infiltration ;

L : est une longueur caractéristique, généralement prise comme largeur des cellules de grille ;

D : est le coefficient de dispersion.

Il est à noter que notre modèle de transport de masse est réalisé seulement par convection.

VII. 4. 1. 2. La dispersion:

VII. 4. 1. 2. 1. Définition :

Ce terme nous l'avons définit précédemment au chapitre VI.

VII. 4. 1. 2. 2. Coefficient de dispersion:

Le tenseur hydrodynamique de la dispersion Dij pour un milieu poreux isotrope, est défini selon Bear (1979), sous les formes suivantes :

$$D_{xx} = \alpha_L \frac{v_x^2}{|v|} + \alpha_T \frac{v_y^2}{|v|} + \alpha_T \frac{v_z^2}{|v|} + D^* \qquad (10a)$$

$$D_{yy} = \alpha_L \frac{v_y^2}{|v|} + \alpha_T \frac{v_x^2}{|v|} + \alpha_T \frac{v_z^2}{|v|} + D^* \qquad (10b)$$

$$D_{zz} = \alpha_L \frac{v_z^2}{|v|} + \alpha_T \frac{v_x^2}{|v|} + \alpha_T \frac{v_y^2}{|v|} + D^* \qquad (10c)$$

$$D_{xy} D_{yx} = (\alpha_L - \alpha_T)\frac{v_x v_y}{|v|} \qquad (10d)$$

$$D_{xz}D_{zx} = (\alpha_L - \alpha_T)\frac{v_x v_z}{|v|} \qquad (10e)$$

$$D_{yz}D_{zy} = (\alpha_L - \alpha_T)\frac{v_y v_z}{|v|} \qquad (10f)$$

Où :

D_{xx}, D_{yy}, D_{zz} : sont les composantes principales du tenseur de la dispersion ;

D_{xy} , D_{xz} , D_{yx} , D_{yz} , D_{zx} , D_{zy} : sont les limites en travers du tenseur de dispersion ;

α_L : est le dispersivité longitudinal ;

α_T : est le dispersivité transversal ;

D^* : est le coefficient de diffusion moléculaire efficace ;

v_x , v_y , v_z : sont les composantes du vecteur de vitesse le long des coordonnées axiales x, y et z ;

$|v| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$: est la grandeur du vecteur de vitesse.

En plus de la dispersion isotrope décrite ci-dessus, le modèle de transport de mass MT3DMS soutient une alternative qui permet l'utilisation de deux dispersivités transversales, une dispersivité transversale horizontale α_{TH} , et une dispersivité transversale verticale α_{TV} ,comme proposé par Burnett et Frind (1987) :

$$D_{xx} = \alpha_L \frac{v_x^2}{|v|} + \alpha_{TH} \frac{v_y^2}{|v|} + \alpha_{TV} \frac{v_z^2}{|v|} + D^* \qquad (11a)$$

$$D_{yyx} = \alpha_L \frac{v_y^2}{|v|} + \alpha_{TH} \frac{v_x^2}{|v|} + \alpha_{TV} \frac{v_z^2}{|v|} + D^* \qquad (11b)$$

$$D_{zz} = \alpha_L \frac{v_z^2}{|v|} + \alpha_{TH} \frac{v_x^2}{|v|} + \alpha_{TV} \frac{v_y^2}{|v|} + D^* \qquad (11c)$$

$$D_{xy} = D_{yx} = (\alpha_L - \alpha_{TH})\frac{v_x v_y}{|v|} \qquad (11d)$$

$$D_{xz} = D_{zx} = (\alpha_L - \alpha_{TH})\frac{v_x v_z}{|v|} \qquad (11e)$$

$$D_{yz} = D_{zy} = (\alpha_L - \alpha_{TH})\frac{v_y v_z}{|v|} \qquad (11f)$$

Dans les équations (10) et (11), les composantes du tenseur de coefficient de dispersion sont définis en termes de la vitesse d'infiltration des eaux souterraines, v. quand la porosité change dans l'espace, il est plus commode de définir un tenseur apparent de dispersivité comme suit,

$$\hat{D}_{ij} = \theta D_{ij} \qquad (12)$$

$\hat{D}$: est la dispersivité apparente.

VII. 4. 1. 3. Les réactions chimiques :

Le module MT3DMS est capable de remettre la sorption linéaire ou non linéaire d'équilibre commandée, la sorption (taux limitée) du non équilibre, et la réaction du premier ordre qui peut représenter l'abaissement radioactif ou fournir une représentation approximative de la biodégradation.

VII. 4. 1. 3. 1. Adsorption linéaire ou non linéaire d'équilibre commandé :

L'adsorption se rapporte au procédé de transfert de masse entre les contaminants dissous en eaux souterraines (phase aqueuse) et les contaminants adsorbés sur le milieu poreux (phase pleine). Il est supposé généralement que les états d'équilibre existent entre phase liquide et les concentrations en phase solide et que la réaction d'adsorption s'effectue à une vitesse relativement assez rapide de sorte qu'elle puisse être traitée comme étant instantanée. Le rapport fonctionnel entre les concentrations dissoutes et adsorbées sous une température constante est désigné sous le nom de l'isotherme de l'adsorption. Des isothermes de sorption d'équilibre commandé sont généralement incorporées au modèle de transport par l'utilisation du facteur de retard. Trois types d'isothermes de sorption d'équilibre commandé sont considérés dans le modèle de transport de masse MT3DMS : linéaire, Freundlich et Langmuir.

