



Faculté des Sciences de la Terre
Département de Géologie

MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de

MAGISTER

THÈME

**«FAISABILITÉ DE L'IMPLANTATION DE BASSINS
D'ALIMENTATION D'UN AQUIFÈRE.
CAS DU MASSIF DUNAIRE DE BOUTELDJA».
(EXTRÊME NORD-EST ALGÉRIEN)**

Option: Ingénierie des ressources en eau (Hydrogéologie)
Présenté par

Hani BOURBIA

Ingénieur d'Etat en Hydrogéologie, Université Badji Mokhtar-Annaba

Directeur de mémoire: CHAFFAI Hicham **Maître de Conférences (U.B.M. Annaba)**

DEVANT LE JURY

Président: DJABRI Larbi **Professeur (U.B.M. Annaba)**
Examineurs: HANI Azzedine **Professeur (U.B.M. Annaba)**
DJORFI Saâdane **Maître de Conférences (U.B.M. Annaba)**

REMERCIEMENTS

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

Les membres du jury d'avoir accepté de lire et juger ce travail.

Monsieur le Docteur Hicham CHAFFAI qui, après avoir accepté de prendre la Direction de ce mémoire, m'a donné un goût spécial à l'hydrogéologie, il m'a laissé bien souvent gérer mon travail tout en apportant les critiques et conseils nécessaires lors de son élaboration. Je le remercie vivement pour l'intérêt qu'il a porté pour ce travail, ses précieux conseils, sa disponibilité et sa sympathie.

Monsieur le Professeur Azeddine HANI qui, n'a jamais épargné un effort à me faire profiter de sa grande connaissance de l'hydrogéologie ses remarques pertinentes, son suivi et ses précieuses orientations. Je ne saurai lui exprimer ma gratitude et ma reconnaissance à leur juste valeur.

Monsieur le Professeur Lahcen BENAABIDATE, Professeur à la Faculté des Sciences et Technique (FST) de Fès (Maroc), pour les documents demandés.

Mes remerciements à tous les enseignants du département de géologie de l'université Badji Mokhtar de Annaba.

Enfin tous ceux qui m'ont soutenu tout au long de ce travail directement ou indirectement, par leur amitié et leur sympathie, qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

Tout le mérite revient à ma très chère famille et mes proches amis qui m'ont bien soutenu et qui n'ont pas cessé de m'apporter un précieux soutien moral. Que ce travail soit le témoignage de ma profonde reconnaissance.

ملخص

تعرف كتلة الكثبان الرملية ليوثلجة، بكونها من أهم خزانات المياه الجوفية، والقادرة على تخزين مياه الأمطار نظرا إلى طبيعة تربتها.

للأسف، غشاء هذه الأخيرة، يستغل استغلالا مكثفا استجابة لحاجيات الزراعة وكذلك الماء الشروب لولايتي عنابة و الطارف. (هاني.ع، 2003).

هذه الوضعية قادتنا إلى التساؤل عن إمكانيات تخزين الكميات الفائضة من المياه السطحية تحت الأرض، وذلك لتنظيم وإعادة التوازن المختل للغشاء نتيجة الاستغلال المكثف والذي أنجر عنه انخفاض في مستوى المياه الجوفية.

زرع حوض للتغذية على مستوى كتلة الكثبان الرملية، وسيلة فعالة لحل هذا المشكل، لكن قبل هذا تعتبر الدراسة التقنية لإعادة التعبئة الصناعية جد هامة لاختيار المناطق الجد ملائمة لهذه العملية، الشيء الذي يدفعنا إلى معرفة مفاهيم كل من حوض تغذية مناطق التقاط المياه، وقطعة الغشاء المغذية لمنطقة التقاط المياه، مع تعيين حدود كل واحد منها؛ مع وضع النصوص والآليات الأصلح لنقل المياه إلى المناطق المحددة سابقا.

الكلمات المفتاحية

كتلة الكثبان الرملية، انخفاض ببيزومتري، تخزين المياه، إعادة التعبئة الصناعية، حوض تغذية المياه، قطعة الغشاء المغذية لقطعة التقاط المياه، نصوص التعبئة.

Résumé

Le massif dunaire de Bouteldja est connu comme un important réservoir souterrain capable de stocker les eaux dont l'infiltration est favorisée par de la nature du sol.

Malheureusement, la nappe du massif dunaire est intensivement exploitée et même surexploitée pour répondre aux besoins de l'irrigation et l'AEP des deux wilayas : Annaba et El Tarf (Hani. A, 2003).

Cette situation, nous a conduit à s'interroger sur les possibilités d'emmagasiner dans le sous-sol une partie de l'eau excédentaire de surface soit pour régularisation, soit pour restauration d'un équilibre perturbé par l'exploitation intensive entraînant un abaissement de surface piézométrique et par conséquent, un accroissement des charges d'exploitation.

L'implantation d'un bassin d'alimentation au sein du massif dunaire est un moyen efficace pour résoudre le problème de la surexploitation. Il est donc indispensable d'apprécier la faisabilité technique de la recharge artificielle et de sélectionner les secteurs les plus favorables à cette recharge, ceci fait donc appel aux notions de bassin d'alimentation des captages (BAC) et la portion de la nappe alimentant le captage (PNAC) ainsi que la détermination de leurs limites et de mettre au point les dispositifs les mieux adaptés pour réaliser un apport artificiel conséquent au droit de ces secteurs.

Mots clés : Massif dunaire de Bouteldja, Abaissement piézométrique, Stockage d'eau, Recharge artificielle, Bassin d'alimentation des captages (BAC), Portion de la nappe alimentant le captage (PNAC), Dispositifs de recharge.

Abstract

The dune massive of Bouteldja is known like an important reservoir of underground water capable to stock the rainwater in view of the nature of soil.

Unfortunately, the ground water of this last is exploited intensively and is even overexploited to answer to needs of the irrigation and the AEP of the two willayas: Annaba and El Tarf (Hani. A, 2003).

This situation drove us to wonder about possibilities to store in the basement a part of excess water of surface either for regularization, or for restoration of a balance disrupted by an intensive exploitation dragging a lowering of surface of water in the wells and therefore a growth of exploitation loads.

The implantation of alimentation basin within the dune massive is an efficient means to solve this problem .but before that, it is indispensable to appreciate the technical feasibility of the artificial refill, on the one hand to select sectors most favorable to the refill ,that calls on the notion of alimentation basin of catchment and the portion of water of the ground water nourishing the catchment (BAC and PNAC) and the determination of limits of each of these two, and on the other hand to put better adapted devices to achieve an artificial contribution to the right of these sectors.

Key words:

Dune Massif of Bouteldja, lowering of surface of water in the wells, storage of water, artificial refill, alimentation basin of catchment (BAC), portion of the ground water nourishing the catchment (PNAC), devices of refill.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE 1

Chapitre I : *GENERALITES SUR LA REGION D'ETUDE*

I.1- La situation géographique	3
I.2Géomorphologie	4
I.2.1- Le complexe alluvial de la vallée de l'oued El Kébir.....	4
I.2.2- Les marécages et les lacs	4
I.2.3- Les oueds	4
I.2.4- Les montagnes.....	4
I.2.5- Les collines	4
I.3- Le couvert végétal	5
I.4- Contexte biologique	6
I.4.1- L'écosystème forestier	6
I.4.2- L'écosystème type maquis	6
I.4.3- La faune	7
I.5- Contexte socio-économique	7
I.5.1-Généralité	7
I.5.2-Agriculture	8
I.5.3-Industrie	

Chapitre II : *LA GEOLOGIE DU MASSIF DUNAIRE DE BOUTELDJA*

	9
II. 1- Introduction	10
II. 2- Stratigraphie	10
II.2.1- Les formations du secondaire.....	10
II.2.1.1 Crétacé supérieur (Sénonien).....	10
II.2.2- Les formations du Tertiaire	11
II.2.3- Quaternaire.....	11
II.2.3.1- Quaternaire ancien	11
II.2.3.2- Quaternaire moyen	11
II.2.3.3- Quaternaire récent	12
II. 3 - Géologie et caractéristiques physico-chimiques des dunes	13
II. 4 - Cadre structurale	13
II. 5 - Paléogéographie	14
II. 6 - La tectonique	15
Conclusion :	

Chapitre III : *HYDROCLIMATOLOGIE*

III.1- Introduction	16
III.2- Caractéristiques climatiques	16
III.2.1-Les précipitations	16
III.2.1.1- Analyse de la qualité des données collectées	18
III.2.1.1.1- Test d'indépendance: "le test du signe"	19
III.2.1.1.2- Test d'homogénéité.....	20
III.2.1.1.3- Tests de détection des données atypiques.....	21
III.2.1.2- Précipitations moyennes mensuelles	22
III.2.1.3- Précipitations moyennes annuelles (PMA).....	23
III.2.1.4 - Variabilités des précipitations	24
III.2.1.5 - Caractéristiques climatiques d'aridité	25
III.2.1.6 - Coefficient pluviométrique (H).....	27
III.2.1.7 - Examen de la normalité des précipitations.....	27
III.2.1.8 - Calcul de la lame d'eau moyenne précipitée	27
III.2.2 - La température	28
III.2.2.1 - Les températures moyennes mensuelles	30
III.2.2.2 - Courbe pluvio – thermique	30
III.2.3 - L'humidité relative de l'aire: (Station des Salines)	30
III.2.4 - Le vent	31
III.3 - Bilan hydrologique	32
III.3.1 - Evapotranspiration	35
III.3.1.1 - Méthode de Thornthwaite	35
III.3.1.1.1 - Interprétation du bilan de Thornthwaite.....	36
III.3.1.2- Formule de Turc	37
III.3.2 - Le ruissellement	38
III.3.3- L'infiltration	38
Conclusion	

Chapitre IV : *HYDROGEOLOGIE*

	39
IV. 1 - Introduction	39
IV .2 - Inventaire des points d'eau	39

IV. 2. 1 - Les sources.....	39
IV. 2. 2 - Les puits	40
IV. 2. 2 - Les forages.....	42
IV. 3 - Définition de la nappe des sables dunaires de Bouteldja.....	42
IV. 4 - Géométrie de l'aquifère.....	42
IV. 5 - Interprétation des coupes hydrogéologiques.....	42
IV. 5. 1 - Coupe 1.....	
IV. 5. 2 - Coupe 2.....	43
	46
IV. 5. 3 - Coupe 3.....	47
IV. 5. 4 - Coupe 4.....	47
IV. 5. 5 - Coupe 5.....	47
IV. 5. 6 - Coupe 6.....	48
IV. 5. 7 - Conclusion.....	50
IV. 6 - Piézométrie de la nappe libre de Bouteldja.....	
IV. 7 - Régime de la nappe la nappe du massif dunaire de Bouteldja.....	50
IV. 8 - Conditions aux limites de l'aquifère.....	51
IV. 9 - Caractéristiques hydrodynamiques de la nappe.....	52
	53
IV. 9. 1 - L'épaisseur saturée	
IV. 9. 2 - La transmissivité.....	54
IV. 9. 3 - La perméabilité.....	55
	55
IV. 9. 4 - Le coefficient d'emmagasinement.....	55
IV. 10 - Exemple d'interprétation des données de pompage d'essai.....	
IV. 10. 1 - Forage 565.....	56
	57
IV. 10. 1. 1 - Courbe de décente	
IV. 10. 1. 2 - Courbe de remontée.....	57
	58
IV. 10. 2 - Forage 6920.....	58
IV.11- Les réserve.....	58
IV.11.1- Les réserves régulatrices.....	59
IV.11.2- Ressources régulatrices.....	60
IV.11.3- Les réserves permanentes	
Conclusion	

Chapitre V : *HYDROCHIMIE*

	61
V.1Introduction.....	61
V.2- Etude des paramètres physicochimiques de l'eau	61
V.2.1- Les eaux de surface	61
V.2.1.1- Eaux des marais	61
IV.4- Aquifère dunaire de Bouteldja.....	62

V.2.1.2- Eaux de pluie.....	64
V.2.1.3- Eaux de l'oued Kébir	64
V.2.2- Les eaux souterraines	64
V.2.2.1- Paramètres physiques.....	64
V.2.2.1.1- La température	65
V.2.2.1.2- Le pH	65
V.2.2.1.3- La conductivité	66
V.2.2.1.4- Le résidu sec (RS).....	66
V.2.2.2- La répartition graphique des analyses chimiques	66
V.2.2.2.1- Le diagramme en losange ou de Piper.....	
V.2.2.2.2- Diagramme de Schoëller Berkloff	
V.3- Interprétation des résultats	66
V.3.1- Répartition graphique sur le diagramme de Piper et de Schoëller Berkloff des résultats d'analyse chimique (Haute eaux)	77
V.3.2- Répartition graphique sur le diagramme de Piper et de Schoëller Berkloff des résultats d'analyse chimique (Basses eaux)	81
V.4- Faciès chimique et formule ionique des analyses chimiques	82
Conclusion	

Chapitre VI : *ETUDE DE LA FAISABILITE DE L'IMPLANTATION D'UN BASSIN D'ALIMENTATION AU MAFFIF DUNAIRE DE BOUTELDJA*

83

VI. 1 - Introduction	
-----------------------------------	--

VI. 2 PARTIE 1 : *ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE*

VI. 2. 1 - ETUDE DE LA FAISABILITE DE LA RECHARGE ARTIFICIELLE	84
VI. 2. 1. 1 - La recharge artificielle à travers le monde	85
VI. 2. 1. 2 - Application principale de l'alimentation artificielle.....	85
VI. 2. 1. 2. 1 - Accroissement des ressources.....	86
VI. 2. 1. 2. 2 - Modification du caractère chimique et thermique.....	86
VI. 2. 1. 2. 3 - Restauration d'un équilibre perturbé	87
VI. 2. 1. 3 - Problèmes de la recharge	88
VI. 2. 1. 4 - Conditions générales de la recharge artificielle	88
VI. 2. 1. 4. 1 - Facteurs hydrologiques.....	88
VI. 2. 1. 4. 2 - Facteurs topographiques	89
VI. 2. 1. 4. 3 - Facteurs pédologiques.....	89
VI. 2. 1. 4. 4 - Facteurs géologiques et hydrogéologiques	90
VI. 2. 1. 4. 5 - Facteurs hydrodynamiques.....	
VI. 2. 1. 5 - Méthodes de la recharge	91

VI. 2. 1. 5. 1 - Amélioration du lit des cours d'eau	92
VI. 2. 1. 5. 2 - Fosses et canaux.....	94
VI. 2. 1. 5. 3 - Epanchage de crues	96
VI. 2. 1. 5. 4 - Puits et forages d'injection (ouvrages de recharge profonde).....	96
VI. 2. 1. 5. 5 - Drains	

VI. 2. 2 - FAISABILITE DE L'IMPLANTATION D'UN BASSIN D'ALIMENTATION

VI. 2. 2. 1 - Bassin d'alimentation des captages et portion alimentant le captage (BAC et PNAC) (Concepts et terminologie).....	97
VI. 2. 2. 2 - Notion d'aire d'alimentation d'un captage	98
VI. 2. 2. 3 - Démarches proposées pour la détermination du BAC et PNAC.....	98
VI. 2. 2. 4 - Méthodes de délimitation des BAC	
VI. 2. 2. 5 - Avantage et inconvénients de différentes méthodes.....	

VI. 3 - PARTIE 2 : APPLICATION AU MASSIF DUNAIRE DE BOUTELDJA

VI. 3. 1 - Introduction.....	101
VI. 3. 2 - La recharge artificielle au massif dunaire de Bouteldja	101
VI. 3. 2. 1 – Les condition de la recharge.....	101
VI. 3. 2. 1. 1 -La géologie et les conditions structurales (conditions aux limites).....	102
VI. 3. 2. 1. 2 - Epaisseur totale du réservoir	103
VI. 3. 2. 1. 3 - Conditions hydrogéologiques : la source d'alimentation.....	104
VI. 3. 2. 1. 3. 1 - Irrégularité interannuelle des modules et leurs répartitions statistiques	105
VI. 3. 2. 1. 3. 2 - Variation mensuelle des débits en fonction des précipitations	105
VI. 3. 2. 1. 3. 3 - Variations Saisonnières des débits.....	106
VI. 3. 2. 1. 3. 4 - Les régimes saisonniers et les coefficients mensuels des débits.....	106
VI. 3. 2. 1. 3. 5 - Disponibilités Saisonnières en Eau de Surface.....	
VI. 3. 2. 1. 3. 6 - L'Hydraulicité	107
VI. 3.2. 1. 3.7 - Application de la méthode de corrélation linéaire aux séries hydropluviométriques de l'oued El Kébir Est	109
VI. 3. 2. 1. 3. 8 - La Qualité des eaux de l'oued El Kébir Est	110
VI. 3. 2. 1. 4 - Les paramètres hydrauliques	110
VI. 3. 2. 1. 4. 1 – La perméabilité.....	110
VI. 3. 2. 1. 4. 2 - La transmissivité.....	111
VI. 3. 2. 1. 4. 3 – Le coefficient d'emménagement.....	111
VI. 3. 2. 1. 5 – Volume d'eau mobilisable.....	112
VI. 3. 2. 1. 6 - Termes du bilan	
a- Les entrées	112
b- Les sorties.....	

VI. 3. 3 - La délimitation du BAC et PNAC dans le massif dunaire de Bouteldja	113
VI. 3. 3. 1 - Introduction.....	113
VI. 3. 3. 2 - La délimitation du BAC.....	115
VI. 3. 3. 3 - Délimitation du PNAC	116
VI. 3. 3. 3. 1 - Méthode utilisée (Méthode analytique)	117
VI. 3. 3. 3. 2 - Description de la méthode	122
VI. 3. 3. 4 - Calculs et Résultats	123
VI. 3. 4 - Définition des périmètres de protection	123
VI. 3. 4. 1 - Périmètre de protection immédiat	123
VI. 3. 4. 2 - Périmètre de protection rapprochée	
VI. 3. 4. 3 - Périmètre de protection éloignée.....	124
VI. 3. 5 - Propositions pour la recharge artificielle	125
VI. 3. 5. 1 - Infiltration directe des eaux de surface le long des cours d'eau	126
VI. 3. 5. 2 - Infiltration directe des eaux de surface par des bassins d'infiltration	127
VI. 3. 5. 2. 1 - Dimension des bassins d'infiltration.....	130
VI. 3. 5. 2. 2 - Les calculs.....	
Conclusion	132
CONCLUSION GENERALE	137
ANNEXES	

LISTE DES FIGURES

Fig. 1	- Situation géographique du massif dunaire de Bouteldja.
Fig. 2	- Extrait de la carte géologique et structurale au 1/500000 de la chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens (D'après J.M.VILA, 1978).
Fig. 3	- Loge stratigraphique.
Fig. 4	-Analyse granulométrique au niveau des forages dans le massif dunaire de Bouteldja.
Fig. 5	- Carte schématique tectonique (D'après SONATRACH modifiée).
Fig. 6	- Les boîtes à moustaches dans la station des salines et d'Ain Assel.
Fig. 7	-Histogramme des précipitations moyennes mensuelles aux stations des salines et Ain Assel (1990/2010).
Fig. 8	- Précipitations moyennes annuelles en mm (1990/2010).
Fig. 9	- Ajustement à la loi de Gauss des données pluviométriques de la station des Salines.
Fig. 10	- Ajustement à la loi de Gauss des données pluviométriques à la station d'Ain Assel.
Fig. 11	- Températures moyennes mensuelles en °C (1980/10).
Fig. 12	- Diagramme pluviothermique de la station des Salines.
Fig. 13	- Diagrammes pluvio-thermiques aux stations de Ain Assel.
Fig. 14	- Représentation graphique du bilan de C.W.Thornthwaite (Station : les Salines).
Fig. 15	- Représentation graphique du bilan de C.W.Thornthwaite (Station : les Salines).
Fig. 16	- Carte de la répartition des forages dans le massif dunaire de Bouteldja.
Fig. 17	- Carte des isopaches des sables dunaires (Source : A. Hani, 2003).
Fig. 18	- Coupe au travers de la plaine et du massif dunaire de Bouteldja (Source : A. Hani, 2003).
Fig. 19	- Coupe schématique hydrogéologique N°1 d'après les coupes des forages et la géophysique.
Fig. 20	- Coupe schématique hydrogéologique N°2 d'après les coupes des forages et la géophysique.
Fig. 21	- Coupe schématique hydrogéologique N°3 d'après les coupes des forages et la géophysique.
Fig. 22	- Coupe hydrogéologique N°4 d'après B. Gaud, 1975 (modifiée).
Fig. 23	- Coupe hydrogéologique N°5 d'après B. Gaud, 1975 (modifiée).
Fig. 24	- Coupe schématique hydrogéologique N°6 d'après les coupes des forages et la géophysique.
Fig. 25	- Carte piézométrique de la nappe du massif dunaire de Bouteldja en Octobre 1994 (Ramdani. A ; 1996).
Fig. 26	- Carte piézométrique de la nappe du massif dunaire de Bouteldja en 1982 (Khérici. N ; 1985).
Fig. 27	- Carte des conditions aux limites de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja (Source : A. Hani, 2003).
Fig. 28	- Carte d'égale épaisseur de la couche saturée de la nappe libre du massif dunaire

Fig. 29	- Carte de répartition des transmissivités dans la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja.
Fig. 30	- Carte de répartition des perméabilités en 10^{-5} m/s de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja.
Fig. 31	- ACP de l'oued Kébir. (A. Hani, 2003).
Fig. 32	- Diagramme de Piper des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de hautes eaux 2004.
Fig. 33	- 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.
Fig. 34	- Diagramme de Piper des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de hautes eaux 2005.
Fig. 35	- Diagramme de Schoëller Berkaloff des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de hautes eaux 2005.
Fig. 36	- Diagramme de Piper des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de hautes eaux 2006.
Fig. 37	- 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.
Fig. 38	- Diagramme de Piper des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de hautes eaux 2008.
Fig. 39	- Diagramme de Schoëller Berkaloff des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de hautes eaux 2008.
Fig. 40	- Diagramme de Piper des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de hautes eaux 2010.
Fig. 41	- Diagramme de Schoëller Berkaloff des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de hautes eaux 2010.
Fig. 42	- Diagramme de Piper des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de basses eaux 2004.
Fig. 43	- Diagramme de Schoëller Berkaloff des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de basses eaux 2004.
Fig. 44	- Diagramme de Piper des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de basses eaux 2009.
Fig. 45	- Diagramme de Schoëller Berkaloff des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de basses eaux 2009.
Fig. 46	- Localisation des cas recensés de recharge de nappe au tour du monde.
Fig. 47	- Répartition des méthodes utilisées dans la recharge.
Fig. 48	- Lit d'oued aménagé (Bulletin de l'association international des sciences d'hydrologie, 1971).
Fig. 49	- Infiltration à partir d'un canal (Bulletin de l'association international des

	sciences d'hydrologie, 1971).
Fig. 50	- Epannage de crues sur les rives de l'oued (Bulletin de l'association international des sciences d'hydrologie, 1971).
Fig. 51	- Méthodes d'injection artificielle d'eau dans la nappe (puits et forages).
Fig. 52	- Le BAC et le PNAC.
Fig. 53	- Bassin hydrogéologique et bassin d'alimentation du captage dans un cas simple de nappe libre.
Fig. 53bis	- Bassin hydrogéologique et bassin d'alimentation du captage dans un cas simple de nappe libre.
Fig. 55	- Variation annuelles des débits a la station d'Ain Assel.
Fig. 56	- Variation mensuelle des débits en fonction des précipitations à la station d'Ain Assel 1990/2009.
Fig. 57	- Coefficient moyen des débits de l'oued El Kébir Est a la station d'Ain Assel 1990/2009.
Fig. 58	-Corrélation pluies/débits de l'oued El Kébir Est à la station d'Ain Assel 1990/2009.
Fig. 59	- Le bassin d'alimentation du massif dunaire de Bouteldja.
Fig. 60	- Les sous bassins du massif dunaire de Bouteldja.
Fig. 61	- Schéma explicatif du tracé du périmètre d'appel d'un captage.
Fig. 62	- Détermination des isochrones (méthode de Wyssling).
Fig. 63	- Périmètre d'appel et isochrones de forage 9612.
Fig. 64	- Périmètre d'appel et isochrones de forage B9.
Fig. 65	- Périmètre d'appel et isochrones de forage B 01.
Fig. 66	- Périmètre d'appel et isochrones de forage 6918.
Fig. 67	- Périmètre d'appel et isochrones de forage 6902.
Fig. 68	- Périmètre d'appel et isochrones de forage 6919.
Fig. 69	- Plan schématique de l'ouvrage proposé au sein d'Oued El B'haiem.
Fig. 70	- Schéma de la recharge.
Fig. 71	- Recharge artificielle par bassin d'infiltration au massif dunaire de Bouteldja.

LISTE DES TABLEAUX

Tabl. 1	: Peuplements et formations forestières.
Tabl. 2	: Principales formations forestières.
Tabl. 3	: Les coordonnées Lambert des stations pluviométriques.
Tabl. 4	: Les valeurs critiques du test du signe.
Tabl. 5	: Précipitation moyennes mensuelles en mm/an (1990/2010).
Tabl. 6	: Précipitation moyennes annuelles en mm/an (1990/2010).
Tabl. 7	: Les irrégularités interannuelles des précipitations.
Tabl. 8	: Indice d'aridité annuelle (D'après la formule DE MARTONNE).
Tabl. 9	: Coefficient pluviométrique des stations des Salines et Ain Assel (1990/2010).
Tabl. 10	: Températures moyennes mensuelles en °C.
Tabl. 11	: Moyennes mensuelles et moyenne annuelle de l'humidité relative de l'aire à la station des Salines en % (1980/2010).
Tabl. 12	: Bilan hydrique à la station des Salines (1990-2010).
Tabl. 13	: Bilan hydrique a la station d'Ain Assel (1990-2010).
Tabl. 14	: L'évapotranspiration réelle selon la formule de Turc.
Tabl. 15	: Comparaison entre les valeurs des deux méthodes.
Tabl. 16	: Le ruissellement dans les deux stations.
Tabl. 17	: Tableau récapitulatif du bilan de Thornthwaite.
Tabl. 18	: Essai par paliers de débits au forage 565 (R. Nouacer, 1993).
Tabl. 19	: Analyses chimiques des eaux de pluie dans la région de Bouteldja (meq/l).
Tabl. 20	: ACP- Inertie des 4 premières composantes principales.
Tabl. 21	: Corrélation entre les variables et les trois premières composantes principales.
Tabl. 22	: Relation entre conductivité et minéralisation (Detay, 1997).
Tabl. 23	: Formules ioniques et faciès chimiques des eaux du massif dunaire.
Tabl. 24	: Tour du monde de la recharge artificielle
Tabl. 25	: Les avantages et inconvénients des différentes méthodes utilisées pour la détermination du PNAC.
Tabl. 26	: L'apport moyen annuel des oueds qui drainent le bassin versant du Mafragh.
Tabl. 27	: Les coefficients mensuels des débits.
Tabl. 28	: Les valeurs des coefficients d'hydraulicité.
Tabl. 29	: Résultats d'analyse chimique des eaux de l'Oued El Kébir Est prises à la station hydrométrique d'Ain El Assel.
Tabl. 30	: Le potentiel hydrique de la nappe du massif dunaire.
Tabl. 31	: Les débits de quelques sources du massif dunaire.
Tabl. 32a	: Résultats des calculs par la méthode de Wyssling.
Tabl. 32b	: Résultats des calculs par la méthode de Wyssling.
Tabl. 33	: Caractéristiques du sous bassin de oued B'haïem.

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

"L'eau est essentielle à la vie et au bien-être. C'est pourquoi, elle a besoin d'être protégée, traitée et économisée ".

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, pour cela la pénurie d'eau est devenue un problème décisif vécu par toutes les sociétés. En effet, l'accroissement des populations et le développement des agglomérations, des unités industrielles et des terres cultivées ont eu pour corollaire une dégradation de la qualité des eaux souterraines et une baisse très significative des réserves qui représentent parfois les seules ressources d'eau pour l'alimentation des populations.

A l'instar de la plupart des nappes des eaux souterraines du pays, la nappe côtière du massif dunaire de Bouteldja, « renferme dans son sous-sol un potentiel hydrique d'une grande importance, et caractérisé par un grand nombre de données de toutes natures accumulées dans divers services depuis des dizaines d'années : logs de forages, campagnes géophysiques, analyses physico-chimiques, mesures de débits, données de pompages d'essai, relevés piézométriques », a connu ces dernières années une exploitation abusive, conjuguée au déficit d'apport (les eaux météoriques), a provoqué des baisses importantes du niveau piézométrique qui va conduire par le temps et par suite une diminution de la productivité des ouvrages hydrauliques exploitants cet aquifère et une déformation de la nappe par endroit.

Le sujet objet de la présente étude, consiste en premier temps à l'étude de la faisabilité de l'implantation d'un bassin d'alimentation au sein du massif dunaire de Bouteldja, afin de rattraper les quantités d'eaux exploitées en cours d'année par le ralentissement de l'abaissement du niveau piézométrique avec des dispositifs de recharge artificielle proposées.

Pour mettre en évidence ce travail, le mémoire s'articule sur six (06) chapitres dont le sixième est divisé en deux parties : une théorique et l'autre présente une application au massif dunaire de Bouteldja.

➔ Dans **Le premier chapitre**, une synthèse des connaissances de la région du massif dunaire de Bouteldja qui fournira une approche du point de vue géographique, stratigraphique et géomorphologique.

→ Le **deuxième chapitre**, est consacré à l'étude géologique, structurale et tectonique de la région, afin de constituer une idée sur les zones favorable à l'alimentation et le stockage des eaux souterraines.

→ Le **troisième chapitre**, fait le point sur l'hydrologie de surface par un traitement des données hydroclimatiques et à l'évaluation des termes du bilan hydrologiques en s'appuyant essentiellement sur les relevés pluviométriques et de température effectués en différents points du réseau de mesure.

→ Le **quatrième chapitre**, est une étude hydrogéologique, qui s'intéresse à la définition de 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), ainsi que la détermination des caractéristiques hydrodynamiques de la nappe du massif dunaire et les principaux aspects de l'écoulement des eaux souterraines.

→ Le **Cinquième chapitre**, porte sur l'étude hydrochimique des eaux de surface et souterraines, ainsi que la détermination de leur faciès chimiques.

→ Enfin le **Sixième chapitre**, partie spéciale du mémoire « la faisabilité de l'implantation d'un bassin d'alimentation au du massif dunaire de Bouteldja », est subdivisée en deux parties :

Une partie théorique résume les différentes conditions, les méthodes et les techniques de la recharge artificielle, qui sont des conditions indispensables pour l'implantation d'un bassin d'alimentation. Dans une seconde partie, des définitions et conceptions concernant les bassins d'alimentations des captages et les portions des nappes alimentant les captages (BAC et PNAC), ainsi que les démarches et les méthodes de déterminations de chaque élément.

L'application au massif dunaire de Bouteldja, comporte une étude détaillée de chaque élément de la partie théorique afin de déterminer les limites des bassins d'alimentation (zones de recharge) et les propositions pour résoudre le problème d'abaissement des niveaux d'eaux dans la région d'étude.

GENERALITES SUR LA ZONE D'ETUDE

I.1 - La situation géographique

Le massif dunaire de Bouteldja appartient administrativement au territoire de la wilaya d'El Tarf, à l'extrême Nord-Est Algérien. Il fait partie du système aquifère Annaba – Bouteldja avec une superficie d'environ 183 Km², le tout inclus dans le bassin versant de la Mafragh qui s'étend sur 2660 Km² (Fig.1).

Il est limité :

- Au Nord, par la mer Méditerranée
- Au Sud, par la plaine des graviers de Bouteldja
- Au Sud – Est, par les monts de la Cheffia et d'El Kala
- A l'Est, par le massif de Cap Rosa
- A l'Ouest, par l'oued Mafragh.

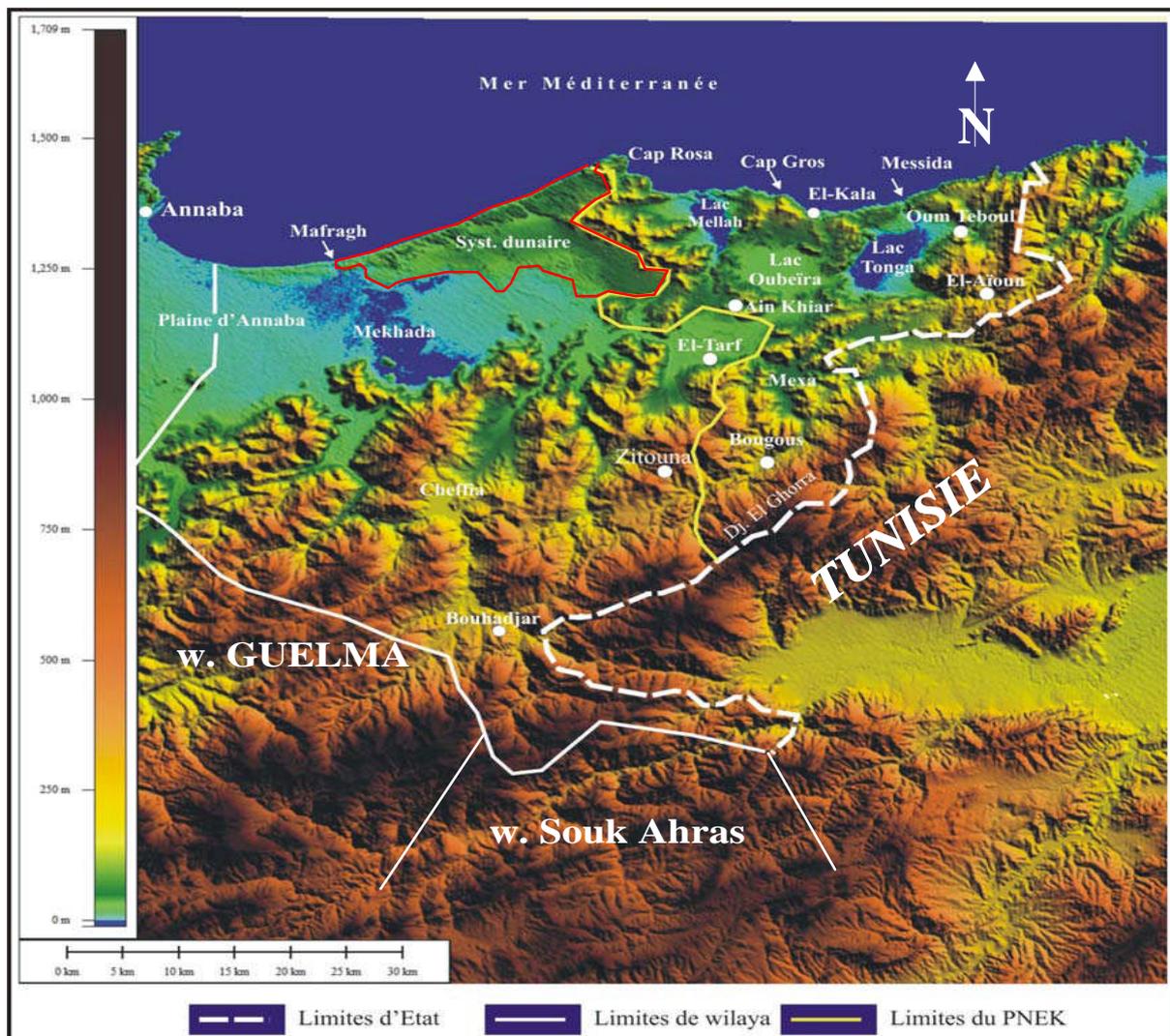


Figure 1 : Situation géographique du massif dunaire de Bouteldja.

I. 2 - Géomorphologie

Le massif dunaire est un cordon de sable localisé au Nord de la plaine alluviale de Bouteldja, il est caractérisé par une grande extension en contact avec la mer Méditerranée, il s'étend jusqu'aux pieds des djebels Bourdim et Hajar Siah à l'Est (Ramdani, 1996), il est caractérisé par un Quaternaire dominant toute la partie avale du Nord – Est et du Nord – Ouest. Les différentes unités géomorphologiques sont :

I. 2. 1 - Le complexe alluvial de la vallée de l'oued Kébir Est

Caractérisé par une série de terrasses à faciès hétérogènes (sables, graviers, limons et surtout d'argiles).

I. 2. 2 - Les marécages et les lacs

Leur présence est liée aux différentes phases d'assèchement des zones lacustres de l'Algérie orientale durant le Quaternaire.

Ils sont dus principalement à la réduction progressive des surfaces lacustres avec un remplissage alluvionnaire intensif des zones avales, de nombreux oueds tributaires du bassin comblé surtout au niveau des dépressions internes par les transports solides des différents oueds. Les marécages de Mekada, de Mohacène et du lac des oiseaux (Fig.2), développés dans la basse vallée de Kébir Est, forment un delta commun aux principaux oueds drainant la région.

I. 2. 3 - Les oueds

Représentés principalement par le Bounamoussa à l'Ouest et Kébir Est à l'Est (Fig.2), ces deux grands cours d'eau rejoignent la mer à l'embouchure appelée la Mafragh qui forme un exutoire unique.

I. 2. 4 - Les montagnes

Les montagnes de la Cheffia qui surplombent la partie avale du bassin, formant ainsi une barrière Est – Ouest. Leurs altitudes avoisinent les 450 m, avec la présence de massifs de 700 à 900 m d'altitude (Djebel Bled Gherfie, 996 m à l'Ouest et Djebel Rhona, 1202 m à l'extrême Est de la frontière Algéro – Tunisienne).

Les monts de la Cheffia sont caractérisés par les grès de la nappe Numidienne qui constitue le principal affleurement (Fig.2).

I. 2. 5 - Les collines

Au Nord – Est de Bouteldja, les collines sont représentées par le Hadjar Siah et Djebel Bourdim avec des altitudes respectives de 175 et 177 m. Elles sont dominées par un faciès

argilo – gréseux numidien et qui forment une limite étanche à la formation sous jacente (Mouchara, 2004).

I. 3 - Le couvert végétal

La couverture végétale est représentée par une dominance des peuplements forestiers qui occupent une superficie de l'ordre de 167 777 ha représentant 60 % de la superficie de la wilaya d'El Tarf (cf. Plan d'aménagement de la wilaya d'El Tarf, 2001). Cette étendue de végétation abrite des espèces floristiques où l'on compte entre 600 et 700 espèces. On distingue que 63 % de ce patrimoine est représenté par divers peuplements, les 37% restant sont constitués de maquis qui couvre les bas fond inter dunaire et la surface des dunes au Nord - Ouest de la région.

Le tableau ci – dessous montre les principales espèces qui composent le couvert forestier :

Tableau 1 : Peuplements et formations forestières

Espèce	Superficie en (ha)	Participation en (%)
- Chêne liège	59563	35.5
- Chêne zeen	6492	3.86
- Eucalyptus	13047	7.78
- Peuplier	1278	0.76
- Pin maritime	18542	11.05
- Oléastres	1024	0.61
- Alune	730	0.43
- Maquis	62173	37.06
- Autre espèces	850	0.51
- Clairière	40780	2.44
Total	167777	100%

I. 4 - Contexte biologique

L'Algérie présente des contrastes climatiques et paysagers qui se succèdent le long d'un gradient latitudinal. Cinq étages bioclimatiques y sont distingués (humide, subhumide, semi-aride, aride et saharien).

La wilaya d'El Tarf jouit d'une renommée internationale pour la richesse de ses écosystèmes forestiers, lacustres et marins.

I. 4. 1 - L'écosystème forestier

Elle possède une superficie forestière de 166 311 hectares, soit 53,42% de sa superficie totale (Tab. 2).

Tableau 2: Les principales formations forestières.

Principales formations forestières	Etendue
Le chêne zeen	6492 hectares
Le chêne liège	59563 hectares
L'eucalyptus	13000 hectares
Le pin maritime	18000 hectares

I. 4. 2 - L'écosystème type maquis

Il est possible de distinguer plusieurs types de maquis, d'une part en fonction de la composition floristique, d'autre part en se référant à la taille des arbustes.

Les différents types de maquis selon les étages climatiques méditerranéens sont :

➤ **Les maquis de l'étage thermo-méditerranéen** : ce sont des maquis essentiellement littoraux se développant à des altitudes dépassant 200m et des températures de 16°C.

➤ **les maquis de l'étage méso-méditerranéen** : se développent entre 200 et 900m, à des températures moyennes plus froides comprises entre 13 et 15°C.

➤ **les maquis de l'étage supra-méditerranéen** : ils se développent à partir de 600m et jusqu'à 1400m d'altitude ; il s'agit souvent des maquis à bruyère et les espèces méditerranéennes y sont rares.

I. 4. 3 - La faune

La wilaya d'El Tarf regroupe un grand nombre d'espèces animales, ceci est dû à l'importante superficie forestière et à l'abondance de la ressource hydrique de cette région. Les principales espèces animales sont : le Cerf de barbarie, l'Hyène rayée, le Porc-épic, le

Renard doux, la Loutre, le Chacal doré, la Cigogne blanche, l'Oie cendrée et les Tortues, etc....

I. 5 - Contexte socio-économique

I. 5. 1 - Généralité

La diversification et la richesse du sol de la wilaya d'El Tarf, lui confère une double vocation agricole et touristique ; elle dispose d'une superficie agricole utile (S.A.U) de 71 000 hectares (24% du territoire) et d'un littoral de 90 km de long, regroupant cinq zones d'expansion touristique. Elle est en outre frontalière avec la république de la Tunisie sur une bande de 98 km de long, allant de la commune de Souarekh au Nord, jusqu'à la commune d'Aïn Karma au Sud.

I. 5. 2 - L'agriculture

L'agriculture en générale, et le secteur forestier plus précisément, sont les identifiants direct de la wilaya.

Les principales spéculations agricoles sont menées en sec. Leurs superficies représentent 95% de la SAU. Cette situation pour la rappeler, est attribuée au climat humide de la région avec une moyenne de précipitation de l'ordre de 750 mm/an. Les terres de parcours et improductives représentent moins de 20%.

A l'échelle de la wilaya, la céréaliculture est la plus convoité par les exploitants avec une surface de l'ordre de 30% de la SAU. La situation de l'occupation du sol montre que 57% de la SAU ont été mobilisés pour la campagne agricole 2008/2009. EL Tarf et Aïn Assel restent les seules communes qui mobilisent le moins de SAU pour leur campagne agricole.

A l'opposé, nous retrouvons trois communes dans lesquelles presque 80% de la SAU est utilisée, il s'agit de Bouteldja, Berrihane et El Aioun.

I. 5. 3 - L'industrie

Le secteur de l'industrie reste le moins développer dans la wilaya par rapport aux autres secteurs.

Par région, le parc national d'El Kala ne renferme sur son territoire que 10 unités avec une grande concentration dans les communes d'El Kala et de Bouteldja. Dans les autres communes de la wilaya, l'activité agro-alimentaire prédomine. Elles se localisent dans les communes limitrophes de la région d'Annaba. Cela démontre bien le caractère attractif du pôle industriel d'Annaba (El Hadjar).

LA GEOLOGIE

II.1- Introduction

Nombreux sont les géologues qui ont étudié la géologie de l'Algérie. Vu l'importance de cette étude pour l'identification des structures profondes des formations géologiques et leurs litho stratigraphie, on s'est inspiré pour l'accomplir des travaux de Joleaud, 1936; Flandrin, 1955; Hilly, 1962; J.M.Vila, 1978 sur la chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro-Tunisiens.

La région fait partie du grand bassin versant de la Mafragh (Fig.2). Elle est limitée à l'Ouest par les massifs cristallins (schistes, gneiss, cipolins) des monts de l'Edough, à l'Est et au Sud par les formations grés – argileuses des monts de Cheffia et la région de la Calle (Numidien).

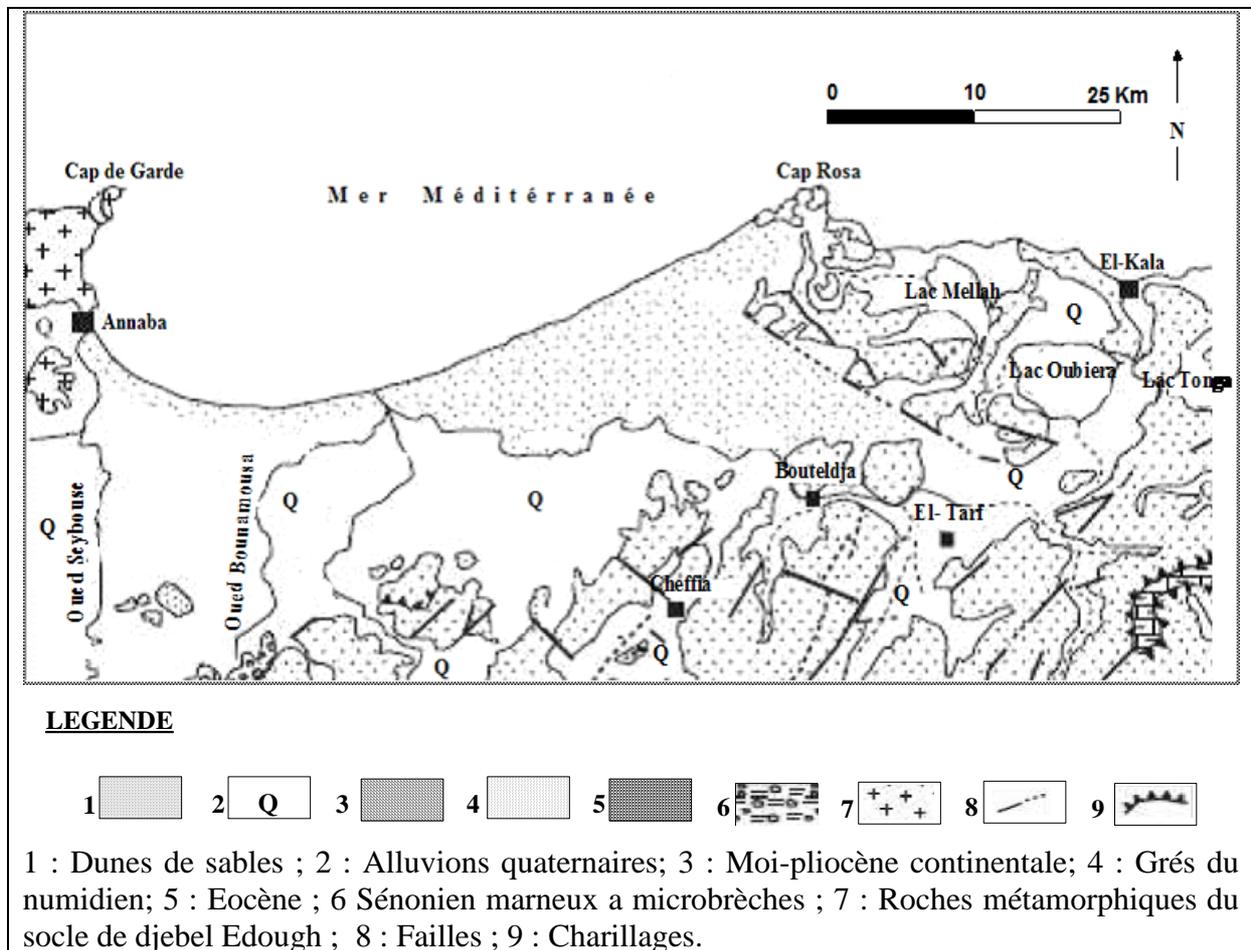


Fig. 2- Extrait de la carte géologique et structurale au 1/500000 de la chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens (D'après J.M.VILA, 1978).