- L'isotherme de l'adsorption linéaire suppose que la concentration adsorbée ($\overline{C}$) est directement proportionnelle à la concentration dissoute (C):

$$\overline{C} = K_d C \qquad (13)$$

K_d : est le coefficient de distribution. Le facteur de retard est ainsi donné par la formule suivante :

$$R = 1 + \frac{\rho_b}{\theta}\frac{\partial \overline{C}}{\partial C} = 1 + \frac{\rho_b}{\theta} K_d \qquad (14)$$

- L'isotherme de Freundlich est une isotherme non linéaire qui peut être exprimée sous la forme suivante :

$$\overline{C} = K_f C^a \qquad (15)$$

K_f: est la constante de Freundlich;
a : est l'exposant de Freundlich, sans dimensions.

K_f et a sont des coefficients empiriques. Quand l'exposant a est égal à l'unité, l'isotherme de Freundlich est équivalente à l'isotherme linéaire. Le facteur de retard pour l'isotherme de Freundlich est défini en conséquence comme suit :

$$R = 1 + \frac{\rho_b}{\theta}\frac{\partial \overline{C}}{\partial C} = 1 + \frac{\rho_b}{\theta} a K_f C^{a-1} \qquad (16)$$

- Une autre isotherme de l'adsorption non linéaire qui est l'isotherme de Langmuir, décrite par l'équation suivante :

$$\overline{C} = \frac{K_f \overline{S} C}{1 + K_l C} \qquad (17)$$

K_f: est la constante de Langmuir;
$\overline{S}$: est la concentration totale des emplacements de l'adsorption disponibles.

Le facteur de retard de l'isotherme de Langmuir est alors :

$$R = 1 + \frac{\rho_b}{\theta}\frac{\partial \overline{C}}{\partial C} = 1 + \frac{\rho_b}{\theta}\left[\frac{K_l \overline{S}}{(1 + K_l C)^2}\right] \qquad (18)$$

VII. 4. 1. 3. 2. Adsorption du non équilibre :

Le processus de l'adsorption peut être représenté par une réaction cinétique réversible de premier ordre comme suit :

$$\rho_b \frac{\partial \overline{C}}{\partial t} = \beta\left(C - \frac{\overline{C}}{K_d}\right) \qquad (19)$$

β : est le taux de transfert de masse de premier ordre entre les phases dissoutes et absorbées; et K_d : est le coefficient de distribution de la phase absorbée.

VII. 4. 1. 3. 3. Abaissement radioactive ou biodégradation :

Le terme de la réaction irréversible du taux de premier ordre inclus dans l'équation régissante, $-(\lambda_1 \theta C + \lambda_2 \rho_b \overline{C})$, représente la perte de masse de la phase dissoute (C) et de la phase absorbée ($\overline{C}$). La constante du taux est habituellement donnée dans les termes de la demi-vie :

$$\lambda = (\ln 2)/t_{1/2} \qquad (20)$$

$t_{1/2}$: est la demi vie des matériaux radioactifs ou de biodégradation, c.-à-d., le temps requis pour que la concentration diminue de moitié de la valeur originale.

VII. 4. 2. Simulation de la propagation des sulfates :

Les analyses chimiques montrent une concentration élevée des sulfates des eaux du Lac Noir, cependant la concentration des sulfates des eaux souterraines de la nappe est inférieur à 20 mg/l. Cette disproportion nous a conduit à établir un modèle hydrodispersif basé sur le modèle hydrodynamique (Saaidia. B ; 2006).

L'introduction des paramètres hydrodispersifs caractéristiques du lit du Lac et la simulation en régime permanent montre que la concentration des sulfates se dissipent au voisinage du Lac et que celle arrivent au forage le plus proche le U3 avec une valeur inférieur à 20 mg/l tel que l'indique la figure N° 75.

VII. 4. 3. Simulation de la propagation des hydrocarbures :

Comme le site du Lac Noir est proche de la route nationale qui est très fréquentée. Nous avons simulé une pollution accidentelle au niveau du Lac pour visualiser l'évolution du front de pollution à long terme.

Les résultats de la simulation pour une concentration de 5000 mg/l d'hydrocarbures montrent que le lit du Lac peut jouer un rôle important dans l'épuration mais que malheureusement la lithologie du sous-sol n'empêchera pas une concentration très réduite d'hydrocarbures d'arriver au forage U3 le plus proche. La figure N° 76 montre que le front de pollution arrive jusqu'à ce forage.

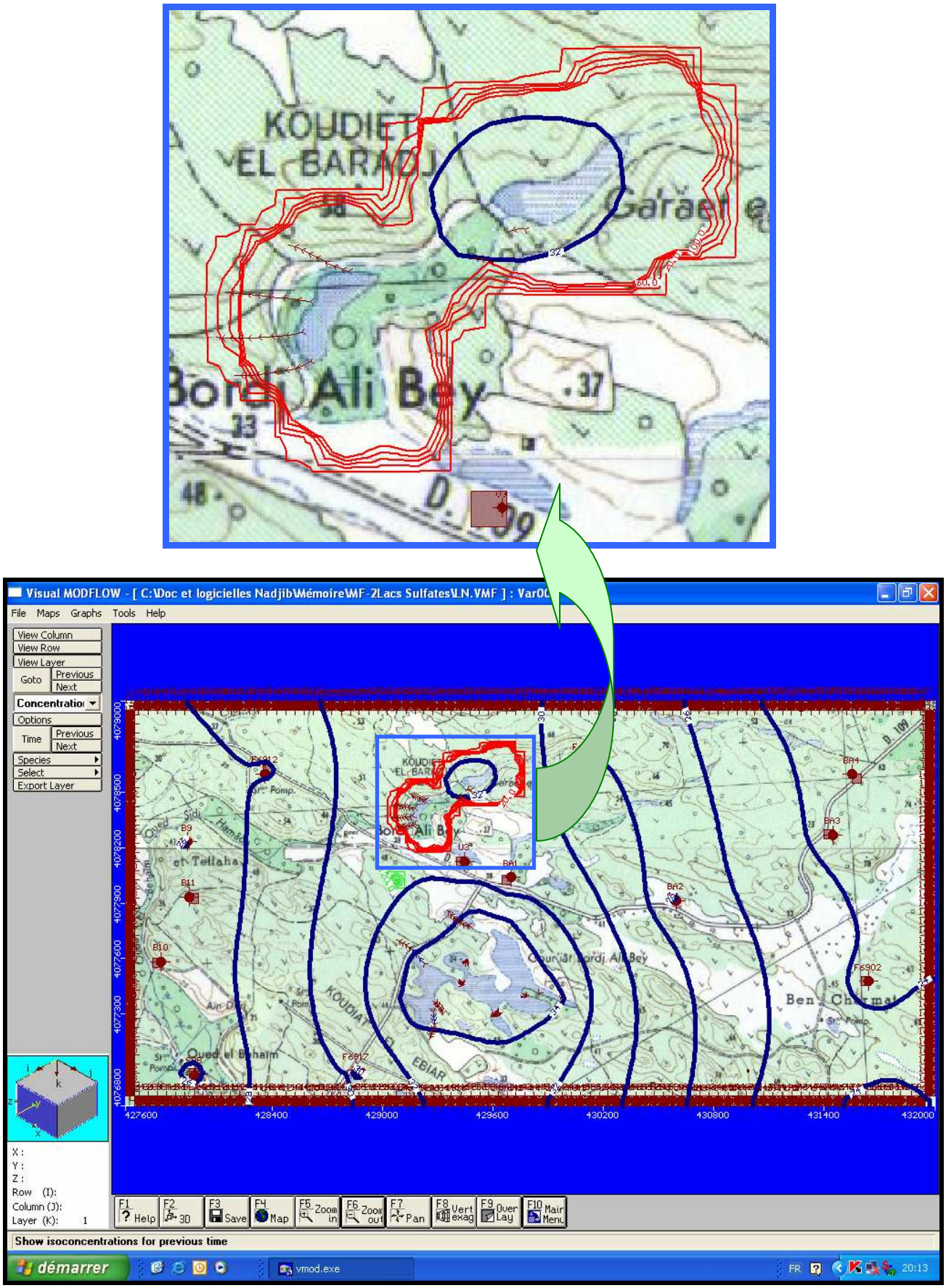


Figure N° 75 : Carte de propagation des sulfates à partir du Lac Noir.