II. 2- Stratigraphie

Le chrono stratigraphie de la zone d'étude montre qu'on a deux ensembles de terrains litho logiquement d'âge différents allant du Secondaire au Quaternaire récent :

✓ Un ensemble constitué d'affleurements de bordure, caractérisé par des formations allant du crétacé supérieur au tertiaire.

✓ Un ensemble, généralement quaternaire, par les formations dunaire et les produits de comblements de la dépression alluviale de la plaine d'Annaba et de la vallée de l'Oued Kébir.

II.2.1- Les formations du secondaire

II.2.1.1 Crétacé supérieur (Sénonien)

Le seul étage dans le secondaire occupe presque la totalité des monts de Cheffia, où il été réalisé des forages de reconnaissance dans le cadre d'une étude géologique au droit de l'emplacement du barrage et de la galerie d'amenée ont recoupé.

Il comprend de bas en haut: Des schistes plus ou moins argileux de couleur bleu ardoise avec des passées calcaires ou de micro- brèches épais de 5 à 10 cm inters stratifiés à microfaune déterminant un âge sénonien supérieur. Il s'agit de l'ultra tellien.

II.2.2- Les formations du Tertiaire

Il est représenté par des argiles formant la base de la série numidienne datant de l'Eocène supérieur. On le rencontre dans les parties inférieures des versants de la majeure partie des monts de la Cheffia et au Sud Est de Bouteldja (Bourdim, Oum Lagareb). Ce facies argileux, de couleur verdâtre, brunâtre ou bleu sombre, comprend parfois des intercalations de lentilles gréseuses pouvant aller d'un à 30 cm d'épaisseur.

Au dessus de ses formations argileuses viennent se superposer les grés numidiens en position allochtone d'âge aquitainien (H. Rouvier in Ramdani, 1996).

Ces grés de nature quartzeuse, a grains plus au moins consolidés de couleur rouge a jaunâtre sont épais de près de 150 m, et bien représentés au Sud de la région d'étude, a l'Est dans le djebel Bourdim et au Nord-Est dans le Djebel Koursi.ils ceignent les formations alluvionnaire et surtout dunaire.

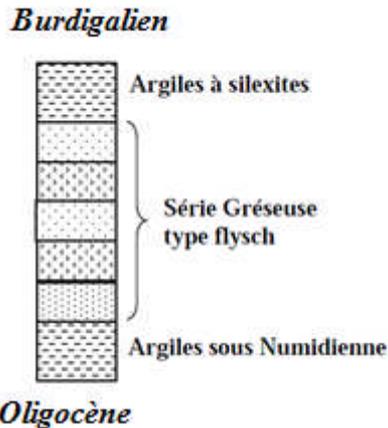


Fig.3- loge stratigraphique.

II.2.3- Quaternaire

Il affleure au niveau de la plaine de Bouteldja donnant naissance à la nappe aquifère.

II.2.3.1- Quaternaire ancien

Il est caractérisé par des mollasses calcaires marines et dunaires, d'âge sicilien (L. Joleaud).

II.2.3.2- 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 caillouteuse et plus au moins argileuses a la base avec une texture fine au sommet.

➤ **Pléistocène récent** : correspond aux alluvions de basses terrasses qui sont plus lamineuses que sableuses.

II.2.3.3- 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.

II.3- Géologie et caractéristiques physico-chimiques des dunes

Les dépôts du matelas dunaire sont le produit principale de l'érosion intense des massifs argilo gréseux numidiens et gneissiques charries vers la mer, dégradés en sable, puis ramenés à l'intérieur par le vent.

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 donnée des sables qui à l'état pure renfermes 80 à 90% de silice.

C'est ce qui dégage de la carte géologique et structurale établit par J.M. Vila (1978) 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 fer oxydé donne au sable sa coloration rouge, brune ou jaune (source de Bouglès).

Les travaux réalisés dans la région (Khérici, 1985 ; Ramdani, 1996 ; Hani, 2003) permettent de distinguer :

- ❖ Des sables blancs ou jaune claire généralement perméables situés au centre du massif dunaire ;
- ❖ 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 précédentes ;
- ❖ Des vases sablo-limoneuse déposées au fond des marigots « Nechaas » de couleur noir en relation avec la décomposition des végétaux.

Les analyses granulométriques effectuées à différents points du massif dunaire (en surface et en profondeur) ont bien confirmé que ces sables sont homogènes et d'origine éolienne (bien superposables à la courbe standard des dépôts éoliens).

La granulométrie est fine à moyenne (75 à 85 %), les grains ayant un diamètre de 0.15 – 0.5 mm. Il s'en suit en l'absence d'argile une bonne perméabilité de la formation (10^{-4} à 10^{-3} m/s) de telle sorte que l'eau précipitée y pénètre immédiatement et totalement.

Ces sables jouent ainsi le rôle de filtre naturel et de magasin aquifère. Seuls les sables des bas reliefs argilo - gréseux ont une moins bonne perméabilité (10^{-6} m/s) mais une capacité de rétention supérieure due à la fraction argileuse provenant de l'érosion (Joleaud, 1936).

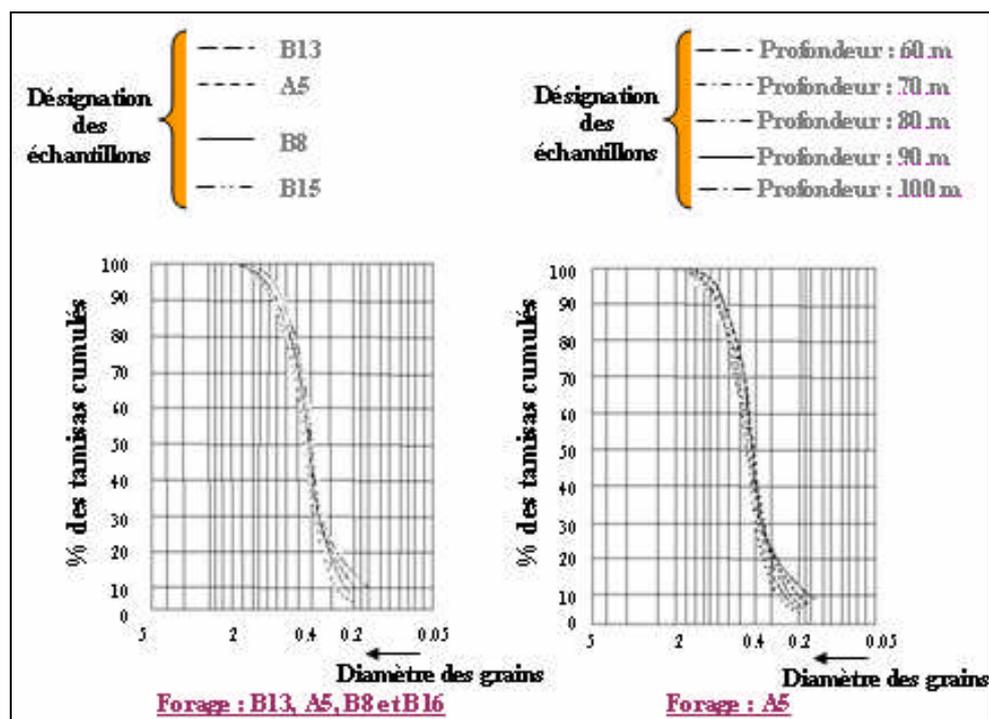


Fig.4 - Analyse granulométrique au niveau des forages dans le massif dunaire de Bouteldja.

II.4- Cadre structurale

Les études de la SONATRACH ont montré que l'ensemble sous Numidie était charrié et non placé. Le Numidien repose en contact anomal sur le substratum sous jacent. Les sédiments alluviaux, avec quelques influences lacustres ou marines, comblent une zone d'effondrement constituée par deux fossés (fossé de Ben Ahmed d'axe NS et fossé de Ben M'hidi d'axe SW, NE) séparés par un haut fond d'élévation de Daroussa ou affleurent les grès Numidien, le substratum numidien se retrouve à plus de 900 mètres au cœur du fossé de Ben M'hidi.

II.5- 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 l'Est de Bouteldja et au Sud de la plaine de Tarf, un puits a recoupé des marnes bleu 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 de 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 littorale ont favorisé la création de lagunes marines. Ces dernières se sont

transformées peu à peu en zones marécageuses et lacs ou 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 formes d'éboulis.

A la fin e cette phase, une lapidification des sables par un ciment calcaire a donné naissance a des grés dunaire désignés par Hilly (1962) : des arénites calcaires ou calcarénites.

Durant la phase transgression, les dunes rubéfiés formés au cours de la régression se façonnent en sables rouges. Au niveau aussi des oueds, les terrasses continuent a 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 végétale 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).

II.6- La tectonique

En ce qui concerne la tectonique de la région, elle s'avère très variée et caractérisée par des phases anti-quaternaires dont les formes résultantes sont en générale des horsts et grabens ainsi que d'autres formes tels que les plis allongés et les anticlinaux des massifs numidiens. La majorité de ces plis ont une orientation générale Sud - Ouest et Nord – Est.

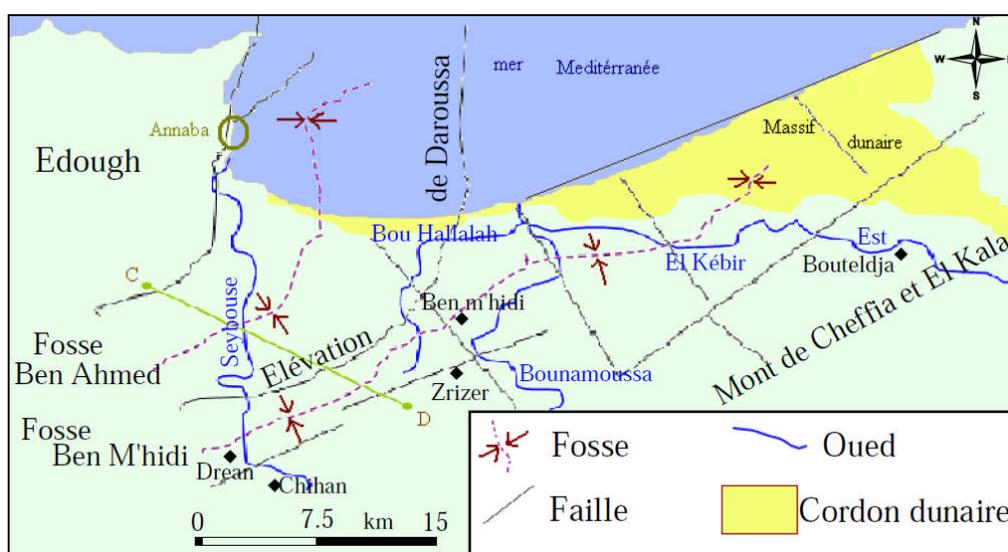


Fig.5- Carte schématique tectonique (D'après SONATRACH modifiée).

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 ;
- ❖ 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 grès 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.

Conclusion

L'étude géologique, structurale et tectonique du massif dunaire de Bouteldja, nous permettons de ressortir que :

- Le Quaternaire est représenté sur une grande majorité des terrains dans la région. Le processus de sédimentation est le résultat des cycles de transgression et régression constitue un matériel de remplissage avec une importance hydrogéologique.
- Les argiles et les grès numidiens se localisent au niveau des collines et des montagnes et forment des terrains de très faible perméabilité.
- Les dunes constituées de matériaux sableux représentent des zones d'alimentation et de stockage des eaux souterraines du massif dunaire de Bouteldja.

HYDROCLIMATOLOGIE

III.1- Introduction

La connaissance de l'évolution pluviométrique est importante pour comprendre et d'essayer de mieux interpréter les comportements des piézomètres implantés dans le secteur d'étude. Cependant l'évolution du niveau de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja dépend des précipitations mais également d'un certain nombre de paramètres qui régissent d'une part le ruissellement et d'autre part l'évapotranspiration.

Avant l'exposition des différents paramètres climatiques dont nous disposons et qui influencent la recharge de la nappe, un contrôle de qualité des données sera appliqué sur l'ensemble des données pluviométriques et enfin une discussion concernant l'évolution pluviométrique.

III.2- Caractéristiques climatiques

Notre étude est basée sur les données disponibles des deux stations pluviométriques, les Salines et Ain Assel pour une période d'observation de 20 ans (1990/2010).

Tableau 3: Les coordonnées Lambert des stations pluviométriques

Les coordonnées Lambert des stations pluviométriques				
Station	Coordonnées			Période d'observation
	X	Y	Z	
Les salines	955.80	403.8	3	1990/2010
Ain Assel	1005.55	400	32	1990/2010

III.2.1-Les précipitations

III.2.1.1- Analyse de la qualité des données collectées

En vue d'une utilisation effective des données pluviométriques, l'analyse primaire de ces séries semble primordiale (Musy et Laglaine, 1992). Elle permet de contrôler la vraisemblance de l'information (test d'indépendance), l'homogénéité spatiale et temporelle des données (test MW), et la représentativité des mesures (BOX PLOT).

III.2.1.1.1- Test d'indépendance: "le test du signe"

Vise à vérifier le caractère aléatoire de la variable étudiée pour s'assurer que les éléments de la série des données étudiées sont vraiment indépendants les uns des autres et sont donc le résultat du hasard.

➤ Démarche

- Le test du signe consiste à calculer la médiane (Me) de la série d'observations aux deux stations, ($Me_{\text{les salines}} = 857,8$; $Me_{\text{Ain Assel}} = 666,25$) et à remplacer chaque valeur de X par un signe plus (+) si x_i est supérieur à Me et un signe moins (-) si x_i est inférieur à Me;
 - U_{obs} le nombre de changements des signes (+) et (-) dans la séquence étudiée (dans ce cas: $U_{\text{obs}} = 12$);
 - N_1 et N_2 le nombre de signes de part et d'autre de la médiane (dans ce cas: $N_1 = 11$; $N_2 = 9$);
 - Le test du signe cherche à comparer la valeur de U_{obs} à une valeur critique ($U_{N_1;N_2, \alpha}$) correspondant à une probabilité donnée α appelée seuil de signification (tabulée);
 - Si $U_{\text{obs}} \in] U_1, U_2 [$: accepter l'hypothèse nulle H_0 au seuil α .
 - Si $U_{\text{obs}} \notin] U_1, U_2 [$: rejeter l'hypothèse nulle H_0 au seuil α .
- Dans notre cas : $U_{\text{obs}} \in] 6-16 [$ [donc on accepte H_0 , les données sont aléatoires.

Tableau 4 : Les valeurs critique du test du signe

TABLE A-10 Critical Values for Number of Runs G		$\alpha = 0.05$ (bilatéral)																		
		Value of n_2																		
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Value of n_1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	3	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
	4	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4
	5	6	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
	6	1	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	7	6	8	9	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
	8	1	2	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	9	6	8	9	10	11	11	11	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
	10	1	2	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	11	6	8	10	12	13	13	13	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
	12	1	2	3	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	13	6	8	10	12	13	14	14	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	14	1	2	3	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	15	6	8	10	12	13	14	14	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	16	1	2	3	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	17	6	8	10	12	13	14	14	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	18	1	2	3	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	19	6	8	10	12	13	14	14	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	20	1	2	3	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

NOTE:

- The entries in this table are the critical G values, assuming a two-tailed test with a significance level of $\alpha = 0.05$.
- The null hypothesis of randomness is rejected if the total number of runs G is less than or equal to the smaller entry or greater than or equal to the larger entry.

From "Tables for testing randomness of groupings in a sequence of alternatives," *The Annals of Mathematical Statistics*, Vol. 14, No. 1. Reprinted with permission of the Institute of Mathematical Statistics.

III.2.1.1.2- Test d'homogénéité

Les deux stations météorologiques, les Salines et Ain Assel, ne sont pas des stations de référence pour la région d'étude. Un contrôle d'homogénéité de leurs données annuelles s'avère donc nécessaire afin d'avoir une cohérence spatiale entre les différentes stations de mesure. Nous appliquons un test d'homogénéité des observations, le test "U", autres appellations: test de Mann-Whitney = test de Wicoxon (le but principal de cet test est de vérifier l'hypothèse d'uniformité ou d'homogénéité de deux groupes d'observations ; tester si deux échantillons de tailles N_1 et N_2 proviennent de la même population.

➤ Principe et démarche

Les données des deux groupes seraient d'autant plus différentes que les observations de l'un des groupes seraient classées suffisamment en avant par rapport à celles de l'autre.

- ▶ définir les deux groupes de données de tailles N_1 et N_2 (ex: pluviométrie extrême avant et après 1990), N_1 dénotant toujours la taille du plus petit échantillon ;
- ▶ fusionner les données des deux échantillons pour former une série de taille : $N = N_1 + N_2$;
- ▶ classer, par ordre croissant, les valeurs de la série obtenue (garder l'identifiant: l'année) ;
- ▶ calculer la somme des rangs (R_1) occupés par les observations de l'échantillon de taille N_1 ;
- ▶ calculer la statistique U_{obs} par la relation :

$$U_{obs} = (N_1.N_2) + (N_1 (N_1 + 1)/2) - R_1$$

➤ Construction du test

Lorsque $N_1 \leq 20$ et $N_2 \leq 40$: le test d'homogénéité compare la valeur de U_{obs} à une valeur critique ($U_{N_1, N_2, \alpha}$) correspondant à une probabilité donnée α appelée seuil de signification (tables de Mann-Whitney).

➤ Formulation d'hypothèses et règle de décision

- ▶ Hypothèse nulle: H_0 : les observations sont homogènes (même population).
 - ▶ Hypothèse alternative: H_1 : les observations ne sont pas homogènes.
- Si $U_{obs} > U_{N_1, N_2, \alpha}$: accepter l'hypothèse d'homogénéité au seuil α , choisi a priori.
 - Si $U_{obs} \leq U_{N_1, N_2, \alpha}$: rejeter l'hypothèse d'homogénéité au seuil α ; l'hétérogénéité est d'autant plus marquée que U_{obs} est plus petit que U critique.

Dans notre cas, N_1 et $N_2 > 20$ et N_1 ou $N_2 > 40$: ne pas utiliser la table de Mann-Whitney, la distribution de la statistique U devient gaussienne: $N(U_{moy}, s_U)$ avec :

$$U_{moy} = (N_1 \cdot N_2) / 2$$

$$s_U = [N_1 \cdot N_2 (N_1 + N_2 + 1) / 12]^{1/2}$$

Pour U_{obs} , on calcule la variable réduite de Gauss: $Z_{obs} = (U_{obs} - U_{moy}) / s_U$.

Règle de décision:

- Si $Z_{obs} \in [-Z_{\alpha/2}, +Z_{\alpha/2}]$: accepter l'hypothèse d'homogénéité ;
- Si $Z_{obs} \notin [-Z_{\alpha/2}, +Z_{\alpha/2}]$: Rejeter l'hypothèse d'homogénéité.

Application numérique :

$$U_{obs} = 135$$

$$U_{moy} = 200$$

$$s_u = 36,96$$

$$Z_{obs} = (135 - 200) / 36,96 = -1,75.$$

Puisque Z_{obs} est dans l'intervalle $-1.96; +1.96$: on accepte l'hypothèse d'homogénéité.

III.2.1.1.3- Tests de détection des données atypiques, non représentatives (en anglais outliers)

Les données atypiques sont des valeurs extrêmes, qui sont exactes et qu'il convient de ne pas modifier dans la base de données et de ne pas confondre avec les valeurs aberrantes, c'est-à-dire qui sont fausses et qui ne passent pas inaperçues.

Deux méthodes utilisées pour la détection des outliers, quantitatives (intervalle de confiance et tests statistiques), graphiques (nuages de points, histogramme, et la boîte à moustache ou BOX PLOT). Pour faciliter la tâche on a utilisé la dernière méthode à l'aide de logiciel BOX PLOT.

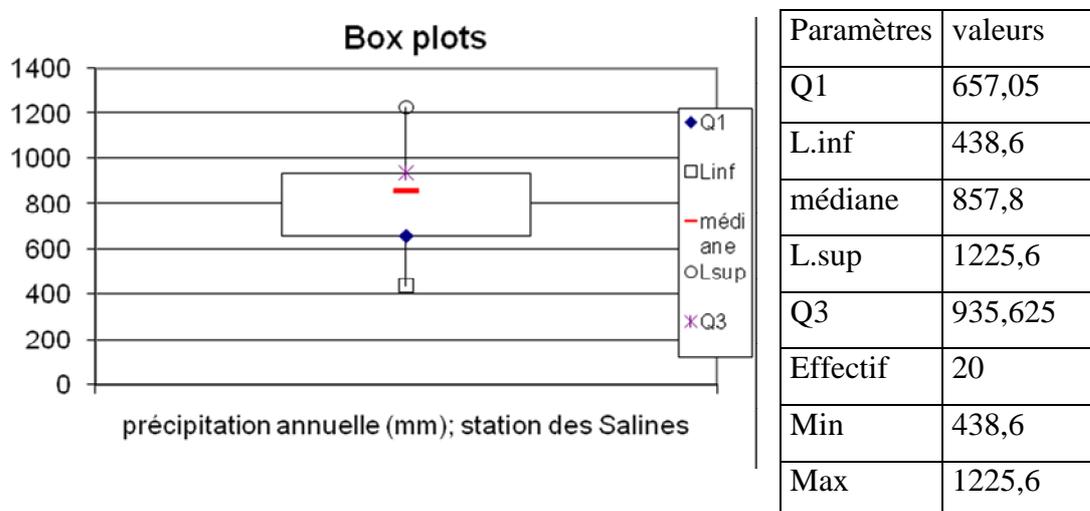


Figure 6 : La boîte à moustaches station des salines.

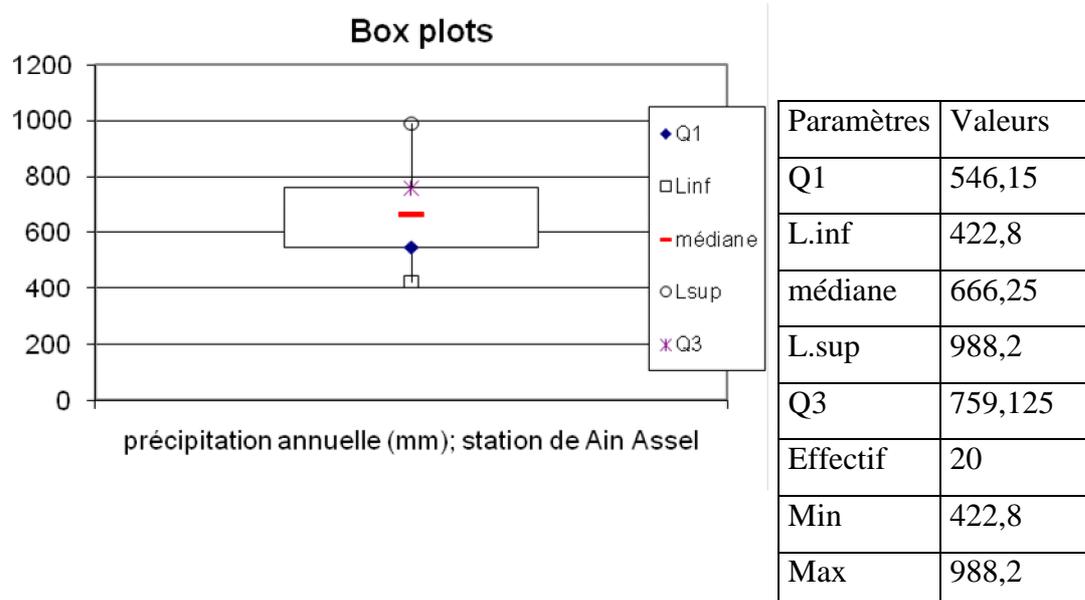


Figure 6 bis : La boîte à moustaches dans la station d'Ain Assel

D'après les deux boîtes à moustaches (Fig.6 et 6 bis), n'existe aucune valeur atypique.

Les données sont aléatoires, homogènes, et ne contiennent pas des valeurs atypiques, donc sont fiable et prêts a une utilisation effective.

III.2.1.2- Précipitations moyennes mensuelles

La précipitation moyenne mensuelle nous permet de donner un aperçu sur les variations mensuelles et pluriannuelles des précipitations en se basant sur des calculs de la moyenne arithmétique des hauteurs des précipitations du mois considéré pour un nombre d'années quelconques.

Les hauteurs des pluies moyennes mensuelles enregistrées durant les périodes d'observation (1990 - 2010) sont illustrées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 5 : Précipitations moyennes mensuelles en mm (1990/2010)

Station /mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Les Salines	49,07	69,18	131,22	149,41	112,98	96,16	67,00	80,64	37,33	11,95	3,01	8,80
Ain Assel	48,04	52,51	130,89	132,5	112,91	91,18	65,39	76,3	34,1	7,9	2,76	5,61

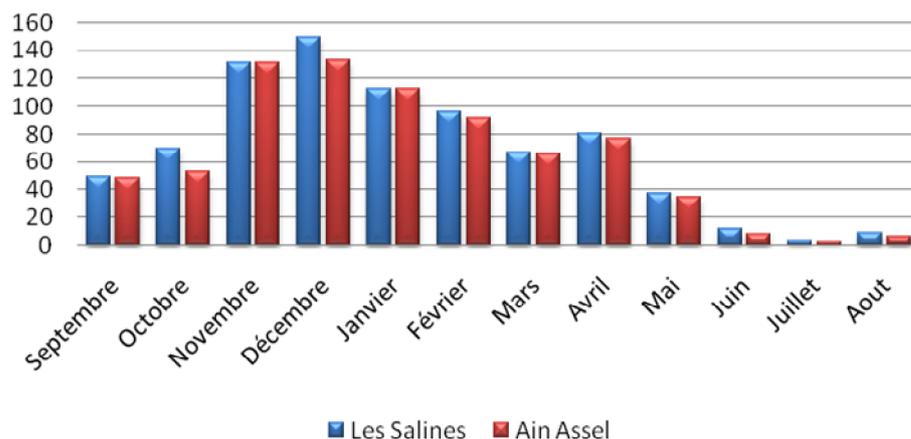


Figure 7 : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles aux stations des salines et Ain Assel (1990/2010)

L'histogramme des précipitations moyennes mensuelles (Fig. 7) des deux stations, les Salines et Ain Assel, montre un accroissement des précipitations allant du mois de septembre jusqu'au mois de Décembre ou atteindre les valeurs maximum 149, 41 mm et 132,5 mm successivement. A partir du mois de Janvier débute la baisse des précipitations qui se poursuit jusqu'au mois d'Août. Les valeurs minimum sont marquées au mois de juillet ou les précipitations sont presque nulles 3,01mm pour la station des Salines et 2,76 mm pour la station d'Ain Assel.

III.2.1.3- Précipitations moyennes annuelles (PMA)

Les hauteurs des pluies moyennes annuelles enregistrées par les deux stations pour 20 ans d'observations sont comme suite:

Tableau 6 : Précipitations moyennes annuelles en mm (1990/2010)

Précipitations moyennes annuelles en mm (1990/2010)					
Année	Les Salines	Ain Assel	Année	Les Salines	Ain Assel
90/91	952,4	689,3	00/01	860,5	550,7
91/92	890,6	684,6	2001/2002	489,8	460,3
92/93	861	644,1	2002/2003	1225,6	772,1
93/94	590,1	519,7	2003/2004	951,3	708
94/95	668,6	548,3	2004/2005	1158,6	988,2
95/96	930,4	807	2005/2006	622,4	612,3
96/97	438,6	422,8	2006/2007	855,1	647,9
97/98	1011,6	941	2007/2008	706,9	539,7
98/99	881,9	841	2008/2009	750,6	687,4

99/00	606,1	459,6	2009/2010	850,4	754,8
-------	-------	-------	-----------	-------	-------

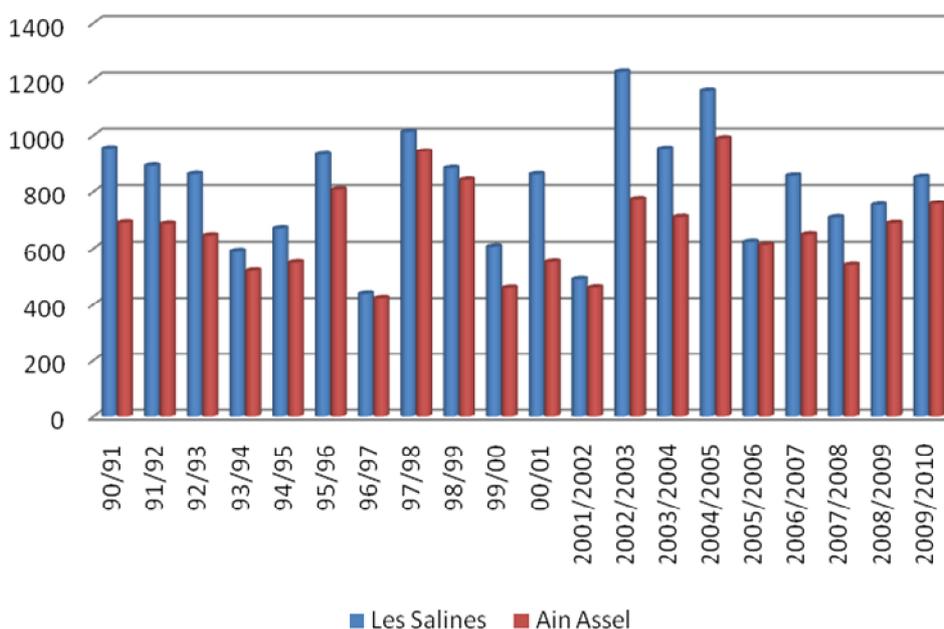


Figure 8 : Précipitations moyennes annuelles en mm (1990/2010)

III.2.1.4 - Variabilités des précipitations

Les irrégularités interannuelles des précipitations sont traduites par le coefficient de variation (cv) égale au rapport de l'écart type à la moyenne.

Tableau 7: Les irrégularités interannuelles des précipitations

P (mm) /stations	Les salines	Ain Assel
Max	1225,6	988,2
Min	438,6	422,8
Moyenne	815,125	663,94
Ecart type	206,38	156,33
CV	0,25	0,23

Le coefficient de variation : $cv = \frac{\sigma P}{P}$ avec :

$$\text{Ecart type : } \sigma P = \sqrt{\frac{\sum (P_i - \bar{P})^2}{n}}$$

Pour $n = 20$

$$\text{La moyenne : } \bar{P} = \frac{\sum P_i}{n}$$

Taille de l'échantillon n .

Les coefficients de variations varient d'une station à l'autre, 0.25 pour la station des Salines et 0.23 pour la station de Ain Assel, ce qui traduit par une certaine régularité de la distribution des précipitations moyennes annuelles tant au niveau spatial que temporel.

III.2.1.5 - Caractéristiques climatiques d'aridité

Emmanuel DE.MARTONNE (1925) a proposé une formule climatologique, appelée indice d'aridité, fonction de la température (T) et des précipitations (P) de la forme:

$$A = P / (T + 10)$$

Avec:

A : indice d'aridité annuelle;

P : précipitations moyennes annuelles en mm;

T : températures moyennes annuelles en °C.

Selon DE MARTONNE :

- Si A est inférieur à 5: le climat est hyperaride.
- Si A est compris entre 5 et 10: le climat est très sec.
- Si A est compris entre 10 et 20: le climat est sec.
- Si A est compris entre 20 et 30: le climat est tempéré.

- Si A est supérieur à 30: le climat est humide (l'écoulement est abondant).

Les résultats des calculs sont récapitulés dans le tableau ci-dessous:

Tableau 8 : Indice d'aridité annuelle (D'après la formule DE MARTONNE)

stations	Indice d'aridité
Les salines	28,08
Ain Assel	23,83

Les deux stations montrent que le climat de notre région d'étude est un climat tempéré (pour une valeur comprise entre 20 et 30).

III.2.1.6 - Coefficient pluviométrique (H)

Le coefficient pluviométrique permet de déterminer pour une station donnée si l'année est excédentaire ou déficitaire. L'année est d'autant plus excédentaire que $H > 1$. Si $H < 1$, l'année correspondante est déficitaire.

Le terme H est défini par le rapport de la pluviométrie P d'une année à la pluviométrie moyenne \bar{P} pour une période de n années;

$$H = P / \bar{P}$$

Avec:

H : coefficient pluviométrique;

P : pluviométrie d'une année en mm;

\bar{P} : Pluviométrie moyenne en mm.

Tableau 9 : Coefficient pluviométrique des stations des Salines et Ain Assel (1990/2010)

Année	Les Salines	Ain Assel
90/91	1,17	1,04
91/92	1,09	1,03
92/93	1,06	0,97
93/94	0,72	0,78
94/95	0,82	0,83
95/96	1,14	1,22
96/97	0,54	0,64
97/98	1,24	1,42
98/99	1,08	1,27
99/00	0,74	0,69
00/01	1,06	0,83
2001/2002	0,60	0,69
2002/2003	1,50	1,16
2003/2004	1,17	1,07
2004/2005	1,42	1,49
2005/2006	0,76	0,92
2006/2007	1,05	0,98
2007/2008	0,87	0,81
2008/2009	0,92	1,04
2009/2010	1,04	1,14

Les valeurs du coefficient pluviométrique obtenues montrent une alternance entre les années excédentaires et les années déficitaires. Cette évolution est indiquée par la figure ci-dessus et qui met en évidence les différentes années excédentaires et les années déficitaires au niveau des deux stations (les Salines et Ain Assel).

III.2.1.7 - Examen de la normalité des précipitations

Avant de pouvoir exploiter les données pluviométriques dans la région d'étude, il importe de les ajuster tout d'abord à la loi normale ou loi Gaussienne. Sur une période de 20 ans allant de 1990 à 2010, nous avons réalisé un examen visuel sur les valeurs de précipitations à l'échelle annuelle des deux stations, les Salines et Ain Assel, pour savoir si cet échantillon de 20 valeurs suit la loi normale. La procédure utilisée est la suivante :

- Classement de la série des modules pluviométriques dans l'ordre croissant, associant à chaque valeur un rang r .

- Détermination pour chaque valeur de la fréquence empirique, utilisant la formule de Hazen :

$$F = \frac{r - 0.5}{n}$$

, r étant le rang de chaque valeur et n la taille de l'échantillon. A chaque fréquence empirique, nous avons fait correspondre ainsi une variable normale centrée et réduite.

- Construction du graphe des valeurs pluviométriques en fonction de la variable réduite de Gauss $u = \frac{Fi - \bar{P}}{\sigma P}$.

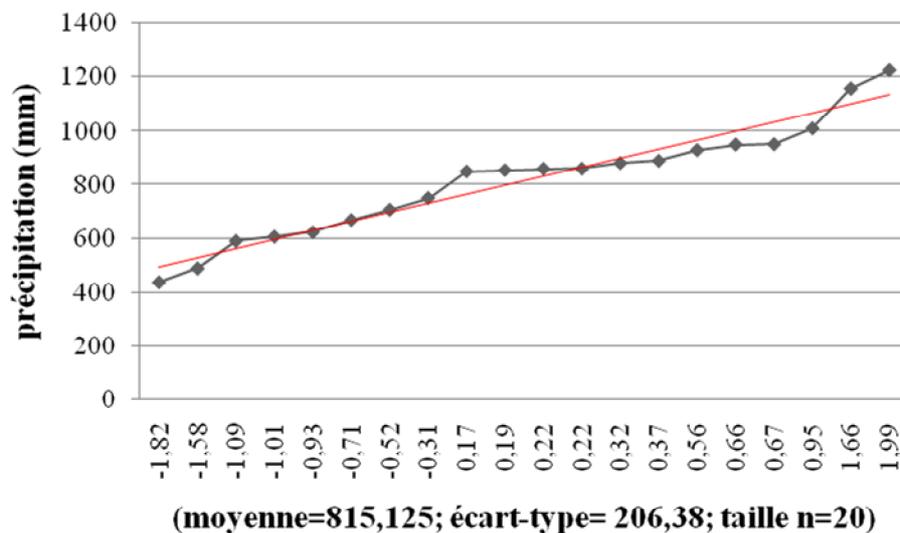


Figure 9 : Ajustement à la loi de Gauss des données pluviométriques de la station des Salines.

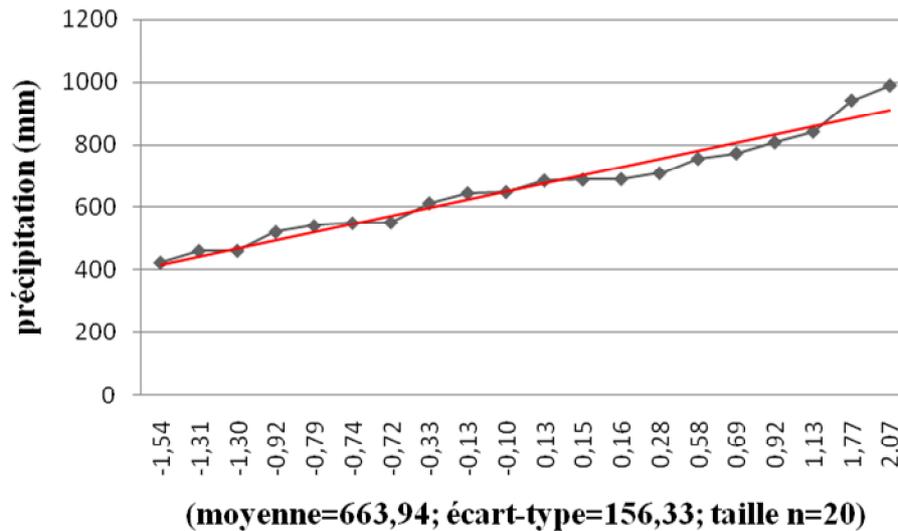


Figure 10 : Ajustement à la loi de Gauss des données pluviométriques à la station d'Ain Assel.

Un examen visuel des graphiques représentatifs d'ajustement à la loi normale (Fig. 9 et 10) affirme que les valeurs pluviométriques annuelles des stations de référence s'ordonnent suivant la loi normale.

III.2.1.8 - Calcul de la lame d'eau moyenne précipitée

En climat méditerranéen, la moyenne pluviométrique ne reflète pas la réalité climatique, pourtant sa détermination demeure nécessaire pour l'étude de l'abondance fluviale et permet de cerner la variabilité des précipitations sur de longues séries d'observations.

Deux méthodes peuvent être utilisées pour le calcul de la lame d'eau précipitée (ARITHMETIQUE et THEISEN). Selon la première méthode la lame d'eau moyenne précipitée est égale à :

$$\overline{H} = \frac{\sum P_i}{n}$$

\overline{P}_i : Précipitation annuelle moyenne pour chaque poste pluviométrique en mm;

n : nombre de poste.

$$\overline{H} = 762.02 \text{ mm}$$

III.2.2 - La température

La température de l'aire est un facteur de grande influence sur le bilan hydrique du fait qu'il conditionne l'évaporation. Elle varie sous l'influence de plusieurs facteurs telle que

l'altitude par un gradient thermique varie selon SELTZER de (-0,5 °c) chaque fois qu'on monte plus de 100 m, ainsi que l'influence des océans.

III.2.2.1 - Les températures moyennes mensuelles

L'analyse des données de la température est basée sur les données relevées au niveau des deux stations Les Salines et Ain Assel (1980/2010).

Tableau 10 : Températures moyennes mensuelles en °C (1980/10)

Mois Station	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
les salines	23,03	20,01	51,61	13,11	11,53	11,65	13,25	15,13	18,25	21,9	25	25,79
Ain Assel	23,3	19,7	15,39	12,31	10,74	11,19	13,15	14,98	18,32	21,89	24,48	25,66

L'histogramme des températures moyennes mensuelles montre une différence assez proche entre les températures des deux stations (Fig. 11).

Les plus faibles valeurs sont mesurées aux mois de décembre, janvier, février et mars où on remarque que le mois le plus froid est le mois de janvier (avec une température de l'ordre de 11.53°C aux Salines et de 10.74°C à Ain Assel).

Par contre les plus fortes valeurs caractérisent les mois de juin, juillet et août où on remarque que le mois le plus chaud est le mois d'août (avec une température de l'ordre de 25.79°C aux Salines et de 25.66°C à Ain Assel).

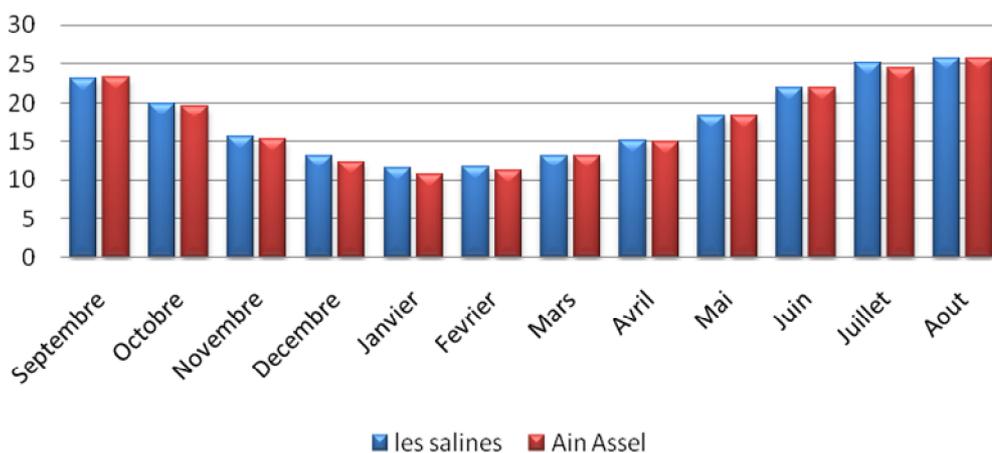


Figure 11 : Températures moyennes mensuelles en °C (1980/10)

III.2.2.2 - Courbe pluvio – thermique

A partir des courbes pluvio-thermiques des deux stations, on distingue une saison sèche s'étant de début de mai au septembre et une saison humide allant de la fin de septembre à mai, avec une précipitation importante qui atteint son maximum pendant le mois de décembre (149,4 mm au Salines ; 132,5 mm à la station de Ain Assel).

Sur le plan temporel, on constate une nette coïncidence typiquement méditerranéenne entre le maximum thermique et le minimum pluviométrique, ce qui se traduit par une sécheresse marquée où l'évapotranspiration atteint son maximum.

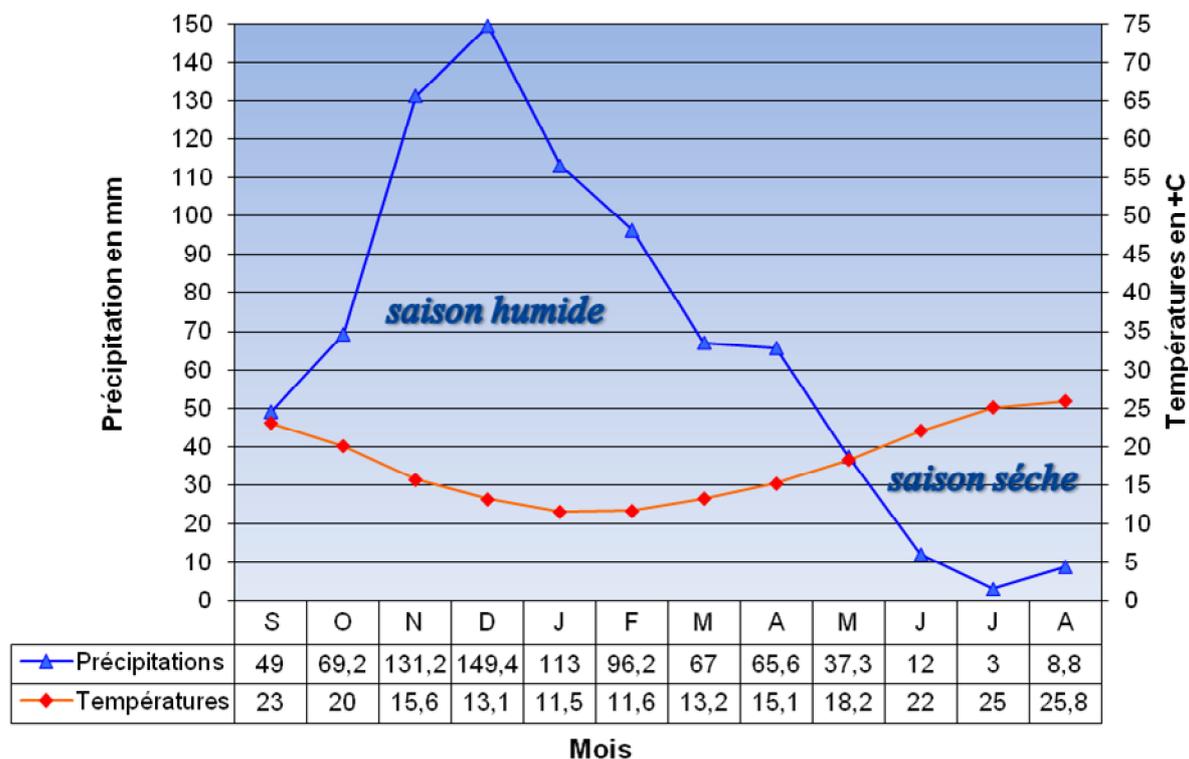


Figure 12 : Diagramme pluviothermique de la station des Salines

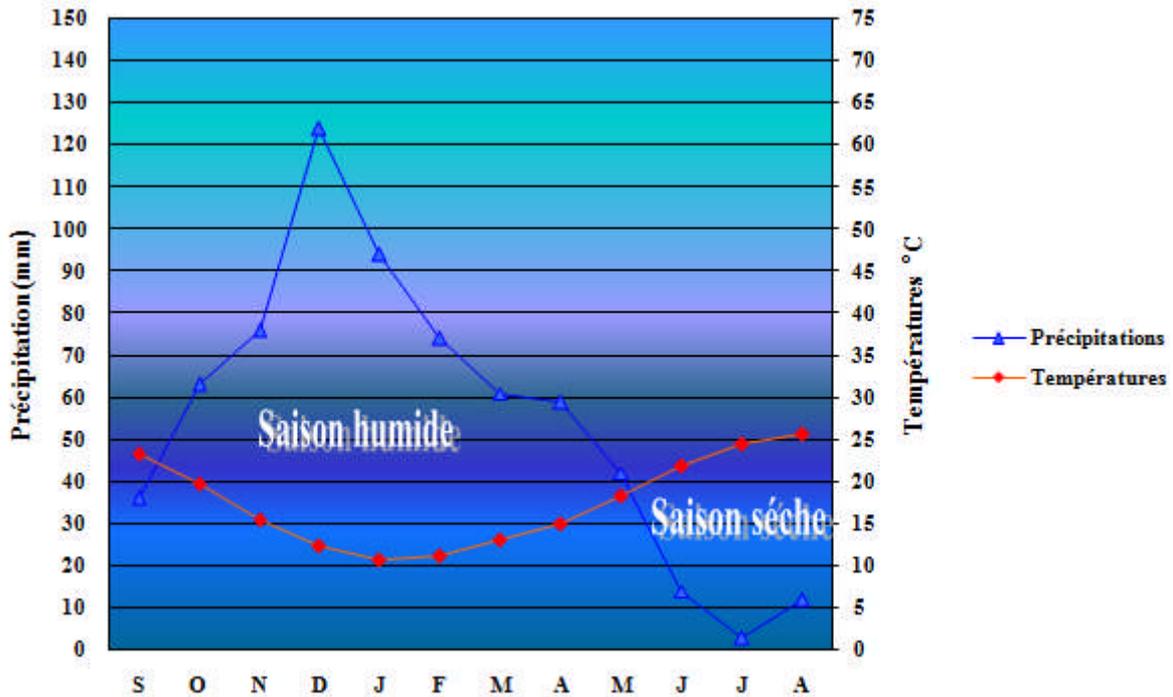


Figure 13 : Diagrammes pluvio-thermiques aux stations de Ain Assel

III.2.3 - L'humidité relative de l'aire: (Station des Salines)

L'humidité relative de l'aire correspond au rapport de la tension de vapeurs réelles observées par la tension de la vapeur saturante à la même température. Elle nous permet de donner une idée sur l'état de l'atmosphère s'il est plus ou moins proche de la condensation.