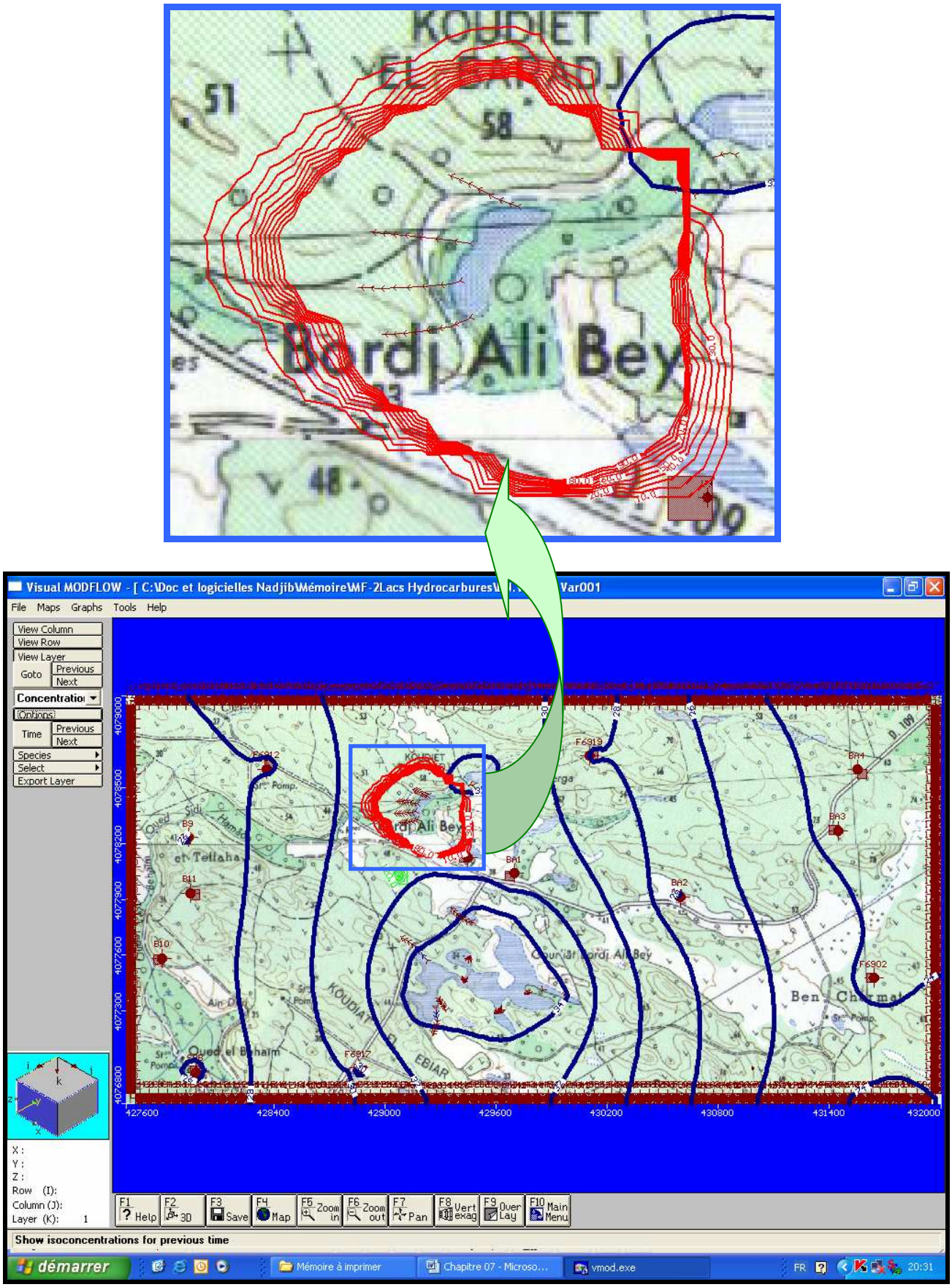


Figure N° 76 : Carte de propagation des hydrocarbures à partir du Lac Noir.

VII. 5. Conclusion :

La simulation de la propagation des sulfates nous a aidé à distinguer que les eaux de réalimentation n'ont aucun impact sur les eaux de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja au cours d'une période extrêmement longue.

Une pollution accidentelle est toujours possible et d'actualité surtout dans une zone très fréquentée telle que celle du Lac Noir. La simulation a montré que le forage U3 sera le premier à être touché même si la concentration du polluant est très amoindrie. Il ne faut pas perdre de sens que certains polluants sont indésirables dans les eaux souterraines même à l'état de trace.

Conclusion générale.

Conclusion générale

Cette étude est une contribution à la connaissance de l'impact des eaux de réalimentation sur la qualité des eaux souterraines de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja.

L'interprétation des différents résultats obtenus par les différentes méthodes nous amène à la conclusion suivante :

Occupant la partie orientale de l'extrême Est algérien, Le massif dunaire de Bouteldja s'étend sur une superficie d'environ 160 Km^2, caractérisée par des affleurements Tertiaires (les formations argilo-gréseux du Numidien) et des formations quaternaires (Dunes, sables, alluvions).

En effet, La région est soumise à l'influence d'un climat Méditerranéen caractérisé par une période humide (Décembre, Janvier, Février) et une autre sèche (Juin, Juillet, Août). Elle reçoit en moyenne une pluviométrie de l'ordre de 650 mm/an, répartie de façon irrégulière au cours de l'année. La température moyenne est de l'ordre de 18°C. La nappe du massif dunaire est drainée par les Oueds Bhaim, Bourdim et Bouglès.

L'analyse du bilan hydrologique fait ressortir que l'infiltration, paramètre le plus intéressant en hydrogéologie, représente près de 89 mm/an. L'évapotranspiration et le ruissellement représentent 69 % et 16 %.

Le massif dunaire de Bouteldja est formé essentiellement par des sables éoliens quaternaire avec des intercalations de lentilles argileuses, avec une épaisseur de 20 m à l'Est et 220 m à l'Ouest.

L'étude des paramètres hydrodynamiques a permis de déterminer les valeurs de transmissivité de l'ordre de 10^{-6} et $1.3\ 10^{-3}$ m^2/s, de perméabilité qui varie entre $8\ 10^{-5}$ et 10^{-4} m/s et une porosité efficace comprise entre 12 et 30%.

La piézométrie a mis en lumière que l'alimentation de la nappe se fait essentiellement par infiltration des eaux de pluie ainsi que par ruissellement diffus sur les reliefs de Dj Koursi. L'écoulement souterrain est dérigé vers la mer au Nord et vers les terrasses de l'Oued Kebir Est au Sud suivent une ligne de partage des eaux.

Les eaux souterraines de la nappe du massif dunaire de Bouteldja se caractérisent par un faciès chloruré sodique. Cette nappe offre une eau douce, d'excellente qualité pour l'alimentation en eau potable et l'irrigation.

L'étude de la pollution des eaux du Lac Noir nous a permis de déceler des teneurs en sulfates et en sodium très élevées, qui dépassent la norme. La méthode des indices de pollution organique a été retenue pour la détermination de la pollution organique, cette dernière a montré que les eaux du Lac Noir ont une pollution organique faible à modérée.

Les essais d'infiltration montrent que la région d'étude a une capacité d'infiltration importante. La réalisation des expériences de traçage par la fluoricéine sur un perméamètre à charge constante en régime permanent a permis de déterminer la dispersivité longitudinale α_L qui est de l'ordre de 0.61 et 0.67 m, ce qui prouve que la région du Lac Noire est une région de faible dispersion.

La simulation de la propagation des sulfates nous a aidé à distinguer que les eaux de réalimentation ne présentent aucun risque sur la qualité des eaux de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja au cours d'une période extrêmement longue (régime permanent).
La simulation d'une éventuelle pollution accidentelle par les hydrocarbures, a montré que le front de pollution va atteindre le U3 avec des concentrations très faible.

Enfin, en peut dire que la réalisation d'une réalimentation artificielle au niveau du Lac Noir est à promouvoir car elle peut apporter des solutions sur les plans quantitatifs et qualitatifs et setenir l'exploitation de la nappe.

Références bibliographiques.

Références bibliographiques :

Ababsa Mouaki M. S., Aggoune S. et Bouacha Y., 1994, "Recherche d'une variante rationnelle d'exploitation du massif dunaire de Bouteldja", mémoire d'ingénieur, IST, Université d'Annaba, 71p.

Ahmedou Ould Cherif A., 2000, "Modélisation de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja (500 m/500 m)", mémoire d'ingénieur, IST, Université d'Annaba, 27p.

Allem B. et Maoui A., 1994, "Contribution à l'étude hydrogéologique de la plaine d'El Tarf", mémoire d'ingénieur, IST, Université d'Annaba, 124p.

Assassi F., Djabri L. et Hani A, 2004, "Evolution chimique et vulnérabilité à la pollution de l'aquifère dunaire de Bouteldja", Sciences et techniques, revue semestrielle de l'université Mentouri Constantine –Algérie- ISSN-111-5041 N° 21- Juin 2004.

Bahroun S., 2006, "Impact des eaux usées urbaines et industrielles sur les eaux naturelles dans la région d'El Tarf", mémoire de magister, IST, Université d'Annaba, 122p.

Bear J. et verruijt A., 1990, "Modelling groundwater flow and pollution", D. Reidel Publishing Company, 414p.

Bise J., Bourguet L. et Lemoine J., 1972 "L'alimentation artificielle des nappes souterraines", groupe d'ingénieurs de BURGEAP, MASSON et Cie édition, Paris, 185p.

Brinis S., 1997, "Etude quantitative des eaux de la région de Bouteldja. Exemple : Massif dunaire", mémoire d'ingénieur, IST, Université d'Annaba, 76p.

Carpenter M. S. N., Fairbridge R. W et Michel J. P., 2004, "Dictionnaire des sciences de la terre", DUNOD édit. Paris, 496p.

Castany G., 1982, "Hydrogéologie : Principes et méthodes", DUNOD édit. Paris, 238p.

Castany G., Margat J., 1977, "Dictionnaire français d'hydrogéologie**",** B.R.G.M S.G.N, Orléans, 249p.

Chaib W., Kafi W. et Moumnia N., 2002, "Etude de l'évolution de l'agressivité de l'eau et impact éco-environnemental de la nappe aquifère du massif dunaire de Bouteldja" mémoire d'ingénieur, IST, Université d'Annaba, 74p.

Chebli I. et Guendouz S., 2001, "Etude des effets du charbon actif lors de la désinfection par chloration (Station de Chaiba)", mémoire d'ingénieur, Université d'Annaba, 74p.

Chistakov V. M., 1975, "Hydrodynamique souterraine en pratique (en Russe)", Nedra, 179p.

Detay M., 1997, "La gestion active des aquifères", MASSON, Paris, 415p.

Drissi F. et Zaalani M., 2002, "Etude par modèle mathématique du système aquifère Annaba-Bouteldja", mémoire d'ingénieur, IST, Université d'Annaba, 47p.

Drouiche A. M. et Haied N., 2005, "Relation hydrodynamique et processus d'alimentation de la nappe aquifère du massif dunaire de Bouteldja par les eaux du Lac Noir", mémoire d'ingénieur, IST, Université d'Annaba, 64p.

Foucault A. et Raoult J. F., 2001, "Dictionnaire de géologie", DUNOD édit. Paris, 380p.

Gaud B., 1976, "Etude hydrogéologique du système aquifère Annaba-Bouteldja, système des reconnaissance et recherche des conditions de modélisation (rapport d'étude I.N.R.H d'Annaba)".

Ghedjati F. et Djaba H., 2001, "Modélisation et hydrodispersion de la nappe aquifère dunaire de Bouteldja" mémoire d'ingénieur, IST, Université d'Annaba, 57p.

Hadj Said S. et Hamzaoui W., 1999, "Contribution à l'étude des caractéristiques hydrologiques et incidence pluviométrique dans le massif dunaire de Bouteldja", mémoire d'ingénieur, IST, Université d'Annaba, 60p.

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, Es. Sciences, Université d'Annaba, 213p.

Hassah A. H. et Zaida F., 1994, " Inventaire et actualisation de la ressource en eau de surface et souterraine du bassin versant de la Mafragh", mémoire d'ingénieur, IST, Université de Annaba, 77p.

Joleaud L., 1936, "Etude géologique de la région de Bône et la Calle".

Khelfaoui H., 2007, "Impact des rejets industriels sur les eaux souterraines. Cas de la région de Berrahal (Algérie)", mémoire de magister, IST, Université de Annaba, 153p.

Khérici N., 1985, "Aquifère sableux de bord de mer, hydrodynamique et hydrochimie. Exemple de la nappe de Bouteldja (N-E Algérie)", thèse de 3ème cycle, U.S.T.L, Montpellier, 202p.

Khérici N., 1993, "Vulnérabilité à la pollution chimique des eaux souterraines d'un système de nappes superposées en milieu industriel et agricole (Annaba-La Mafragh", thèse de doctorat d'état, és-Sciences, Université d'Annaba.

Lahondere J. C., 1987, "Les séries ultra Telliennes d'Algérie Nord-Orientale et les formations environnantes dans leur cadre structurale", thèse sc., Université Paul Sabatier Toulouse, 242p.

Mouchara N., 2004, "L'hydrogéologie du massif dunaire de Bouteldja et les possibilités de réalimentation artificielle de la nappe", mémoire d'ingénieur, IST, Université d'Annaba, 59p.

Nafaa K., 1985, "Etude hydrogéologique du système aquifère Annaba-La Mafragh", thèse de 3ème cycle U.S.T.L, Montpellier, 156p.

Nouacer R., 1993, "Essai de synthèse des caractéristiques hydrogéologiques et hydrochmiques de la nappe du massif dunaire de Bouteldja", thèse de magister, IST, Université d'Annaba, 119p.

Ramdani A., 1996, "Etude hydrogéologique et simulation par modèle mathématique de la nappe dunaire de la région de Bouteldja" thèse de magistère, IST, Université d'Annaba. 139p.

Rodier J., 1978, "Analyse de l'eau", DUNOD édition, paris, 642p.