La variation de l'humidité relative au cours de l'année est irrégulière, elle atteint leur minimum au mois de juillet, tandis que, le maximum est enregistré au mois de janvier.

III.2.4 - Le vent

Le vent est l'un des éléments les plus déterminants des régimes pluvieux, de l'évaporation et par conséquent du climat.

Les mesures réalisées sur le site d'une durée effective de 15 mois entre janvier 2007 et novembre 2009 (hors période d'été car il n'y a pas eu de mesures), font apparaître des vents de toute provenances, avec prédominance du secteur Est à Sud-est et Nord à Nord-ouest, ces derniers étant également prépondérants en intensité (vitesse maximale de 2 à 2,5 m/s) (d'après SOGREAH ALGERIE).

III.3 - Bilan hydrologique

Le bilan permet d'évaluer les apports et les sorties en eau sur une période déterminée. L'évaluation du bilan d'eau est nécessaire aux paramètres physiques du milieu tels que les éléments climatologiques, pédologiques qui interviennent dans le cycle de l'eau.

Le calcul de ce bilan est nécessaire pour mieux définir les besoins globaux et chiffrés du milieu et essentiellement pour l'évaluation du volume des ressources en eau souterraine (infiltration) et de surface (ruissellement). Le bilan hydrologique d'un bassin peut se traduire par l'équation suivante:

$$P = ETR + I+R + \Delta RFU$$

Avec :

P : Lamme moyenne précipitée sur le bassin versant en mm

ETR : Evapotranspiration réelle en mm. L'évapotranspiration réelle correspond à la quantité d'eau effectivement évapo-transpirée au dessus de la surface étudiée. L'ETR dépend de la lamme d'eau stockée dans le sol et la pluviosité.

R : Ruissellement en mm,

ΔRFU : Variation de la réserve facilement utilisable, c'est-à-dire de la lamme d'eau stockée dans le sol, utilisable par les plantes. La RFU commence à alimenter l'ETR quand les précipitations deviennent inférieures à l'ETP.

L'excédent (**EXC**), différence positive, par définition, entre la précipitation et l'évapotranspiration réelle, correspond au surplus des précipitations qui peut ruisseler ou s'infiltrer : l'excédent est assimilé à la pluie efficace, cette notion diffère d'un auteur à l'autre. En hydrogéologie la pluie efficace (P_e) est parfois confondue avec l'infiltration. En hydrologie par contre, la pluie efficace (P_e) correspond à la partie qui alimente les cours d'eau. L'excédent (**EXC**) correspond à la somme des précipitations ruisselées et infiltrées.

III.3.1 - Evapotranspiration

Le terme d'évapotranspiration désigne la quantité de vapeur d'eau rejetée dans l'atmosphère tant par évaporation directe au niveau du sol lui-même que par transpiration des organes aériens des plantes. L'étude de l'évapotranspiration exige que soient définis deux concepts essentiels : l'évapotranspiration réelle (ETR) et l'évapotranspiration potentielle (ETP). Cette dernière est apparue en particulier avec les travaux de Thornthwaite et se définit

comme représentant la quantité d'eau disponible sous forme d'humidité du sol, suffisante pour que les plantes puissent maintenir leur taux de transpiration à un niveau maximal.

Au cours de travaux sur la croissance des végétaux, Thornthwaite, botaniste et climatologue Américain (*in* Brochet & Gerbier, 1975), avait noté que les échanges d'eau entre la plante et l'atmosphère conditionnaient pour une grande part la croissance du tissu végétal. L'évapotranspiration potentielle correspond à une alimentation hydrique optimale des végétaux.

Pour le calcul de l'évapotranspiration, nous pouvons utiliser l'une des méthodes suivantes :

- la méthode Thornthwaite (1948), Thornthwaite & Mather (1955) ont relié l'évapotranspiration potentielle (ETP) à des paramètres facilement accessibles : la température moyenne de l'air et la durée théorique de l'insolation.
- la méthode de Penman (1950) prend en compte quatre facteurs principaux qui agissent sur l'ETP : la température de l'air, la radiation, l'humidité et le vent.
- la méthode de Turc (1954, 1961) utilise uniquement deux variables : la température et la durée d'insolation.

Le bilan hydrologique d'un bassin versant est une méthode de calcul qui permet d'apprécier les relations entre apports et sorties d'eau, sur une période de temps déterminée, qui correspond à une année hydrologique complète. Il sert à vérifier la cohérence de l'ensemble des données recueillies et calculées : mesure de précipitation, calcul d'évapotranspiration, mesure de l'écoulement moyen.

Le non-équipement des stations météorologiques utilisées pour la détermination de certains paramètres, nous oblige à utiliser seulement deux méthodes (Thornthwaite et Turc) basée sur les données fournies.

III.3.1.1 - Méthode de Thornthwaite

Cette méthode nous permet à partir des données de base (précipitation, température, le coefficient thermique mensuel (K) et l'indice thermique mensuel (i)) de calculer l'évapotranspiration potentielle selon la relation suivante :

$$ETP = 16 \cdot \left(10 \cdot \frac{t}{I} \right)^a \cdot k$$

$$i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1.5}$$

$$I = \sum_1^{12} i$$

$$a = \frac{1,6}{100} I + 0,5$$

t est la température moyenne mensuelle du mois considéré ;

ETP est l'évapotranspiration potentielle du mois considéré (en mm d'eau) ;

K est un coefficient d'ajustement mensuel.

Le principe de calcul du bilan hydrologique de Thornthwaite est le suivant :

➤ si pour un mois $P \geq ETP$ on pose que l'ETP = ETR, la quantité d'eau qui reste (P-ETR) va alimenter la RFU jusqu'à son maximum (100 mm) et si elle dépasse cette valeur il y aura un excès (WS) qui va partir soit sous forme d'infiltration efficace vers la nappe, soit sous la forme de ruissellement.

➤ si $P < ETP$, la valeur de $ETR = P + RFU$, jusqu'à égalisation avec ETP. Si la RFU est nulle, il va se produire un déficit agricole $DA = ETP - ETR$, ce dernier paramètre représente alors le besoin des cultures à l'irrigation.

Les résultats de calcul de ces paramètres pour les stations (les Salines et Ain Assel), sont présentés dans les tableaux 12 et 13.

Tableau 12 : Bilan hydrique à la station des Salines (1990-2010)

	Pr	T (°C)	IT	ETP (mm)	RFU (mm)	ETR (mm)	DA (mm)	EXC (mm)	BH
S	49	23	10,1	105,1	0,0	49,0	56,1	0,0	-56,1
O	69	20	8,2	76,3	0,0	69,0	7,3	0,0	-7,3
N	131	15,6	5,6	42,7	88,3	42,7	0,0	0,0	0
D	149	13,1	4,3	29,0	100,0	29,0	0,0	108,3	108,3
J	113	11,5	3,5	24,5	100,0	24,5	0,0	88,5	88,5
F	96	11,6	3,6	24,3	100,0	24,3	0,0	71,7	71,7
M	67	13,2	4,3	37,5	100,0	37,5	0,0	29,5	29,5
A	63	15,1	5,3	51,4	100,0	51,4	0,0	11,6	11,6
M	37	18,2	7,1	79,9	57,1	79,9	0,0	0,0	0
J	12	22	9,4	114,6	0,0	69,1	45,5	0,0	-45,5

J	3	25	11,4	147,7	0,0	3,0	144,7	0,0	-144,7
A	9	25,8	12,0	146,5	0,0	9,0	137,5	0,0	-137,5
Annuel	798,0	17,8	84,8	879,3	-	488,3	391,0	309,7	-81,3

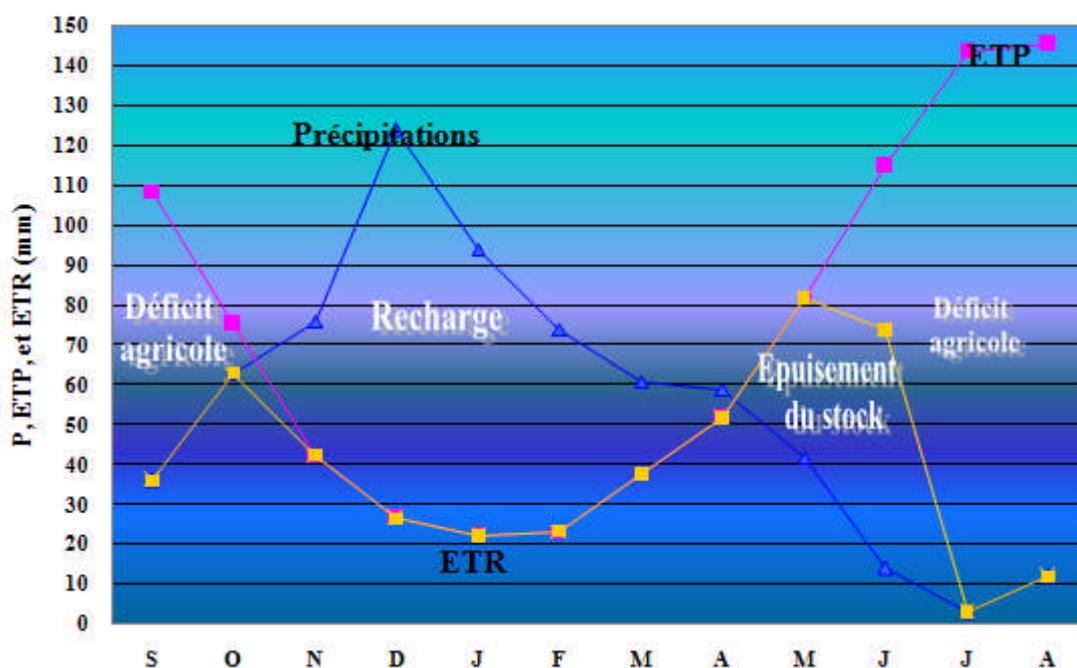


Figure 14 : Représentation graphique du bilan de Thornthwaite (Station les Salines)

Tableau 13 : Bilan hydrique a la station d'Ain Assel (1990-2010)

	Pr	T (°C)	IT	ETP (mm)	RFU (mm)	ETR (mm)	DA (mm)	EXC (mm)	BH
S	36	23,3	10,3	108,6	0,0	36,0	72,6	0,0	-72,6
O	63	19,7	8,0	75,2	0,0	63,0	12,2	0,0	-12,2
N	76	15,4	5,5	42,5	33,5	42,5	0,0	0,0	0
D	124	12,3	3,9	26,5	100,0	26,5	0,0	31,0	31
J	94	10,7	3,2	22,1	100,0	22,1	0,0	71,9	71,9
F	74	11,2	3,4	23,4	100,0	23,4	0,0	50,6	50,6
M	61	13,1	4,3	37,8	100,0	37,8	0,0	23,2	23,2
A	59	15	5,3	51,8	100,0	51,8	0,0	7,2	7,2
M	42	18,3	7,1	82,0	60,0	82,0	0,0	0,0	0

J	14	21,9	9,4	114,9	0,0	74,0	40,8	0,0	-40,8
J	3	24,5	11,1	143,4	0,0	3,0	140,4	0,0	-140,4
A	12	25,6	11,9	145,3	0,0	12,0	133,3	0,0	-133,3
Annuel	658,0	17,6	83,2	873,5	0,0	474,1	399,4	183,9	-215,5

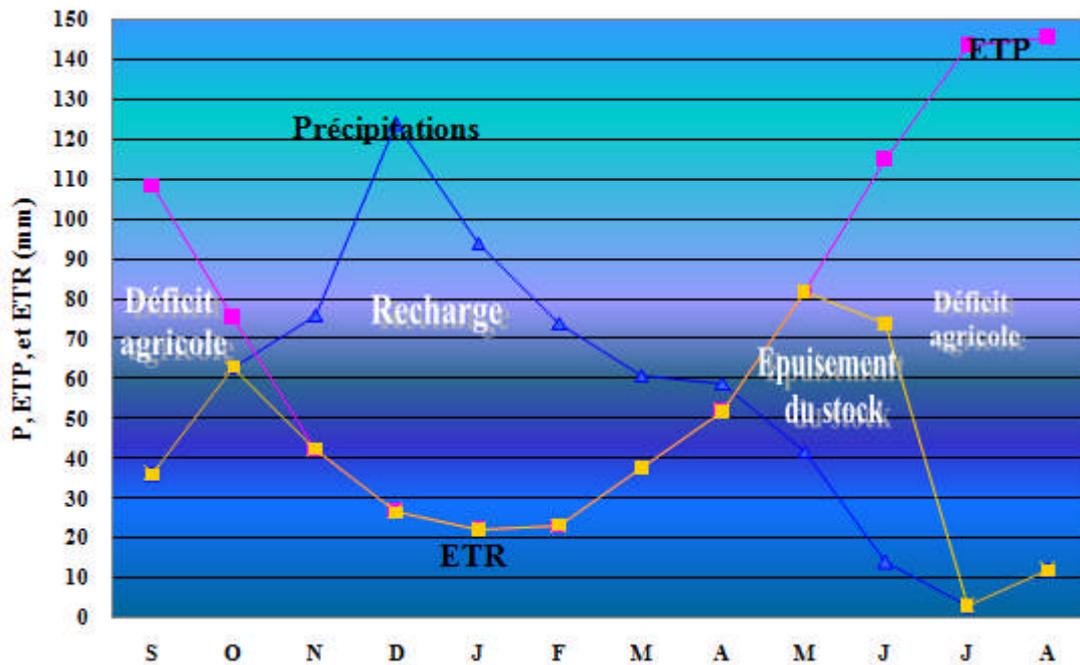


Figure 15 : Représentation graphique du bilan de Thornthwaite (Station Ain Assel)

III.3.1.1.1 - Interprétation du bilan de Thornthwaite

Ce graphe montre que l'évapotranspiration maximum a été observée pendant les mois de juin, juillet et août pour des valeurs entre 114 et 145 mm, ce qui produit un déficit agricole et nécessite une irrigation pour les zones de cultures. Par contre, pendant les mois de décembre, janvier et février, on observe une recharge de la nappe avec une valeur de 100 mm/mois. Lorsque la recharge dépasse la RFU, le surplus d'eau va partir soit sous forme d'infiltration vers la nappe, soit sous forme du ruissellement.

III.3.1.2- Formule de Turc

Cette formule consiste à évaluer directement l'évapotranspiration réelle à partir de la hauteur moyenne de la pluie et de la température moyenne annuelle.

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3 \quad (2)$$

ETR : évapotranspiration réelle en (mm).

P : précipitation moyenne annuelle en (mm).

L : paramètre arbitraire lié à la température.

T : température moyenne annuelle en (°C).

Tableau 14 : L'évapotranspiration réelle selon la formule de Turc

Station	P (mm)	L	T (°C)	ETR (mm / an)
Les Salines	815,12	1030,62	17,85	662,7
Ain Assel	663,94	1011,87	17,59	577,33

Tableau 15 : Comparaison entre les valeurs des deux méthodes

Station	ETR Turc (mm /an)	ETR Thornthwaite (mm / an)
Les Salines	662,7	488,3
Ain Assel	577,33	474,1

III.3.2 - Le ruissellement

Le ruissellement de surface est la quantité d'eau au cours d'une précipitation, échappée à l'infiltration et à l'évaporation.

Le coefficient de ruissellement R a été estimé avec la formule de Tixeront-Berkaloff

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

$$R = P^3/3 \quad \text{quand : } P > 600 \text{ mm.}$$

Avec :

R : ruissellement en mm.

P : précipitation moyenne mensuelle en mm.

ETP : évapotranspiration potentielle.

Les résultats de ruissellement calculé à partir de cette formule sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau 16: Le ruissellement dans les deux stations

Station	P (mm)	R (mm)	R (%)
Les Salines	815,125	180,53	22,14
Ain Assel	663,94	97,56	14,69

III.3.3- L'infiltration

L'infiltration est un paramètre très important dans le bilan hydrique, est définie comme étant le mouvement de l'eau dans un sol en passant par la surface, elle dépend de plusieurs facteurs, les plus importants sont :

- ✓ La nature de sol,
- ✓ La perméabilité et la porosité.
- ✓ La couverture végétale.

Elle est calculée à partir du bilan hydrique, en remplaçant chacun des termes par sa valeur trouvée :

$$I = P - R - ETR$$

Avec :

R : ruissellement en mm.

P : Précipitation moyenne annuelle en mm.

I : Infiltration en mm.

Si $I > 0$: Les entrées sont supérieures aux sorties.

Si $I < 0$: Les entrées sont inférieures aux sorties

Les résultats de l'infiltration sont notés dans le tableau suivant :

Tableau 17 : Tableau récapitulatif du bilan de Thornthwaite

Station	P (mm)	R (mm)	ETR (mm)	I (mm)
Les Salines	815,125	180,53	488,3	146,295
Ain Assel	663,94	97,56	474,1	92,28

Conclusion

Le massif dunaire de Bouteldja est soumis à un climat Méditerranéen, caractérisé par une période humide qui s'étale du mois d'Octobre au mois de Mai et une période sèche qui s'étend du mois de Mai jusqu'au mois de Septembre.

Les moyennes annuelles des précipitations variant entre 815,12 mm et 663,94 mm, sous une température moyenne annuelle de l'ordre de 17,85 °C.

Le bilan hydrique de la zone d'étude montre les caractéristiques suivantes : une évapotranspiration réelle représentant 65,06% des précipitations et plus de 30% d'excédent qui se traduit plus tard en infiltration efficace prouvée par plusieurs auteurs.

HYDROGEOLOGIE

IV. 1 - Introduction

L'aperçu hydrogéologique constitue une étude restreinte orientée surtout vers la structure géométrique et les conditions aux limites du massif dunaire de Bouteldja.

La structure hydrogéologique du massif dunaire de Bouteldja pourrait être schématisée de la façon suivante :

- ❖ Une nappe libre : exploitée par un grand nombre de forages et composée essentiellement des sables.

- ❖ Une nappe profonde reconnue par les forages profonds et par les compagnes géophysiques et constituées de graviers.

IV. 2 - Inventaire des points d'eau

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

IV. 2. 1 - Les sources

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

IV. 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).

IV. 2. 3 - Les forages

Un très grand nombre de forages de différentes profondeurs ont été réalisés dans le massif dunaire durant ces dernières années. Malheureusement, ces forages sont groupés dans la zone de Bouglés, Bourdim et El-Haraba, et peu d'entre eux atteignent le substratum de la nappe.

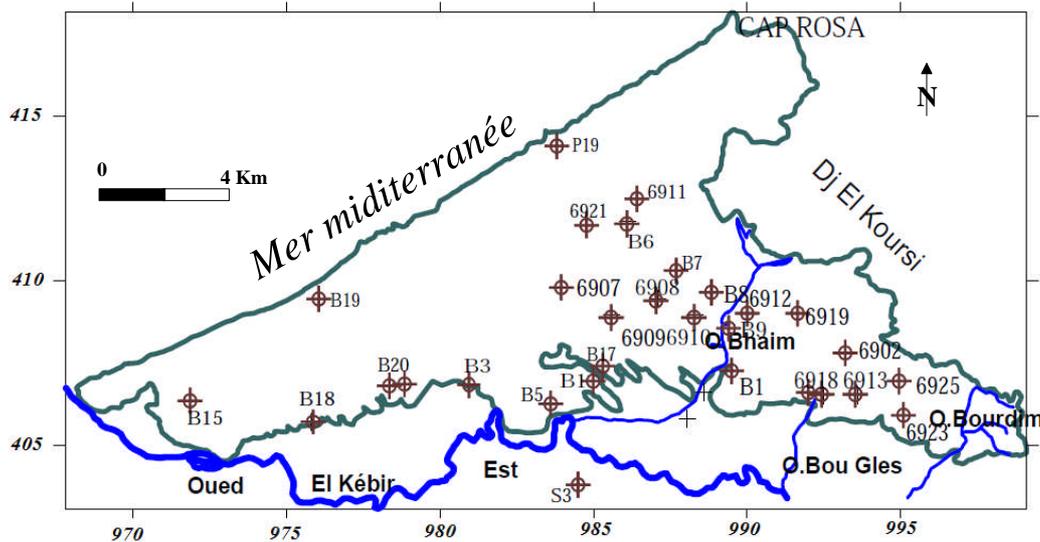


Fig.16- Carte de la répartition des forages dans le massif dunaire de Bouteldja.

IV.3- Définition de La nappe des sables dunaires de Bouteldja

La nappe du massif dunaire est alimentée par les précipitations atmosphériques, les marécages (marais Righia et Oum Lagareb), le ruissellement à partir des pentes favorables des formations numidiennes et en fin les affluents de l'oued El Kébir Est. Elle est limitée :

- Au Nord par la mer Méditerranée d'où la relation souterraine perméable;
- Au Sud par une limite perméable avec les terrasses de l'oued El Kébir Est et avec la nappe profonde des graviers dans lesquelles elle se décharge;
- A l'Est une limite perméable au niveau des grés numidien et une limite imperméable dans la zone argileuse;
- A l'Ouest une limite perméable avec les marécages.

Au nord-est, la nappe libre du massif dunaire est contenue dans les sables éoliens épais de 20m à l'Est et de 120m à l'Ouest (Fig.17). La partie orientale du massif est caractérisée par une augmentation progressive des épaisseurs, suivant une première direction Est-Ouest de l'oued Bourdim (20 m) à l'oued Bouglés (75 m), puis une seconde direction NE-SW du djebel Koursi (70 m) vers Nécha Righia (150 m). La zone centrale englobant la Garaet El Groubzi et El Gouréate présente une épaisseur relativement constante, évaluée à quelques 150 m. Dans toute la partie orientale du massif, la carte montre des épaisissements très importants des alluvions notamment à l'aplomb des thalwegs reconnus par la prospection géophysique (Khérici, 1985; Ramdani, 1996 ; Toubal, 1998).

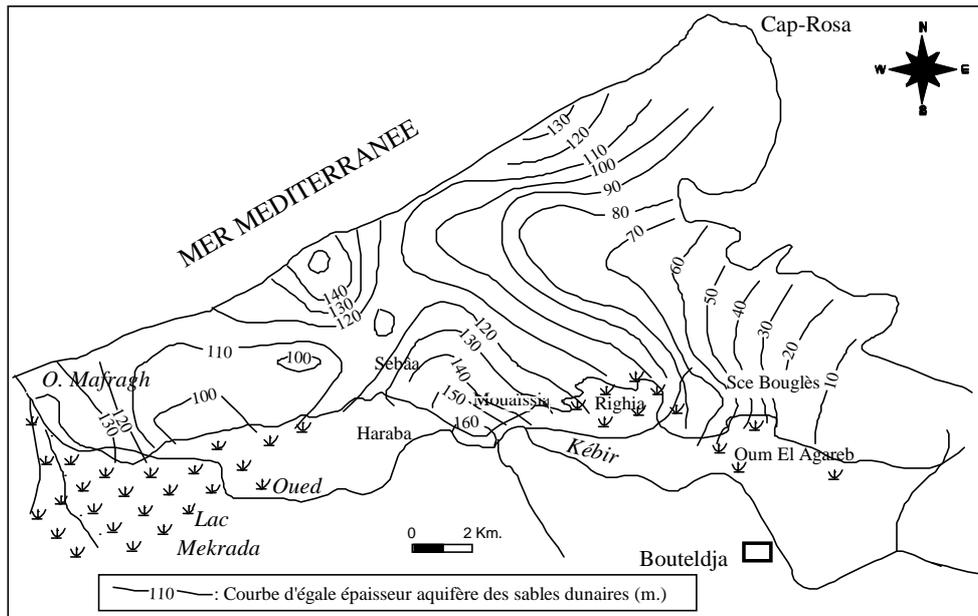
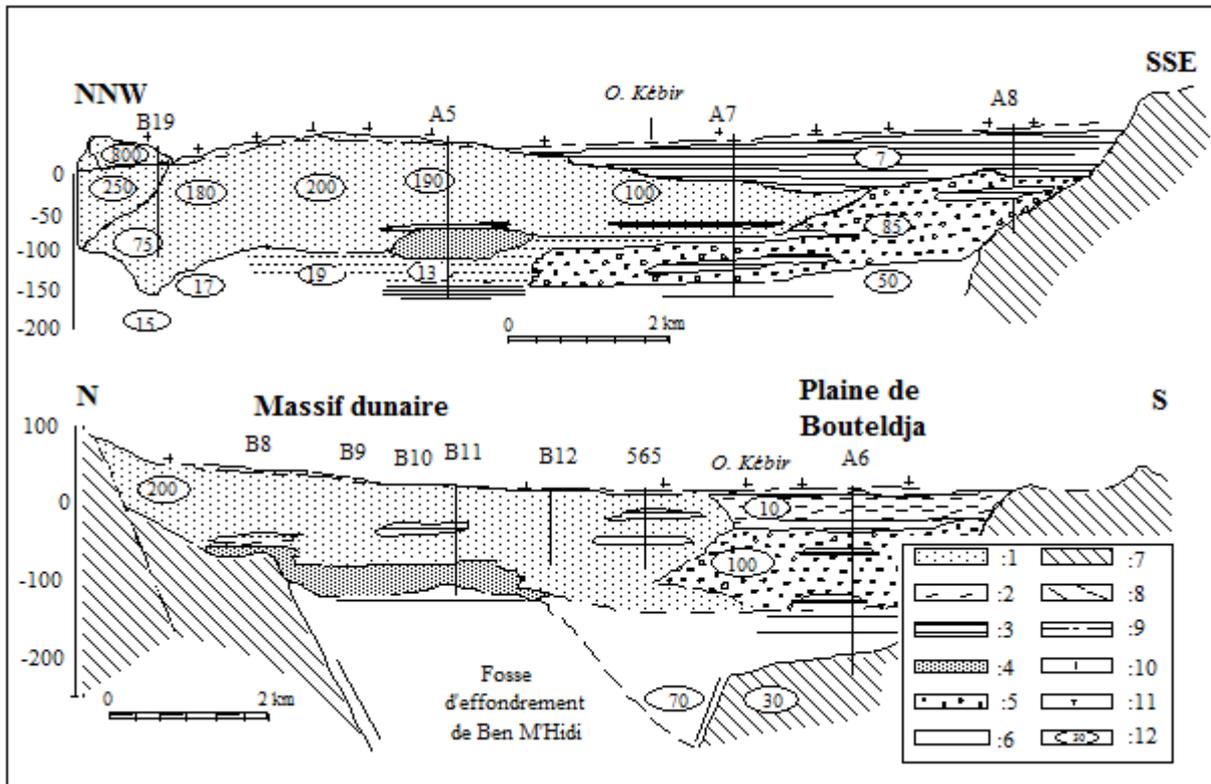


Fig.17- Carte des isopaches des sables dunaires (Source : A. Hani, 2003).



Légende : 1 : Sables dunaires ; 2 : Argiles grises (couverture de la nappe des graviers) ; 3 : Sable très argileux ; 4 : Lentille argileuse ; 5 : Gravieres et galets ; 6 : Argiles grises (substratum de la nappe des graviers) ; 7 : Numidien argilo-gréseux ; 8 : Faille et faille présumée ; 9 : Niveau piézométrique ; 10 : Forage ; 11 : Sondage électrique ; 12 : Résistivité (Ohm.m).

Fig.18 - Coupe au travers de la plaine et du massif dunaire de Bouteldja (Source : A. Hani, 2003).

IV.4 - Géométrie de l'aquifère

Les données des sondages mécaniques et électriques permettent de définir un aquifère contenu dans les formations sableuses de granulométrie fine à moyenne.

Cet important réservoir repose sur un substratum argilo-gréseux du numidien dont la profondeur varie de 300m dans la zone d'EL-HARABA à +50m au Sud Est de la région d'étude (Fig.12).

Les essais de corrélation entre les différents logs de sondages permettent de mettre en évidence une corrélation assez nette au Sud entre la nappe libre du massif dunaire et la nappe des graviers. Cette dernière draine en fait la nappe libre sur toute la limite Sud (R. Nouacer, 1993).

IV.5- Interprétation des coupes hydrogéologiques

IV.5.1- Coupe 1

Cette coupe d'orientation Nord- Sud, emprunte de thalweg de l'oued El-Behaim, l'épaisseur des sables d'environ 120 m. dans la plaine du Kébir, vers le Sud le forage A6 qu'il y a probablement une relation directe entre les sables dunaire et les graviers. Ces derniers sont alimentés par la nappe des sables (Fig.19).

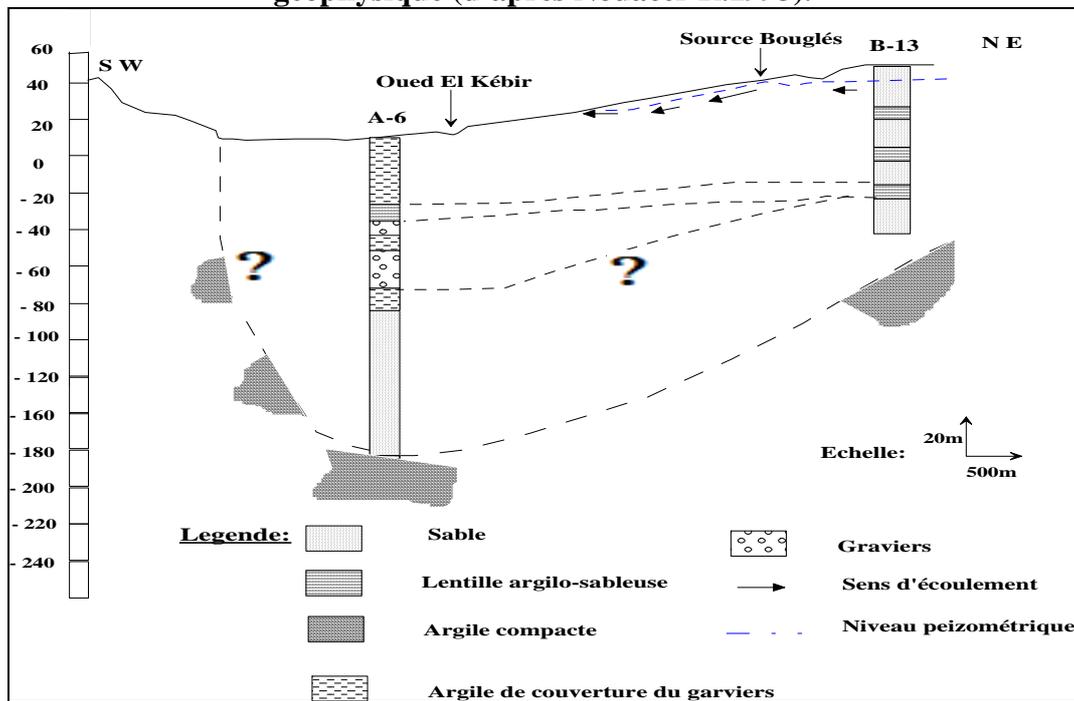
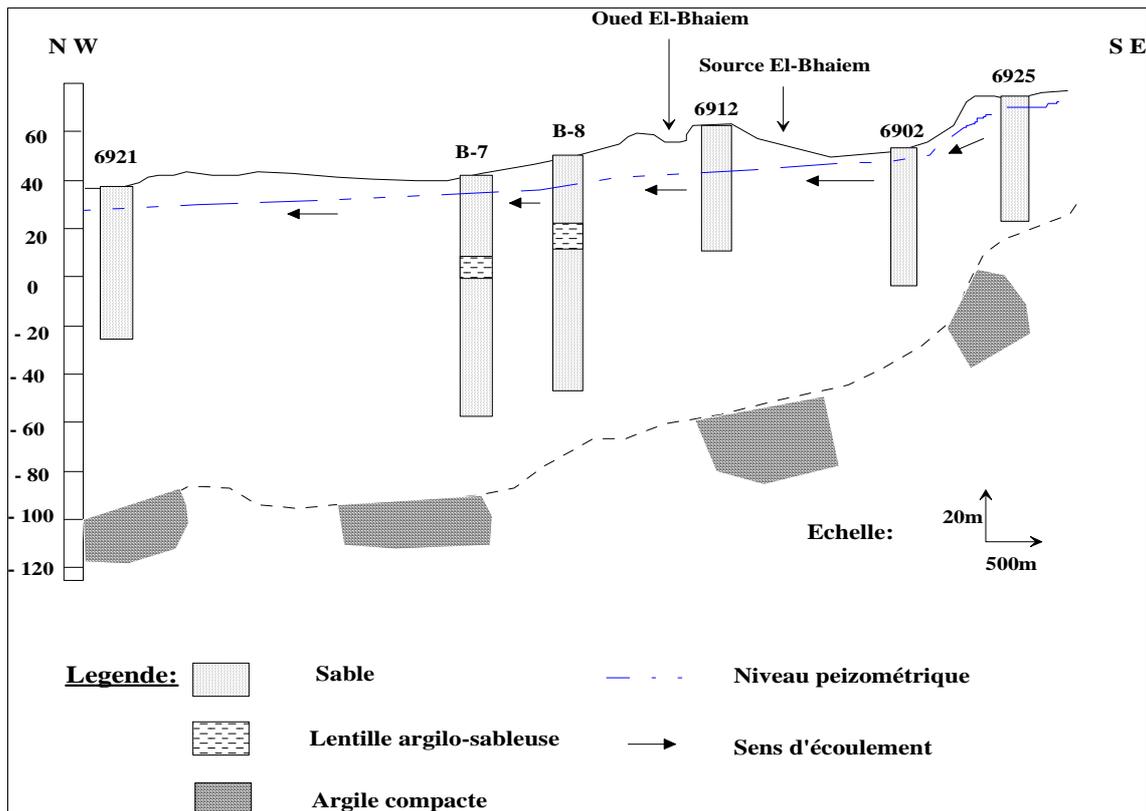
IV.5.2- Coupe 2

Cette coupe d'orientation SW-NE, correspond au thalweg d'Ain Bouglés ; la source prend naissance à la faveur d'une dépression de terrain ; l'épaisseur des sables atteint 80 mètres en moyenne. Vers le Sud, dans la plaine de l'oued Kébir, on note une forte épaisseur de graviers mais le manque de forage a rendu difficile l'établissement de relation entre les sables et les graviers (Fig. 20).

L'allure régulière du substratum présente un pendage vers le Sud, ce qui confirme l'hypothèse d'un écoulement souterrain de la nappe vers la nappe des graviers.

IV.5.3- Coupe 3

Cette coupe assez schématique de direction SW-NE, montre que l'épaisseur des sables augmente de l'Est vers l'Ouest. Ces sables sont localement argileux d'où la difficulté de représenter la proportion d'argile en tout point de l'aquifère. Le substratum présente une allure assez ondulée (Fig.21).



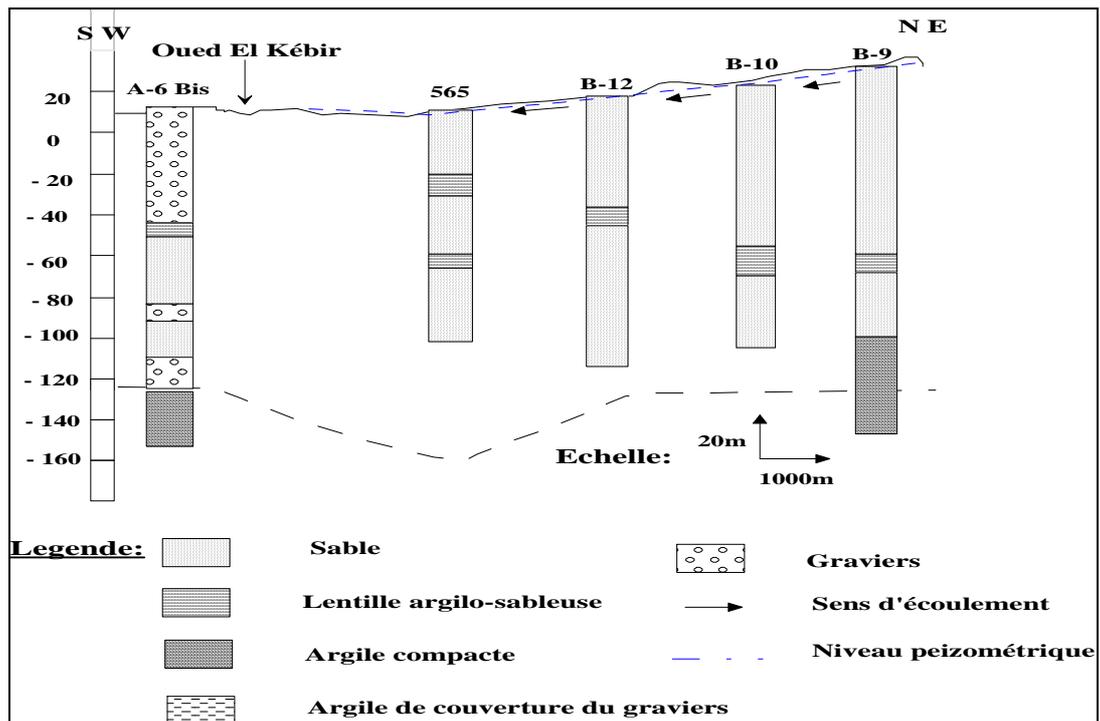


Figure 21 : Coupe schématique hydrogéologique N°3 d'après les coupes des forages et la géophysique (d'après Nouacer R.1993).

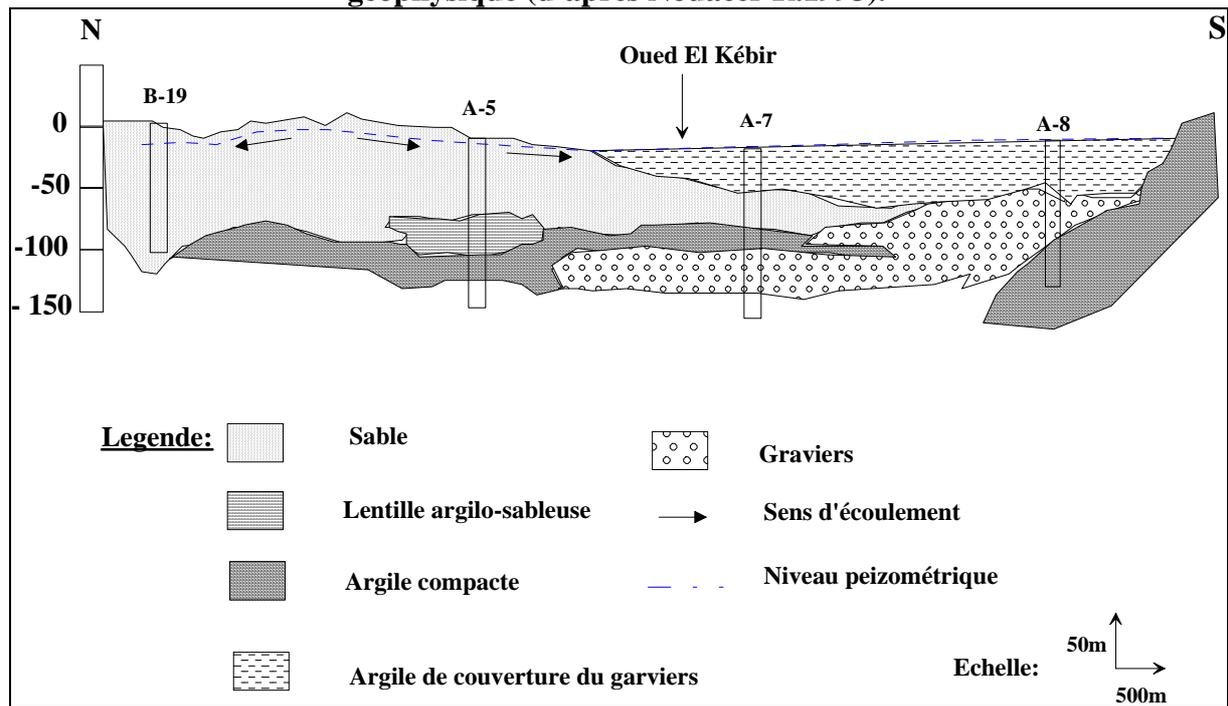
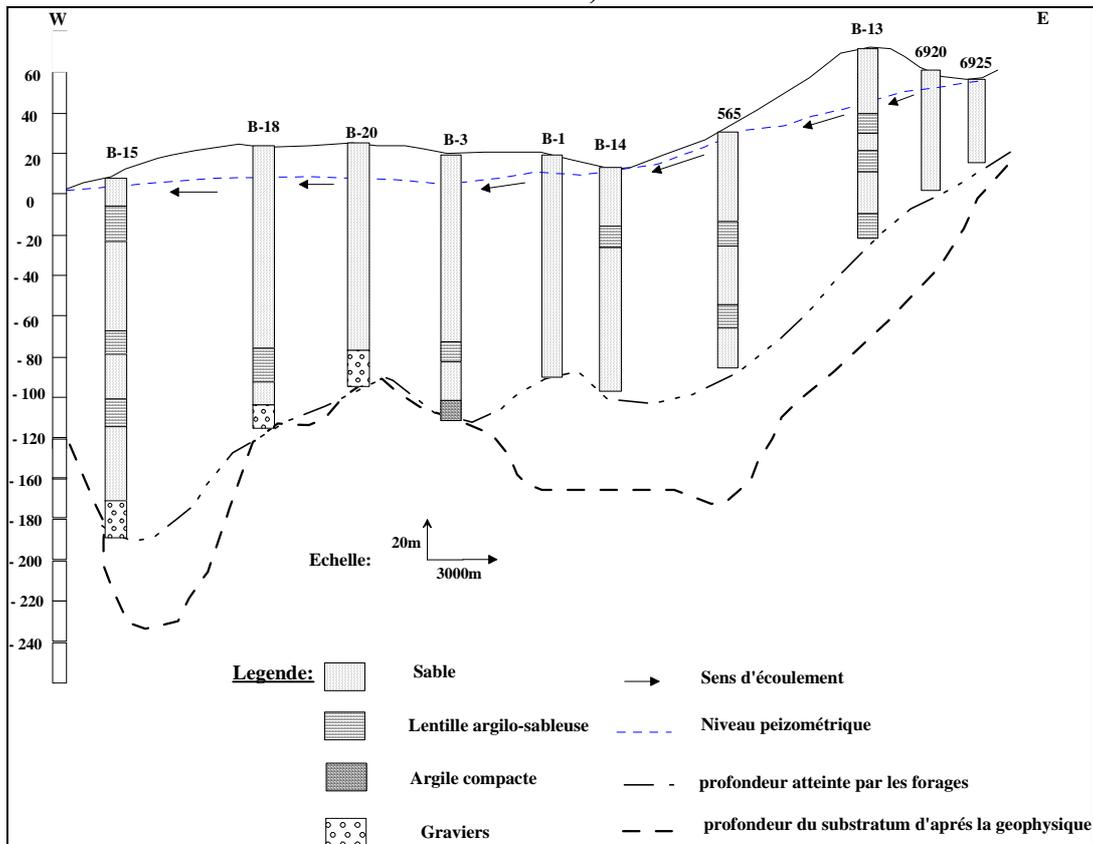
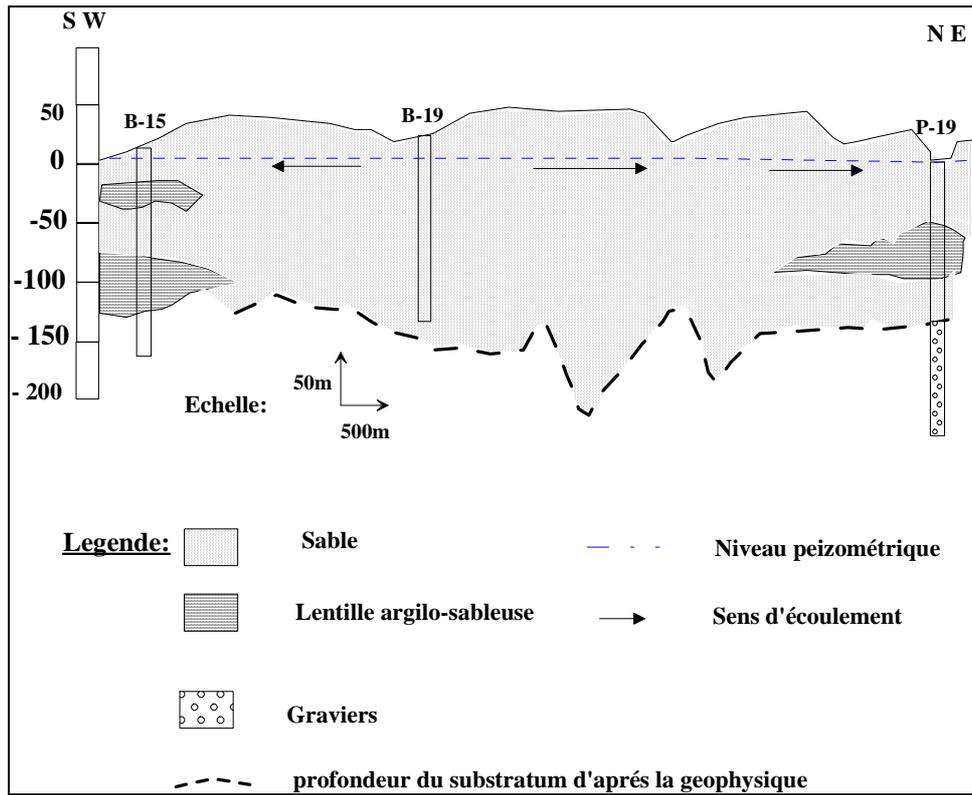


Figure 22 : Coupe hydrogéologique N°4 d'après B. Gaud, 1975 (modifiée) (In Nouacer R.1993).



IV.5.4- Coupe 4

Cette coupe d'orientation N-S, montre que l'épaisseur des sables peut atteindre 120 m environs. Vers le Sud, on note la superposition des sables et des graviers. Tandis que dans la limite Sud, les grès numidiens se relèvent d'environ 100 m et les graviers ont épaisseur de 50 m avec des intercalations argileuses.

La nappe du massif dunaire, libre dans la partie Nord, devient localement captive sous les formations argileuses (au niveau du forage A7). Aussi, on note que le substratum présente un dôme au niveau du forage 6902 ainsi qu'un surélévèrent vers l'Est, conduisant a une réduction de l'épaisseur de l'aquifère (Fig.22).

IV.5.5- Coupe 5

Cette coupe d'orientation N-S, montre le passage des lentilles argilo-sableuses dans différents niveaux. Ces lentilles argileuse sont le résultat de la contamination par les eaux de ruissellement sur les versants argilo-gréseux du numidien (Fig.23).

IV.5.6- Coupe 6

Cette coupe d'orientation NW-SE, montre que l'épaisseur des sables augmente de l'Est vers l'Ouest. On note que le substratum argilo-gréseux présente, d'une part, surélévèrent a l'Est (+ 25 m au dessus du niveau de la mer), et un approfondissement (surcreusement) au voisinage des forages B4 et B5 (moins de 200 m). On note dans la région Ouest, la présence des sables et de graviers d'origine fluviale (Fig.24).

IV.5.7- Conclusion

La nappe libre de Bouteldja est contenue dans les sables éoliens, généralement hétérométriques contenant une forte proportion de sable moyen a fin ; ces sables sont localement argileux ce qui conduit a une grande dispersion des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère, et provoque des déformations au niveau du régime d'écoulement souterraine et complique les liaisons hydrauliques entre oued-nappe.

Ces coupes confirment le passage latéral de la nappe libre à la nappe des graviers et l'écoulement des eaux souterraines de la nappe libre vers les formations gravéleuses des terrains d'El Kébir. Enfin, il convient de noter le phénomène d'artesianisme au niveau des forages B11 et B5, créés d'une part, par différenciation locale argilo-gréseuse es dunes et d'autre part, par le brusque changement latérale de facies.

IV.6 - Piézométrie 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. Ainsi que les points d'eaux que nous disposons pour établir la carte piézométrique sont concentrés dans des agglomérations rurales, ce qu'il ne permet pas d'avoir une idée claire sur l'écoulement de l'eau souterraine.

C'est pour cette cause là que nous nous sommes basés sur des données de forage faites au mois d'Octobre 1994 (A. Ramdani, 1996) et de 1982 (N. Khérici, 1985).

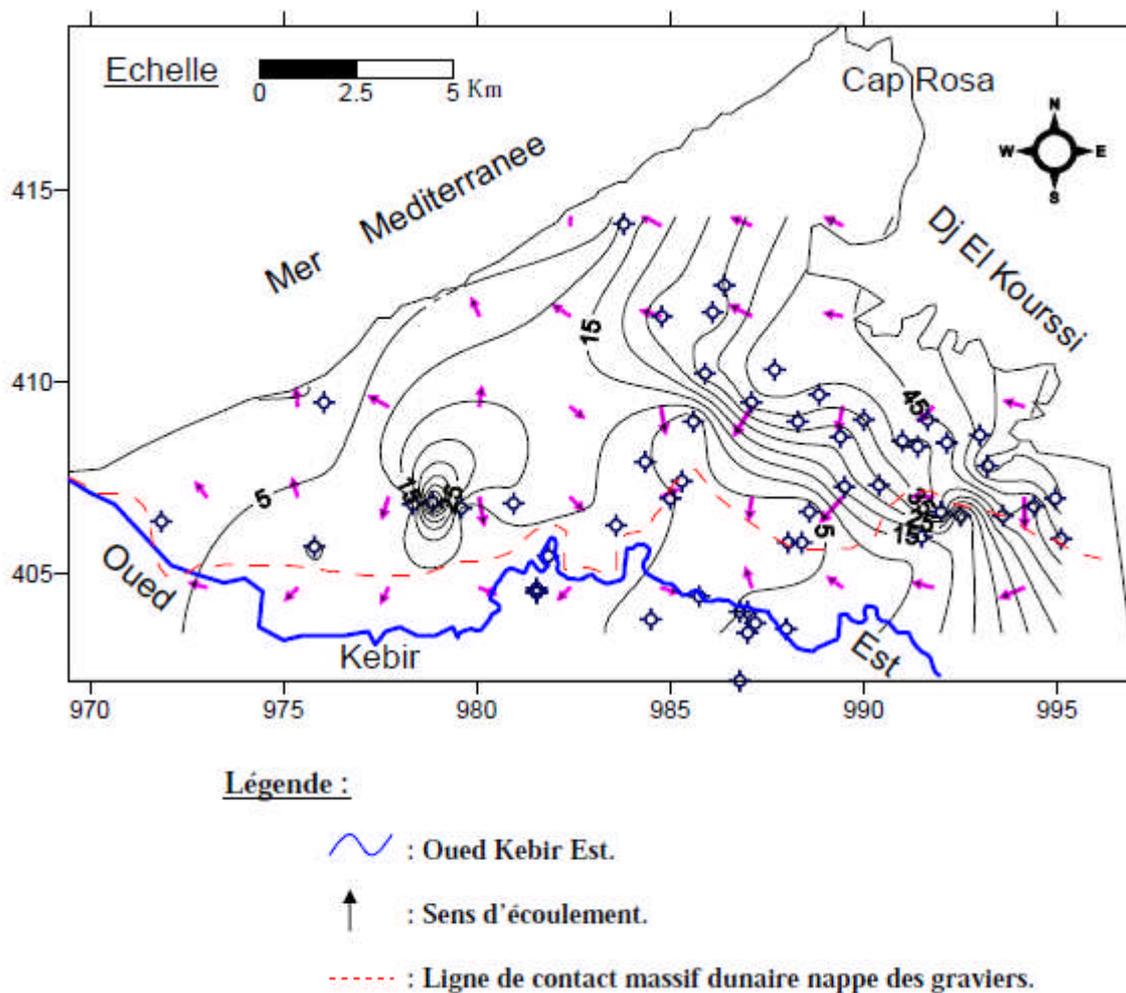


Figure 25 : Carte piézométrique de la nappe du massif dunaire de Bouteldja en Octobre 1994 (Ramdani A. 1996).

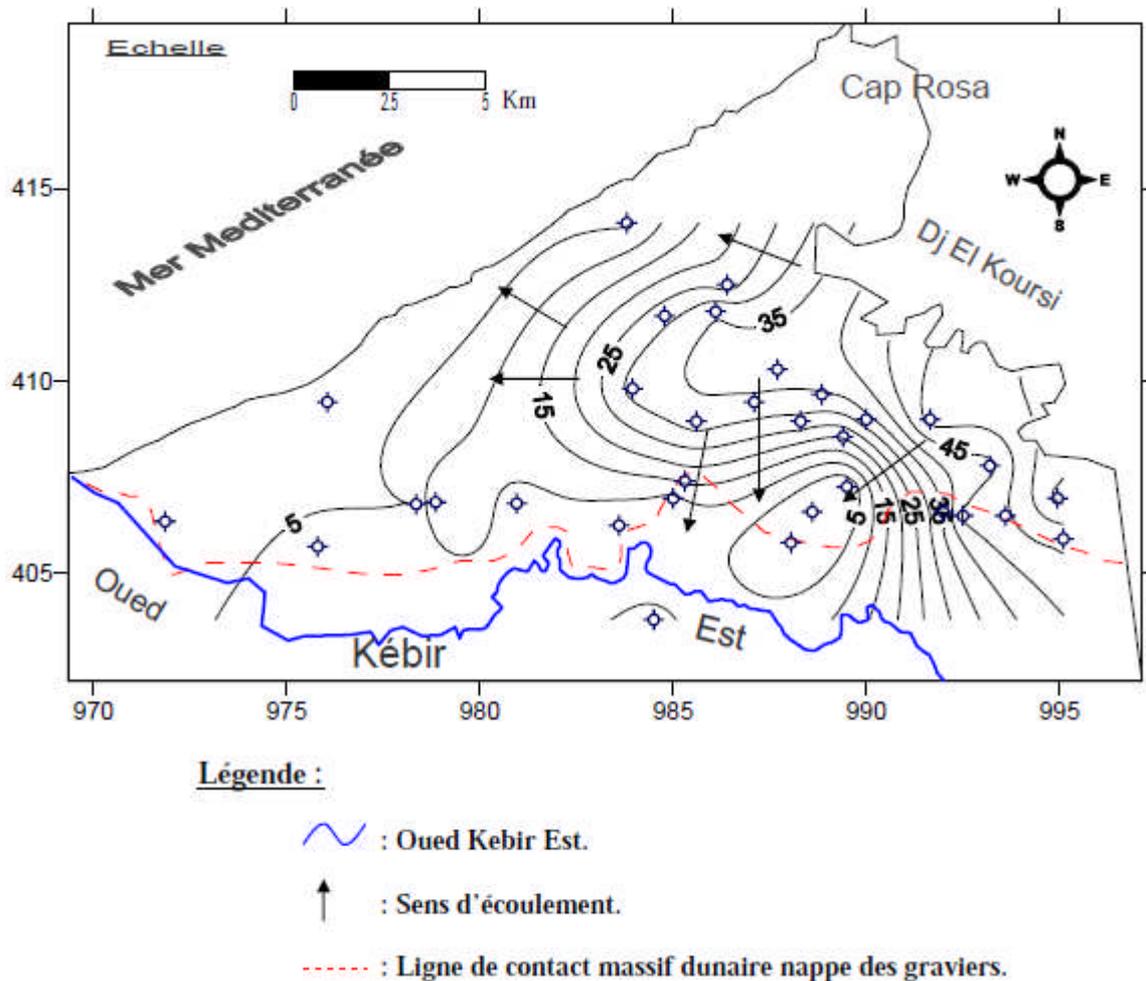


Figure 26 : Carte piézométrique de la nappe du massif dunaire de Bouteldja en 1982 (Khérici N. 1985).

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

On observe un écoulement vers la zone sud-est, caractérisée par les apports venant des reliefs grésio-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 piézométriques 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 Bouglés et B'haim. Ce resserrement est dû essentiellement à surexploitation (Khérici N. 1985).

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 piézométrie.

IV.7- Régime de la nappe du massif dunaire de Bouteldja

La nappe est libre, elle renferme, d'une part, une zone non saturée aux caractéristiques hydrodynamiques similaires à celles de la zone saturée et d'autre part, a une zone de fluctuation.

En fonction de l'importance des précipitations et de la perméabilité des sables, les niveaux maximum apparaissent de Décembre à Avril (le plus souvent en Décembre et en Mars). Les niveaux minimaux apparaissent le plus souvent d'Aout à Octobre quand les précipitations sont très faible voir nulles. L'alimentation du massif dunaire est en apparence simple, elle se fait à partir des pluies abondantes de la saison pluvieuse, pénétrant dans un sédiment à fort pouvoir hydrophile et reposent sur un substratum imperméable. Ainsi le ruissèlement est faible sauf pour le bassin de Bourdim où l'eau s'écoule du numidien environnant. Ailleurs les eaux provenant du numidien s'infiltreront au contact des sables.

Contrairement au ruissèlement, l'infiltration est très élevée, favorisée à la fois par la morphologie et la perméabilité des dunes.

IV.8- Conditions aux limites de l'aquifère

Après avoir interpréter les coupes hydrogéologiques, on constate que la nappe libre du massif dunaire repose sur un substratum argilo-gréseux imperméable. Latéralement, ses limites se présentent sous différents aspects lithologiques :

- A l'Est : on a deux types de limites.
 - ❖ Limite étanche : située dans les zones argileuses (argile du numidien).
 - ❖ Limite perméable : elle se localise au niveau des grés numidien.
- A l'Ouest : il existe une limite perméable entre le massif dunaire et les grands marécages (Garaat Makrada) d'une part, et la nappe de la Maffragh dans les couches profondes d'autre part.
- Au Nord : on note l'existence d'une liaison souterraine entre le massif dunaire et la mer méditerranée.
- Au Sud : dans la direction de la vallée de Kébir, on note l'existence d'une :
 - ❖ Limite perméable profonde entre la partie basse du massif dunaire et la nappe alluvionnaire captive de la terrasse de l'oued Kébir.

❖ Deuxième limite perméable entre la nappe libre du massif dunaire et la nappe libre de l'oued Kébir.

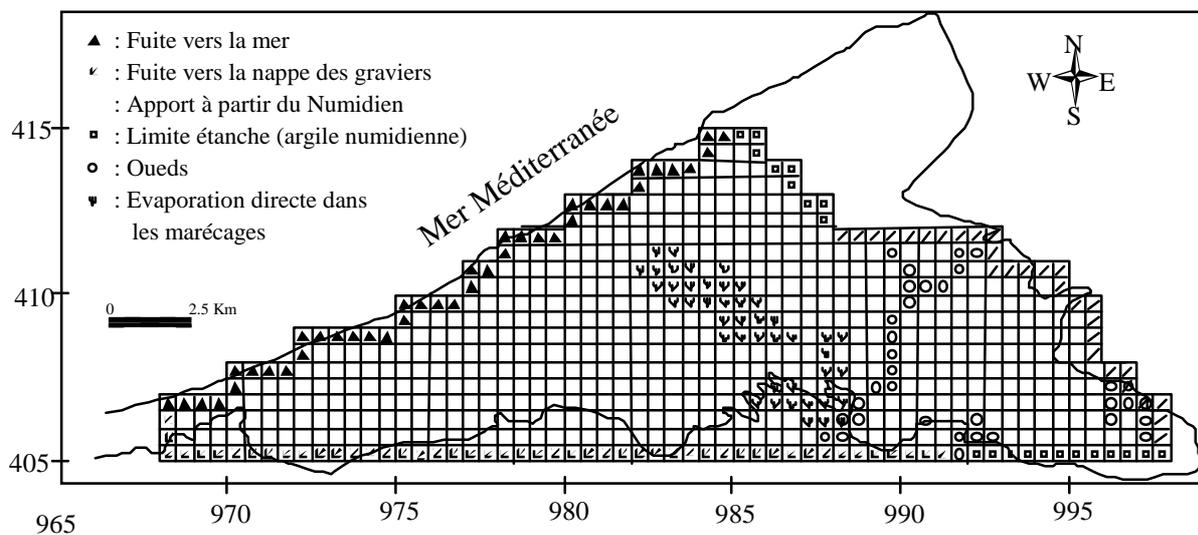


Figure 27 : Carte des conditions aux limites de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja

(Source : Hani A. 2003).

IV.9- Caractéristiques hydrodynamiques de la nappe

Les caractéristiques hydrodynamiques des nappes sont généralement obtenues au moyen des tests portant sur les modifications du comportement hydrodynamiques du complexe aquifère-ouvrage de captage, en réponse à une impulsion créée par un pompage à un débit constant.

L'essai par pompage est l'un des moyens les plus utilisés pour connaître les caractéristiques du complexe aquifère-ouvrage, et déterminer les paramètres hydrodynamiques (perméabilité, transmissivité, coefficient d'emmagasinement) et les caractéristiques particulières de l'aquifère (structure, hétérogénéité, drainance...etc.).

IV.9.1-Epaisseur saturée

L'épaisseur mouillée de l'aquifère libre du massif dunaire peut être obtenue en superposant la carte en courbes isopiezés et la carte d'égalité de valeurs du substratum.

Plus de 78% des ouvrages montrent une épaisseur saturée comprise entre 100 et 160 m. La valeur moyenne est de l'ordre de 119 m.

Géographiquement, les épaisseurs mouillées ont tendance à se répartir comme suit :

- La nappe est très puissante, épaisseur supérieure à 130 m, dans les régions situées au Nord Ouest en bordure de la mer et autour des marécages de Nécha Righia et d'Oum Lagareb.
- La puissance la plus faible est atteinte à l'Ouest dans la région de Bourdim, Dj.Siah, et Dj Koursi où les proportions d'argile demeurent très importantes, ce qui limite par conséquent la fraction de la couche saturée.
- A l'Ouest de la région d'étude, les épaisseurs décroissent du Nord vers le Sud et de l'Ouest vers l'Est.

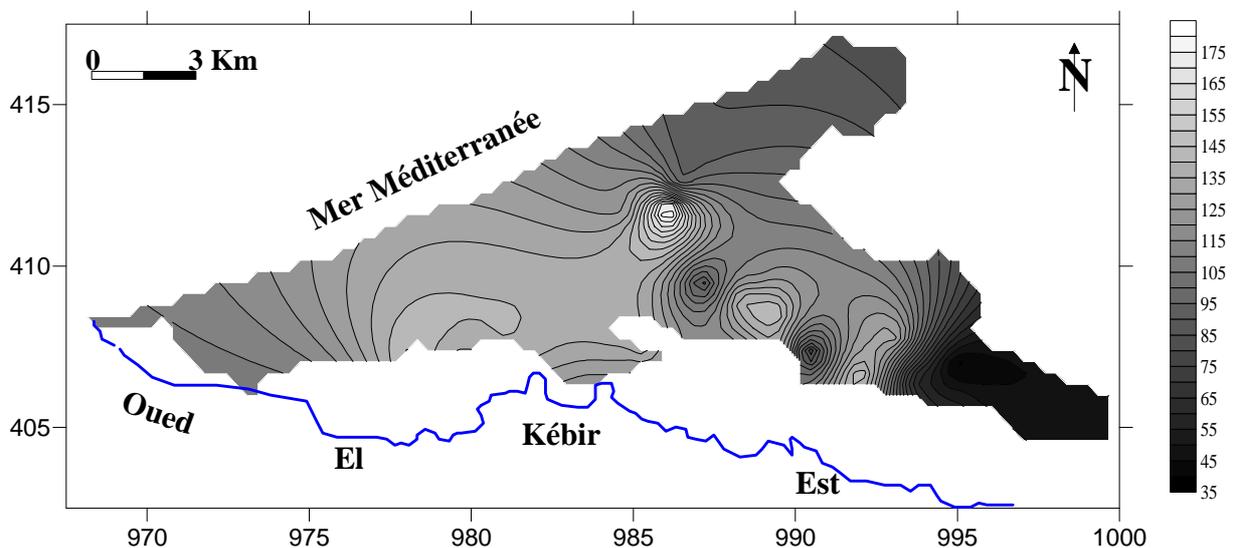


Figure 28 : Carte d'égal épaisseur de la couche saturée de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja.

IV.9.2-Transmissivités

D'une manière générale, la répartition statistique des transmissivités, montre une grande dispersion des valeurs. En effet la valeur minimale est de $5.6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ (au forage B1). Les valeurs consignées dans le tableau ci-dessus, ont permis l'établissement d'une carte de transmissivité (fig.29).

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

- La zone plus transmissive (transmissivités supérieures à $5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$), se situe au Nord de la source de Bougles.
- La zone la moins transmissive (transmissivité inférieure à $5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$), se situe à l'Ouest de la ligne formée par les forages B17, 6907 et 6921.
- Outre ces deux zones, la transmissivité croît en allant de l'Ouest vers l'Est dans la partie centrale du massif et du Sud vers le Nord au voisinage des sources espagnole et italienne.

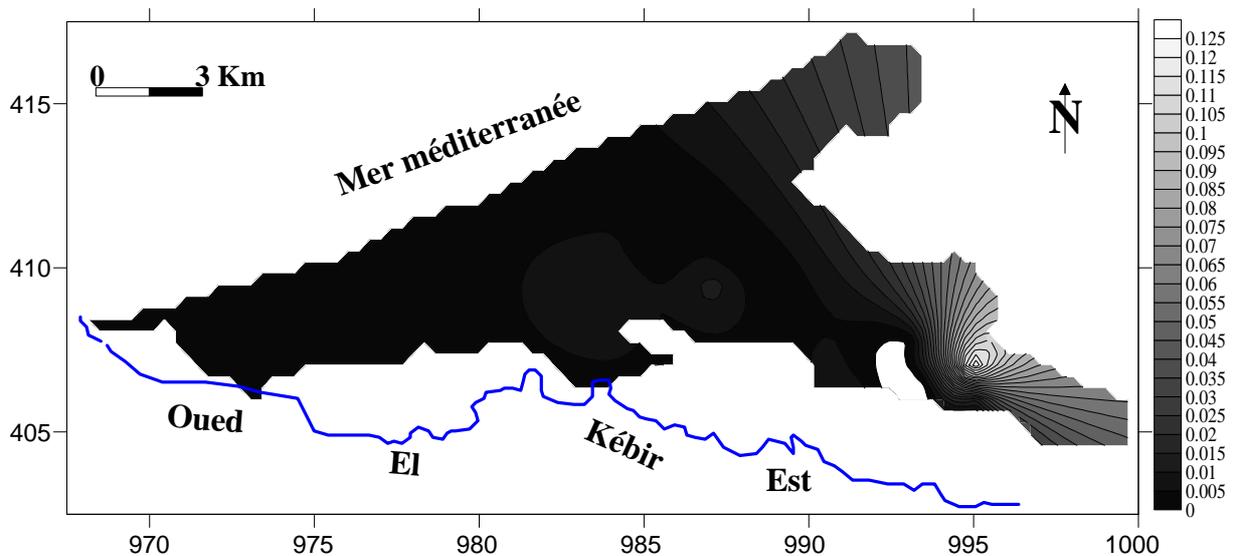


Figure 29 : Carte de répartition des transmissivités dans la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja.

IV.9.3-La perméabilité

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).

La répartition géographique des perméabilités (fig.30), on constate que les valeurs se distribuent de la manière suivante:

- Les plus fortes valeurs, perméabilités supérieures à $1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$, se situent au Sud – Est de la région, entre la source de Bourdim et le lac noir. Ces fortes valeurs de perméabilités sont dues vraisemblablement aux lessivages des sables par les échanges permanents entre les surfaces d'eau libre et la nappe.

➤ Les régions les moins permanentes (perméabilités inférieures à 1.10^{-5} m/s) sont situées:

- ❖ Dans la partie Ouest du terrain d'étude;
- ❖ Dans la partie centrale du cordon dunaire suivant une zone s'étend d'El Haraba au Sud jusqu'à la mer au Nord.

Ces valeurs sont fortement influencées par les fortes proportions d'argile dans l'aquifère.

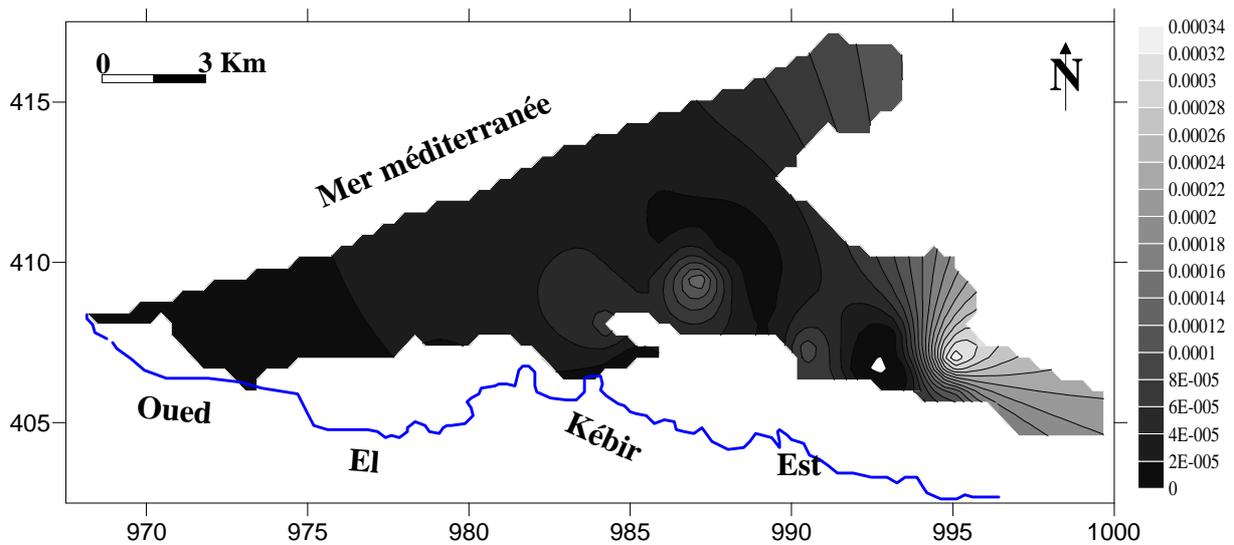


Figure 30 : Carte de répartition des perméabilités en 10^{-5} m/s de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja

IV.9.4 - Coefficient d'emmagasinement

Il est défini comme un volume d'eau libre ou emmagasiné à travers une surface d'aire égale à l'unité, pour une unité de variation de la charge hydraulique Δh , normal à cette surface. Il est désigné par le symbole S (sans dimension).

Les Coefficients d'emmagasinement maximaux et minimaux sont respectivement 0.2 et 24%. En moyenne ils seraient de 13% (Gaud ; 1976, Khérici ; 1986).

Les valeurs se situent entre 24% au niveau du B10 et 1.4% au forage B6. Localement, la nappe peut être sous pression sous les formations argileuses et les valeurs du coefficient d'emmagasinement pourraient être plus faibles (B. Saadelli ; 2007).

IV.10- Exemples d'interprétation des données de pompages d'essai

Pour bien mettre en évidence les différentes caractéristiques hydrodynamiques de la nappe du massif dunaire de Bouteldja, on va interpréter les données des pompages d'essai effectuées au niveau des forages suivants : 565 et 6920.

IV.10.1- Forage 565

Le forage 565 a été implanté dans la région de Righia (X = 989.05 : Y = 405.80).

Le forage a été exécuté dans les sables fins et aquifères qui ont posé d'importantes difficultés quant à son équipement l'écrasement de la colonne des tubes pleins et crépines à partir du 52 mètre conduisent à l'installation d'une double colonne d'exploitation composée de :

- Une première colonne de 400 mm de diamètre;
- Une deuxième colonne de 245 mm de diamètre.

Les essais sur ce forage ont consisté en un pompage par trois paliers de débits croissant dont les résultats sont portés sur le tableau suivant :

Tableau 18 : Essai par paliers de débits au forage 565 (Nouacer R. 1993).

Palier(m)	Débits Q (l/s)	Durée (h)	Rabatement final
1	8.00	6	12.33
2	12.49	12	19.48
3	20.23	49	33.61

La nappe est légèrement en charge sous une formation argileuse de 2 mètres : le niveau statique étant à 2.06 m au dessus du sol.

Outre ces 3 essais de pompage, la remontée des niveaux a été observée pendant 21 h. L'interprétation des essais par paliers de débits enchaînés a permis de déterminer la transmissivité de l'aquifère au voisinage du forage. Elle a permis également de déduire les pertes de charges dues au captage.

IV.10.1.1- Courbe de descente

Les données du pompage par paliers enchaînés, rabattements spécifiques (s/Q en m/l/s) et le temps (t en seconde). Les valeurs de la transmissivité sont extraites à partir d'un papier semi_ logarithmique qui donnent des droites représentatives (R. Nouacer, 1993):

- Le 1^{er} palier pour $Q = 8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ on aura :

$$T = 0.183 / c = 0.183 / 0.089 \cdot 10^3 = 2.1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}.$$

- Le 2^{eme} palier pour $Q = 1.2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ on aura :

$$T = 0.183 / 0.014 \cdot 10^3 = 4.1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}.$$

- Le 3^{eme} palier pour $Q = 2.02 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ on aura :

$$T = 0.183 / 0.078 \cdot 10^3 = 2.35 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}.$$

Pour la courbe de remontée, la transmissivité calculée est de $8,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$.

✓ Principe de la méthode

On suppose que l'on enchaîne une série de paliers de débits sans attendre à chaque palier la remontée de la nappe. La méthode consiste à reporter sur un graphique semi-logarithmique le rabattement spécifique (s/Q) en fonction du temps (t) cumulés depuis le début du pompage.

Deux cas peuvent se présenter :

Le premier cas : toutes les courbes obtenues ont une même asymptote d'équation.

$$s/q = 0.183 / T * \text{Log} (2.25 * T * t) / r^2 \text{ s}$$

$$s/Q = 0.183 / T * \text{Log} (2.25 * T * t) / r^2 \text{ s}$$

D'où une pente : $c = 0.183 / T$.

✓ Méthode des paliers enchainés (DEMASSIEUX 1983)

Le second cas : les courbes représentant les paliers 2.3...n, représentent des décrochements successifs par rapport au premier palier (Q_1). Ce phénomène est dû aux pertes de charge parasites au niveau de l'équipement de l'ouvrage de pompage qui s'ajoutent au rabattement créé par le pompage.

IV.10.1.2- Courbe de remontée

Le rapport du rabattement résiduel S_r en fonction de la quantité $(1+tp/tr)$ permet de calculer la transmissivité T :

$$T = 0.183 * 20.23 * 10^{-3} / 4.2 = 9 * 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

On peut conclure que les essais par paliers de débits enchainés sur le forage 565 ont permis de constater que les pertes de charge dues à l'équipement (crépine, tubage...) sont négligeables. Il apparaît donc que le choix d'une double colonne captantes, bien que très coûteux, est très judicieux, car il permet de limiter les pertes de charge quadratiques et d'éviter par conséquent la dégradation de l'ouvrage.

D'autre part, la concordance des résultats obtenus, par l'application des trois méthodes est bonne. La transmissivité moyenne de l'aquifère est de $2.3 \text{ m}^2/\text{s}$.

IV.10.2- forage 6920

Le forage 6920 a été implanté à l'Ouest de la source de Bouglés et à travers les formations sableuses jusqu'à 56m de profondeur. L'ouvrage a été crepiné sur 24m.

Après les opérations de nettoyage et de développement, les essais ont été effectués selon le programme suivant :

➤ Un essai de 54 h, au débit constant de 24.6 l/s , destiné à définir la transmissivité de l'aquifère et à observer les conditions aux limites.

- Suivi d'une remontée de 20 h.

Les rabattements montrent un accroissement normal au cours des deux premiers heurs de pompage. Ensuite, ils marquent une stabilisation qui peut être expliquée par la proximité d'une limite de réalimentation. Cette limite serait matérialisée par les marécages d'Oum Lagareb (R. Nouacer, 1993).

Si on admet que le pompage se fait dans une aquifère limite par une ligne à niveau d'eau constant. On peut appliquer l'expression d'approximation logarithmique de Jacob à la droite représentative à pente constante.

La valeur de la transmissivité est :

$$T = 0.183 * 24.6 * 10^{-3} / 1.78 = 2.5 * 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

Le graphique de la figure N° x donne la courbe de la remontée du pompage. Elle permet de calculer une transmissivité identique à celle obtenue sur la courbe de descente :

$$T = 0.183 * 24.6 * 10^{-3} / 1.78 = 2.5 * 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

Les rabattements résiduels montrent la encore une stabilisation a : $(t_p + t_r) / t_r = 7$

IV.11- les réserves

IV.11.1- Les réserves régulatrices

Elles correspondent au volume d'eau qui subit le rythme saisonnière des pluies. Ce volume dépend donc des fluctuations de la surface piézométriques des nappes.

La variation moyenne du plan d'eau de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja entre Octobre 1983 et Mai 1983 obtenue sur l'ensemble des forages est de 1.5m. Les valeurs faibles sont localisées au Sud Ouest et dans la partie centrale autour d'une moyenne de 1.2m.

La nappe libre du massif dunaire de Bouteldja enregistre les plus fortes fluctuations avec une moyenne de 1.8m qui sont localisées au Sud Est de la région.

IV.11.2- Ressources régulatrices

Elles correspondent au volume d'eau qui transite au cours d'une année au dessus du niveau le plus bas de la nappe, et qu'on exprime par :

$$V_r = A. h. m_e$$

D'où :

A : la superficie totale.

h : la variation du plan d'eau dans la nappe libre.

m_e : la porosité utile calculée par la méthode d'Archie.

Les réserves régulatrices sont de l'ordre de $35,7 * 10^6 \text{ m}^3$ (R. Nouacer, 1993).

IV.11.3- Réserves permanents

Ces réserves représentent le volume d'eau des nappes à surface libre. Situées au dessous de la zone de fluctuation de cette surface. Ces réserves dites séculaires varient à l'échelle des temps géologiques.

La puissance moyenne des aquifères a été estimée à partir des résultats obtenue par les forages de reconnaissance et d'exploitation et l'étude géophysique.

Nous avons considéré la nappe du massif dunaire pour l'estimation de réserves permanentes dont l'expression est la suivante :

$$V_p = A \cdot h_p \cdot m_e$$

D'où :

A : la superficie totale.

$h_p = H - h$: la puissance des aquifères non affectés pour les fluctuations de la nappe. Avec H puissance de l'aquifère et h variation du niveau piézométrique.

m_e : porosité efficace moyenne d'après Archie.

Les réserves permanentes du massif dunaire sont de l'ordre de $270 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (R. Nouacer, 1993).

Conclusion

L'analyse et la cartographie des résultats de l'étude géophysique et des pompages d'essais ont permis de faire la synthèse des principales caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère dunaire de Bouteldja :

- L'épaisseur saturée varie de 37 m à l'Ouest de la région de Bourdim, à 190 m au Nord Ouest de la région.
- Les zones les plus transmissives se situent au Nord de la source de Bouglés avec des valeurs supérieures à $5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, tandis que les zones à faibles transmissivités se localisent à l'Ouest de la ligne formée par les forages B17, 6907 et 6921. Ces dernières sont fortement influencées par l'augmentation de la fraction argileuse dans le sable.

La transmissivité moyenne est de l'ordre de $3,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

- Les perméabilités les plus fortes se situent au Sud Est de la région, entre la source de Bourdim et le lac noir. Ces fortes valeurs sont dues vraisemblablement au lessivage des sables par les échanges permanents entre les surfaces d'eau libre et la nappe.

Les faibles perméabilités se localisent à l'Ouest et au centre du cordon dunaire. Ces faibles valeurs sont provoquées par les fortes proportions d'argile dans l'aquifère.

HYDROCHIMIE

V. 1 - Introduction

L'étude hydrochimique permet d'évaluer la qualité des eaux après la détermination des caractéristiques physiques et chimiques, leur classement selon le chimisme qu'elles présentent, et d'orienter leur utilisation.

Pour cela nous avons essayé, dans un premier temps de faire le point sur la qualité des eaux superficielles et souterraines à partir des données des campagnes d'analyses chimiques des eaux de la nappe effectuées par l'ADE (laboratoire centrale d'ADE, Annaba) en Septembre 2004, Mai (2004, 2005, 2006, 2008 et 2010) et Octobre 2009.

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.

V.2- Etude des paramètres physicochimiques de l'eau

V.2.1- Les eaux de surface

V.2.1.1- Eaux des marais

Les eaux des marais de Mekrada sont du type chloruré sodique avec des teneurs en calcium et en magnésium en proportions identiques, de même pour les sulfates et les bicarbonates (Ramdani, 1996). L'importance des teneurs en sels semble être liée à l'influence de la mer par l'intermédiaire de l'oued Mafragh et par la nature lithologique de la zone à texture argileuse salée. Les marais de Mekrada peuvent donc constituer un front de pollution pour le système aquifère de Bouteldja notamment dans le cas où il se produit une modification du sens de l'écoulement induite par des pompages excessifs (A. Hani, 2003).

V. 2. 1. 2 - Eaux de pluie

Les analyses chimiques des eaux de pluie effectuées dans la région de Bouteldja en période de hautes eaux 1993 (Tab.19), mettent en évidence des eaux bicarbonatée-magnésio-calciques, assez proches des eaux souterraines en période de hautes eaux.

Les éléments HCO_3^- et Ca^{++} sont les plus dominants. Il apparaît donc qu'en période pluvieuse, l'influence des eaux de pluie sur le chimisme des eaux souterraines est plus importante que celle du sol par l'apport des ions HCO_3^- et Ca^{++} . En période de basses eaux, c'est le temps de séjour, plus long qu'en période de hautes eaux, qui régit le contenu chimique des eaux souterraines par l'apport des sulfates et surtout des chlorures (A. Hani, 2003).

Tableau 19 : Analyses chimiques des eaux de pluie dans la région de Bouteldja (meq/l).

Lieu	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	HCO ₃	NO ₃	pH
Bouteldja	0,89	1,06	0,08	0,02	0,14	0,04	2,50	0,03	8
Lac des oiseaux	0,28	0,08	0,43	0	0,28	0	0,99	0,016	7,8

V. 2. 1. 3 - Eaux de l'oued Kébir

Pour mieux apprécier les principaux grands traits hydrochimiques des eaux de l'oued, une analyse en composantes principales a été effectuée sur un tableau de 310 individus et 10 variables couvrant la période 1975-1990. Le tableau 20 donne les valeurs propres et l'inertie expliquée par les quatre premières composantes principales (A. Hani, 2003).

Tableau 20 : ACP- Inertie des 4 premières composantes principales.

N° de l'axe factoriel	Valeur propre	Inertie expliquée (%)	Pourcentages cumulés
1	5.06	50.6	50.6
2	1.40	14.1	64.7
3	1.02	10.2	74.9
4	0.85	08.6	83.5

✓ Etude de la contribution des variables au premier facteur :

Dans le plan des variables I-II (Fig.31), le facteur I exprime 50.6% de la variance. Il oppose le débit à l'ensemble des variables marquées par la dilution qu'elles subissent lors de l'augmentation des débits. Ce premier facteur exprime donc la vitesse de transit de l'eau dans l'aquifère.

✓ Etude de la contribution des variables au deuxième facteur :

Le facteur II, avec 14.1% de la variance totale, oppose les nitrates et le pH aux bicarbonates. Ce facteur semble donc traduire l'origine des éléments liés au lessivage du sol.

Le plan I-II des individus (Fig.31) visualise ces résultats en séparant :

- un groupe d'automne et de début d'été caractérisé par l'augmentation des chlorures, sodium, potassium, magnésium, calcium et des sulfates;
- un groupe d'hiver et de printemps marqué par la dilution de l'ensemble des éléments chimiques,

Le second facteur qui représente particulièrement l'influence pédologique sur la nature des sols lessivés oppose les bicarbonates aux nitrates et pH. Ce facteur qui apparaît difficilement interprétable, singularise néanmoins le comportement du NO₃ vis-à-vis du régime hydrologique.

Tableau 21 : Corrélation entre les variables et les trois premières composantes principales.

Paramètres	Axe 1	Axe 2	Axe 3
Q	0.498	-0.011	0.241
Ca	-0.865	0.110	0.064
Mg	-0.654	-0.339	-0.267
Na+K	-0.912	0.253	0.113
Cl	-0.906	0.206	0.123
SO₄	-0.918	0.069	-0.116
HCO₃	-0.423	0.096	0.076
NO₃	0.097	0.402	-0.846
CE	-0.979	-0.036	0.010
pH	-0.011	0.721	0.350

En somme, l'ACP permet de mettre en évidence une relation très étroite entre les éléments chimiques et le régime du cours d'eau (Ramdani, 1996) (Tab.21). Durant la période des hautes eaux, c'est le processus de dilution qui fait baisser les concentrations.

A l'étiage, par contre, c'est le processus de concentration qui fait augmenter les sulfates, le magnésium, le calcium, les chlorures et le sodium-potassium induit par la baisse du flux de l'oued qui régit le chimisme des eaux.

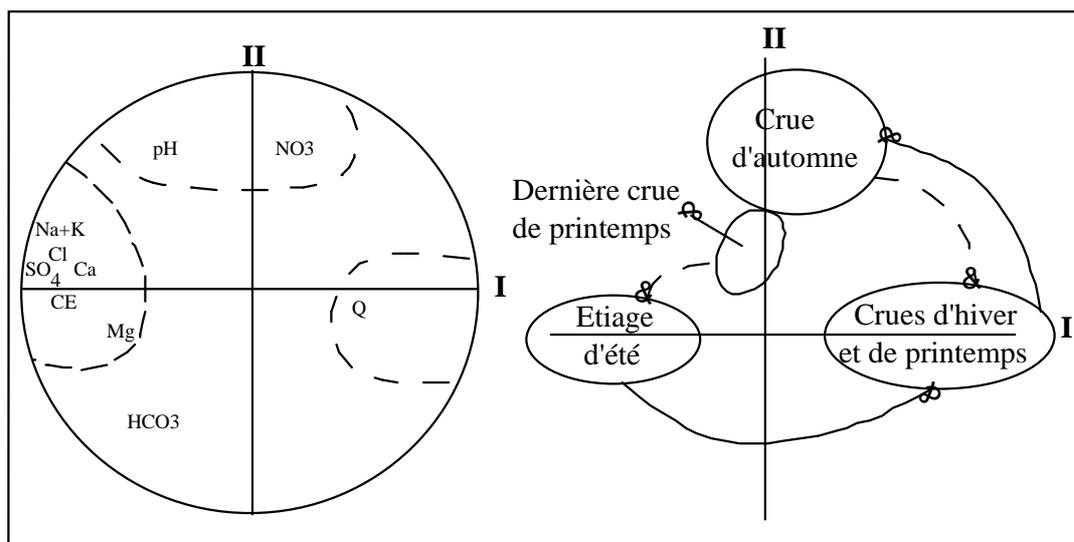


Figure 31 : ACP de l'oued Kébir. a- Cercle des variables ; b- Plan I-II des individus (A. Hani, 2003).

V. 2. 2 - Les eaux souterraines

V. 2. 2. 1 - Paramètres physiques

V. 2. 2. 1. 1 - La 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 température du massif dunaire varie entre 17.5°C à 22.5°C avec une moyenne de près de 20°C (N. Haied, 2008).

V. 2. 2. 1. 2 - Le pH

Le pH (potentiel Hydrogène) mesure la concentration en ions H⁺ de l'eau. Ce paramètre caractérise un grand nombre d'équilibre physico-chimique et dépend de facteurs multiples, dont l'origine de l'eau (Castany, Margat, 1977).

Le pH doit être impérativement mesuré sur le terrain à l'aide d'un pH-mètre ou par colorimétrie.

Les eaux du massif dunaire de Bouteldja présentent un pH oscille entre 6 à 7 caractérisant ainsi une eau acide à neutre.

V. 2. 2. 1. 3 - La conductivité

La conductivité est l'inverse de la résistivité, et elle caractérise la propriété pour un liquide à laisser passer le courant électrique.

La plupart des matières dissoutes dans l'eau se trouvent sous forme d'ions chargés d'électron, donc la mesure de la conductivité 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 22 : Relation entre conductivité et minéralisation (Detay, 1997).

Conductivité en $\mu\text{s}/\text{cm}$, à 20°C	minéralisation
inférieur à 10.	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 $\mu\text{s}/\text{cm}$. 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 $\mu\text{s}/\text{cm}$ sont dues aux apports pluvieux qui diluent les eaux, par contre les fortes valeurs ($> 250 \mu\text{s}/\text{cm}$) sont dues à présence des lentilles d'argile (N. Haied, 2008).

V. 2. 2. 1. 4 - Le résidu sec (RS)

Le résidu sec (RS) est la masse résiduelle des sels et des matières organiques après dessèchement ou évaporation totale à 110 °C pendant 24 h. Les valeurs obtenues permettent d'apprécier la minéralisation de l'eau : pour des valeurs inférieures à 600 mg/l, l'acceptabilité par le consommateur est bonne, au dessus de 1200 mg/l, l'eau devient désagréable.

✓ Du Nord vers le Sud Ouest et le centre, les valeurs du résidu sec se varient entre 50 et 130 mg/l. Ces faibles valeurs peut être expliqués par la bonne perméabilité d'où un écoulement rapide de la nappe et un échange réduit entre l'eau et l'encaissant.

✓ Alors que dans la zone proche du littoral et la moitié occidentale du massif dunaire semblent être caractérisées par un résidu sec plus élevé (130 à 290 mg/l).

Cette observation peut s'expliquer par l'effet de l'évaporation qui constitue un facteur important dans l'augmentation de la minéralisation des eaux surtout au niveau des zones d'affleurement de la nappe (Righia, Oum Lagareb). Il peut être aussi le résultat de l'alimentation de la nappe par les eaux de l'oued Kébir, relativement chargées, au niveau de ce secteur ce qui corrobore les résultats des analyses chimiques du forage 565 dont la teneur en sels dissous est de 426 mg/l. La nature plutôt argileuse de la nappe dans ce secteur ralentit l'écoulement de la nappe et entraîne une augmentation de minéralisation des eaux (A Hani, 2003).

V. 2. 2. 2 - La 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 Schoëller-Berkaloff.

V. 2. 2. 2. 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 ($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{--}$, 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.

V. 2. 2. 2. 2 - Diagramme de Schoëller Berkloff

Le diagramme de Schoëller Berkloff 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.

V. 3 - Interprétation des résultats

V. 3. 1 - Répartition graphique sur le diagramme de Piper et de Schoëller Berkloff des résultats d'analyse chimique, période hautes eaux Bouteldja 2004, 2005, 2006, 2008 et 2010

La représentation graphique de l'analyse chimique des points d'eau de la nappe du massif dunaire, période hautes eaux (2004, 2006, 2007, 2008 et 2010) nous a permis de déterminer une dominance des chlorures pour les anions et sodique pour les cations (Fig.32-41).

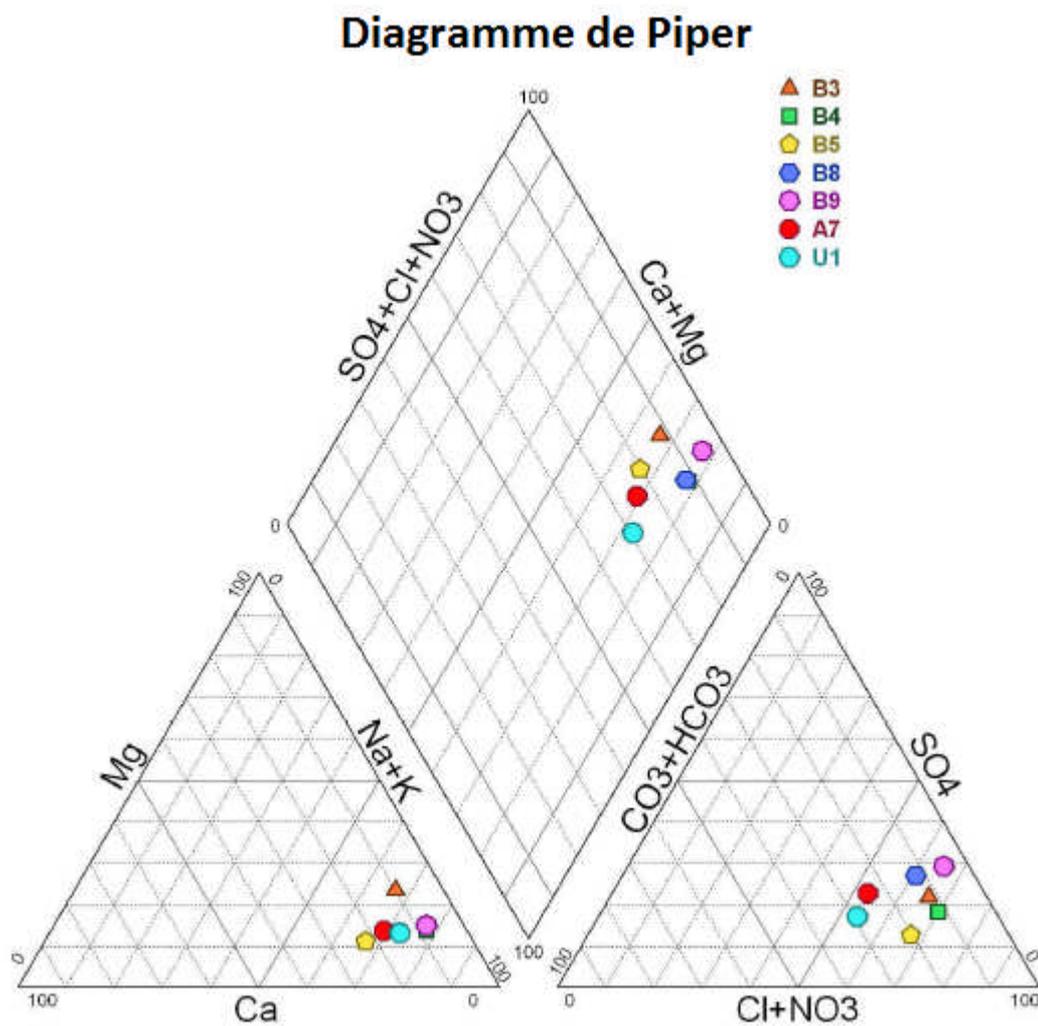


Figure 32 : Diagramme de Piper des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de hautes eaux 2004.