Saaidia B., 2006, "Etude des possibilités de réalimentation artificielle des nappes d'Annaba et de Bouteldja comme moyen de lutte contre la pollution et l'épuisement", thèse de doctorat d'état, IST, Université d'Annaba, 144p.

Saadali R., 2007, "Détermination des paramètres hydrodispersifs de la vallée de l'Oued Saf-Saf 'W.Skikda)", mémoire de magister, IST, Université d'Annaba, 80p.

Sedrati N., 2006, "Vulnérabilité et impact des agglomérations sur la qualité des eaux du massif dunaire de Bouteldja", mémoire de magister, IST, Université d'Annaba, 106p.

Toubal A. C., 1983, "Etude hydrogéologique du massf dunaire de Bouteldja", thèse de 3ème cycle, Université Bab Ezzouar Alger, 500p.

Vaillant J. R., 1977, "Accroissement et gestion des ressources en eau", EYROLLES édition, Paris, 246p.

Villa J. M., 1980, "La chaîne Alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro-Tunisiens", thèse sc., Paris, 2t 665p, 199 fig., 40pl.

Annexes.

Annexe N° 01 : Précipitations moyennes mensuelles : Station des Salines (1990 – 2006).

Mois / Années	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fèv	Mar	Avr	Mai	Juin	Juillet	Août	Total
1990/91	2.00	30.00	107.00	181.00	92.00	73.00	96.00	24.00	61.00	14.00	0.30	9.00	689.3
1991/92	52.00	100.00	67.00	29.00	69.00	81.00	65.00	112.00	83.00	15.00	11.00	0.60	684.6
1992/93	0.00	36.40	126.00	143.00	83.70	42.00	81.00	59.00	66.00	3.00	0.00	4.00	644.1
1993/94	0.00	55.00	20.00	160.00	84.00	86.00	5.00	79.20	17.00	13.00	0.10	0.40	519.7
1994/95	18.00	46.80	19.40	109.90	180.00	20.00	74.00	37.00	10.10	29.00	0.10	4.00	548.3
1995/96	75.00	10.00	80.00	66.00	92.00	209.00	71.00	106.00	65.00	16.00	6.00	11.00	807
1996/97	27.00	41.00	45.00	63.00	61.00	49.00	43.10	33.00	6.00	33.70	0.00	21.00	422.8
1997/98	118.00	103.00	215.00	141.00	70.00	87.00	35.00	85.00	49.00	6.00	0.00	32.00	941
1998/99	64.00	237.00	61.00	63.00	157.00	103.00	48.00	44.00	38.00	9.00	13.00	4.00	841
1999/00	16.60	30.00	111.00	136.00	50.00	24.00	31.00	20.00	115.00	10.00	0.00	16.00	559.6
2000/01	19.30	105.00	37.00	108.00	112.00	75.00	19.00	40.00	28.00	4.00	0.40	3.00	550.7
2001/02	4.00	47.00	60.00	82.00	29.00	49.00	32.00	62.00	15.00	0.30	13.00	67.00	460.3
2002/03	24.00	73.00	188.00	147.10	186.00	86.00	21.00	91.00	26.00	0.00	0.00	0.00	842.1
2003/04	67.00	39.00	20.00	171.00	110.00	23.00	69.00	97.00	75.00	32.00	2.00	3.00	708
2004/05	81.00	21.00	179.60	185.00	135.90	179.50	61.00	123.20	10.00	3.40	1.10	7.00	987.7
2005/06	29.30	15.10	55.10	184.00	131.20	72.60	45.00	15.30	26.00	7.60	1.50	29.80	612.5
moyenne	37.33	61.83	86.94	123.06	102.68	78.69	49.76	64.23	43.13	12.25	3.03	13.24	676.17

Annexe N° 02 : Températures moyennes mensuelles : Station des Salines (1990 – 2006).

Mois / Années	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fèv	Mar	Avr	Mai	Juin	Juill	Août	moy
1990/91	25.30	22.40	16.60	11.00	10.46	10.81	14.85	13.67	15.79	21.30	24.64	25.62	17.7
1991/92	24.70	19.90	14.35	10.78	9.70	10.76	12.87	14.74	17.94	21.36	23.31	25.58	17.16
1992/93	24.17	19.84	15.95	14.70	10.16	10.34	11.49	15.01	18.84	22.23	24.61	26.62	17.83
1993/94	20.58	15.19	9.79	12.22	12.21	12.00	13.80	14.02	19.49	20.05	25.63	28.28	16.93
1994/95	25.40	20.32	17.19	12.97	11.41	13.58	12.38	14.34	19.21	21.84	24.89	26.11	18.3
1995/96	23.14	20.09	16.30	14.32	13.45	11.04	13.33	15.34	18.32	27.60	24.32	25.82	18.58
1996/97	21.80	18.10	16.25	13.93	13.01	12.41	12.79	15.28	20.12	23.41	24.77	25.93	18.15
1997/98	23.45	20.72	12.78	13.28	11.86	12.24	13.67	16.28	18.28	23.55	24.82	25.27	18.01
1998/99	11.16	13.87	18.25	23.89	11.86	10.14	14.14	15.49	20.37	23.38	25.24	27.50	17.94
1999/00	25.21	22.39	15.18	12.09	9.07	13.51	11.99	16.03	19.66	22.00	25.30	26.87	18.27
2000/01	23.07	18.89	15.82	12.73	12.01	11.02	15.99	14.56	18.16	22.67	24.97	25.65	17.96
2001/02	21.86	22.95	15.33	11.26	9.77	11.52	13.65	15.15	18.65	22.70	24.76	24.93	17.71
2002/03	22.59	19.63	16.30	13.49	11.45	10.56	13.24	16.40	18.45	24.78	27.59	28.10	18.54
2003/04	23.56	21.20	16.06	11.71	11.54	12.26	12.72	14.43	17.17	20.84	24.46	26.24	17.68
2004/05	23.00	21.20	13.95	12.20	9.20	9.20	12.40	15.30	18.90	23.00	25.60	24.70	17.38
2005/06	22.60	20.30	15.70	11.10	9.80	10.90	13.30	16.70	19.70	22.20	25.80	24.90	17.75
moyenne	22.60	19.81	15.36	13.23	11.06	11.39	13.29	15.17	18.69	22.68	25.04	26.13	17.87

Annexe N° 03 : Précipitations moyennes mensuelles : Station de Ben M'hidi (1990 – 2006).