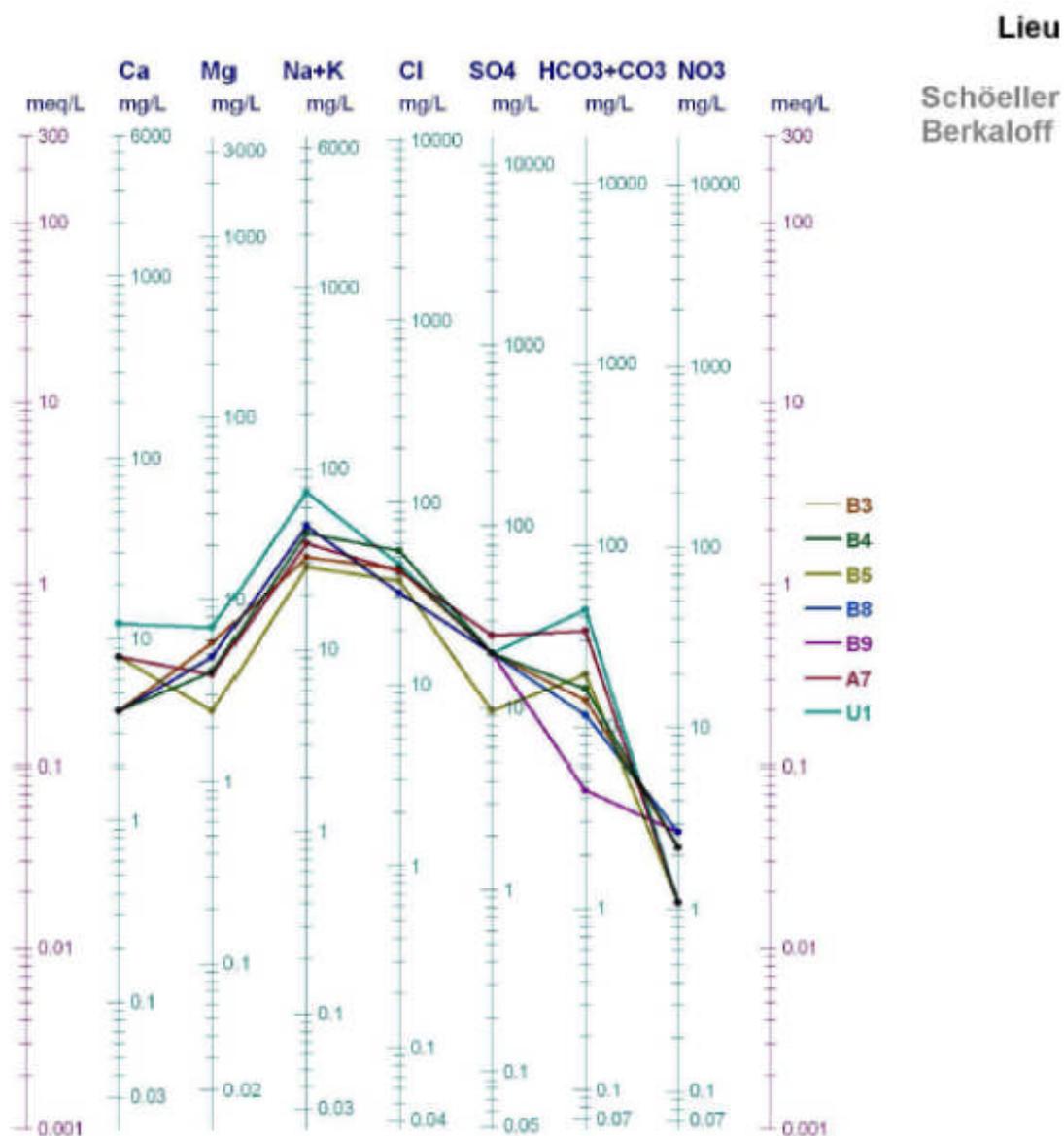


Figure 33 : Diagramme de Schoëller Berkaloff des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de hautes eaux 2004.

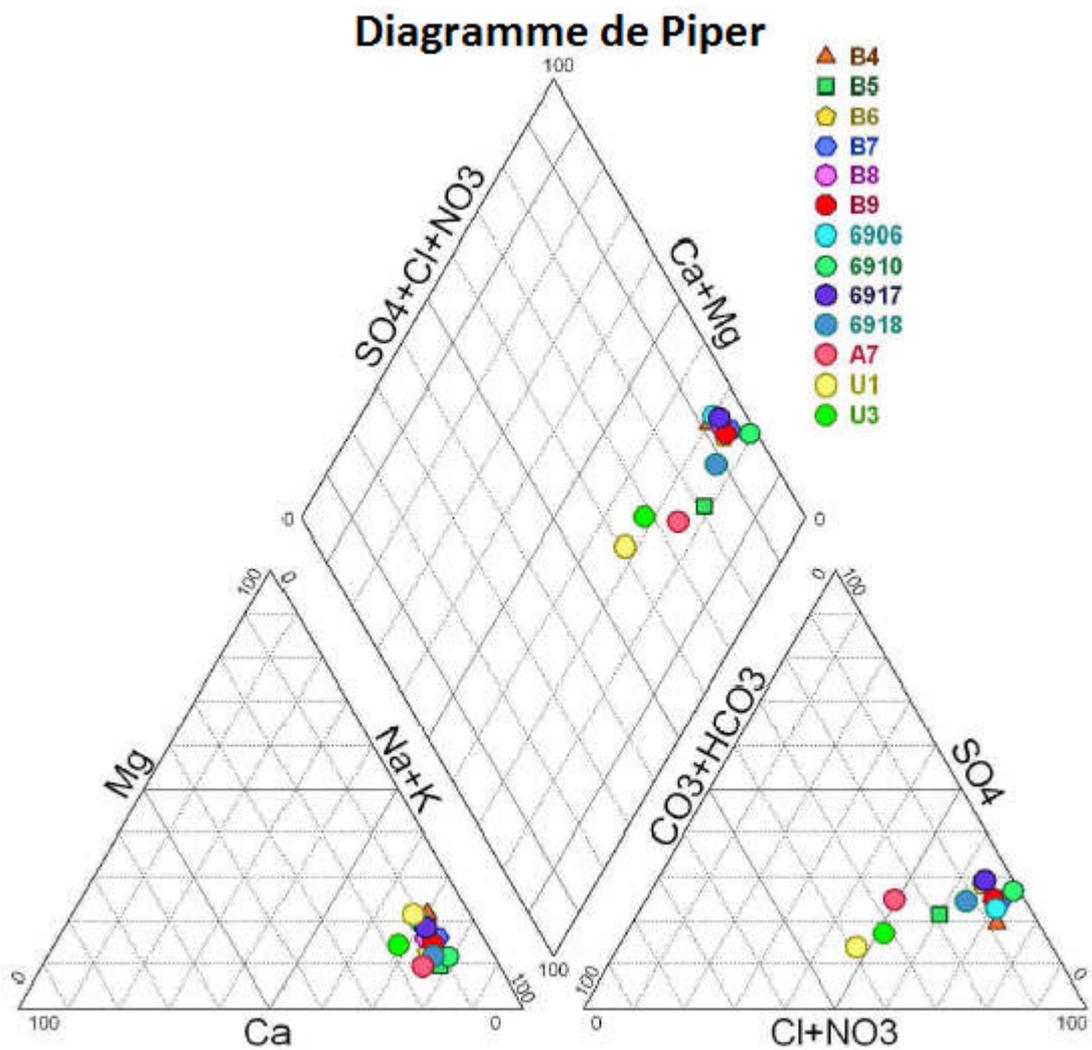


Figure 34 : Diagramme de Piper des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de hautes eaux 2005.

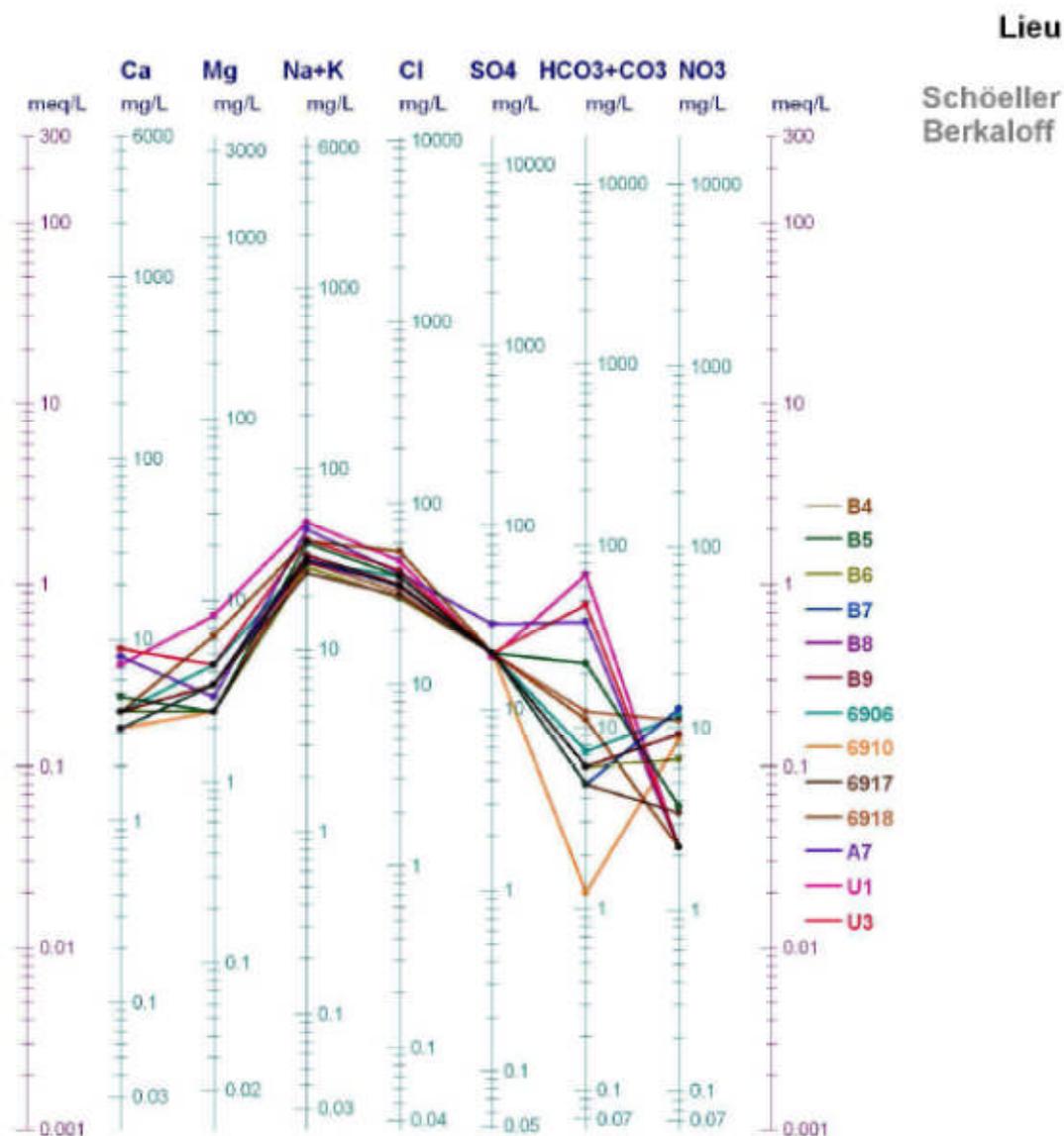


Figure 35 : Diagramme de Schoëller Berkaloff des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de hautes eaux 2005.

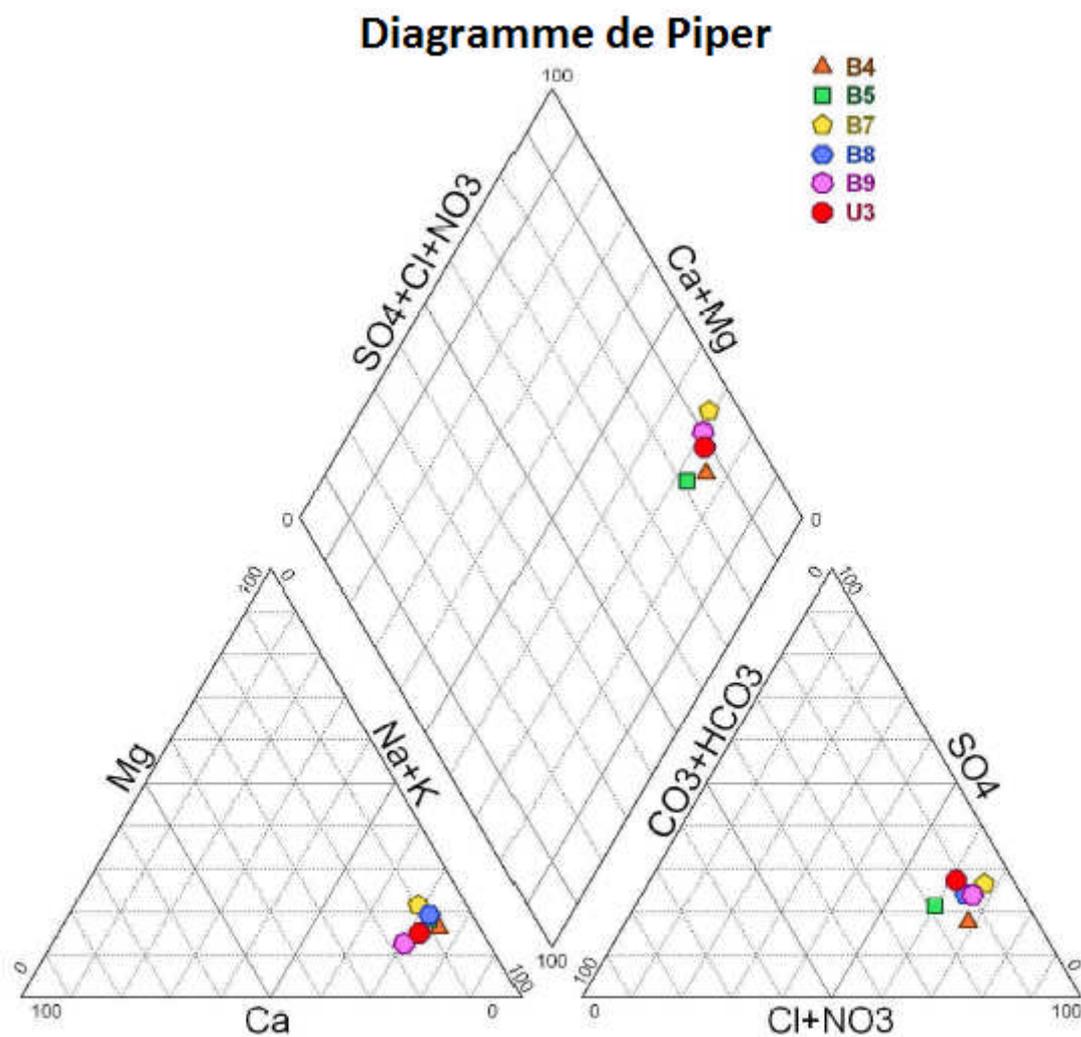


Figure 36 : Diagramme de Piper des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de hautes eaux 2006.

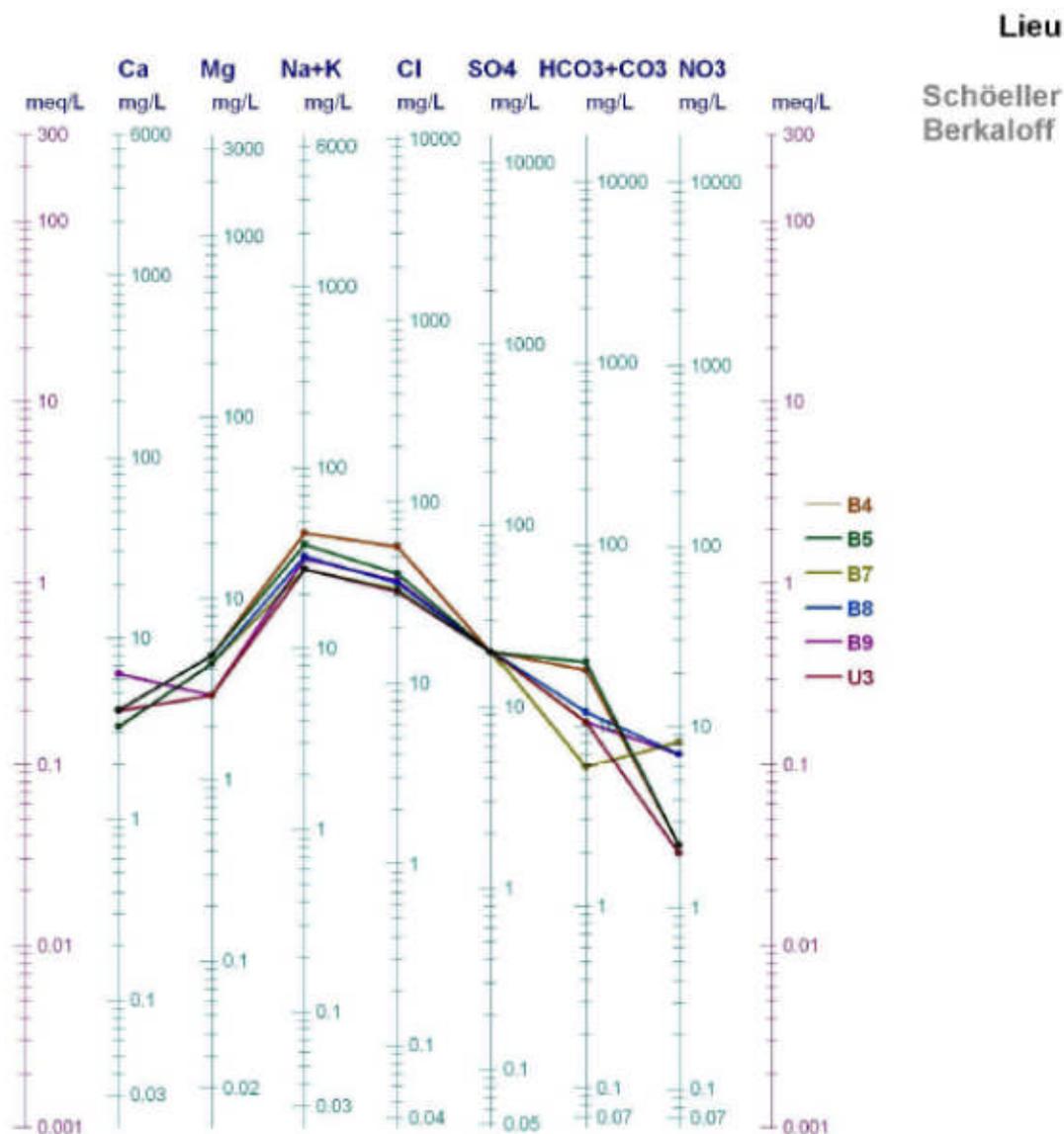


Figure 37 : Diagramme de Schoëller Berkaloff des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de hautes eaux 2006.

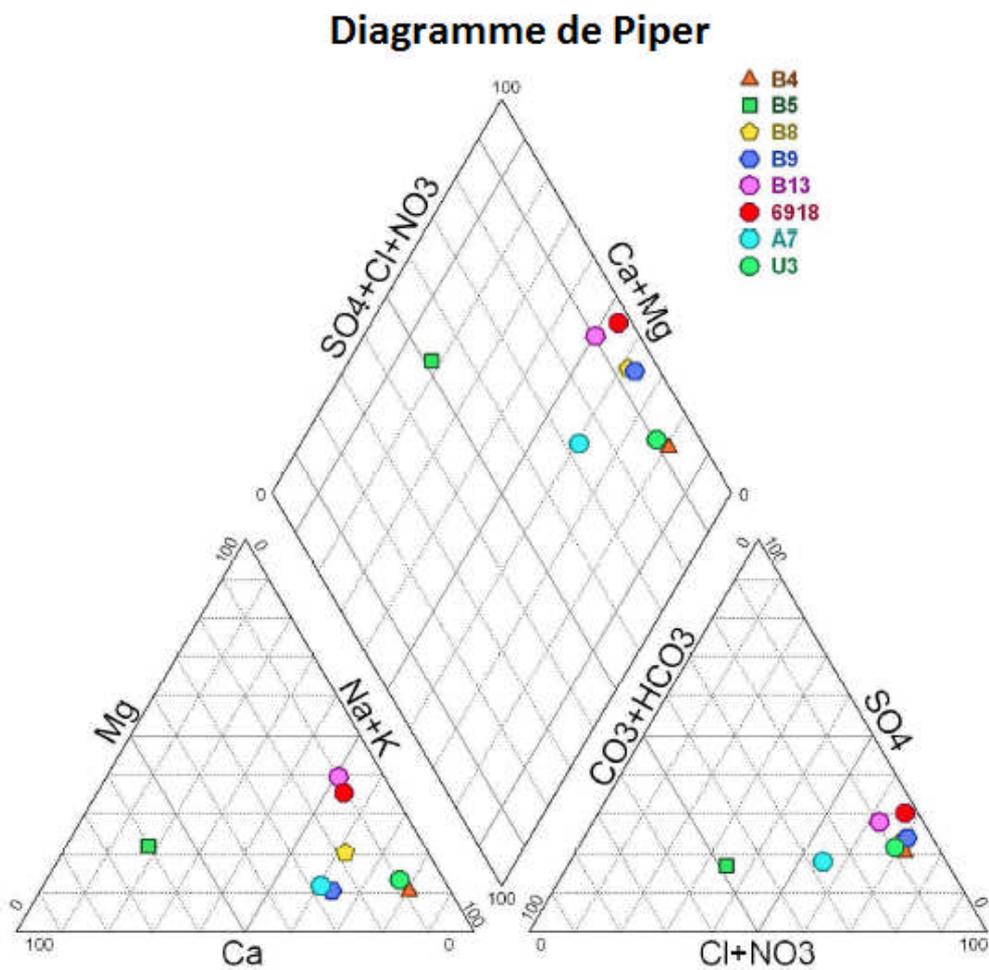


Figure 38 : Diagramme de Piper des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de hautes eaux 2008.

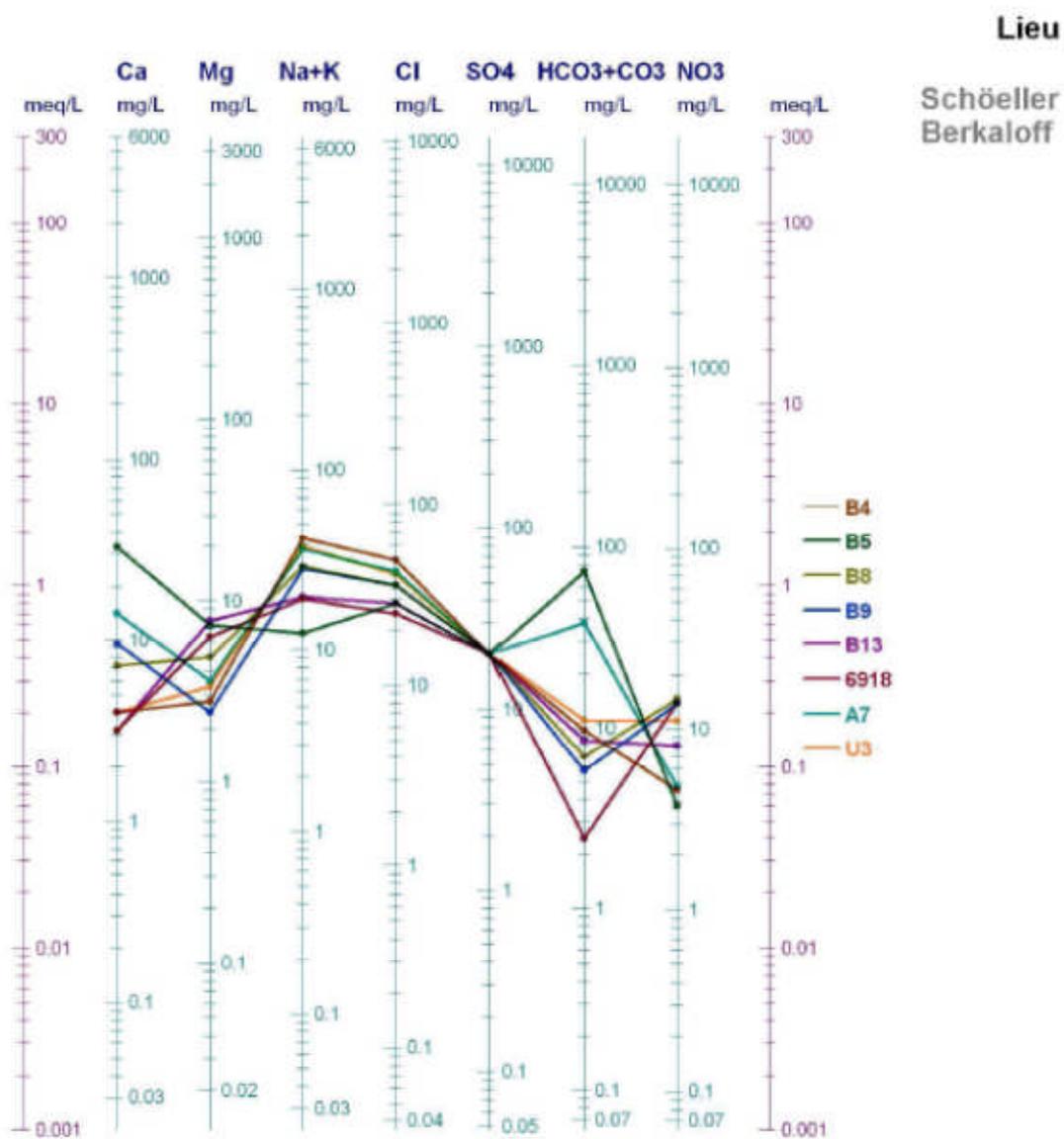


Figure 39 : Diagramme de Schoëller Berkaloff des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de hautes eaux 2008.

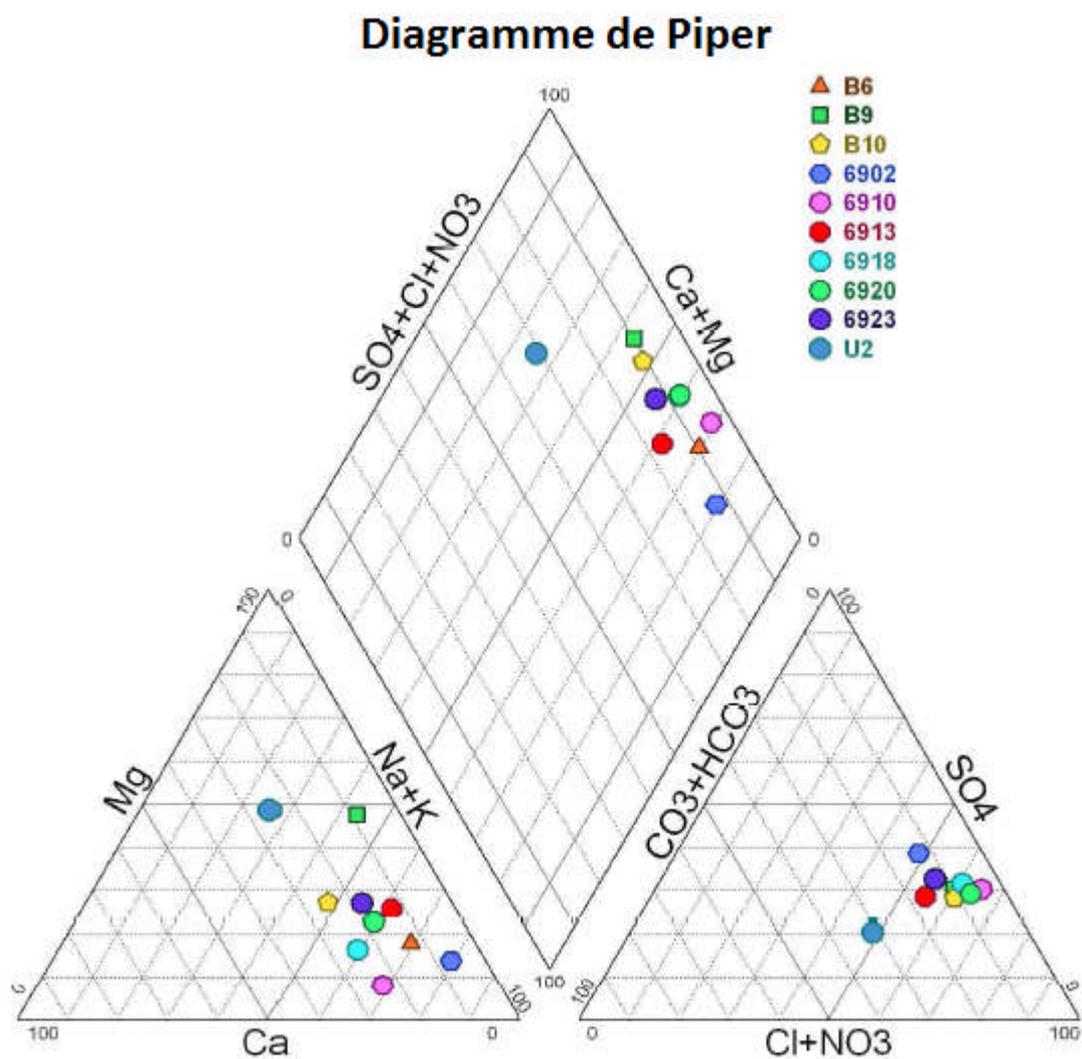


Figure 40 : Diagramme de Piper des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de hautes eaux 2010.

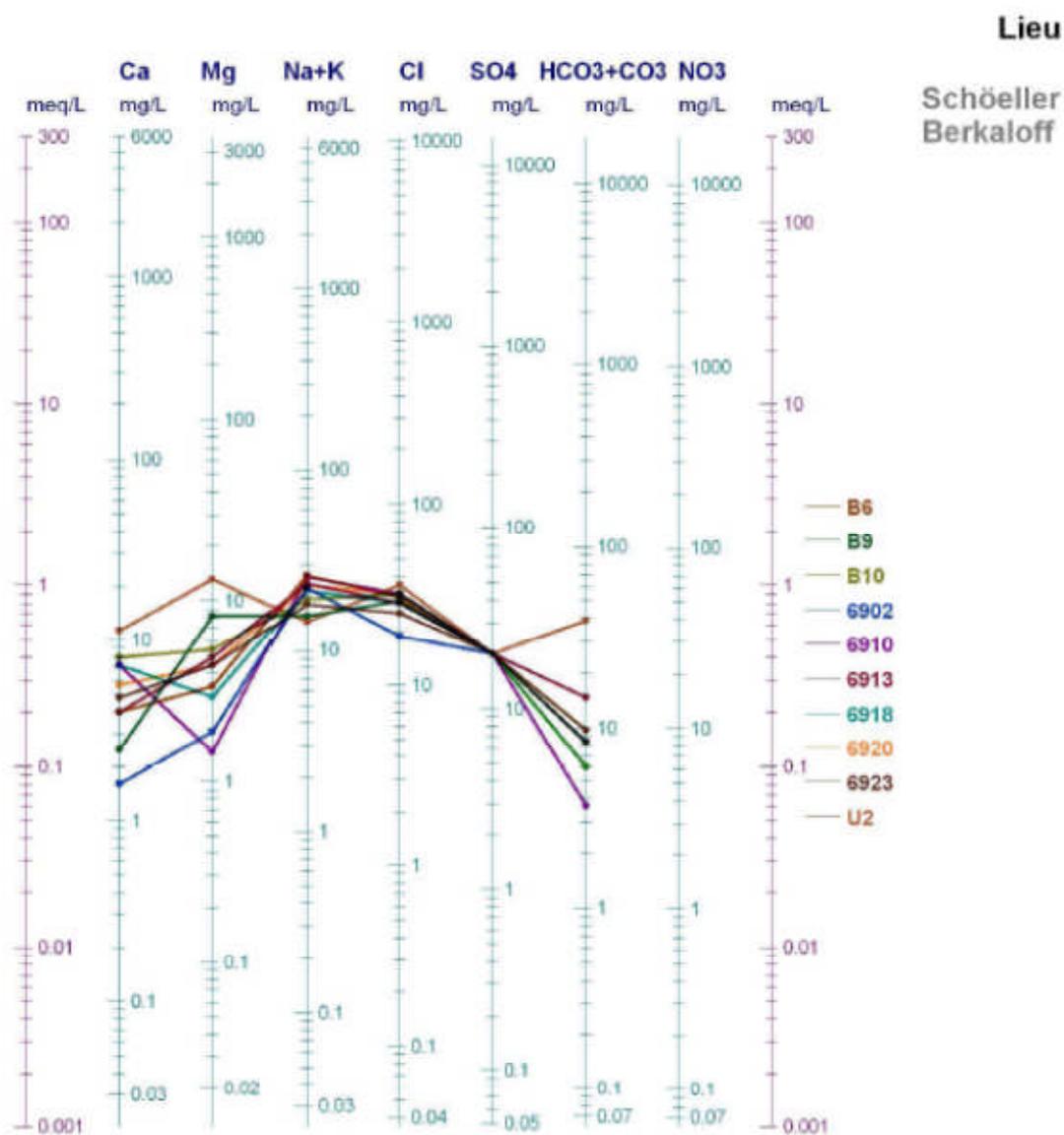


Figure 41 : Diagramme de Schoëller Berkaloff des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de hautes eaux 2010.

V. 3. 2 - Répartition graphique sur le diagramme de Piper et de Schoëller Berkaloff des résultats d'analyse chimique, période basses eaux Bouteldja 2004 et 2009

C'est pratiquement les mêmes anions et cations qui prédominent en l'occurrence le sodium et les chlorures à quelques exceptions près (Fig.42-45).

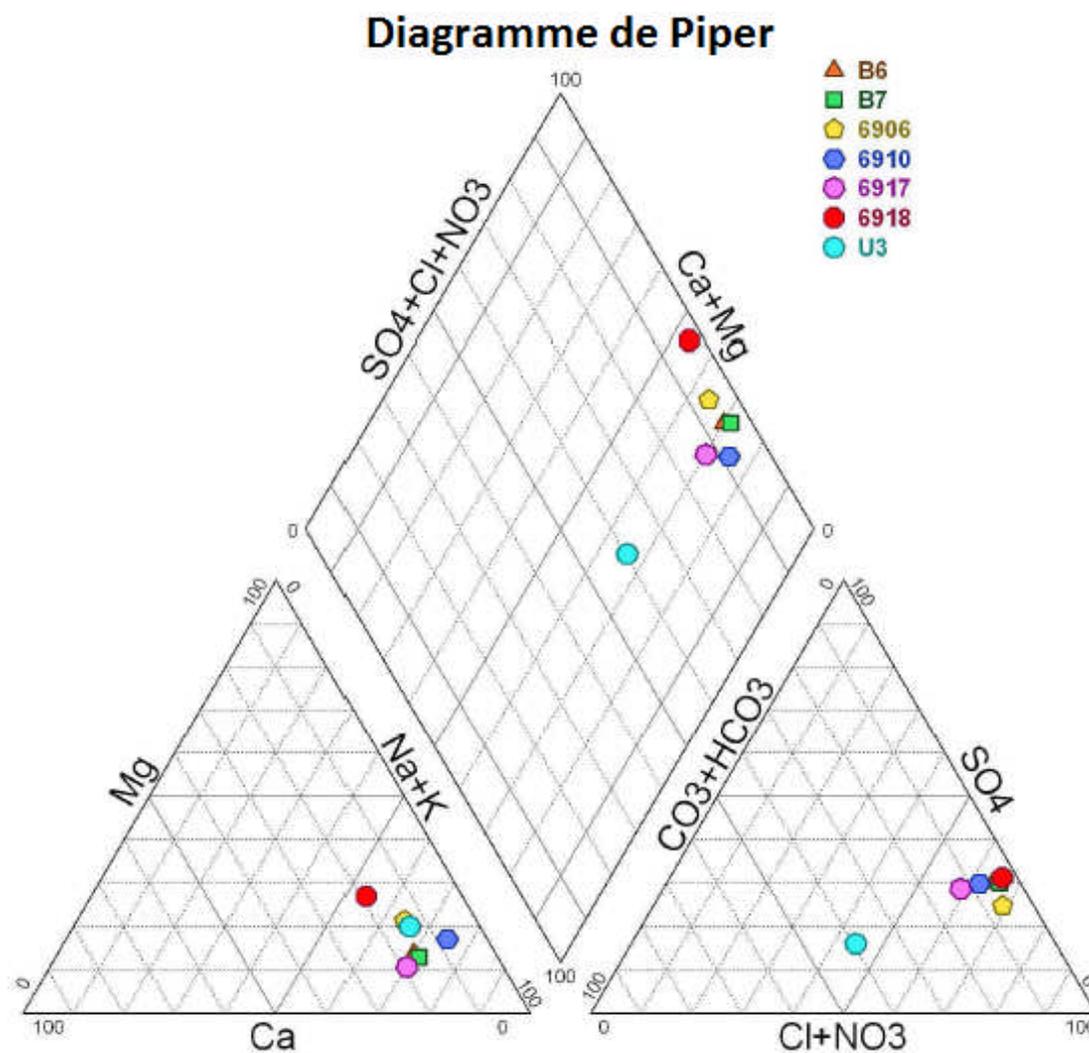


Figure 42 : Diagramme de Piper des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de basses eaux 2004.

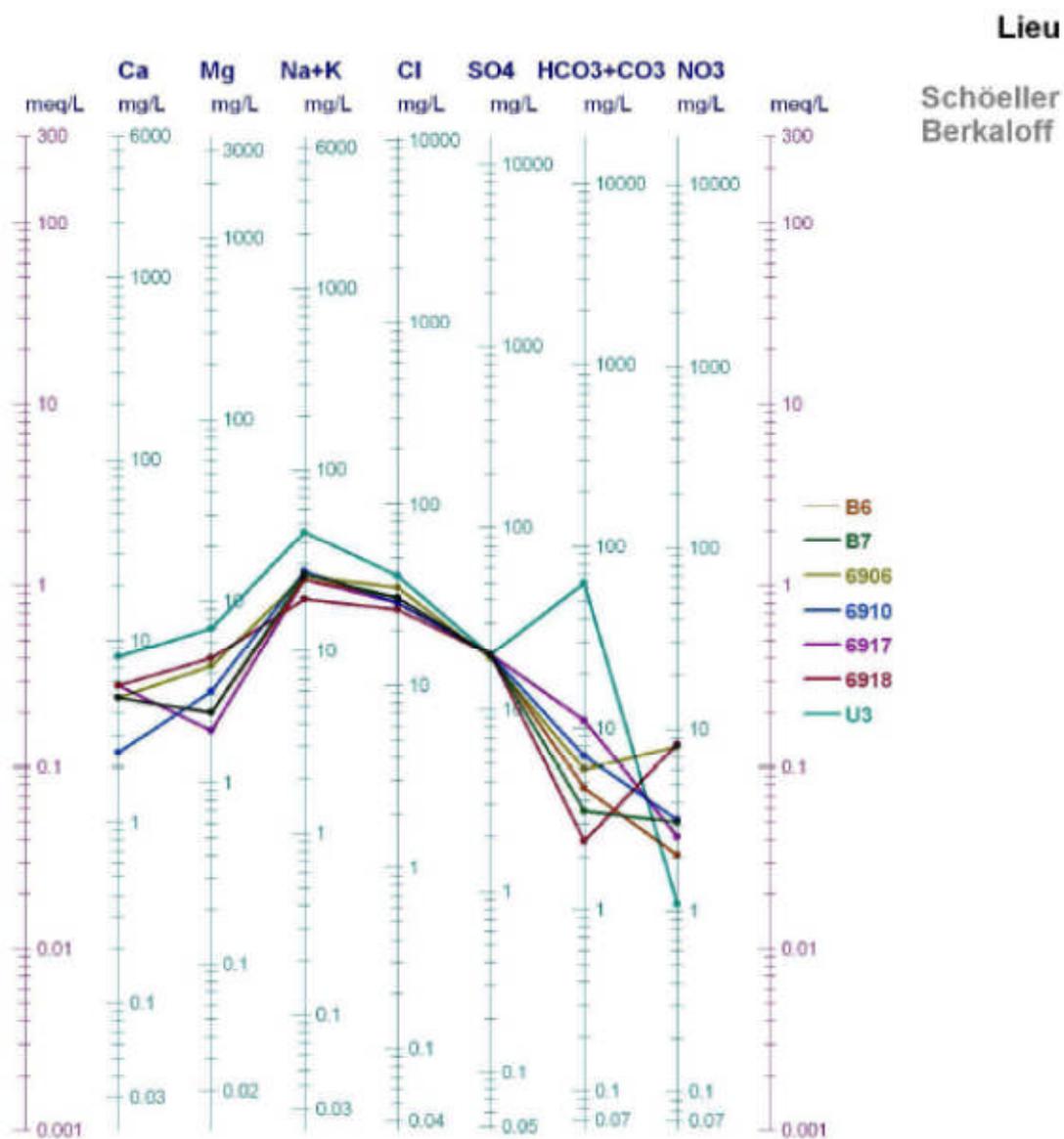


Figure 43 : Diagramme de Schoëller Berkaloff des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de basses eaux 2004.

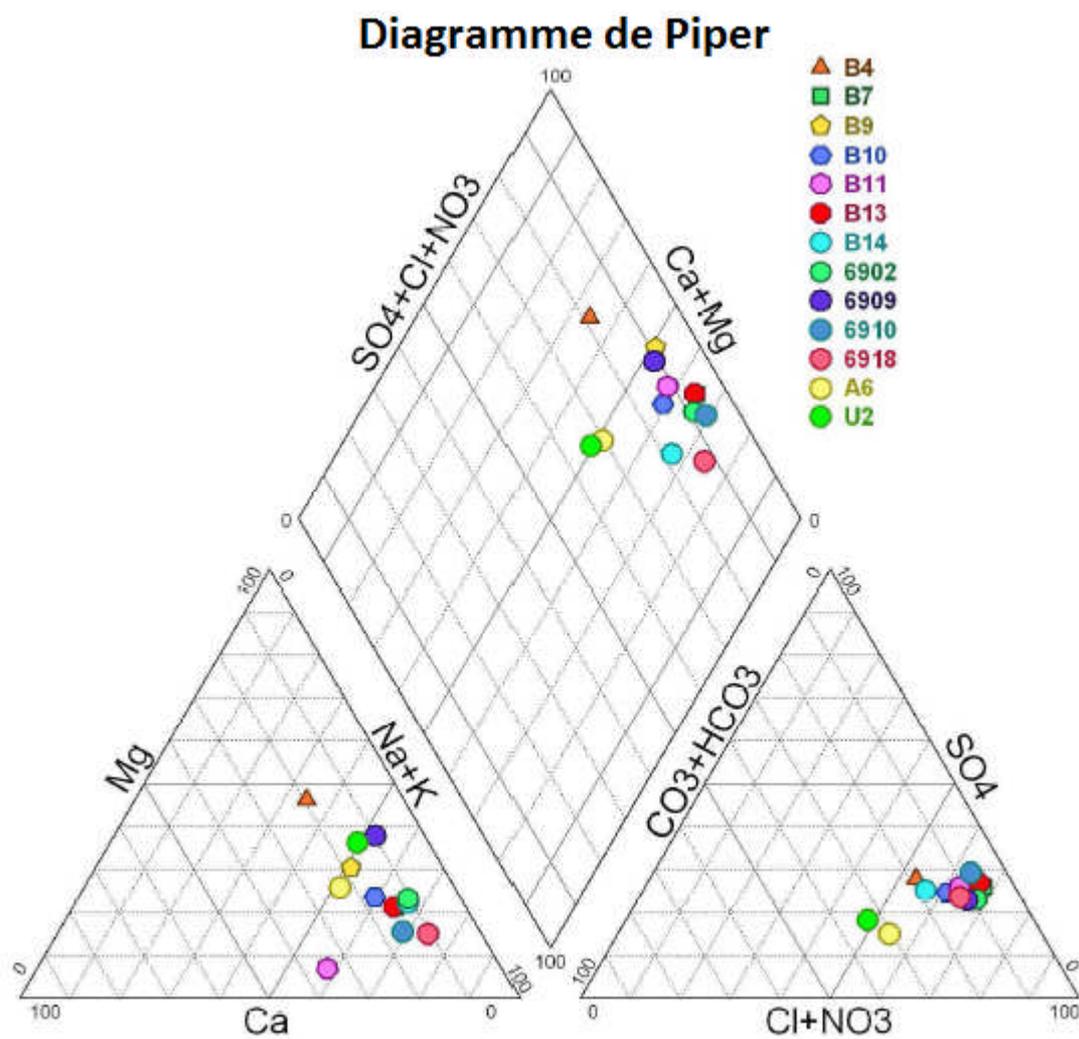


Figure 44 : Diagramme de Piper des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de basses eaux 2009.

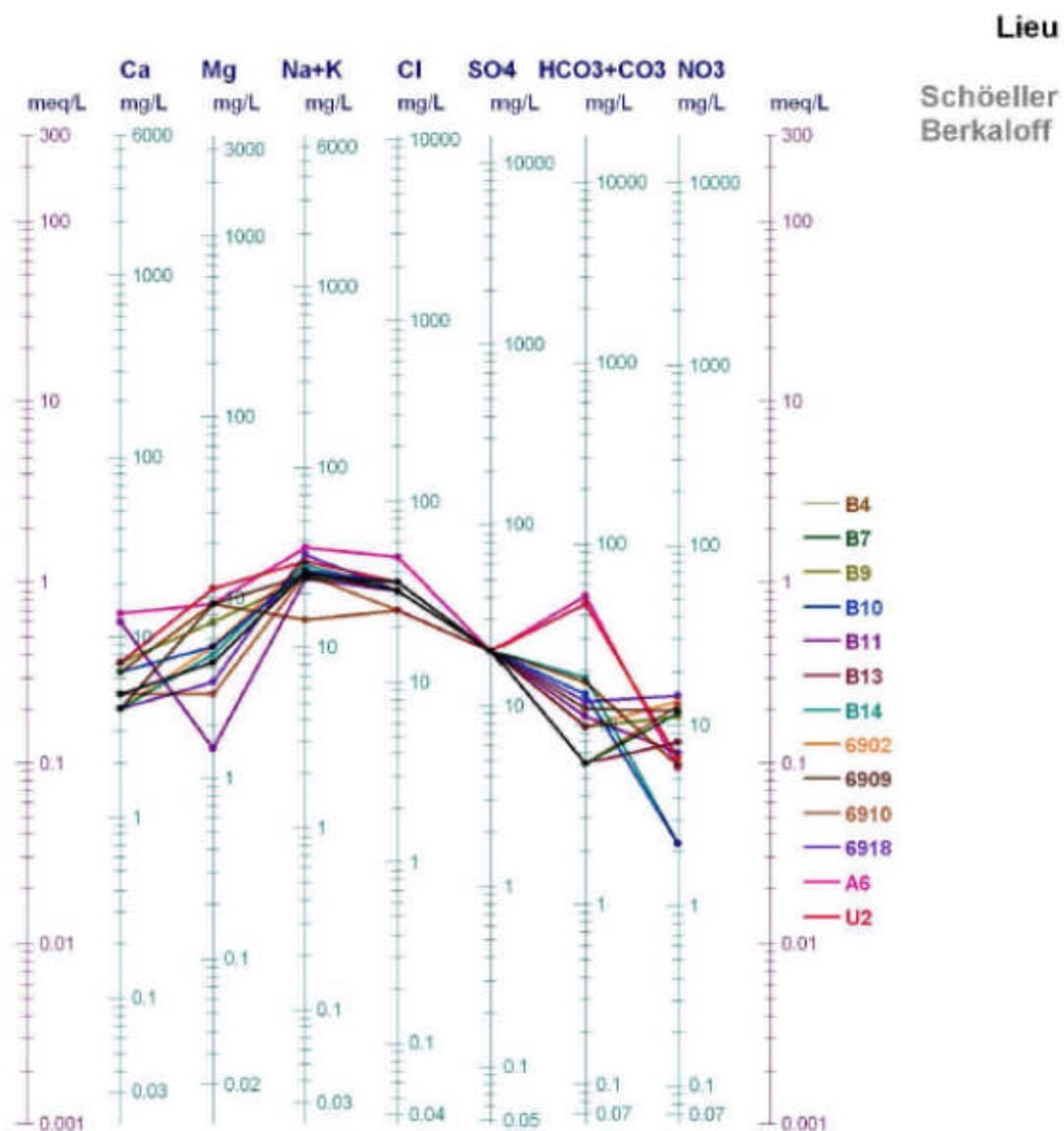


Figure 45 : Diagramme de Schoëller Berkaloff des résultats de l'analyse chimique des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja période de basses eaux 2009.

V. 4 - Faciès chimique et formule ionique des analyses chimiques

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 exprimés en meq/l.

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

Les analyses pour lesquelles la balance ionique est supérieure à 6% ne seront pas prises en considération.

Les comparaisons ioniques reposent essentiellement sur l'établissement de la prédominance de tel ou tel ion (Tab.23).

Tableau 23 : Formules ioniques et faciès chimiques des eaux du massif dunaire.

Forages	Formule ionique	Période	Faciès chimique
B3, B4, B5, B8, B9, A7 et U1.	$rCl^- > rSO_4^{4-} > rHCO_3^-$, $r(Na^{++}+K^+) > rMg^{++} > rCa^{++}$	Hautes eaux 2004.	Chloruré-sodique.
B4, B5, B6, B7, B8, B9, 6906, 6910, 6917, 6918, A7, U1 et U3.	$rCl^- > rSO_4^{4-} > rHCO_3^-$, $r(Na^{++}+K^+) > rMg^{++} > rCa^{++}$	Hautes eaux 2005.	Chloruré-sodique.
B4, B5, B7, B8, B9 et U3.	$rCl^- > rSO_4^{4-} > rHCO_3^-$, $r(Na^{++}+K^+) > rMg^{++} > rCa^{++}$	Hautes eaux 2006.	Chloruré-sodique.
B4, B5, B8, B9, B13, 6918, A7 et U3.	$rCl^- > rSO_4^{4-} > rHCO_3^-$, $r(Na^{++}+K^+) > rMg^{++} > rCa^{++}$	Hautes eaux 2008.	Chloruré-sodique.
B6, B9, B10, 6902, 6910, 6913, 6918, 6920, 6923 et U2.	$rCl^- > rSO_4^{4-} > rHCO_3^-$, $r(Na^{++}+K^+) > rMg^{++} > rCa^{++}$	Hautes eaux 2010.	Chloruré-sodique.
B6, B7, 6906, 6910, 6917, 6918 et U3.	$rCl^- > rSO_4^{4-} > rHCO_3^-$, $r(Na^{++}+K^+) > rMg^{++} > rCa^{++}$	Basses eaux 2004.	Chloruré-sodique.
B4, B7, B9, B10, B11, B13, B14, 6902, 6909, 6910.	$rCl^- > rSO_4^{4-} > rHCO_3^-$, $r(Na^{++}+K^+) > rMg^{++} > rCa^{++}$	Basses eaux 2009.	Chloruré-sodique.

D'après la formule ionique et les diagrammes de Piper et de Schoëller Berkloff, 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 (N. Haied, 2008).

Conclusion

L'étude hydrochimique des eaux superficielles et souterraines du système aquifère du massif dunaire de Bouteldja nous à permis d'apprécier leur qualité chimique qui constitue un point essentiel pour l'objectif de 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 Kébir Est est de bonne qualité (pas de pollution chimique), ainsi que la nappe offre une eau douce d'excellente qualité pour l'AEP et l'irrigation.

FAISABILITE DE L'IMPLANTATION
D'UN BASSIN D'ALIMENTATION
D'UN AQUIFERE

VI. 1 - Introduction

La nécessité de gérer les ressources en eau conduit à s'interroger sur les possibilités d'emmagasiner dans le sous-sol d'une partie de l'eau excédentaire de surface soit pour régularisation, soit pour restauration d'un équilibre perturbé par l'exploitation intensive entraînant un abaissement de la surface piézométrique et par conséquent un accroissement des charges d'exploitation.

Parmi les techniques d'aménagement de ces ressources : la recharge artificielle s'avère une approche particulièrement intéressante qui consiste à augmenter l'infiltration naturelle de l'eau de précipitation ou introduire dans le sous-sol des eaux superficielles.

Cette technique a donné des résultats très encourageants dans différents pays du monde, notamment dans les pays maghrébins. Par exemple, en Tunisie, elle a commencé au début des années 1980. Ils ont tenté même de réutiliser des eaux usées épurées à la recharge des nappes superficielles. Au Maroc, elle est largement expérimentée depuis plus de 30 ans avec d'excellents résultats. En Algérie, cette technique est très peu pratiquée ; la seule application a eu lieu le 27 avril 1998 par des compagnes de lâchers des eaux du barrage de Boukourdane (Ouest d'Alger) pour recharger la nappe alluviale de l'Oued El Hachem dont le volume totale infiltré est de $52,3\text{m}^3$, soit une infiltration de 10,87% du volume lâché (Remini, 2005 in Seghir et Khérici, 2010).

La nappe du massif dunaire de Bouteldja est intensivement exploitée et même surexploitée pour répondre aux besoins de l'irrigation et de l'AEP des deux wilayas : Annaba et El Tarf. Cette augmentation en eau évolue à la hausse au vu de l'accroissement de la population. En complément du stockage superficiel (barrage et retenues collinaires), la recharge artificielle permet de soulager les nappes et de compenser les débits exploités.

VI. 2 PARTIE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

VI. 2. 1 - ETUDE DE LA FAISABILITE DE LA RECHARGE ARTIFICIELLE

VI. 2. 1. 1 - La recharge artificielle à travers le monde

Les recherches bibliographiques ont permis de mettre en avant des pays où la pratique de la recharge artificielle de la nappe est pratiquée. Une analyse rapide des exemples à permis d'établir le tableau 24 suivant.

Nous constatons que les américains ont très souvent recours à ce processus afin que cette eau soit réutilisée pour l'irrigation mais également pour la consommation humaine.

Tableau 24 : Tour du monde de la recharge artificielle.

Pays	Localisation du site	Type de réalimentation	Taille de la commune (nombre d'habitants)
ALLEMAGNE	Berlin	Percolation pour 15% Injection directe	3,4 millions
AUSTRALIE	Adelaïde		1,1 millions
ETATS-UNIS	West Basin, Californie	/	/
ETATS-UNIS	Tucson, Arizona	Percolation	/
ETATS-UNIS	Ville de Mesa, Arizona	Percolation	/
FRANCE	Pecq-Croissy	Percolation	
FRANCE	Moulle	Percolation	300 000
ISRAEL	Dan Région Project, Tel-Aviv	Percolation	1,3 millions
MEXIQUE	Mexico		18 millions
TUNISIE	Korba	Percolation	/

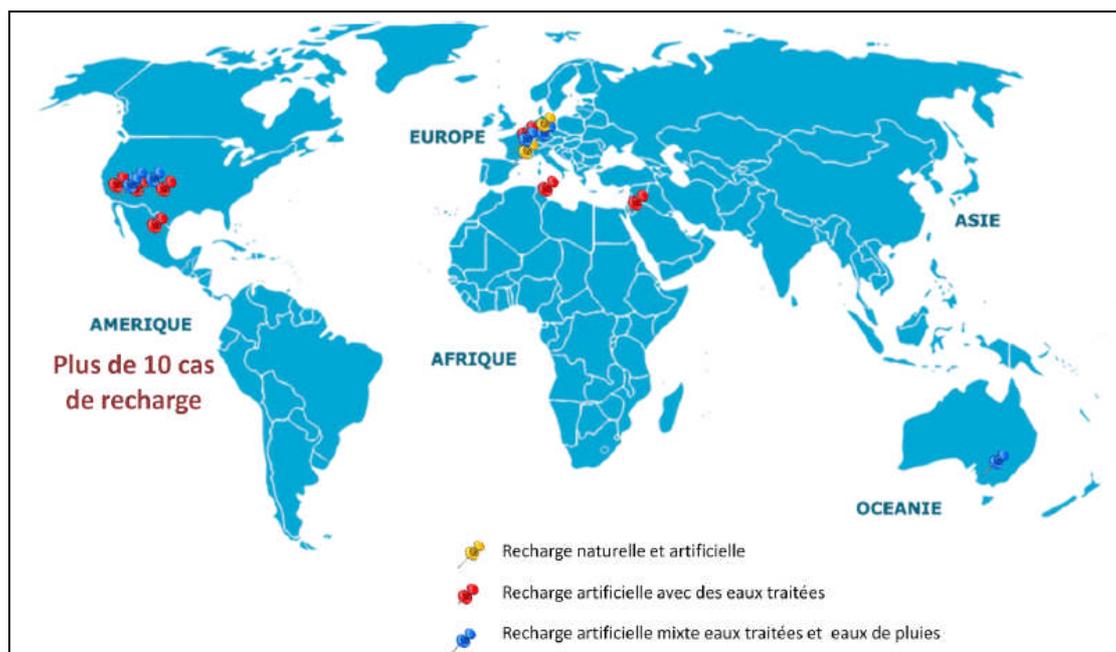


Figure 46 : Localisation des cas recensés de recharge de nappe dans le monde.

VI. 2. 1. 2 - Applications principales de l'alimentation artificielle

VI. 2. 1. 2. 1 - Accroissement des ressources

Gestion : Un besoin accru d'alimentation en eau nécessite l'élaboration d'une gestion globale des ressources avec parfois un transfert des eaux de surface dans les aquifères profonds. On prend en compte: la distribution irrégulière des eaux souterraines et de surface ; les réservoirs fixes, lacs, barrages ; les éléments de transfert, le ruisseau, le fleuve, et la nappe.

Les pointes : La consommation d'eau est difficile à planifier du fait de débits de pointes prévisibles (arrosages, par exemple) et imprévisibles (sécheresse). En général on considère que le débit en heures de pointe peut être de 40% supérieur à celui du débit moyen. Stocker l'eau dans des aquifères souterrains permet en principe au réseau d'absorber plus facilement ces pointes que par le recours à des stocks de surface, à cause des problèmes de traitement de l'eau ou des débits irréguliers des cours d'eau.

VI. 2. 1. 2. 2 - Modifications du caractère chimique et thermique

L'injection d'eau implique un filtrage et un temps de séjour dans le sol relativement important, d'où une amélioration de la qualité de l'eau injectée par rapport à l'eau réexploitée. Inversement, on peut tenter d'améliorer la qualité chimique de l'eau d'un aquifère par des réinjections d'eau de bonne qualité (biseau salé). En ce qui concerne l'utilisation thermique de

l'eau pour le refroidissement d'installations industrielles, le stockage souterrain de l'eau garantit une stabilisation thermique souvent très appréciée.

VI. 2. 1. 2. 3 - Restauration d'un équilibre perturbé

Les pompages excessifs entraînent parfois un important abaissement du niveau dynamique et les frais d'exploitation deviennent prohibitifs. Ces pompages peuvent également induire des apports d'eau de nappes éloignées dont la qualité chimique est préoccupante.

VI. 2. 1. 3 - Problèmes de la recharge

Les principaux problèmes de la recharge sont :

➤ **Le colmatage dû aux matières en suspension** : on pourra soit le prévenir, soit le guérir et c'est souvent la première méthode qui reste la meilleure. Ainsi, on utilisera des eaux chargées à moins de 1 000 ppm de matières en suspension; ou on traitera l'eau des bassins par décantation ou même floculation. Celle-ci pourra être faite à l'aide de sulfate de cuivre. On cite également, au Texas, l'atomisage par avion de produits tels que le « Separan » sur des cours d'eau; une amélioration de 75 % aurait été obtenue. Lorsque le colmatage n'aura pas pu être empêché on retournera mécaniquement le fond des bassins après séchage; on pourra aussi remplacer les couches supérieures par du gravier à granulométrie adéquate ;

➤ **Les microorganismes** : on les combattra à l'aide du Chlore (2 à 15 ppm), du citrate de cuivre, d'oxygène et par maintien de conditions aérobies (faible épaisseur d'eau, aérateurs), contre les algues, des algicides seront efficaces; l'utilisation des virus est même envisagée.

Ainsi, Daniel Jackson de l'Université de Syracuse, USA a introduit le .bleu-green algal virus LPP-1. Dans un bassin de 10 mètres cubes riche en algues et a obtenu une eau limpide au bout de 2 jours (Bulletin de l'association international des sciences d'hydrologie XVI, 1971).

➤ **L'entraînement de l'air dans l'eau injectée** : ce gaz pénètre dans l'aquifère, permet des réactions d'oxydation et, du fait de la tension superficielle eau/air, colmate partiellement l'aquifère. On y remédie en plaçant des dispositifs d'aspiration d'air sur les conduites et on évitera l'injection en chute libre.

➤ **Les réactions d'échange d'ions** : les eaux superficielles contiennent beaucoup plus de Na que les eaux souterraines. Cette eau riche en Na modifie l'équilibre eau souterraine /minéraux des argiles ; il y a fixation de Na et libération de Ca. Cette mise en solution de Ca déplace l'équilibre des suspensions semi-colloïdales d'argile et peut entraîner des modifications importantes de perméabilité. Pour y remédier on peut ajouter du CaCl à l'eau

injectée pour équilibrer la composition Ca/Na entre l'eau injectée et l'eau souterraine. On peut également employer l'hexametaphosphate de sodium comme dispersant des argiles ;

- La stabilité de l'eau : l'addition de CaCl peut modifier l'équilibre des carbonates dans l'eau et changer les activités des différents ions.

- L'eau souterraine contient 10 à 100 fois à plus de CO₂ que l'eau superficielle. Il y a lieu donc lors de cycles répétées de pompages-injection, diminution progressive de la teneur en CO₂ dans l'aquifère et possibilité de précipitation de carbonates. Une acidification peut remédier à cet inconvénient.

- Les changements de la température entre eau superficielle et eau souterraine peuvent également déplacer des équilibres et modifier la viscosité de l'eau.

- Des changements biologiques peuvent également se produire.

- Des réactions entre eau injectée et les roches doivent être examinées.

De toutes les manières, si chaque cas présente bien des particularités et une solution, il reste encore beaucoup d'études à faire pour maintenir les débits d'injection des ouvrages.

VI. 2. 1. 4 - Conditions générales de la recharge artificielle

Pour sélectionner un site de recharge et obtenir les résultats cités jusqu'à maintenant, il y a deux paramètres qui jouent un rôle fondamental :

- les caractéristiques des eaux à injecter d'une part ;
- et celles du milieu récepteur - l'aquifère - d'autre part.

Dans tout projet de recharge, il y aura donc lieu de considérer :

Les conditions géologiques, hydrologiques, topographiques, pédologiques, hydrogéologiques et hydrodynamiques qui conditionnent cette réalimentation. Bien entendu, les aspects économiques et juridiques de l'opération ne peuvent non plus être ignorés.

VI. 2. 1. 4. 1 - Facteurs hydrologiques

Il s'agit tout d'abord d'analyser toutes les sources en eau possibles pour la recharge et de définir leur répartition en débit dans le temps et dans l'espace ainsi que le meilleur moyen de les diriger efficacement sur le site. Par conséquent, s'assurer des disponibilités adéquates en quantité et qualité au moment voulu. Un projet de recharge comprendra donc une étude des ressources en eau de surface locales et appréciera les possibilités d'importation. En effet, s'il est souhaitable que les eaux à injecter proviennent de cours d'eau proches du site.

VI. 2. 1.4. 2 - Facteurs topographiques

Ils ne jouent pas de rôle essentiel dans le cas d'ouvrages d'injection profonde; par contre, ils sont à considérer dans celui de la recharge superficielle. Ce sont des pentes de l'ordre de 1 à 2 % environ qui seront en général les plus favorables.

Ce sont, en effet, souvent celles que l'on rencontre dans les portions les plus étalées et les plus perméables des cônes de déjection et des lits des cours d'eau. D'autre part, dans le cas de pentes trop accusées, des hauteurs d'enceinte prohibitives deviendraient nécessaires pour limiter des bassins de volume convenable ou bien il faudrait un grand nombre d'enceintes de hauteur normale; cela mettrait en cause la rentabilité du projet.

VI. 2. 1. 4. 3 - Facteurs pédologiques

Les caractéristiques des dépôts de surface sont loin d'être négligeables. Par exemple, plus la texture du sol sera grossière plus le taux d'infiltration sera élevé. Outre la texture, interviendront des paramètres tels que: la perméabilité, le profil et les variations avec la profondeur, le degré de compactage, la présence ou l'absence de croute calcaire ou de cuirasse ferrugineuse, de matière organique etc.

VI. 2. 1. 4. 4 - Facteurs géologiques et hydrogéologiques

Outre une étude géologique générale, une analyse détaillée sera nécessaire afin de reconnaître et délimiter les réservoirs les plus adaptés à l'opération; géophysique et sondages en seront l'un des moyens.

L'analyse aura pour but de déterminer l'origine, la nature et l'extension des sédiments ainsi que leur aptitude à la recharge. Ainsi, il y aura lieu de définir le réservoir, ses profondeurs, sa structure, sa lithologie, ses limites horizontales et verticales et la profondeur jusqu'au niveau de l'eau.

VI. 2. 1. 4. 5 - Facteurs hydrodynamiques

Nous devons aussi évaluer les perméabilités horizontales et verticales qui devront être importantes, la transmissivité, la porosité et le coefficient d'emmagasinement ainsi que les variations de ces paramètres. On touche déjà là à l'étude hydrogéologique qui devra établir la piézométrie, chiffrer le gradient hydraulique, apprécier le sens d'écoulement des eaux, définir les limites alimentaires et les exutoires, le réseau d'exploitation, la chimie de l'eau, le bilan hydrologique et chimique. Il faudra également évaluer quelle sera l'influence de la recharge sur ce réservoir, quelles seront les zones qui en profiteront.

VI. 2. 1. 5 - Méthodes de la recharge :

L'alimentation artificielle est pratiquée à partir d'ouvrages projetés pour maintenir des taux d'infiltration élevés et accroître la surface mouillée ainsi que le temps de contact entre l'eau et le sol.

La recharge se fait à l'aide d'ouvrages atteignant les nappes mais le plus souvent à partir de structures qui ne les atteignent pas. Celles-ci sont, selon les cas, utilisées

conjointement avec des réservoirs de surface dans lesquels les eaux de crue sont stockées et même décantées.

Les méthodes les plus pratiquées font appel aux bassins (plus de la moitié) ; à l'amélioration des lits des cours d'eau environ de 15 % ; aux puits et forages environ de 12 % ; aux fosses et canaux environ de 8 %, aux carrières de sables et graviers, 7 % et à l'épandage, mais ce dernier procédé n'est pas fréquent.

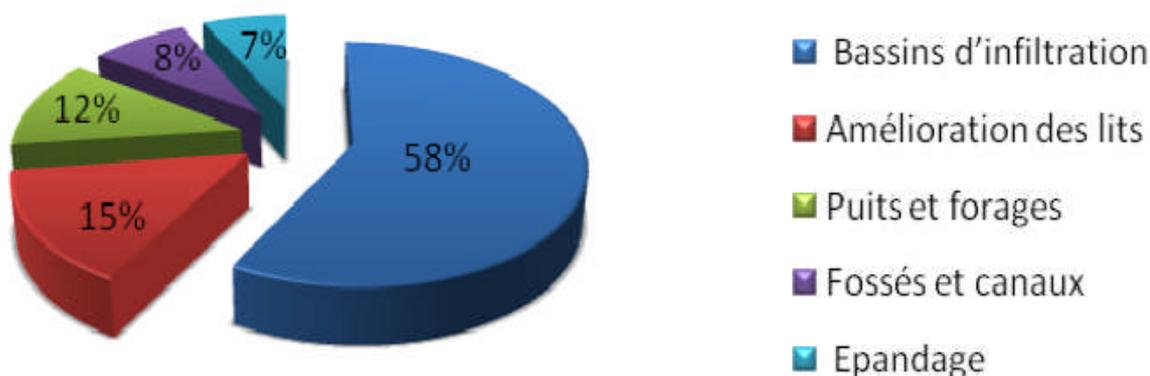


Figure 47 : Répartition des méthodes utilisées dans la recharge.

VI. 2. 1. 5. 1 - Amélioration du lit des cours d'eau :

L'utilisation du lit des cours d'eau est un moyen souvent efficace et rentable de procéder à la recharge artificielle. D'une part, il s'agit souvent là des zones d'alimentation naturelle des nappes et par conséquent le site est déjà trouvé; d'autre part, on rencontre la des matériaux hautement perméables notamment en zones semi-arides. L'opération consiste à aménager le lit du cours d'eau en l'élargissant, l'aplanissant et le scarifiant. On peut également y construire des bassins ou, plus simplement, des digues peu élevées temporaires ou permanentes, en gabions par exemple. Des ouvrages plus sophistiqués tels que des digues en caoutchouc gonflable ou en acier (en Italie, plaques ITACOR de 1 x 1,5 mètres et 5 millimètres d'épaisseurs) peuvent être mises en place. Ces ouvrages peuvent être disposés en série tout au long du cours d'eau. Ils serviront à retenir l'eau et à augmenter la superficie et le temps de contact entre l'eau et le milieu perméable.

Cette méthode convient particulièrement lorsque les débits de surface sont très concentrés dans le temps - cas des oueds sahariens et autres cours d'eau intermittents des zones semi-arides. Elle est facile à appliquer et peu coûteuse.

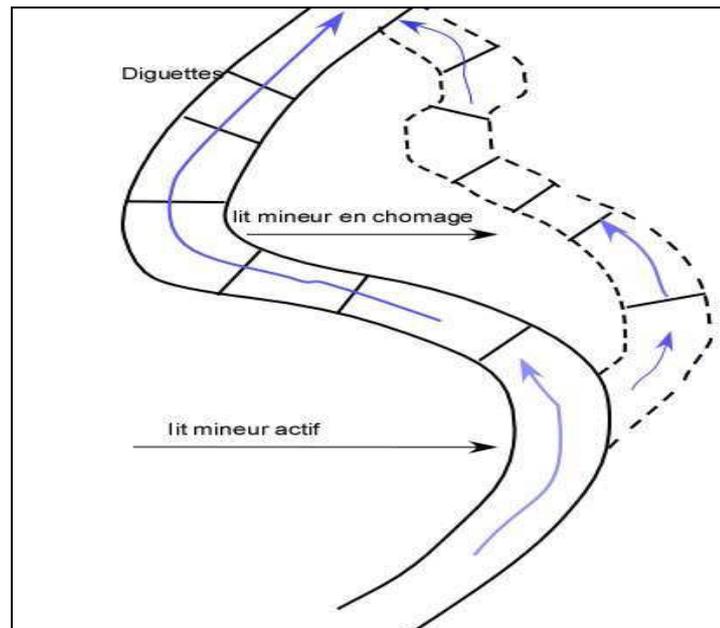


Figure 48 : Lit d'oued aménagé (Bulletin de l'association international des sciences d'hydrologie, 1971).

VI. 2. 1. 5. 2 - Fosses et canaux

Il s'agit d'un système de fosses à fond plat qui sert à transporter l'eau et à faciliter son infiltration. Il est avantageux de le concevoir lorsque le sol est caillouteux, la pente trop forte pour autoriser l'installation de bassins et la charge en matières en suspension élevée.

Les fosses peuvent avoir une largeur de 0,50 à 1 ou 2 mètres selon la nature du terrain et la vitesse désirée pour le courant d'eau - vitesse calculée pour prévenir le dépôt des matières en suspension. Ils sont en général disposés soit selon les courbes de niveau, soit à partir d'un canal principal subdivisé en diguettes. Le système se termine par un canal collecteur qui achemine les eaux excédentaires au cours d'eau d'emprunt.

L'inconvénient de la méthode est que la zone mouillée est bien moindre que dans le cas de bassins (15 % environ de la superficie totale de la zone) si bien que leur efficacité ne vaut pas celle de ceux-ci. Aussi, elle n'est applicable que dans le cas où de grandes surfaces sont disponibles.

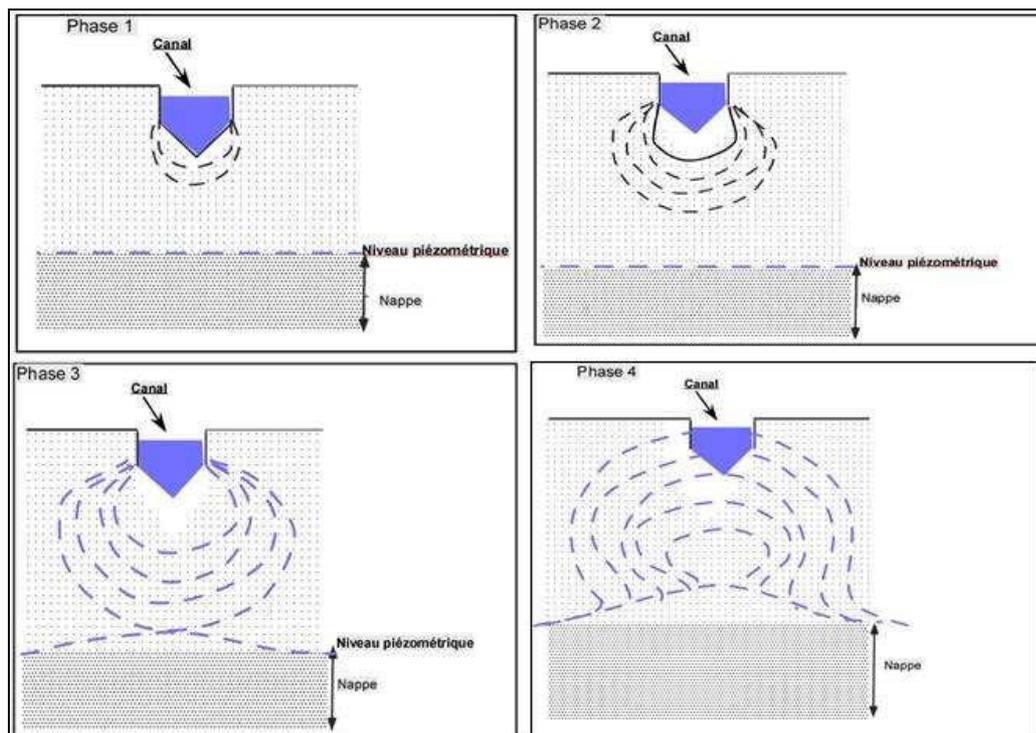


Figure 49 : Infiltration à partir d'un canal (Bulletin de l'association internationale des sciences d'hydrologie, 1971).

VI. 2. 1. 5. 3 - Epannage de crues :

Dans les zones où les pentes sont faibles et uniformes, on choisira de répandre l'eau en une lame mince et continue. L'écoulement sera contrôlé à l'aide d'ouvrages placés à des endroits privilégiés ou à protéger.

La méthode - inondation d'une aire - ne perturbe pas le milieu naturel, coûte peu mais ne se traduit pas par des débits de percolation aussi importants que ceux obtenus avec les bassins.

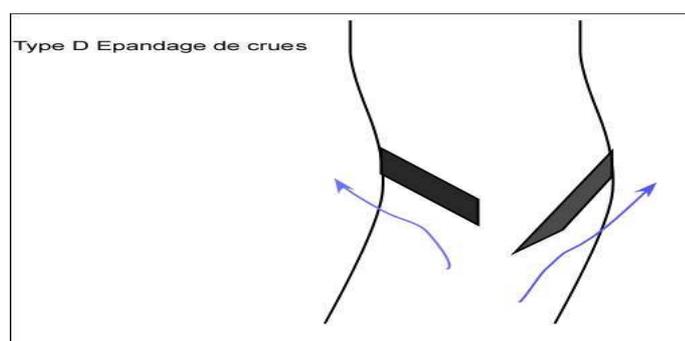


Figure 50 : Epannage de crues sur les rives de l'oued (Bulletin de l'association internationale des sciences d'hydrologie, 1971).

VI. 2. 1. 5. 4 - Puits et forages d'injection (ouvrages de recharge profonde)

L'injection de ce type offre plusieurs avantages. Seuls ces ouvrages permettent de recharger des nappes captives lorsqu'il n'est pas possible de le faire dans leurs zones d'alimentation naturelle. Des surfaces étendues ne sont pas nécessaires et l'injection sous pression est possible, enfin la perméabilité horizontale des terrains est plus grande que la verticale mais, ceci compensant cela, le colmatage se produit souvent et les débits d'injection ne sont pas faciles à maintenir. Ces ouvrages sont donc souvent d'efficacité modérée et en outre coutent très cher.

Les puits et forages d'injection sont essentiellement utilisés dans le cas de stockage de résidus nocifs et de lutte contre l'intrusion d'eau salée, notamment dans le cas d'aquifères côtiers où elle peut atteindre plusieurs milliers de mètres à l'intérieur des terres; une barrière d'extraction de l'eau salée peut alors être éventuellement couplée à celle de recharge.

Leur construction, toujours délicate, nécessite souvent l'isolement par cimentation de la zone absorbante et la pose d'un massif de gravier qui favorise l'injection et prolonge la durée de l'ouvrage. On peut les concevoir secs ou humides, c'est à dire avec crépine au-dessus ou au-dessous de la zone saturée. Le deuxième schéma étant le meilleur car il évite les oxydations.

En résumé, l'injection par forage, si elle est délicate, est une technique qui a fait ses preuves, offre de bonnes perspectives et reste à étudier et développer davantage.

VI. 2. 1. 5. 5 - Drains

Ils sont bien moins répandus que les précédents. On pourrait citer ceux utilisés aux Pays-Bas où des conduites en béton avec ouvertures et entourées de graviers et de sables prennent 1 m³/mètre/jour. En Allemagne, à Francfort, un drain de 3 kilomètres de long et de 2 mètres de diamètre placé dans une formation sableuse absorbe 10 m³/jour et par mètre linéaire. En Iran et Afrique du Nord, on peut imaginer de condamner la partie aval de certains qanâts et l'utiliser comme drain d'injection.

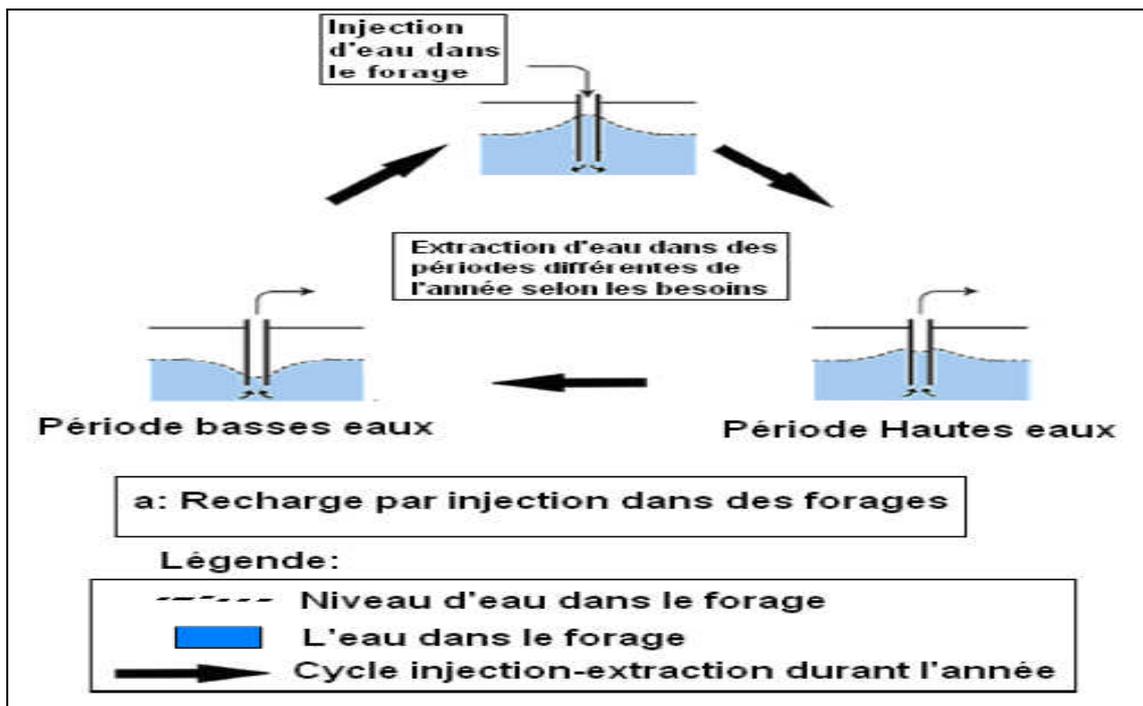


Figure 51: Méthodes d'injection artificielle d'eau dans la nappe (puits et forages).

VI. 2. 2 - FAISABILITE DE L'IMPLANTATION D'UN BASSIN D'ALIMENTATION

Pour pouvoir apprécier la faisabilité technique de la recharge artificielle à partir des ces eaux, il est important d'une part de sélectionner les secteurs les plus favorables à la recharge, ce qui fait appel au notion de bassin d'alimentation des captage et la portion de la nappe alimentant le captage (BAC et PNAC), et d'autre part de mettre au point les dispositifs les mieux adaptés pour réaliser un apport artificiel au droit de ces secteurs.

VI. 2. 2. 1 - Bassin d'alimentation des captages et portion alimentant le captage (BAC et PNAC) (Concepts et terminologie)

Le BAC est le lieu des points de la surface du sol qui contribuent à l'alimentation du captage.

A l'intérieur d'un bassin versant souterrain, on peut définir une portion de la nappe d'eau souterraine alimentant le captage (PNAC) ; elle représente des particules d'eau située en un endroit quelconque de la zone saturée qui termineront leur course dans le captage (Fig. 52).

Dans les cas simples, le bassin d'alimentation concerne un seul aquifère et correspond à la projection en surface de la portion de nappe alimentant le captage. C'est ce que montre la figure 53, en considérant que la surface située entre la crête topographique et la crête piézométrique est infiltrante.

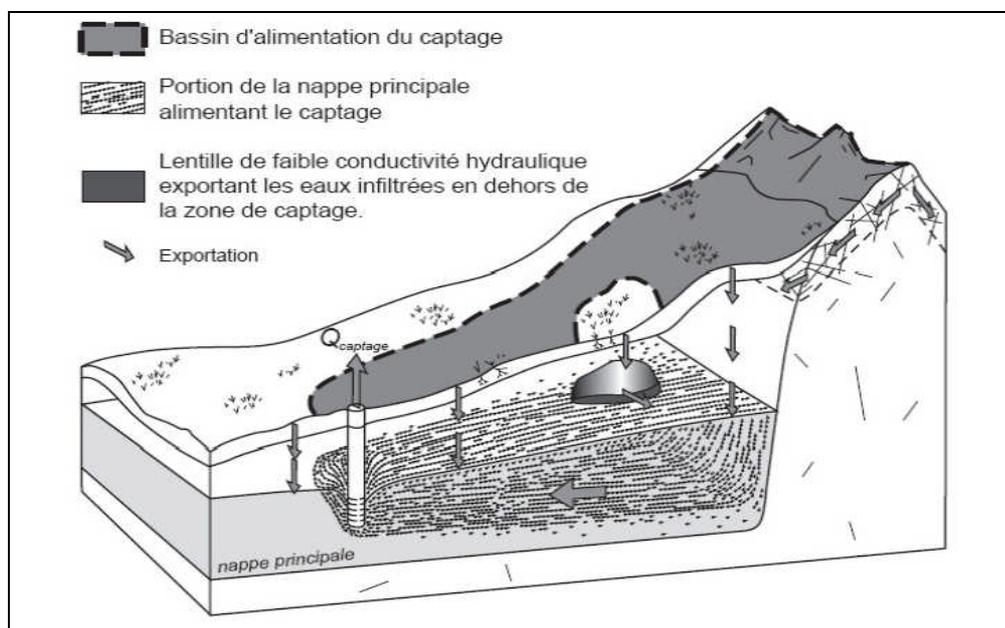


Figure 52 : Le BAC et le PNAC.

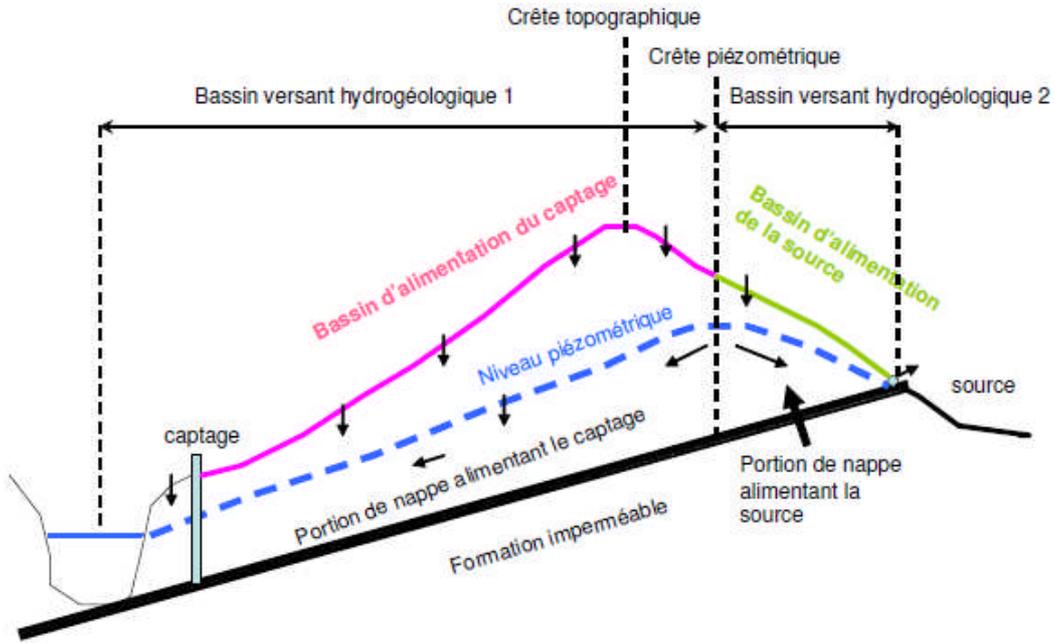


Figure 53 : Bassin hydrogéologique et bassin d'alimentation du captage dans un cas simple de nappe libre.

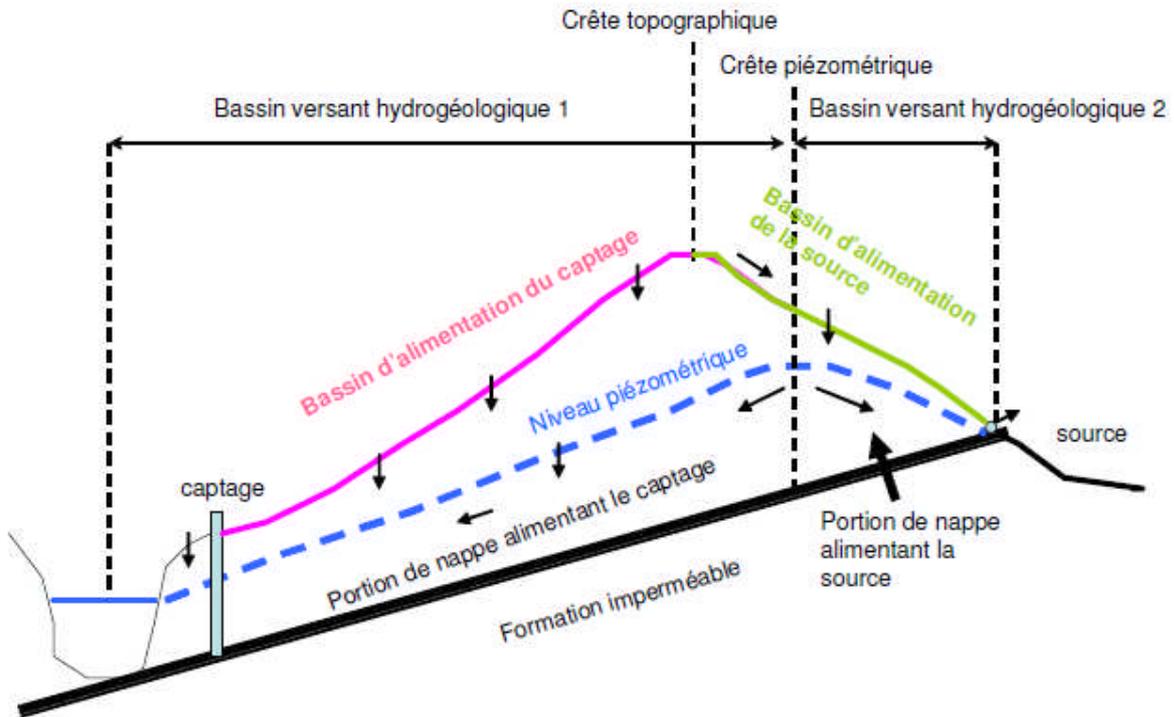


Figure 54 : Bassin hydrogéologique et bassin d'alimentation du captage dans un cas simple de nappe libre.

Si cette surface était imperméable, le bassin d'alimentation du captage serait plus réduit et à l'inverse le bassin d'alimentation de la source serait plus étendu. Dans la pratique une surface étant rarement totalement ruisselante ou infiltrante, la zone située entre la crête topographique et la crête piézométrique devrait être prise en compte pour les deux bassins, les deux BAC ayant alors une partie commune.

Dans des cas plus complexes le bassin hydrogéologique prend en compte plusieurs aquifères. Le bassin d'alimentation du captage est toujours compris à l'intérieur du bassin hydrogéologique de l'aquifère principal mais il peut alors s'étendre au-delà de l'extension structurale de l'aquifère principal.

Le bassin d'alimentation d'un captage qui, rappelons le, est le secteur en surface qui participe à l'alimentation du captage par l'infiltration directe des eaux ou par l'infiltration de cours d'eau, suit généralement la projection directe des eaux ou par l'infiltration de cours d'eau, suit généralement la projection verticale de la portion de la nappe qui alimente le captage, mais il peut en différer par ajout ou retrait de zones en surface.

VI. 2. 2. 2 - Notion d'aire d'alimentation d'un captage

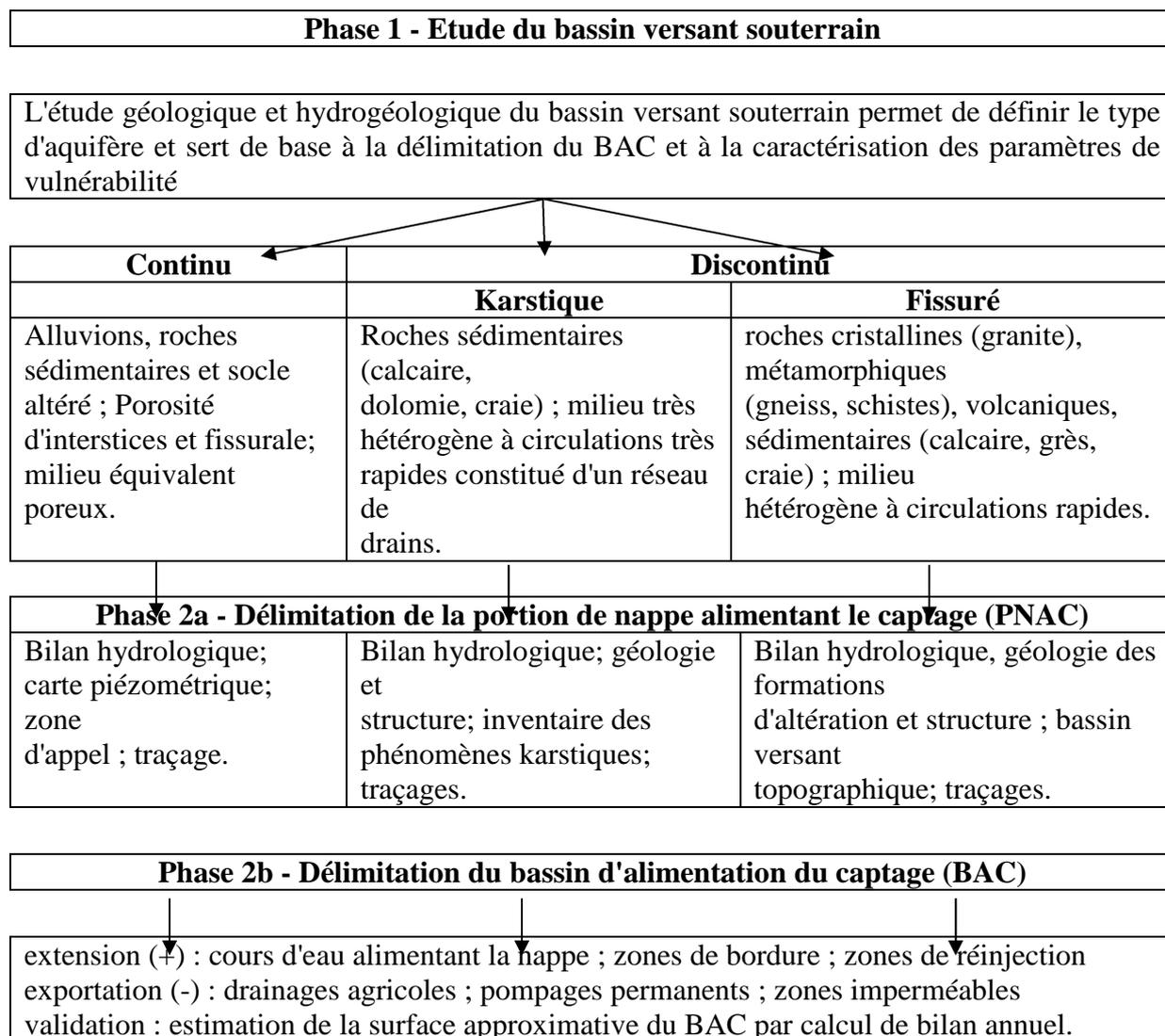
La synthèse bibliographique réalisée en préalable à cette étude (Rapport BRGM/RP-55332-FR, Mai 2007) a montré la diversité des définitions données à la notion « d'aire d'alimentation de captage ». Ces diverses définitions renvoient généralement à une notion topographique de surface en rapport avec l'alimentation d'un captage.

Le concept d'aire d'alimentation de captage n'est pas ici mentionné par référence explicite à un concept hydrogéologique, mais en relation avec l'objectif du législateur : assurer la protection de toutes ressources en eau (souterraine ou superficielles) par le biais d'action à la surface d'un territoire au niveau duquel se fait l'alimentation d'un ou de plusieurs captages d'eau potable.

Ainsi, pour ce qui concerne les eaux souterraines, il convient de considérer que les notions de « bassin d'alimentation de captage » et « aire d'alimentation de captage » sont équivalentes.

VI. 2. 2. 3 - Démarches proposées pour la détermination du BAC et PNAC :

Les démarches proposées sont schématisés comme suit :



Les facteurs de délimitation de bassin d'alimentation sont les mêmes que celles de la recharge artificielle, pour cela une seule étude va être appliquée à la région du massif dunaire de Bouteldja.

VI. 2. 2. 4 - Méthodes de délimitation des BAC :

Les premières méthodes de délimitation ont été proposées par l'USEPA (Agence de Protection Environnementale des Etats-Unis) dans le cadre de la mise en place des périmètres de protection des captages. L'USEPA a élaboré un guide pour la délimitation des périmètres de protection des captages (USEPA, 1987) ainsi qu'un guide adapté aux milieux fracturés (USEPA, 1991) et un manuel sur la protection des captages et des eaux souterraines (USEPA, 1994).