Mois / Années	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Jui	Juill	Août	total
1990/91	2	30	107	181	92	73	96	24	61	14	0.3	9	689.3
1991/92	52	100	67	29	69	81	65	112	83	15	11	0.6	684.6
1992/93	0.2	36.4	126	143	83.7	120	81	59	66	3	0	0.4	718.7
1993/94	29	55	20	160	84	86	5	79.2	19.2	13	0.1	0.4	550.9
1994/95	18	46.8	18.4	136.8	205	17.2	85	46.1	4.5	16.9	0	0	594.7
1995/96	75	10	74	25	64.9	173.8	74.8	111.5	37.7	6	4	0	656.7
1996/97	2.7	42.3	28.2	55.9	60.5	51	35.2	25.8	3.1	8.5	0	9	322.2
1997/98	120.9	93.7	171	93.2	59.2	71.2	26.3	85.1	40.5	1.1	0	47.4	809.6
1998/99	58	52.5	214.8	37.7	161.1	98.1	35	51.6	35.6	2	5.3	0.1	751.8
1999/00	11.8	31.4	81.6	97	46.9	25.2	16.4	15.8	94.8	5	0	9.3	435.2
2000/01	16.9	108.5	32	82.7	98.7	88.2	17.6	42.1	27.3	0	0	0	514
2000/02	80.5	8.8	47.2	61.5	32.4	34.5	31	44.2	17.5	0	11	39.5	408.1
2002/03	27	51.5	159.2	143.4	143.7	100.9	30.4	98.6	28.3	0	0	0	783
2003/04	44.5	37.5	18.3	148.2	123.7	5.9	42.3	47.7	43.3	20	0.2	0.2	531.8
2004/05	73.9	7.76	183.4	140.2	125.5	137.5	53.2	133.9	0	0.1	0	20	875.46
2005/06	18.5	15.5	28	173.1	132.5	115.1	42.1	13	20	0	0	16	573.8
moyenne	39.43	45.48	86.01	106.73	98.93	79.91	46.02	61.85	36.36	6.54	1.99	9.49	618.74

Annexe N° 04 : Températures moyennes mensuelles : Station de Ben M'hidi (1990 – 2006).

Mois / Années	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Jui	Juill	Août	moy
1990/91	25.25	21.9	15.78	10.27	10.16	10.04	14.57	13.7	15.22	21.25	24.81	25.1	17.33
1991/92	25.65	20.34	14.92	10.15	9.55	10.64	12.52	15.5	17.87	20.8	23.93	25.5	17.28
1992/93	24.25	22.45	15.58	12.08	9.61	10	12.25	15.2	18.42	21.91	24.59	28.95	17.94
1993/94	23.19	19.85	14.51	11.75	10.4	13.25	13.9	13.4	19.17	20.93	24.6	28.95	17.82
1994/95	24	21.45	15.85	15.35	10.65	12.65	12.02	14	19.05	21.25	24.67	25.29	18.01
1995/96	24	20.25	16.8	14.28	12.95	10.25	13.35	14.65	17.76	19.69	22.69	25.5	17.68
1996/97	21.44	17.5	15.43	13.4	12.3	12.1	11.35	14.1	19.1	22.79	24.34	25.56	17.45
1997/98	22.39	18.1	14.95	12.35	11.3	11.75	12.85	15.85	18.23	22.35	24.04	23.91	17.33
1998/99	23.3	18.5	16.42	10.97	11.1	9.29	13.39	14.7	19.57	22.69	24.77	27.26	17.66
1999/00	24.86	21.94	14.24	11.77	8.67	11.11	12.74	15.55	19.4	21.52	25.88	25.47	17.76
2000/01	23.71	19.6	15.49	12.61	12.26	11.02	16.61	14.26	18.32	22.92	25.54	25.5	18.15
2000/02	22.78	21.91	15.23	11.5	9.67	11.36	13.66	15.55	18.4	22.33	24.1	24.37	17.57
2002/03	22.15	18.68	14.98	13.75	11.28	11	13.31	17.21	18.97	25.49	27.7	28.54	18.58
2003/04	23.84	19.13	16.17	14.76	11.48	11.49	12.47	14.02	17.29	21.28	24.19	26.44	17.71
2004/05	23.48	22.19	15.27	12.45	9.35	9.77	13.27	16.45	19.98	23.79	25.87	26.74	18.21
2005/06	22.86	20.87	16.11	11.43	10.35	11.24	14.75	17.34	20.47	24.08	25.56	25.12	18.34
moyenne	23.57	20.29	15.48	12.43	10.69	11.06	13.31	15.09	18.58	22.19	24.83	26.14	17.8

<u>Annexe N° 05 :</u> Caractéristiques hydrodynamiques de quelques forages inventoriés dans le massif dunaire de Bouteldja.