Le guide de 1987 distingue 4 méthodes de délimitation :

- ✓ les méthodes géométriques qui prennent en compte un rayon fixé arbitraire ou un rayon calculé, basé sur le temps de transport d'un contaminant par rapport au débit soutiré d'un puits ;
- ✓ les méthodes analytiques simples qui permettent de calculer les temps de transfert et les rabattements ;
- ✓ la cartographie hydrogéologique qui permet de délimiter le bassin d'alimentation du captage, avec utilisation de traceurs pour les milieux fissurés et karstiques, et cartographie de la vulnérabilité ;
- ✓ les modèles numériques basés sur les équations d'écoulement et de transport de masse.

Ces méthodes ont été reprises et développées dans de nombreux travaux (USEPA, 1998).

VI. 2. 2. 5 - Avantage et inconvénients de différentes méthodes

Les avantages et inconvénients des différentes méthodes présentées sont résumés dans le tableau 25, ci-dessous, tout en insistant sur le fait qu'il est préférable de combiner plusieurs méthodes plutôt que de se limiter à une seule et qu'elles ne doivent en aucun cas se substituer à l'étude géologique et hydrogéologique du site.

Tableau 25 : Les avantages et inconvénients des différentes méthodes utilisées pour la détermination du PNAC.

Délimitation de la portion de nappe alimentant le captage	Paramètres	Avantages	Inconvénients
Limites structurales	- Données de sondages ; -affleurements.	Utilise les résultats de l'étude géologique.	-Suppose que les limites sont imperméables ; -utilisable seulement pour des sources en nappe libre, -avec perméabilités et infiltration relativement homogènes sur le bassin.

<p>Méthode hydrodynamique graphique</p>	<p>Niveaux piézométriques ; isopièzes.</p>	<p>-Méthode intégratrice ; -Tient compte de l'hétérogénéité du milieu et de la géométrie du réservoir ; -possibilité de -prendre en compte plusieurs états piézométriques</p>	<p>-cartes piézométriques régionales rarement assez précises ; -peu adaptée pour les milieux fracturés et karstiques ; -peu adaptée en cas de forte anisotropie du milieu ; -peu précise à proximité de l'ouvrage.</p>
<p>Analytiques (Bear et Jacob, 1965)</p>	<p>-Gradient hydraulique ; -perméabilité ; -Epaisseur de l'aquifère ; -Débit de pompage.</p>	<p>-Simple à mettre en œuvre ; -permet de faire des simulations probabilistes.</p>	<p>-Milieu homogène, isotrope et infini ; -régime permanent ; applicable en toute rigueur seulement aux nappes captives ; -tendance à réduire l'aire d'alimentation ;</p>
<p>Méthodes des éléments analytiques (WhAEM)</p>	<p>-Conditions aux limites ; -perméabilité ; -débit ; recharge.</p>	<p>-Simple à mettre en œuvre ; -permet de faire varier la perméabilité ; -permet de prendre en compte une recharge et les relations nappe/rivière.</p>	<p>-Milieu isotrope ; -Ne prend pas en compte la dispersion ; -régime permanent.</p>
<p>Modèles numériques simples (ASMWIN)</p>	<p>-Conditions aux limites ; Paramètres - hydrodynamiques et hydro - dispersifs ; -Recharges ; Prélèvements.</p>	<p>-Simple à mettre en œuvre ; -Permet de faire varier la perméabilité ; -Prend en compte la dispersion ; -Permet de prend en compte une recharge ; régime permanent et transitoire.</p>	<p>-Pas de facilité offerte pour calage ; -Pas de multicouche ; -Pas de relation nappe/rivière.</p>

<p>Modèles numériques complexes (Modflow, Winmarthe,...)</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Conditions aux limites ; -Paramètres hydrodynamiques et hydro dispersifs ; -Recharges ; Prélèvements. 	<ul style="list-style-type: none"> -Méthode complète qui permet de prendre en compte hétérogénéité, anisotropie, -dispersion, recharge, relation nappe/rivière. -Considère les aspects transitoires (déplacement du bassin en fonction des années sèches ou humides, variation des débits,...). -Applicables a la plus part des types d'aquifères. 	<ul style="list-style-type: none"> -Nécessite des données et un bon modèle conceptuel de l'aquifère ; -Compétences particulières en modélisation ; -Appliquer avec précautions pour les aquifères karstiques.
---	---	--	--

VI. 3 - PARTIE 2 : Application au massif dunaire de Bouteldja

VI. 3. 1 - Introduction

La nappe libre du massif dunaire est contenue dans les sables éoliens épais de 20 m à l'Est et de 120 m à l'Ouest. La partie orientale du massif est caractérisée par une augmentation progressive des épaisseurs, suivant une première direction Est-Ouest de l'oued Bourdim (20 m) à l'oued Bouglés (75 m), puis une seconde direction NE-SW du djebel

Koursi (70 m) vers Nécha Righia (150 m). La zone centrale englobant la Garaet El Groubzi et El Gouréate présente une épaisseur relativement constante, évaluée à quelques 150 m. Dans toute la partie orientale du massif, la carte montre des épaissements très importants des alluvions notamment à l'aplomb des thalwegs reconnus par la prospection géophysique (Khérici, 1985 ; Ramdani, 1996 ; Toubal, 1998).

VI. 3. 2 - La recharge artificielle au massif dunaire de Bouteldja

VI. 3. 2. 1 - Les conditions de la recharge

VI. 3. 2. 1. 1 - La géologie et les conditions structurales (conditions aux limites)

L'étude géologique, structurale et tectonique du massif dunaire de Bouteldja, nous a permis de ressortir que le quaternaire est représenté sur une grande majorité des terrains dans la région. Le processus de sédimentation est le résultat des cycles de transgression et régression, constituant un matériel de remplissage.

Les argiles et les grès numidiens qui représentent des limites étanches (substratum), se localisent au niveau des collines et des montagnes et forment des terrains de très faible perméabilité. Par contre, il existe une limite perméable entre le massif dunaire et les grands marécages à l'Ouest, et deux limites perméables aussi au Sud dans la direction de la vallée du Kébir.

Les dunes constituées de matériels sableux représentent des zones d'alimentation et de stockage des eaux souterraines du massif dunaire de Bouteldja.

VI. 3. 2. 1. 2 - Epaisseur totale du réservoir

Les formations de faible épaisseur (alluvions des rivières en général) ne permettent d'aménager que des stations à fonctionnement continu alors que les formations épaisses et les nappes captives conviennent à la régularisation et au stockage.

Géographiquement, les épaisseurs mouillées ont tendance à se répartir comme suit (Fig.17):

- La nappe est très puissante, épaisseur supérieure à 130 m, dans les régions situées au Nord Ouest en bordure de la mer et autour des marécages de Nécha Righia et d'Oum Lagareb.
- La puissance la plus faible est atteinte à l'Ouest dans la région de Bourdim, Dj.Siah, et Dj Koursi où les proportions d'argile demeurent très importantes, ce qui limite par conséquent la fraction de la couche saturée.
- A l'Ouest de la région d'étude, les épaisseurs décroissent du Nord vers le Sud et de l'Ouest vers l'Est.

VI. 3. 2. 1. 3 - Conditions hydrogéologiques : la source d'alimentation

Il n'est de toute évidence, possible d'introduire de l'eau dans une formation perméable que si l'on dispose des ressources en quantité et en qualité convenables (oued, rivières, sources...).

L'étude d'un projet d'alimentation artificielle devra donc mettre sur le même plan, dès le stade préliminaire, les conditions hydrogéologiques et les caractéristiques de la source d'alimentation.

Notre étude hydrologique va se limiter à l'évaluation des débits moyens annuels, les régimes saisonniers et la variation saisonnière des débits.

Les ressources en eaux superficielles sont constituées par les eaux de surface telles que : les cours d'eau, les étendues libres (lacs) et les barrages. Les principaux oueds qui drainent notre zone d'étude sont le Kébir-Est et ses affluents oued El B'haim et oued Bourdim, qui sont moins importants mais qui jouent un rôle complémentaire dans l'écoulement superficiel, l'alimentation et surtout le drainage des nappes superficielles.

Le tableau 26 nous permet d'avoir plus d'information sur le potentiel hydrique superficiel assuré par les apports des oueds qui drainent le bassin versant de la Mafragh et plus précisément la région d'étude.

Tableau 26 : L'apport moyen annuel des oueds qui drainent le bassin versant du Mafragh (Source : DHW d'El Tarf 2004).

Oueds	Apport moyen annuel Hm ³	La part en %
Kébir-Est (station Ain Assel)	295	54.02
Boulathane	15	2.74
Guergour	8	1.46
Zitouna (station Gue Zitouna)	52	9.52
Bouhaloufa	49	8.97
Bouamoussa (station)	127	23.26
Total La Mafragh	546	100

VI. 3.

2. 1. 3.

1 - Irrégularité interannuelle des modules et leurs répartitions statistiques

L'étude des variations interannuelles des modules des oueds nous permet de déceler les irrégularités des écoulements annuels au cours d'une période la plus longue possible.

La série hydrométrique de la station dont le graphe correspond à la figure 55 qui suit montre des variations de débits très fortes d'une année à une autre.

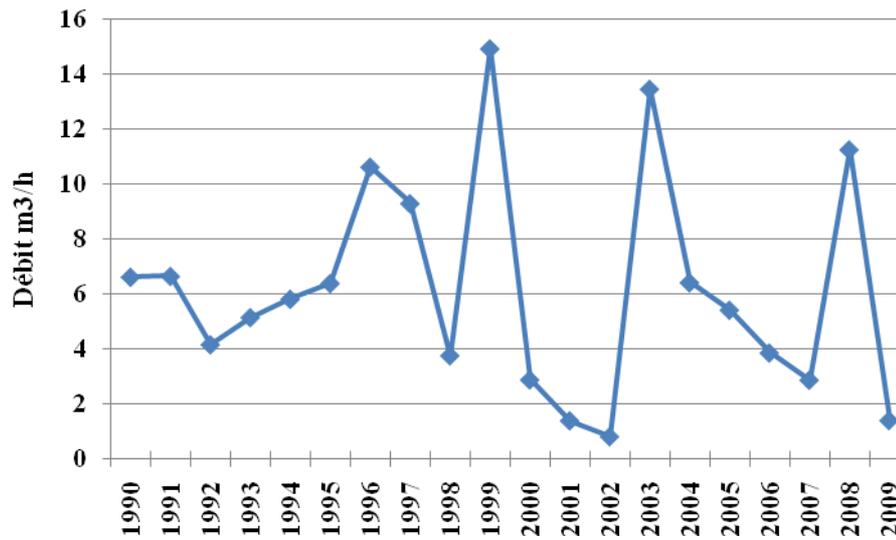


Figure 55 : Variation annuelles des débits a la station d'Ain Assel.

VI. 3. 2. 1. 3. 2 - Variation mensuelle des débits en fonction des précipitations

D'après ce graphique, on constate une étroite relation entre les précipitations et le régime des débits, car les faibles débits enregistrés correspondent à la saison sèche à faibles précipitations, et les forts débits correspondent à la saison pluvieuse à fortes précipitations.

La représentation graphique des débits en fonction des précipitations exprime une évolution parallèle entre ces deux paramètres (débits et précipitations) durant toute l'année (Fig. 56).

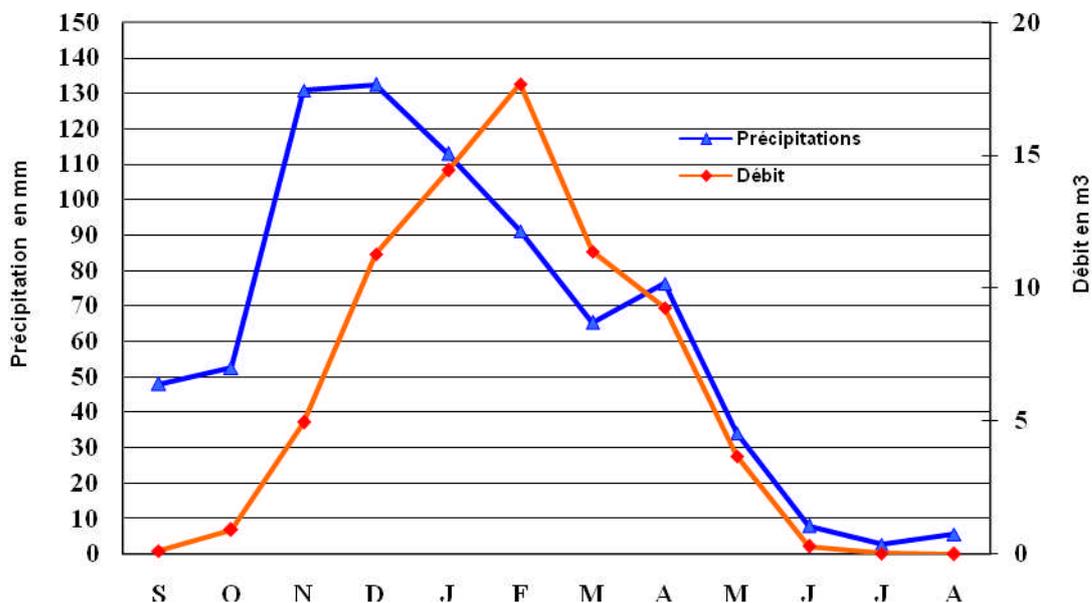


Figure 56 : Variation mensuelle des débits en fonction des précipitations à la station d'Ain Assel de 1990 à 2009.

A partir du mois de Septembre, on a une croissance des deux courbes, mais la courbe des débits est plus faible par rapport à celle des précipitations (période de recharge du sol ou le temps de réponse) qui est plus forte. Les débits montrent des valeurs plus fortes que les précipitations durant la période de Janvier à Mars, ce qui correspond à la période de saturation du sol où l'eau qui tombe ruisselle.

La courbe des débits reflète des valeurs plus faibles avec une cassure entre le mois de Mars et Avril. Ce qui pourrait être expliqué par des erreurs de prélèvement. Le fort débit est enregistré au mois de Février avec une moyenne mensuelle de $16,55 \text{ m}^3/\text{s}$.

VI. 3. 2. 1. 3. 3 - Variations Saisonnières des débits

L'analyse de la variabilité saisonnière des débits constitue le critère le plus simple pour définir le régime d'un cours d'eau. Cette étude peut être mise en évidence par l'étude des coefficients mensuels de débits et les coefficients de variation.

VI. 3. 2. 1. 3. 4 - Les régimes saisonniers et les coefficients mensuels des débits

Le régime d'un cours d'eau est défini par les coefficients moyens des débits, c'est-à-dire les rapports des débits moyens mensuels au module de la période considérée. Les coefficients mensuels des débits sont supérieurs ou inférieurs à l'unité « 1 ».

CMD : Coefficients mensuels des débits.

CMD = débit moyen mensuel / module de la période considérée.

CMD > 1 : correspond aux mois des hautes eaux.

CMD < 1 : correspond aux mois des basses eaux.

CV : coefficient de variation.

Tableau 27 : Les coefficients mensuels des débits.

Mois	Débits moyens Mensuels (m^3/h)	App. Moyens mensuels (Hm^3)	CMD	CV des débits
S	0.27	0.69	0.04	3.25
O	1.33	3.56	0.21	1.69
N	5.18	13.41	0.82	1.38
D	15.18	29.93	1.76	1.43
J	14.20	38.04	2.24	0.84
F	16.76	40.55	2.64	0.86
M	13.16	35.24	2.07	1.06
A	9.86	25.56	1.55	1.04

M	3.79	10.14	0.60	1.57
J	0.33	0.86	0.05	1.01
J	0.16	0.43	0.02	3.60
A	0.01	0.02	0.00	1.49
année	6.35	200.42	/	0.57

Ainsi, les coefficients moyens mensuels de débit calculés (Tab. 27), et leur représentation graphique (Fig. 57), permet de qualifier le régime fluvial par un écoulement important pendant la saison pluvieuse (l'hiver) et une pénurie considérable pendant la saison sèche (l'été). Le régime moyen de l'oued El Kébir Est comporte une période de hautes eaux de Décembre à Mars et une période de basses eaux d'Avril à Novembre. Le maximum mensuel correspond au mois de Février avec 2.64 et 2.78, suivi du mois de Janvier avec un CMD de l'ordre de 2.24. Quant au CMD du mois de Juillet, il est presque nul 0.02.

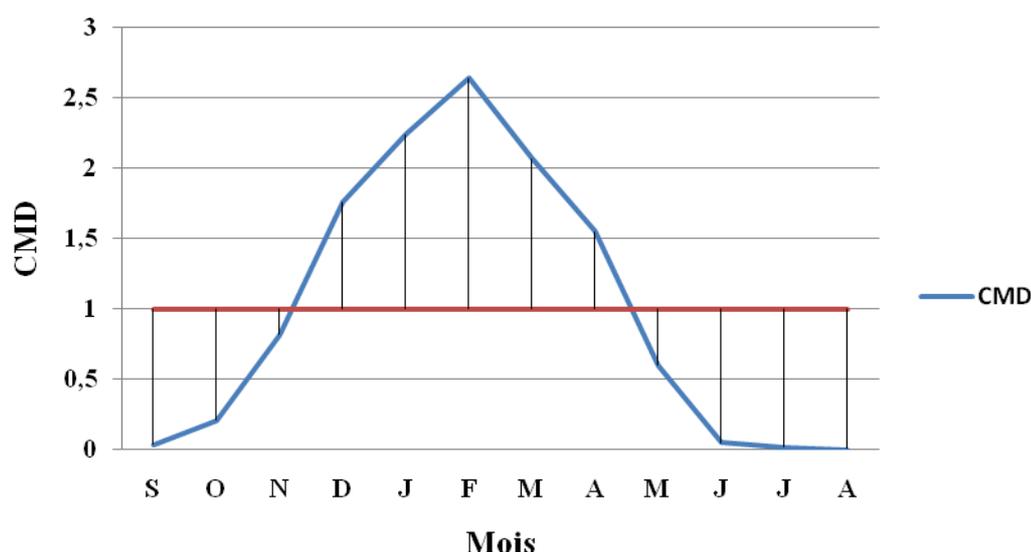


Figure 57 : Coefficient moyen des débits de l'oued El Kébir Est à la station d'Ain Assel de 1990 à 2009.

VI. 3. 2. 1. 3. 5 - Disponibilités Saisonnières en eau de surface

D'après les données des apports mensuels enregistrés au niveau de la station d'Ain Assel, les apports sont considérables pendant la saison des hautes eaux (40.55 Hm³ au mois de Février), tandis que les débits atteignent des valeurs négligeables durant la période des basses eaux (0.86 à 0.02 de Juillet à Août).

VI. 3. 2. 1. 3. 6 - L'Hydraulicité

L'hydraulicité est définie par le rapport du débit d'une année particulière Q_i au débit moyen de la série d'observation étudiée Q_i . Ce paramètre peut être complété par d'autres

critères statistiques simples tels que l'écart type (δ), le coefficient de variation (CV) ainsi que le coefficient d'immodération (R) qui traduit le rapport des modules extrêmes.

Les valeurs des coefficients d'hydraulicité se caractérisent par une forte amplitude (Tab. 28). Ce coefficient atteint des valeurs extrêmes durant les années les plus pluvieuses 2.35 pour la station d'Ain Assel durant l'année 2003 caractérisées par une forte pluviosité, ce qui peut être attribué aux fortes crues. Par opposition, les valeurs les plus faibles traduisent nettement le fort déficit des années les plus sèches, où un coefficient égal à 0.10 et 0.20.

Les coefficients d'hydraulicité sont en moyenne une année sur deux inférieurs à l'unité. On compte 11 années déficitaires sur vingt à la station d'Ain Assel.

Tableau 28 : Les valeurs des coefficients d'hydraulicité

Année	Q moy. (M3/s)	Coef. D'hydraulicité
1990	6,63	1,04
1991	6,66	1,05
1992	4,17	0,66
1993	5,16	0,81
1994	5,83	0,92
1995	6,4	1,01
1996	10,64	1,68
1997	9,31	1,47
1998	3,77	0,59
1999	13,48	2,12
2000	2,89	0,46
2001	1,4	0,22
2002	0,82	0,13
2003	14,95	2,35
2004	6,43	1,01
2005	5,43	0,85
2006	3,87	0,61
2007	2,88	0,45
2008	11,27	1,67
2009	1,41	0,21

VI. 3. 2. 1. 3. 7 - Application de la méthode de corrélation linéaire aux séries hydro-pluviométriques de l'oued El Kébir Est

L'application de cette méthode aux deux séries d'observation disponibles (précipitations et débits annuels), relevées à la station hydro-pluviométrique d'Ain Assel sur une période de 20 ans afin d'établir une corrélation, c'est-à-dire trouver une relation simple qui lie les hauteurs annuelles des pluies tombées dans le sous-bassin de l'oued avec les débits annuels écoulés, ainsi que le degré de liaison entre les deux paramètres (pluies/ débits).

Autrement dit, voir, à l'échelle annuelle, la réaction de l'oued face aux précipitations reçues par le sous bassin (Fig. 58).

Le coefficient de corrélation est de l'ordre de 0.98 à Ain Assel, ce qui détermine la bonne corrélation entre les deux séries étudiées.

Signalons ici l'existence de deux points éloignés de la courbe de tendance, il s'agit de l'année 2004 avec un débit correspondant sous-estimé ($P=754.8$; 988.2 mm, et $Q= 6.66$; 14.95 m³/s) successivement.

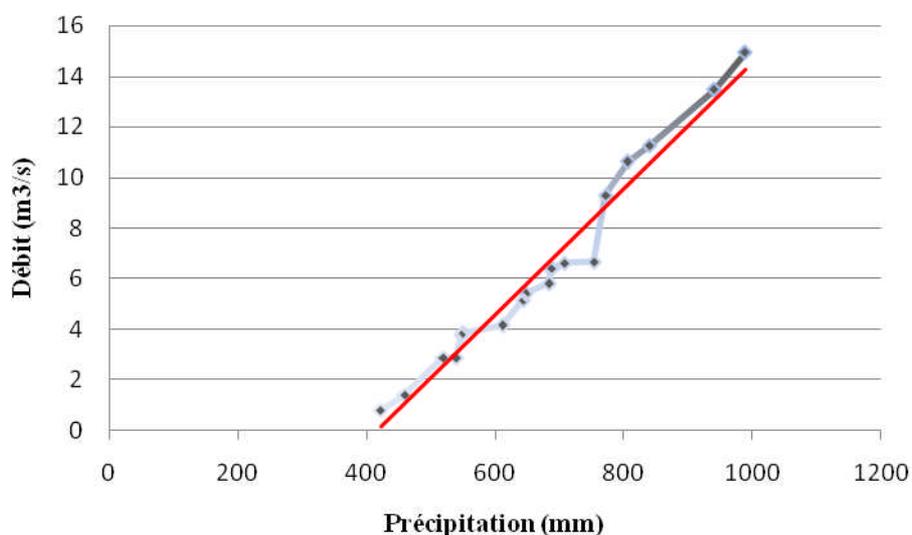


Figure 58 : Corrélation pluies/débits de l'oued El Kébir Est à la station d'Ain Assel 1990/2009.

Conclusion

L'analyse hydrologique des apports moyens annuels de l'oued El Kébir Est, a permis d'estimer ces entrées à environ de 295 Hm³ /an, avec des apports mensuels considérables pendant la saison des hautes eaux qui peuvent atteindre 40.55 Hm³ au mois de Février. Ce qui classe l'oued El Kébir Est dans la première case des sources d'alimentation de la nappe aquifère du massif dunaire de Bouteldja quantitativement.

VI. 3. 2. 1. 3. 8 - La Qualité des eaux de l'oued El Kébir Est

Le facies chimique de l'Oued El Kébir Est est chloruré sodique, ce facies due à la communication de l'oued avec la mer, lors de l'alimentation de l'oued par les fortes pluies (dilution), ou lors du phénomène de l'évaporation (concentration), l'Oued El Kébir Est peut changer de facies en sulfaté calcique (Bousnoubra ,2002), avec une valeur en sulfate de 144 mg/l (Djidel, 2004). La conductivité électrique est de l'ordre de 2140 µs/cm. Au niveau de l'embouchure de l'oued Mafragh avec la mer est de l'ordre de 8160 µs/cm.

Donc, on peut considérer que l'eau de l'Oued El Kébir Est est de bonne qualité (pas de pollution chimique) (Haied, 2008).

Tableau 29 : Résultats d'analyse chimique des eaux de l'Oued El Kébir Est prises à la station hydrométrique d'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	
Salinité	g/l	0.2	

VI. 3. 2. 1. 4 - Les paramètres hydrauliques

VI. 3. 2. 1. 4. 1 - Perméabilité

La gamme des coefficients de Darcy des formations utilisables pour l'alimentation artificielle se situe entre 10^{-2} et 10^{-5} m/s.

Les perméabilités les plus fortes ($\approx 1.10^{-4}$ m/s) se situent au Sud Est de la région, entre la source de Bourdim et le lac noir. Ces fortes valeurs sont dues vraisemblablement au lessivage des sables par les échanges permanents entre les surfaces d'eau libre et la nappe.

Les faibles perméabilités ($\approx 1.10^{-4}$ m/s) se localisent à l'Ouest et au centre du cordon dunaire. Ces faibles valeurs sont dues aux fortes proportions d'argile dans l'aquifère.

VI. 3. 2. 1. 4. 2 - La transmissivité

Les zones les plus transmissives se situent au Nord de la source de Bouglés avec des valeurs supérieures à 5.10^{-3} m²/s, tandis que les zones à faibles transmissivités ($\approx 5.10^{-4}$ m²/s) se localisent à l'Ouest de la ligne formée par les forages B17, 6907 et 6921. Ces dernières sont fortement influencées par l'augmentation de la fraction argileuse dans le sable. La transmissivité moyenne est de l'ordre de $3,5.10^{-3}$ m²/s.

VI. 3. 2. 1. 4. 3 - Les coefficients d'emménagement

L'alimentation artificielle nécessite, pour être efficace que l'augmentation des réserves de la nappe qu'elle entraîne soit conservée pendant un temps suffisant compatible avec la reprise. Il est aussi essentiel de comprendre que le maintien de l'élévation du niveau ou de la pression de la nappe importe plus que la conservation de la masse d'eau introduite, cette masse aurait cependant provoqué une « Onde » se prolongeant rapidement jusqu'aux limites d'émergence de la nappe, entraînant un accroissement du débit sortant à ses limites.

Il ne suffit pas donc de considérer la vitesse moyenne de cheminement d'eau, qui est fonction dans les roches à perméabilité d'interstices de la perméabilité (horizontale) K et de la pente hydraulique I ($V=k*i$), mais aussi de tenir compte de l'emménagement de l'aquifère. Dans le massif dunaire de Bouteldja les valeurs de ce coefficient varient de 1,4% à 24% avec une valeur moyenne de 18%.

VI. 3. 2. 1. 5 - Volumes d'eau mobilisables

Les nappes souterraines constituent l'une des principales richesses naturelles et sont captées par plusieurs ouvrages destinés aux différents usages quotidiens (A.E.P, A.E.I, A.E.A).

L'estimation des réserves en eau souterraine d'après une analyse établie par (Derradji, 2004) reflète que la région du massif dunaire de Bouteldja recèle des potentialités hydriques importantes, qui sont de l'ordre de 34 Hm³.

D'après les données de la DHW de la Wilaya d'El-Tarf (2009), les ressources souterraines sont recensées selon les nappes exploitées dont les capacités diffèrent comme suit

Tableau 30 : Le potentiel hydrique de la nappe du massif dunaire.

(Source : DHW El-Tarf, 2004)

Les nappes	Nombre de forages	Volume Théorique (Hm ³)	Volume utilisé en AEP (Hm ³)	Localités bénéficiaires
Nappe dunaire Bouteldja	50	33	32.5	Annaba 26 F AEP, El Tarf: 21F AEP, 2F IRR, 1F IND.

a- Les sources :

Tableau 31 : Les débits de quelques sources du massif dunaire.

Sources	Débit moyen (l/s)	Débit min (l/s)	Débit max (l/s)
Bougles	80.1	52	98
Bourdim	69.3	58	118
Titri (B'haim)	133.9	52	243

VI. 3. 2. 1. 6 - Termes du bilan

La nappe des graviers situés au Sud et la mer Méditerranée au Nord constituent les deux principaux exutoires de la nappe du massif dunaire de Bouteldja. Enfin, le contact du réservoir avec les argiles numidiennes forme par endroits une limite étanche.

De ce fait les infiltrations directes des précipitations constituent la principale source d'alimentation de la nappe ainsi que l'apport du numidien.

Les sorties de la nappe se limitent aux:

- Ecoulements souterrains vers la mer ;
- fuite vers la nappe des graviers ;
- les prélèvements à des fins agricoles et d'alimentation en eau potable de la population rurale.

a- Les entrées

- ✓ Infiltration des eaux de pluie :

Les stations pluviométriques de Ain Assel et les Salines, présentent une moyenne de précipitation de près de 700 mm/an.

L'infiltration efficace dans le massif dunaire est de 30%. Le volume de pluie qui s'infiltré vers la nappe sur une superficie de 180 km² est de :

$$V \times I_e = 180 \times 210 = 37.8 \text{ Hm}^3/\text{an}$$

✓ L'apport du numidien :

D'après Khérici (1985) ; Nouacer (1993) et Hani (2003), l'apport du numidien vers la nappe du massif dunaire de Bouteldja est estimé à environ de $4.6 \text{ Hm}^3/\text{an}$.

Donc le totale des entrés est estimé à environ $42,4 \text{ Hm}^3/\text{an}$.

b - Les sorties

✓ Fuite vers la mer :

D'après Khérici (1985) ; Nouacer (1993) et Hani (2003), la fuite vers la mer est estimée à environ $11.57 \text{ Hm}^3/\text{an}$.

✓ Fuite vers la nappe des graviers :

D'après les mêmes auteurs, cette fuite est estimée à environ $12.6 \text{ Hm}^3/\text{an}$.

✓ les prélèvements :

L'absence d'une étude spécialisée ne permet pas d'appréhender le degré d'exploitation des nappes. Toutefois, la nappe dunaire de Bouteldja fournit jusqu'à $23 \text{ Hm}^3/\text{an}$ pour l'alimentation des deux wilayas Annaba et El Tarf (d'après la DHW El Tarf, 2009).

Alors le totale des sorties va être de $47,17 \text{ Hm}^3/\text{an}$, Ce qui traduit un déficit de $4.77 \text{ Hm}^3/\text{an}$.

Conclusion

Les entrées représentées par l'infiltration directe des eaux météoriques et l'apport du numidien, apporte à la nappe un volume de $42,4 \text{ Hm}^3/\text{an}$, alors que les prélèvements au droit du massif dunaire sont de l'ordre de $47.17 \text{ Hm}^3/\text{an}$. Ce déséquilibre au niveau du bilan de la nappe entraine une baisse continue du niveau statique. Au vu des conditions traitées précédemment, la nécessité de penser à l'alimentation artificielle de la nappe par les eaux de l'oued El Kébir Est (source d'alimentation), devient nécessaire pour préserver la nappe du massif dunaire de Bouteldja de toute détérioration.

VI. 3. 3 - La délimitation du BAC et PNAC dans le massif dunaire de Bouteldja

VI. 3. 3. 1 - Introduction

Pour pouvoir apprécier la faisabilité technique de la recharge artificielle à partir des ces eaux, il est important d'une part de sélectionner les secteurs les plus favorables à la recharge, ce qui fait appel à la notion de bassin d'alimentation des captage et la portion de la nappe alimentant le captage (BAC et PNAC), et d'autre part de mettre au point les dispositifs les mieux adaptés pour réaliser un apport artificiel au droit de ces secteurs.

VI. 3. 3. 2 - La délimitation du BAC

A partir des deux cartes piézométriques réalisées en 1982 (Khérici, 1985) et en 1993 (Nouacer, 1993), on va délimiter le bassin qui alimente le massif dunaire, et pour cela on doit joindre les points des crêtes piézométriques comme représentés sur la figure 59.

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

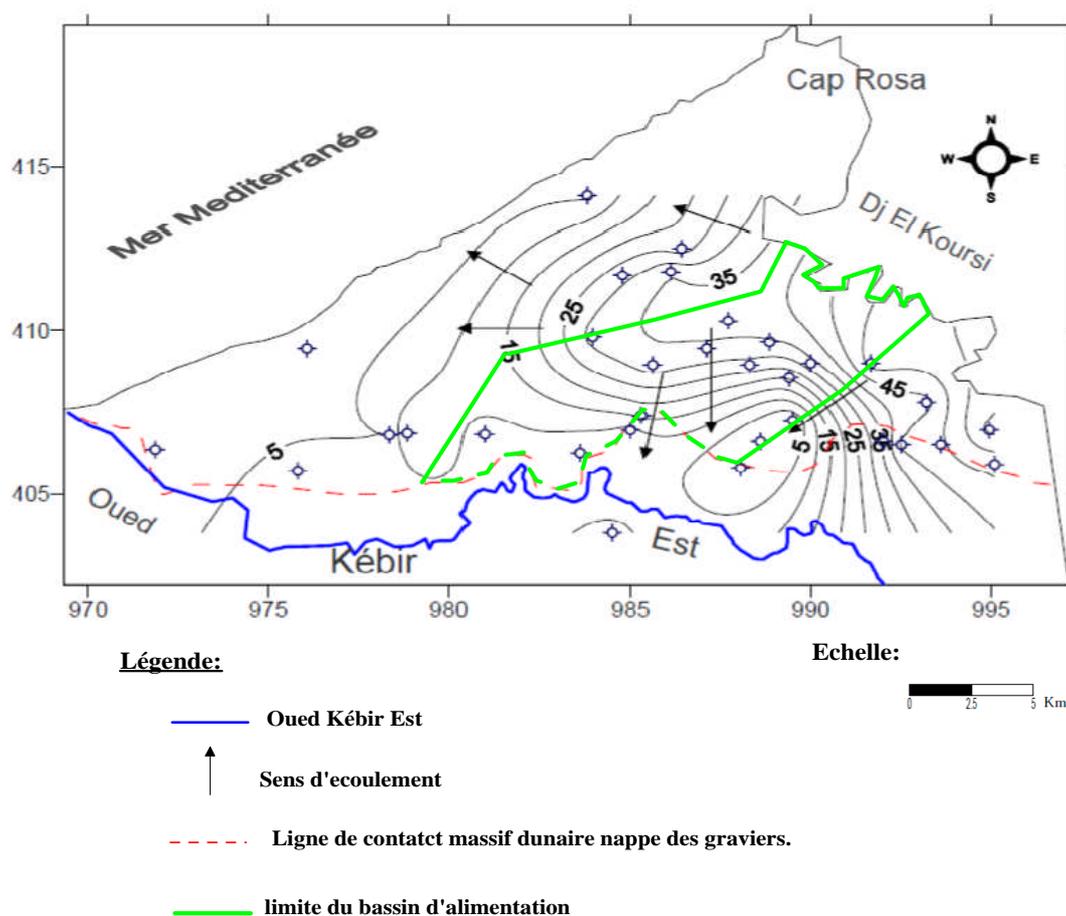


Figure 59 : Le bassin d'alimentation du massif dunaire de Bouteldja.

La superposition de cette carte avec la carte des sous bassins versant hydrologiques partageant la région d'étude, résulte que ce bassin est le sous bassin versant de Oued El B'haim.

Ce bassin vient chevaucher le bassin de Bouglés. Le cours de l'oued El B'haim, grossièrement orienté Nord Est – Sud Ouest, draine environ 45 Km² de dune. L'accroissement du débit de l'amont de l'oued vers l'aval provient d'une part de la source Titri avec 60 l/s et d'autre part du drainage de la nappe le long du cours. Les principales caractéristiques de ce bassin sont :

- Surface totale de 44.95 Km²;
- Surface des terrains gréseux de 2 Km²;
- Surface des terrains dunaires de 42,75 Km²;
- Débit de l'Oued en amont de 20 l/s;
- Débit en aval de 150 l/s.

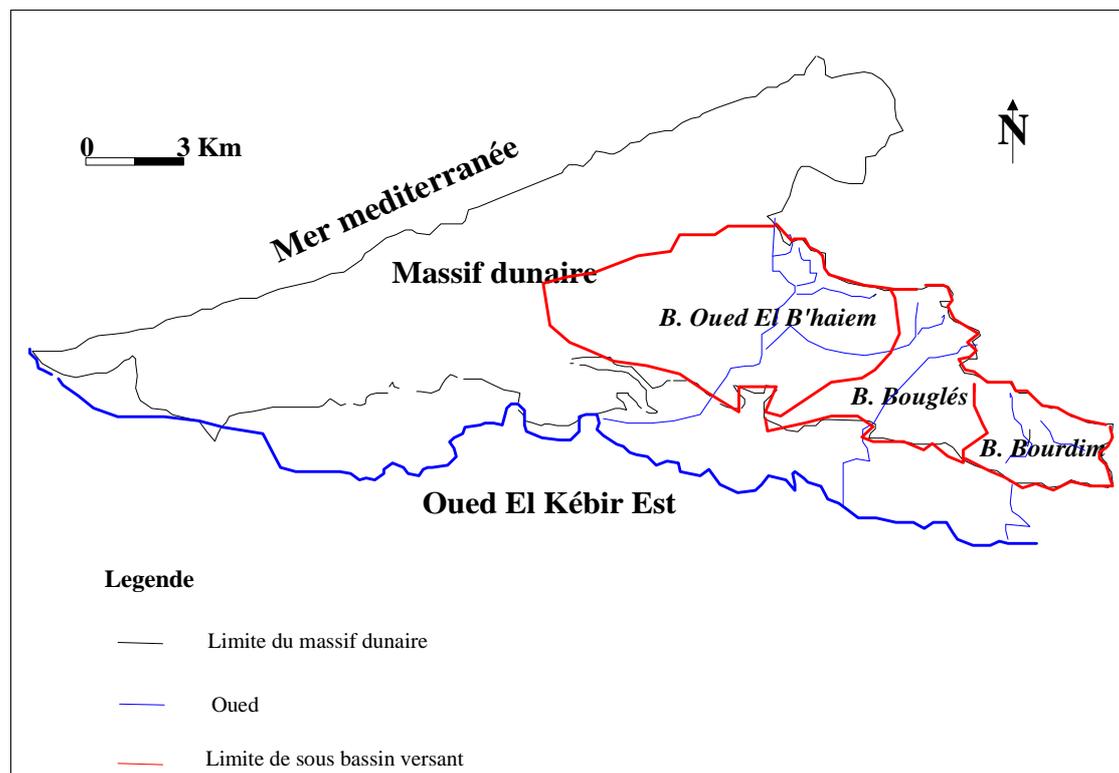


Figure 60 : Les sous bassins du massif dunaire de Bouteldja.

VI. 3. 3. 3 - Délimitation du PNAC

VI. 3. 3. 3. 1 - Méthode utilisée (Méthode analytique)

La méthode de calcul utilisée pour la délimitation du périmètre d'appel du pompage et des isochrones (courbes d'égal temps de trajet souterrain de l'eau vers un captage en exploitation) sont celles préconisées dans l'ouvrage n°33 de la série « Manuels et Méthodes » du BRGM, intitulé « Guide Méthodologique d'établissement des périmètres de protection des captages d'eau souterraine destinés à la consommation humaine » (Lallemand, Barrès et J. Roux, 1999). Il s'agit en particulier des méthodes de calcul en nappe avec gradient hydraulique développées par Sauty et Wyssling.

Ces méthodes permettent, en tenant compte des valeurs des paramètres et les données choisies cités précédemment, d'obtenir en particulier le tracé du périmètre d'appel du captage en exploitation.

La Figure 61 ci-après reprend le schéma explicatif fourni dans le Guide n°33 du BRGM précédemment cité.

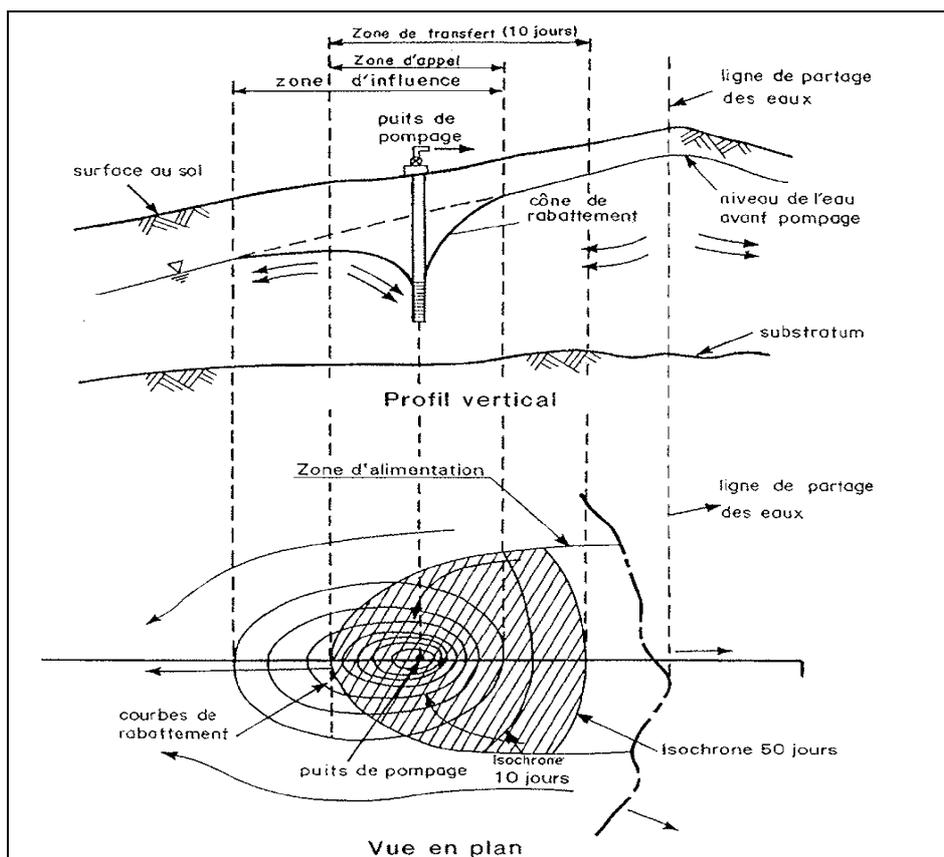


Figure 61: Schéma explicatif du tracé du périmètre d'appel d'un captage.

VI. 3. 3. 3. 2 - Description de la méthode

Selon les hypothèses énoncées précédemment, il est possible de déterminer de façon analytique l'enveloppe de l'aire d'alimentation ainsi que les courbes d'égal temps de transfert (isochrones) vers l'ouvrage de captage (Fig. 62). Les équations utilisent les paramètres sous une forme adimensionnelle.

L'axe des abscisses correspond à la direction du gradient hydraulique régional. Malheureusement, l'équation des isochrones ne se résout pas de façon directe. Il est cependant possible d'utiliser des logiciels mathématiques pour obtenir le tracé des courbes exactes, en fonctions des paramètres du système étudié. Pour éviter cette étape, une méthode d'analyse simplifiée est proposée ci-après.

Il est possible de se contenter de déterminer les distances suivantes (Fig. 62) :

- distance entre la limite aval de la zone d'appel et l'ouvrage de captage ;
- largeur maximale de l'aire d'alimentation (B);
- largeur de la limite d'alimentation au droit du puits (B');;
- distance du puits à l'isochrone considérée (S_u), selon l'axe des abscisses.

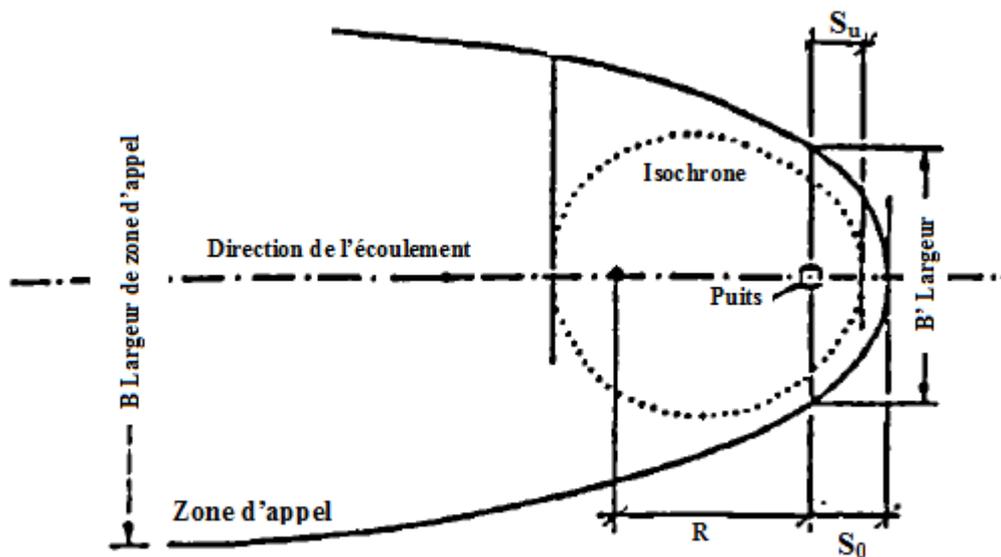


Figure 62 : Détermination des isochrones (méthode de Wyssling).

VI. 3. 3. 4 - Calculs et Résultats

Les paramètres considérés pour le calcul de la zone d'appel du captage sont consignés dans la méthode de Wyssling :

b = épaisseur de l'aquifère (m)

K = perméabilité en m/s

I = gradient hydraulique

Ω = porosité efficace

Q_s = débit du puits (m^3/s)

Dans un premiers temps, on détermine la zone d'appel par le calcul. Dans une nappe libre le cas du massif dunaire de Bouteldja, si B est la largeur du front d'appel : on a :

$$Q = B \times K \times b \times i \quad \text{D'où: } B = Q / Kbi$$

Le rayon d'appel:

$$X_0 = Q / 2\pi Kbi$$

La largeur du front d'appel à la hauteur du captage :

$$\hat{B} = B/2 = Q / 2Kbi$$

D'autre part, la vitesse effective U est égale à :

$$U = K/\omega$$

Une fois la zone d'appel déterminée, on cherche sur la direction d'écoulement, la distance correspondant à un temps de transfert souhaité, par exemple 50 jours, à savoir l'isochrone 50 jours. Cette distance est calculée par les formules suivantes :

$$S_0 \text{ ou } S_u = [\pm l + \sqrt{l(l + 8x_0)}] / 2$$

S_0 : distance en amont du captage depuis le puits jusqu'à la distance correspondant au temps t souhaité en m.

S_u : distance en aval du captage, sur l'axe d'écoulement depuis le puits jusqu'à la distance correspondant au temps t souhaité en m.

$$l = U t$$

Cette formule donne une valeur approchée de S_0 et S_u .

Cette méthode est simple à utilisé. Elle demande un pompage d'essai et les données exposées précédemment.

Les résultats obtenus sont représentées dans le tableau 32a suivant :

Tableau 32a: Résultats des calculs par la méthode de Wyssling.