Forage	Coordonnées		Perméabilité en (10^{-4} m.s^{-1})	Transmissivité en (10^{-3} m^2.s^{-1})
	X	Y		
6902	993.200	407.800	3.5	1.03
6906	987.100	409450	0.8	3
6907	985.900	410.200	5	/
6909	985600	408.950	/	0.5
6910	988.300	408.950	0.8	4
6911	986.400	412.500	0.5	7.3
6912	990.000	409.000	0.6	4
6917	990.400	407.300	0.8	10
6918	991.500	405.950	2.5	4
6919	991.650	409.000	/	4
6920	993.600	406.500	9	6
6921	984.780	411.690	0.05	0.5
6925	994.950	406.950	2	2
B1	881.800	410.800	0.05	0.25
B3	980.950	406.820	0.5	1.4
B4	980.100	406.000	/	0.5
B6	986.100	411.800	0.8	0.95
B5	983.600	406.250	0.08	/
B7	987.700	410.300	0.9	/
B8	988.850	409.650	0.7	1
B9	989.400	408.550	0.8	2.8
B10	984.350	407.900	0.7	1.5
B11	989.500	407.250	0.9	2.5
B12	988.600	406.600	0.9	0.5
B13	992.000	406.600	2	/
B14	985.000	406.950	0.09	0.8
B17	985.300	407.400	0.8	0.27
B18	975.800	405.700	0.08	0.62
B20	978.350	406.800	6	0.18
A5	978.850	406.850	5	2
B13	992.000	406.600	/	3
P19	983.800	414.100	0.02	3.1
6923	995.100	405.900	3	1.3
565	988.050	405.800	4	/

<u>Annexe N° 06 :</u> Mode opératoire pour les analyses chimiques.

EDTA : pour le dosage du Ca et Mg.
3.73 g de l'EDTA dans un litre d'eau distillée.

NaOH : pour le dosage du Ca.
0.4 g de NaOH dans 100 ml d'eau distillée.

Nitrate d'argent : pour le dosage des chlorures.
17.3 g de Nitrate d'argent dans un litre d'eau distillée.

Bichromate de potassium : pour le dosage des chlorures.
4,9 g de Bichromate dans un litre d'eau distillée.

Solution tompon : pour le dosage du TH.
27 g de chlorure d'ammonium + 175 ml d'ammoniac + 500 ml d'eau distillée.

Calcium (Ca^{2+}) :

50 ml de l'échantillon + 2 ml NaOH + pincé de Mérixyde ce qui nous donne une couleur rouge, puis en ajute l'EDTA jusqu'à le virage vers le violé.

$$[Ca] = \frac{V_1 \times 2}{5} \times 20$$

V_1 : volume de l'EDTA.

TH :

50 ml de l'échantillon + 2 ml de solution tompon + pincé de Noire d'Erichrome ce qui nous donne une couleur rouge, puis en ajoute l'EDTA jusqu'à le virage vers le bleu.
Prendre le volume de l'EDTA = V_2.

$$V_3 = V_2 - V_1$$

$$[Mg] = \frac{V_3 \times 2}{5} \times 12$$

TAC : (TAC = TA + HCO_3).

pH < 8.3 → Ta = 0.

Tac : 50 ml de l'échantillon + pincé de Méthyle orange ce qui nous donne un virage vers le jaune, puis titrer par l'acide Sulfurique ou l'acide Chlore Hydrique jusqu'à ce qu'on obtient un rose orangé.

$$TAC = \frac{[(V \times 2) - 0.5]}{5} \times 61$$

V : volume de l'acide Sulfurique ou l'acide Chlore Hydrique.

Chlorures (Cl^{2-}) :

50 ml de l'eau à analyser + 2 goûtes de Bichromates de potassium + une solution de nitrates d'argent (V = ?) jusqu'à obtention d'une coloration rouge brique.

$$[Cl] = V \times 2 \times 35.5$$

Ammonium (NH_4^+) :

50 ml de l'échantillon + réactif 1 (Nitroprussiate de sodium) 1.5 ml + réactif 2 (solution alcaline d'hypochlorite) 1.5 ml. Après le mettre pendant 5 minute dans bain marin (pour accélérer la réaction) puis on le passe au Spectrophotomètre.

Nitrite (NO_2^-) :

50 ml d'échantillon + réactif 1 (solution de sulfanilamide) 1ml resté 4 minute ajouté le réactif 2 (solution de N-Naphtyléthylene diamine-dichlorhydrate de ethylendiamine) 1ml puis on le passe au spectrophotomètre.

Nitrate (NO_3^-) :

100ml de l'échantillon + 2ml (NH_4cl) concentré faire passé a la colonne et récupérer 50ml puis ajouter les réactifs R1 et R2 comme les Nitrite puis on le passe au spectrophotomètre.

Phosphate (Po_4^{3-}) :

50ml d'échantillon + réactif F (8ml acide ascorbique compléter à 40ml par le mélange) pour chaque 50ml d'échantillon ajouter 5ml de réactif F puis on le passe au spectrophotomètre.

Annexe N° 07 : Mode opératoire du Fluorimètre.

Une fois branché à l'électricité, le Fluorimètre doit être laissé au minimum 3 minutes pour qu'il se réchauffe et se stabilise. Puis on passe à l'étape du calibrage, qui consiste à entrer une cuvette plaine de Fluoricéine dans le support de cellules, en appuyant sur la touche MODE et puis la touche CALIBRATE pour calibrer. On entre une deuxième cuvette contenant de l'eau qui a traversée la couche de sable (Le cas de notre expérience), et en refait la même opération précédente.
La lecture se fait directement sur le petit écran du Fluorimètre, après le placement de la cuvette contenant l'échantillon dans le support de cellules.