Forages	E (m)	T (m ² /s)	K (m/s)	I (%)	Débit (m ³ /s)	B=Q/KEI	B'=B/2	$x_0=Q/2JKBI$
6912	127,18	4E-03	3E-05	6,3E-03	0,022	885,73	442,87	141,04
B9	147	2,5E-05	2E-05	6,3E-03	0,02	1270,35	635,17	202,28
B1	154,4	5,6E-05	4E-07	6,3E-03	0,025	713,92	356,96	113,68
6918	136,52	1E-02	7E-05	6,3E-03	0,01	158,84	79,42	25,29
6902	131,98	1,4E-03	1E-05	6,3E-03	0,01	1190,78	595,39	189,61
6919	101,43	4E-03	4E-05	6,3E-03	0,02	802,52	401,26	127,79

Tableau 32b: Résultats des calculs par la méthode de Wyssling.

isochrones forages		50 jours	100 jours	200 jours
6912	S_u	150	230	360
	S₀	90	120	140
B9	S_u	130	200	300
	S₀	90	130	170
B1	S_u	100	150	200
	S₀	90	140	190
6918	S_u	200	370	600
	S₀	50	70	150
6902	S_u	90	150	190
	S₀	50	90	130
6919	S_u	140	220	350
	S₀	90	110	160

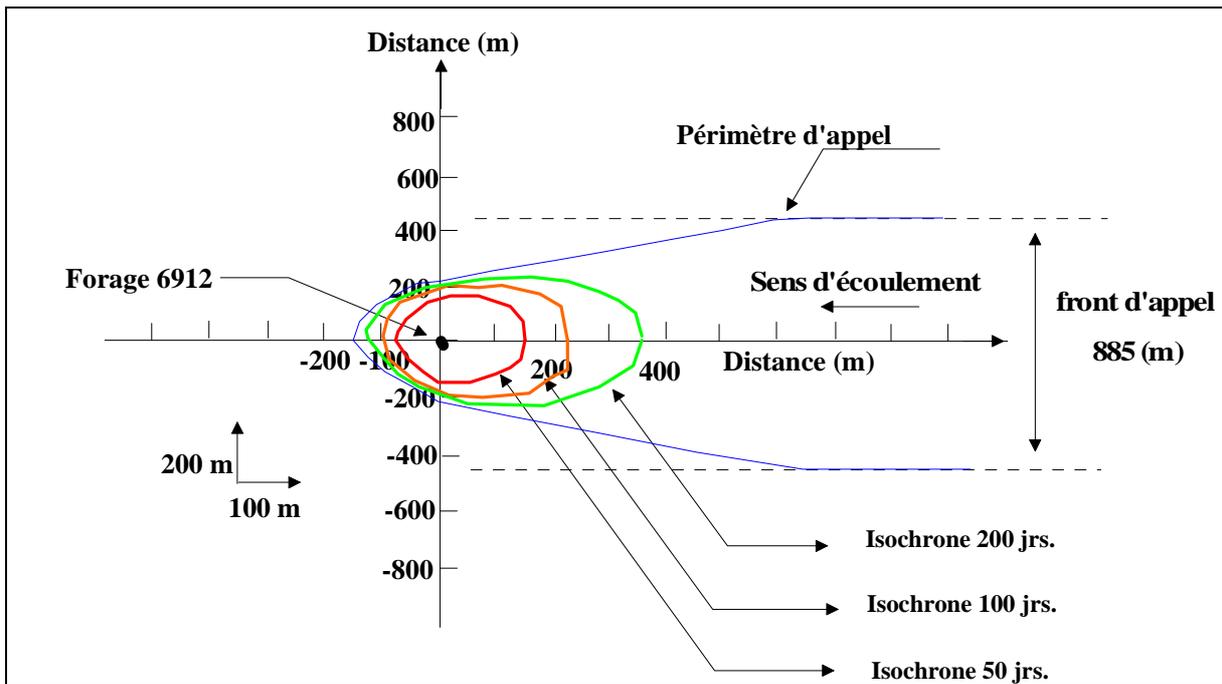


Figure 63 : Périmètre d'appel et isochrones de forage 6912.

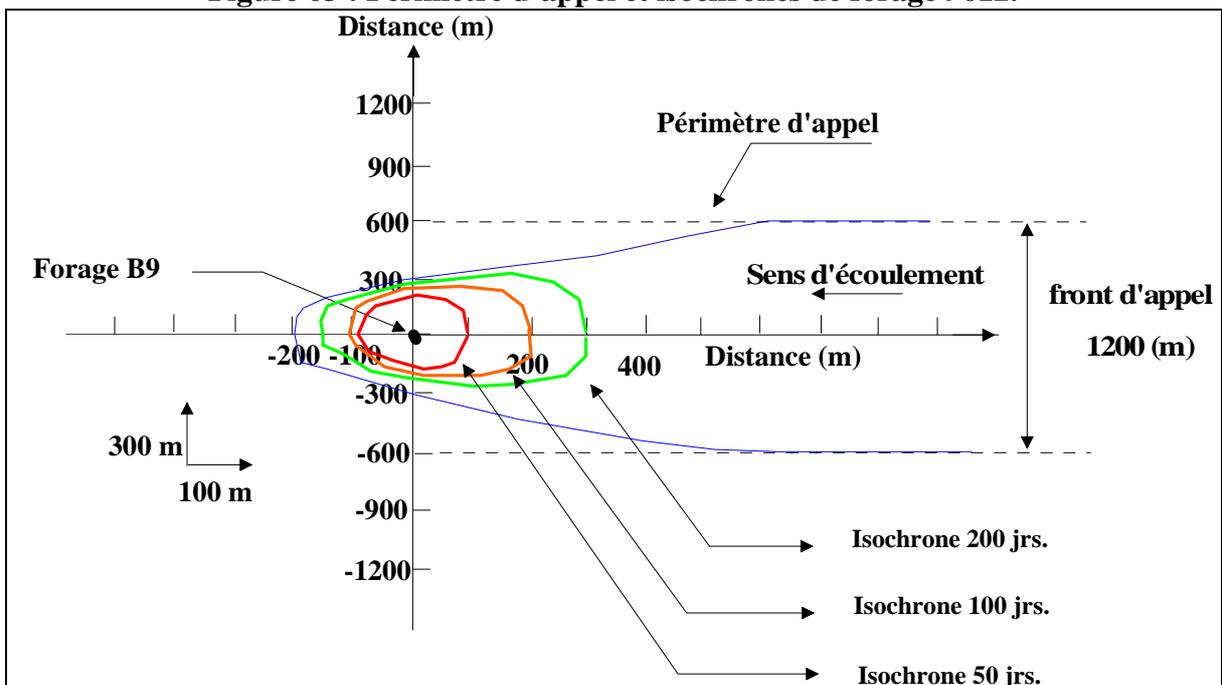


Figure 64 : Périmètre d'appel et isochrones de forage B9.

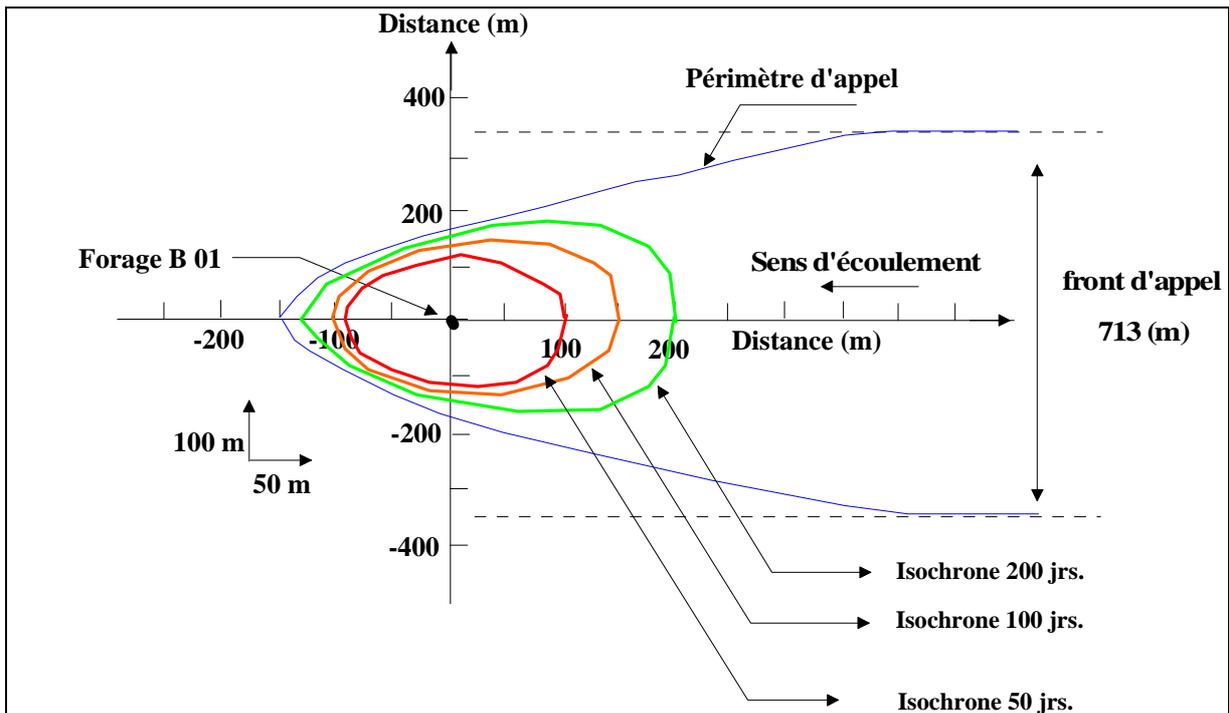


Figure 65 : Périmètre d'appel et isochrones de forage B 01.

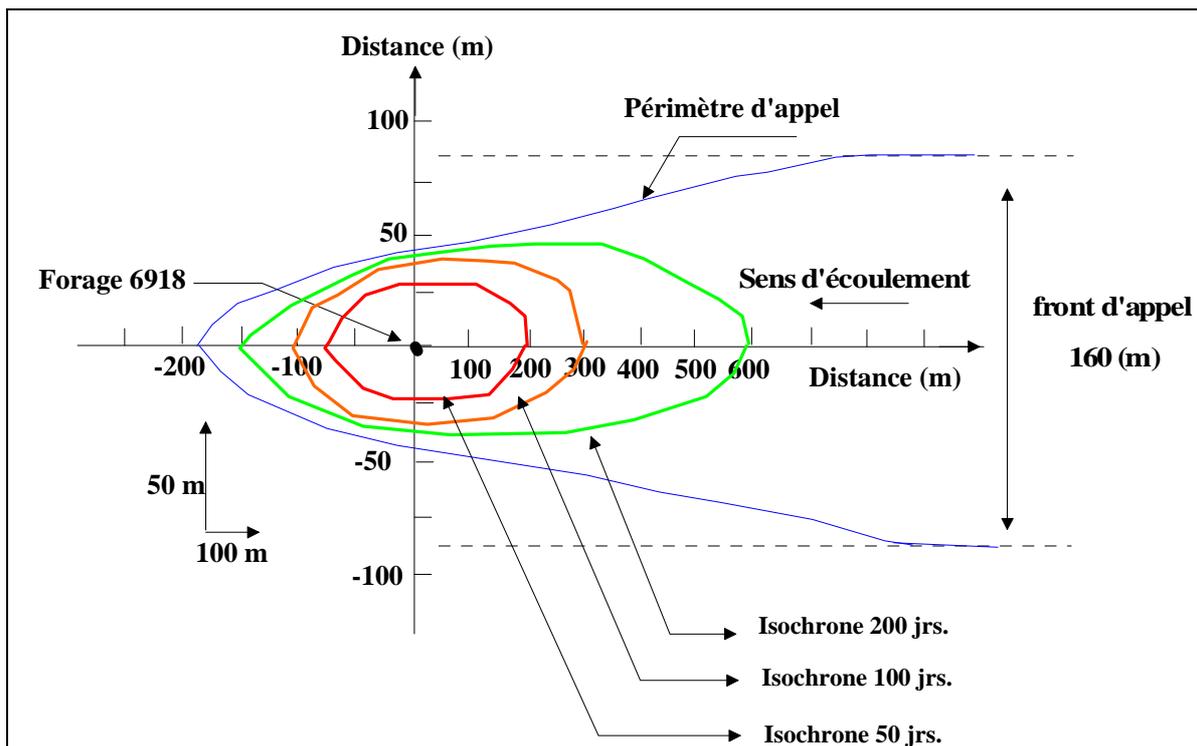


Figure 66 : Périmètre d'appel et isochrones de forage 6918.

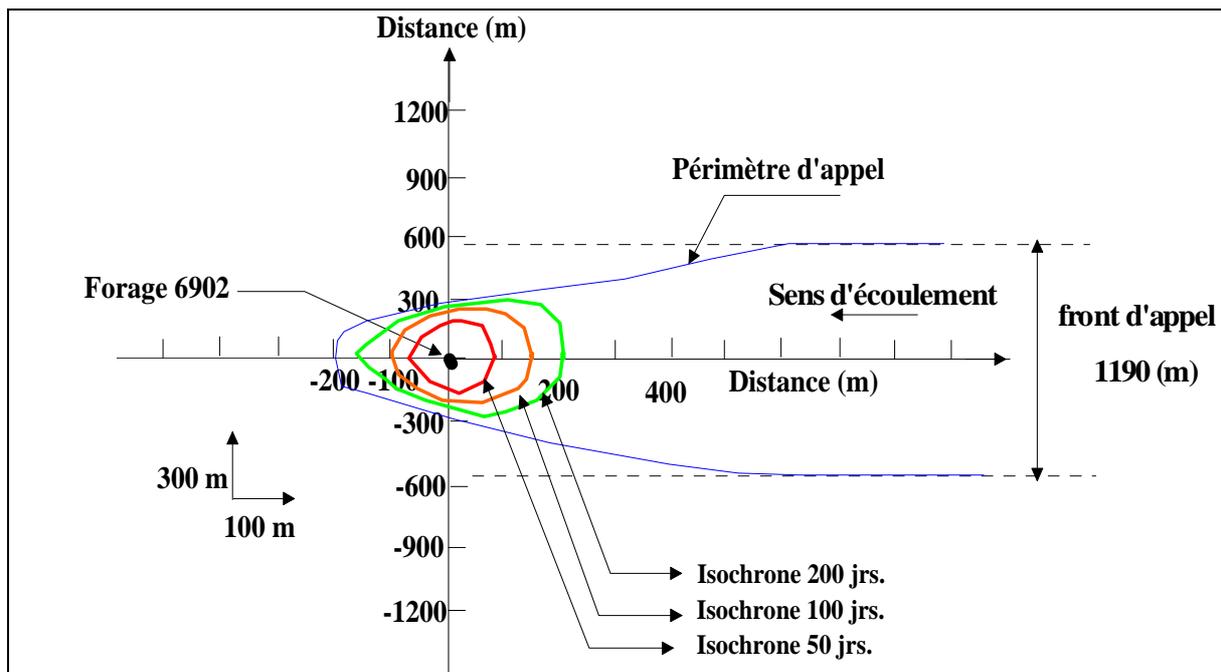


Figure 67: Périmètre d'appel et isochrones de forage 6902.

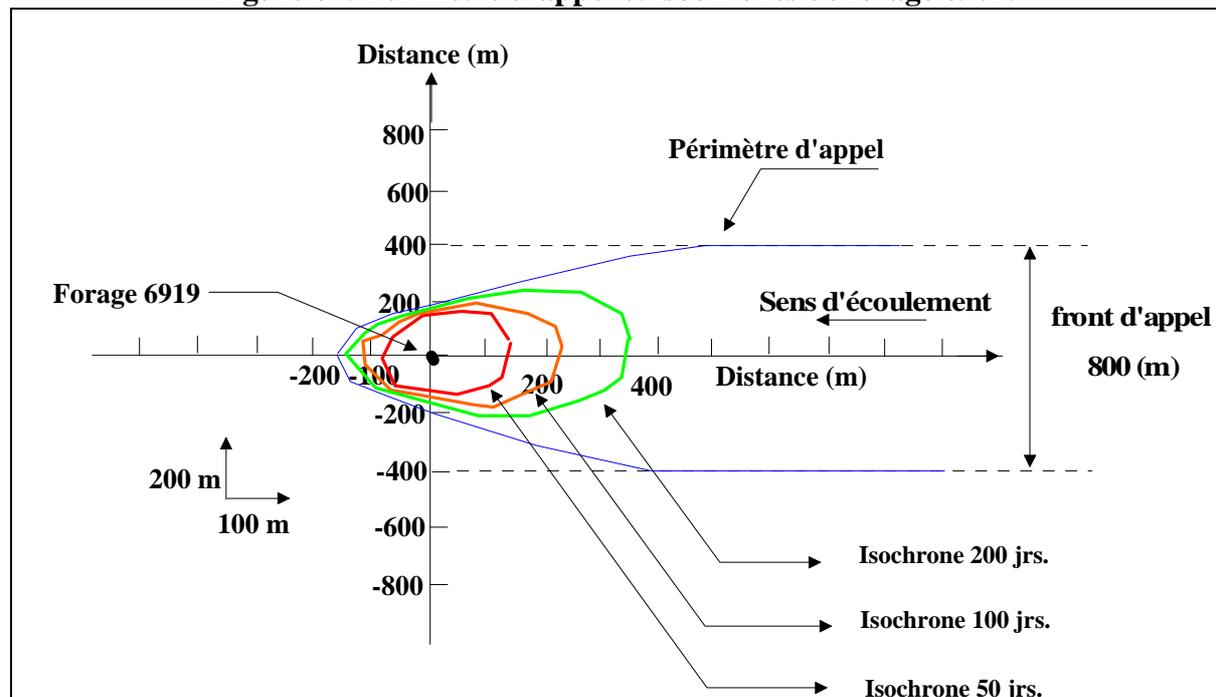


Figure 68 : Périmètre d'appel et isochrones de forage 6919.

VI. 3. 4 - Définition des périmètres de protection

La réglementation (*articles 2 et 63 de la loi N° 10-95 sur l'eau au Maroc*) prévoit que la protection des points d'eau à usage public doit être réalisée par la mise en place de deux zones : l'une de protection immédiate, l'autre de protection rapprochée, complétées éventuellement par une troisième dite de protection éloignée.

Selon la même loi, ces trois zones se définissent comme suit :

- ❖ Une zone de protection immédiate (PPI) englobant le ou les points de prélèvement ;
- ❖ Une zone de protection rapprochée (PPR) qui doit protéger efficacement le captage vis-à-vis de la migration des substances polluantes ;
- ❖ Une zone de protection éloignée (PPE) qui, si nécessaire, prolonge le précédent pour renforcer la protection contre les pollutions.

Ces trois types de zones ont été hiérarchisés de cette manière selon trois types de risques :

- ✓ Le risque d'introduction directe de polluant dans l'ouvrage de prélèvement qui peut être prévenu par la création du PPI ;
- ✓ Le risque de dépassement d'au moins une des limites de qualité réglementaire de l'eau à la suite d'une pollution qui peut être maîtrisée par la mise en place du PPR ;
- ✓ Le risque de dégradation de la qualité de l'eau sans que celle-ci soit rendue impropre à la consommation qui peut être maîtrisée en créant un PPE comprenant la zone ou un tel effet pourrait se faire sentir.

Seraient donc hors périmètre de protection toutes les autres zones où une pollution ne pourrait dégrader la qualité de l'eau capté et où ne s'applique que la réglementation générale relative à la protection des eaux. Il apparaît donc nettement que les rôles dévolus aux périmètres de protection sont définis, sans ambiguïté, par rapport à des objectifs de protection de la santé publique.

Pour atteindre l'objectif de délimitation de risque, quatre démarches sont possibles :

- ➔ Une démarche "minimaliste" selon laquelle la réglementation générale est suffisante pour assurer la protection des captages ;
- ➔ Une démarche "maximaliste" Consistant à assurer la protection de la totalité de la zone d'alimentation du captage en y proscrivant toutes les causes de pollution.
- ➔ Une démarche "traditionnelle" visant à délimiter des périmètres de protection dans lesquels sont définis des contraintes et des mesures préventives adaptées. Dans ce cas

sont pris en considération la protection naturelle de la nappe sollicitée, les caractéristiques de l'aquifère, la piézométrie, la vitesse et le sens d'écoulement de l'eau,...etc.

→ La démarche "dynamique" qui consiste à déterminer dans la zone d'alimentation du captage des courbes isochrones, à estimer le délai disponible pour intervenir avant que l'eau soit polluée et à définir alors les limites des périmètres de protection en fonction du temps jugé nécessaire pour l'intervention. C'est la démarche qu'on a appliqué pour la délimitation des trois périmètres.

VI. 3. 4. 1 - Périmètre de protection immédiate

Les périmètres immédiats autour des six forages seront carrées, de 10 m de coté et de centre respectifs les forages : 6912, B9, B1, 6918, 6902 et 6919.

VI. 3. 4. 2 - Périmètre de protection rapproché

La délimitation de ce périmètre tient compte des paramètres suivants : régime d'exploitation ; épaisseur de l'aquifère ; transmissivité de l'aquifère ; porosité cinématique ; sens d'écoulement de la nappe ; gradient hydraulique et le temps de transfert en nappe en 50 jours (isochrones 50 jours).

Selon les méthodes de calcul utilisées (Sauty, Wyssling), ces paramètres conduisent à une extension du périmètre rapproché dont les résultats sont présentés dans les tableaux 32a, 32b et les figures 63, 64,65, 66, 67et 68.

VI. 3. 4. 3 - Périmètre de protection éloignée

Ce périmètre occupe presque le centre du massif dunaire, il se prolonge du Nord Est vers le Sud Ouest. Il représente le bassin d'alimentation du captage déterminé précédemment (Fig. 59) sur une surface d'environ 45 Km².

VI. 3. 5 - Propositions pour la recharge artificielle

VI. 3. 5. 1 - Infiltration directe des eaux de surface le long des cours d'eau

L'étude de la recharge artificielle de la nappe du massif dunaire de Bouteldja a permis d'identifier un site plus favorable à la filtration des eaux de surface via l'aménagement de seuils de retardement de l'écoulement. Il s'agit d'un tronçon de l'oued El B'haiem dans la partie Sud Est du massif dunaire sous une direction d'écoulement dirigée du Nord Est vers le Sud Ouest, identique au sens d'écoulement des eaux souterraine (carte piézométrique).

Le tableau 33 ci-après donne les caractéristiques de l'oued E B'haiem au droit du site proposé :

Tableau 33 : Caractéristiques du sous bassin de l'oued B'haïem.

Sous bassin	Ordre des affluents											
	Ordre 1		Ordre 2		Ordre 3		Ordre 4		Ordre 5		Total	
	L (km)	N°b	L (km)	N°b	L (km)	N°b	L (km)	N°b	L (km)	N°b	L (km)	N°b
B'haïem	19.35	58	11.75	16	7.40	5	8.75	2	7.05	1	54.30	81
Superficie Km2	Périmètre naturel (km)	Largeur du BV (km)	Indice de la pente %	Densité de drainage (km/km2)	Coefficient De torrentialité		Temps de concentration (heurs)					
44.95	31.55	3.82	2.73	1.20	1.54		6					

Pour renforcer ce procédé de recharge artificielle, des seuils de retentions doivent être réalisés par l'installation des diguettes transversalement au lit de l'oued.

En amont, réalisation d'une digue en gabion (barrières) sur le lit amont de l'oued pour diminuer le maximum d'apport solide, donc de limiter le phénomène d'érosions dans cette région (réduction à 50%), casser la vitesse des eaux particulièrement les eaux des crues et réduire d'éventuels problèmes d'inondation en aval.

Cette digue sera suivie par une série des digues, pour un rôle principal, c'est l'accroissement de la capacité d'infiltration de l'oued El B'haïem par :

- Le retardement de l'écoulement ;
- La création de retenues à l'amont dont le volume est appelé à s'infiltrer ;
- La mise en eau d'une grande plage d'infiltration à l'amont et l'étalement de volumes déversés à l'aval.

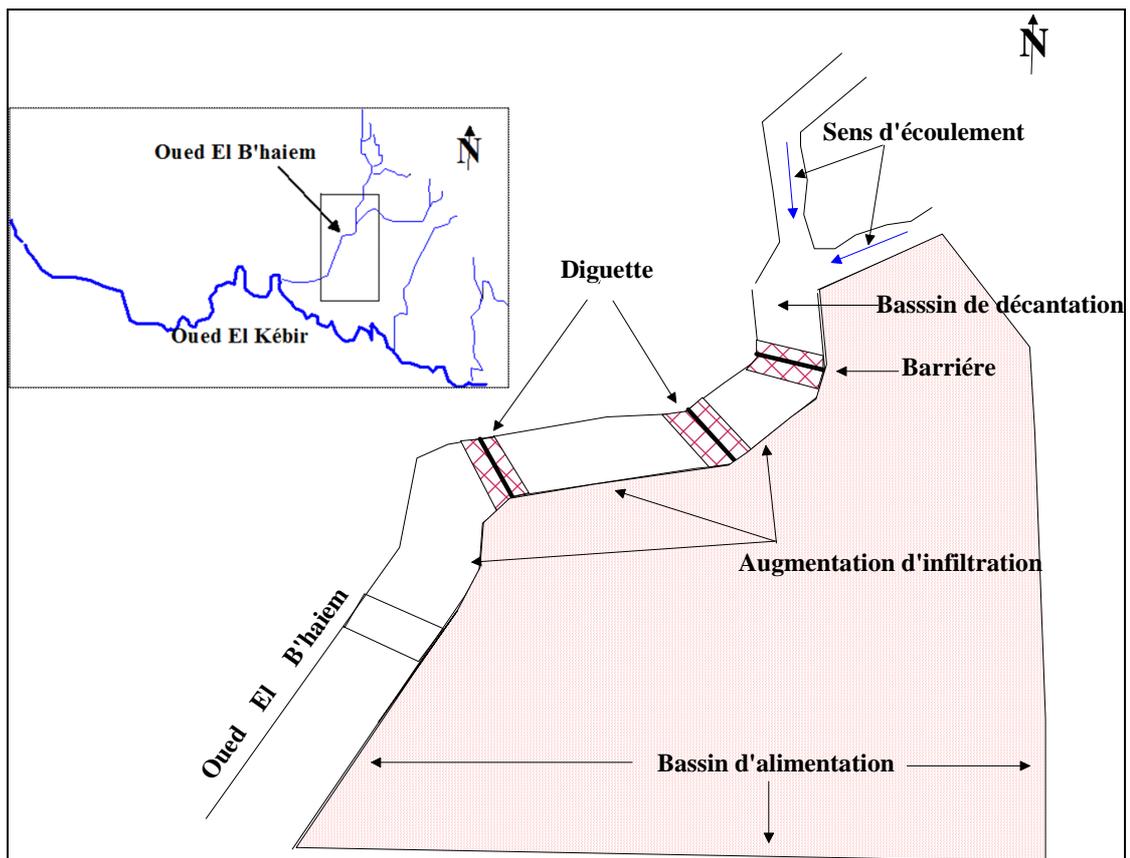


Figure 69 : Plan schématique de l'ouvrage proposé au sein d'Oued El B'haïem.

VI. 3. 5. 2 - Infiltration directe des eaux de surface par des bassins d'infiltration

La recharge par infiltration se fait par le biais de bassins gravitaires. L'eau atteindra la nappe par percolation, utilisant ainsi le pouvoir épurateur des couches sédimentaires traversées. Ces bassins peuvent servir de lacs et doivent régulièrement être nettoyés pour éviter le dépôt d'algues. Les solutions préconisées sont variées comme l'introduction de poissons, d'algicides, teindre l'eau pour empêcher la photosynthèse, faire circuler l'eau pour empêcher la stagnation, éviter le stockage dans des lacs peu profonds, éviter de laisser l'eau stagner trop longtemps et couvrir les réservoirs.

Les analyses granulométriques effectuées à différents points du massif dunaire (en surface et en profondeur) ont bien confirmé que ces sables sont homogènes et d'origine éolienne (bien superposables à la courbe standard des dépôts éoliens) (TOUBAL, 2004).

La granulométrie est fine à moyenne (75 à 85 %), les grains ayant un diamètre de 0.15 – 0.5 mm. Il s'en suit en l'absence d'argile une bonne perméabilité de la formation (10^{-4} à 10^{-3} m/s) de telle sorte que l'eau précipitée y pénètre immédiatement et totalement. Ces sables jouent ainsi le rôle de filtre naturel et de magasin aquifère.

Le centre du bassin d'alimentation délimité précédemment (BAC) qui présente la portion de la nappe qui alimente le captage (PNAC), semble être la plus adéquate pour

l'installation d'un dispositif d'infiltration des eaux de l'oued el Kébir Est via la technique des bassins d'infiltration, du fait qu'elle présente les caractéristiques suivantes :

- La formation affleurante est favorable à l'infiltration ;
- Puissance du non-saturée dépassant 15 mètres ;
- Les eaux infiltrées vont réalimenter les zones les plus touchées par la baisse piézométriques, notamment celle de Bordj Ali Bey, et la partie Nord Est de Berrihane ;
- Secteur intensivement exploité pour l'AEP, et pour l'irrigation des cultures maraichères pendant toute l'année : ce qui assure l'exploitation de toute l'eau infiltrée.

VI. 3. 5. 2. 1 - Dimensions des bassins d'infiltration

L'analyse des cas de recharge de nappe dans plusieurs pays du monde (France, le site de Croissy est le plus grand site de réalimentation artificielle de France ; Berlin ; Californie, West Coast Basin Barrier Project ; Californie – USA, Orange County ; Tucson, Arizona – USA ; Mexico city – El Mezquital ; Alice Springs – Australie et la côte orientale du cap bon en Tunisie) (Gestion de la nappe alluviale de la Siagne, Recherche bibliographique 2010-2011), nous a permis d'estimer les dimensions des bassins d'infiltration favorables pour la recharge de la nappe du massif dunaire de Bouteldja.

La plupart des pays utilisant les eaux usées pour cette technique de recharge, qui mobilise des quantités d'eau suffisantes pour l'opération, qui varient d'une station à autre et peuvent atteindre 88 Mm³/an (STEP Orange County, Californie – USA) et 49Mm³/an (STEP de Korba, Tunisie).

Malheureusement, la région de Bouteldja ne contient pas une station d'épuration des eaux usées, pour cela on a procédé à l'utilisation des eaux de l'oued El Kébir Est, prenant en considération les variations saisonnières des débits.

La recharge de la nappe se fait à partir du mois d'Avril où l'apport moyen mensuel de l'Oued atteint 25.56 Mm³, ce qui coïncide au même temps avec la diminution des niveaux piézométriques, ainsi on va créer des cônes au niveau des zones de recharge qui vont réalimenter automatiquement, suivant la différence de charge hydraulique créée, les zones subites a une important baisse du niveau de la nappe. Le schéma suivant va mettre en évidence la technique de recharge.

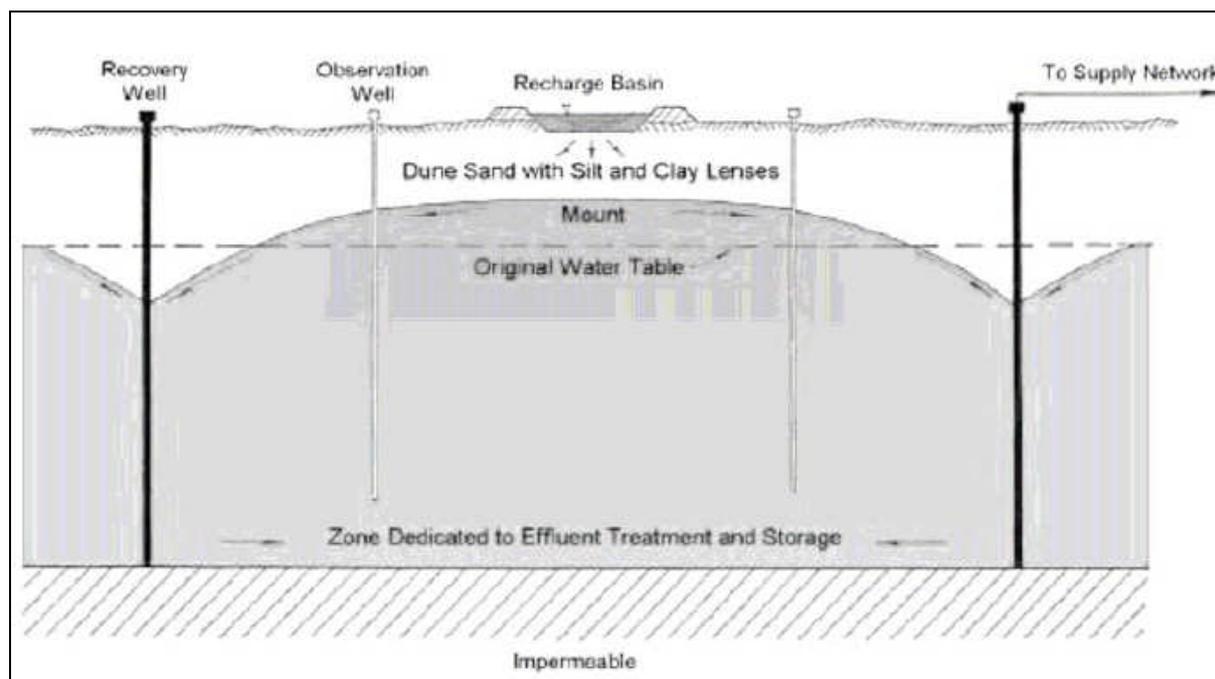


Figure 70 : Schéma de la recharge

Pour rattraper le déficit marqué dans le bilan qui est estimé à environ 10 Mm^3 par an, on propose l'implantation de quatre bassins d'infiltration aux zones délimitées précédemment (PNAC).

L'estimation des dimensions de ces bassins, est basée principalement sur le coefficient de perméabilité ($K = 5.10^{-5} \text{ m/s}$), et la surface d'infiltration du bassin qui est défini arbitrairement par 0.5 ha pour chaque bassin. Supposant que la surface active (totale des surfaces imperméabilisées : parking, toitures, terrasses,...) est négligeable, le débit de fuite est calculé à partir du formule :

$$Q = K \times S$$

VI. 3. 5. 2. 2 - Les calculs

$$K = 5.10^{-5} \text{ m/s};$$

$$S = 5000 \text{ m}^2;$$

$$Q = 5.10^{-5} \times 5000 = 250 \text{ l/s} = 0.648 \text{ Mm}^3/\text{Mois}/ \text{Bassin}.$$

Le total des bassins donne environ $2.59 \text{ Mm}^3/\text{mois}$.

Le transfert d'eau se fait à l'aide d'une pompe de refoulement installé dans une chambre à coté de l'oued El Kébir Est.

Cette pompe est raccordé à une ligne de canalisation en PVC, assurant le transfert des quantités d'eau précisées à chaque bassin (longueur : 100m ; largeur : 50m ; profondeur : 2 , soit un volume de 10000 m^3).

La recharge des bassins se fait successivement, avec des vannes installées à l'entrée de chaque bassin.

Pour illustrer l'idée, un schéma explicatif est réalisé pour donner les détails de chaque étape.

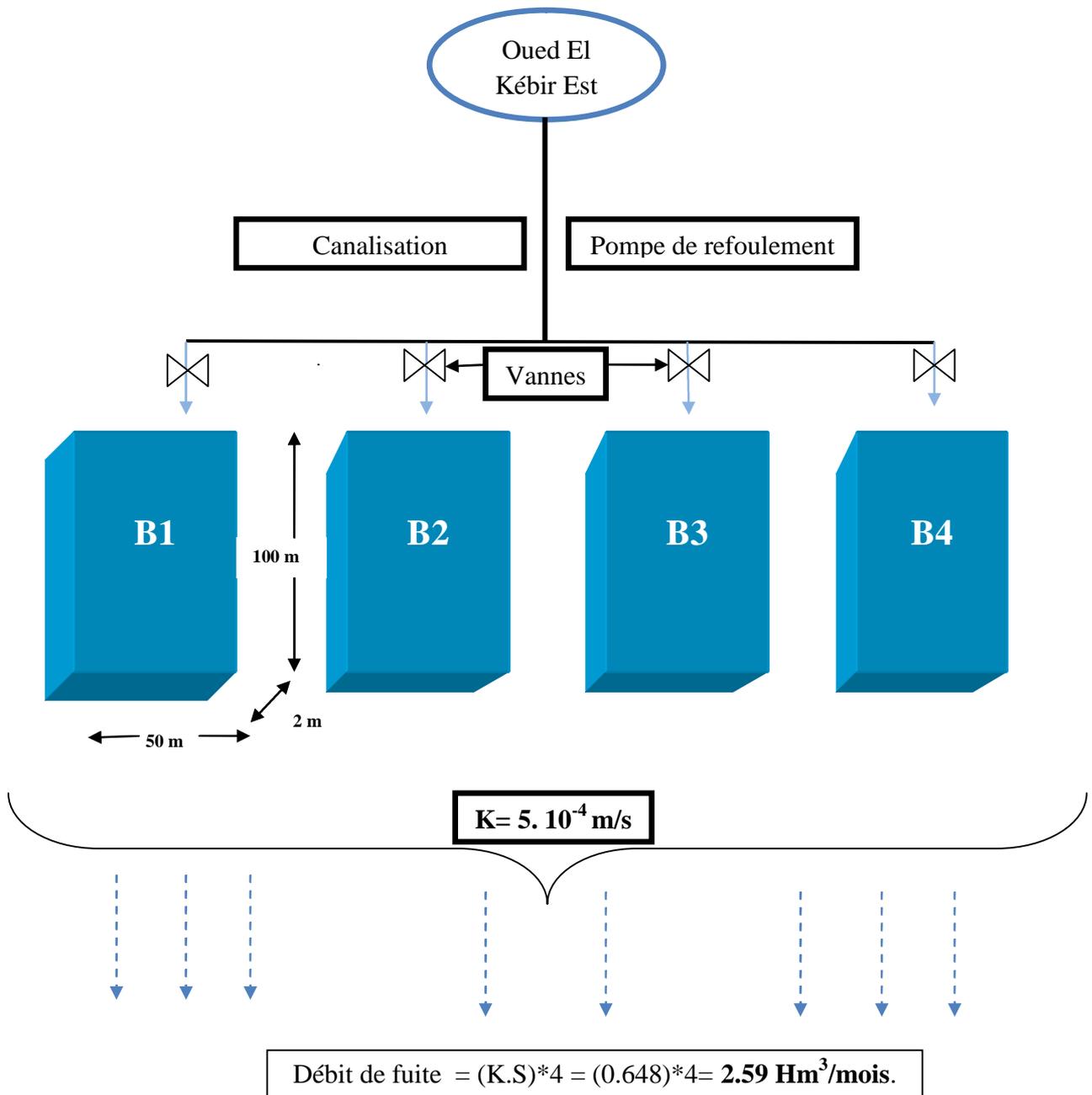


Figure 71 : Recharge artificielle par bassin d'infiltration.

Conclusion

Dans le cadre d'étude de la faisabilité de l'implantation d'un Bassin d'alimentation, ont été obligé d'apprécier la faisabilité technique de la recharge artificielle, d'une part pour sélectionner les secteurs les plus favorables à la recharge, ce qui fait appel au notion de bassin d'alimentation des captage et la portion de la nappe alimentant le captage (BAC et PNAC), et d'autre part pour mettre au point les dispositifs les mieux adaptés pour réaliser un apport artificiel au droit de ces secteurs.

En effet les études nous ont montrée qu'il est favorable à implanter un bassin d'alimentation dans la zone situé à la partie Nord Est du massif dunaire et exactement dans le sous bassin versant d'oued El B'haïem sur une superficie d'environ de 45 km².

Pour rendre l'opération de la recharge très efficace, on a procédé à la détermination du PNAC à l'entourage des forages 6912, B9, B1, 6918, 6902 et 6919 qui présente la zone la plus exploitée et appartient au BAC.

L'analyse hydrologique et chimique de l'oued Kébir Est, a qualifié ce dernier l'oued Kébir Est dans la première case des sources d'alimentation de la nappe aquifère du massif dunaire de Bouteldja quantitativement avec ces entrées estimés à environ de 295 Hm³ /an, avec des apports mensuels considérables pendant la saison des hautes eaux qui peuvent atteindre 40.55 Hm³ au mois de Février, ainsi que la bonne qualité de ces eaux.

Deux solutions ont été proposées pour résoudre le problème de déficit marqué dans le bilan qui est estimer à environ de 4.77 Mm³ par an.

Le premier est par l'infiltration directe des eaux de surface le long des cours d'eau via l'aménagement de seuils de retardement de l'écoulement. Il s'agit d'un tronçon de l'oued El B'haïem sis dans la partie Sud Est du massif dunaire sous une direction d'écoulement dirigé du Nord Est vers le Sud Ouest, le même sens d'écoulement des eaux souterraine.

Le deuxième, par infiltration directe des eaux de surface par des bassins d'infiltration. La recharge de la nappe se fait à partir du mois d'Avril ou l'apport moyen mensuel de l'Oued atteint 25.56 Mm³, ce qui coïncide au même temps avec la diminution des niveaux piézométriques, comme sa on va créer des cônes au niveau des zones de recharges qui vont réalimenter automatiquement, suivant la différence de charge hydraulique crée, les zones subits à une important baisse du niveau de la nappe. Pour cela, quatre bassins d'infiltration aux zones délimitées précédemment (PNAC) proposées pour assurer chaque mois un volume d'eau d'environ de 2.59 Mm³.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale :

Le massif dunaire de Bouteldja est localisé dans la partie Nord Est de l'Algérie, il appartient au système aquifère Annaba – Bouteldja inclus dans l'hydro système du bassin versant de la Mafragh. Il est limité au Nord par la mer méditerranée, au Sud par la plaine de Bouteldja, à l'Ouest par le Mafragh et à l'Est par le massif de Cap Rosa.

Le massif dunaire de Bouteldja s'étend sur une superficie d'environ 180 Km², caractérisée par des affleurements Tertiaires (les formations argilo-gréseux du Numidien) et des formations quaternaires (Dunes, sables, alluvions) dominant la partie avale Nord – Est et Nord – Ouest.

La région est soumise à l'influence d'un climat Méditerranéen caractérisé par une période humide qui s'étend du mois d'octobre au mois de mai, et une autre sèche qui débute au mois de mai et se termine au mois de septembre. Elle reçoit en moyenne une pluviométrie variant entre 815,12 mm et 663,94 mm, sous une température moyenne annuelle de l'ordre de 17,85 °C.

Le bilan hydrique de la zone d'étude montre les caractéristiques suivantes : une évapotranspiration réelle représentant 65,06% des précipitations et plus de 30% d'excédent qui se traduit plus tard en infiltration efficace.

Le massif dunaire de Bouteldja est formé essentiellement par des sables éoliens quaternaires avec des intercalations de lentilles argileuses. Les épaisseurs variant de 20 m (Est) à 160 m (Ouest).

L'étude des paramètres hydrodynamiques a permis de déterminer des valeurs de transmissivité de l'ordre de 10^{-6} à $1.3 \cdot 10^{-3}$ m²/s, des perméabilités qui varient entre $8 \cdot 10^{-5}$ 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 dirigé vers la mer au Nord et vers les terrasses de l'Oued Kébir Est au Sud suivant 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.

Deux solutions ont été proposées pour résoudre le problème de déficit marqué dans le bilan qui est estimé à environ de 4.77 Mm³ par an.

Le premier est par l'infiltration directe des eaux de surface le long des cours d'eau via l'aménagement de seuils de retardement de l'écoulement. Il s'agit d'un tronçon de l'oued El B'haiem sis dans la partie Sud Est du massif dunaire sous une direction d'écoulement dirigé du Nord Est vers le Sud Ouest, le même sens d'écoulement des eaux souterraine.

Le deuxième, par infiltration directe des eaux de surface par des bassins d'infiltration. La recharge de la nappe se fait à partir du mois d'Avril ou l'apport moyen mensuel de l'Oued atteint 25.56 Mm^3 , ce qui coïncide au même temps avec la diminution des niveaux piézométriques, comme sa on va créer des cônes au niveau des zones de recharges qui vont réalimenter automatiquement, suivant la différence de charge hydraulique créée, les zones subits à une important baisse du niveau de la nappe. Pour cela, quatre bassins d'infiltration aux zones délimitées précédemment (PNAC) proposées pour assurer chaque mois un volume d'eau estimer à environ de 2.59 Mm^3 .

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQU

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Affoun S. (2006) : Ressources en eaux, mobilisation et utilisation dans le bassin versant de la Mafragh. Thèse de Magister, Université de Constantine, 223p.

Boudoukha A. (1990) : Influence du déficit pluviométrique sur le comportement hydrogéologique et hydrologique dans deux sous bassins au sein du massif dunaire de Bouteldja : Bouglès, Bourdim (extrême Nord-Est Algérie). Mémoire d'Ingénieur. Université de Annaba, 168 p.

Bulletin de l'association internationale des sciences d'hydrologie XVI, 1971.

Castany G et Margat. (1977) : Dictionnaire français d'hydrogéologie, géologie minière, 249p.

Castany G. (1982) : Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Dunod édit. Paris, 334p.

Chaffai H., Djabri L. et Lamrous S. (2005): Réserves hydriques de la Wilaya de Annaba. Inventaire, évaluation et besoins futurs en ressources en eaux. Larhyss Journal N° 4.

Claudine B et Xavier J. (2007) : Exemple d'un Bassin d'Alimentation de Captage prioritaire : le BAC d'Ecuvilly -Agence de l'Eau Seine-Normandie.

Derradji F. (2004) : Identification quantitative et qualitative des ressources en eau de la région de Annaba – El Tarf (Nord – Est Algérien). Thèse de Doctorat d'Etat, université d'Annaba, 200p.

Djidjel M. (2003) : Etude hydrochimique des nappes côtières : cas de nappe du littoral de Annaba -El Kala (Nord – Est Algérien). Mémoire de Magister, université d'Annaba.

El- Bennouri A. (2002) : Protection des captages d'eau souterraine destinée à l'alimentation humaine. Revue H.T.E N° 122- Mars 2002.

Guilbaud A., Ricaud A et Mondain. Ph, (Novembre 2009) : Délimitation des Aires d'Alimentation des Captages prioritaires du bassin Adour Garonne. BRGM/RP-57299-FR – Rapport final.34p.

Hadj Saïd 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.

Haïed N. (2008) : Impact des eaux de réalimentation sur la qualité des eaux souterraines de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja (NE Algérien). Thèse de magister, Université d'Annaba, 155p.

Hani A. (2003) : Analyse méthodologique de la structure des processus anthropiques. Application aux ressources en eaux d'un bassin côtier méditerranéen. Thèse de Doctorat d'Etat, université d'Annaba, p 234.

Hassan K. (2007) : Etude de la faisabilité de la recharge artificielle de la nappe de Témara par le SIG. Mémoire de Master Université de Fès (Maroc).76p.

Joleaud L. (1936): Etude géologique de la région de Bône-la Calle, B.S.G.A (2), N°12, 199 p.

Kablouti N., Hani A., Nafaa D. et Matmati B. (2008) : Les ressources en eaux souterraines dans les zones humide : approche digital pour une gestion durable de la nappe aquifère de Bouteldja (Extrême Nord-Est d'Algérie). ISSN 1450-216X Vol.23 No.1 (2008), pp.109-121.

Kerjean M. (2006) : Détermination des périmètres de protection du captage AEP (n° BSS 0334-6X-0020). Commune de Viviers-sur-Artaut (Aube). 56p.

Khérici N. (1985) : Aquifère sableux de bord de mer, hydrodynamique et hydrochimie ; exemple de la nappe de Bouteldja (Nord – Est Algérien), Doctorat de 3eme cycle, université de Montpellier, France, 202 p.

Khérici N, (1993) : Vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines d'un système de nappe superposée en milieu industriel et agricole (Annaba- la Mafragh) N-E Algérien. Doctorat d'Etat, université d'Annaba.

Lallahem S. (2002) : Structure et modélisation hydrodynamique des eaux souterraines : application à l'aquifère crayeux de la bordure Nord du bassin de Paris. Université des sciences et technologies de Lille (France), 243p.

Ledoux E. (2003) : cours sur les modèles mathématiques en hydrogéologie. Centre d'Informatique Géologique Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.133p.

Meliouh T., Maizi T. et Rakrouki. N, (1993) : Essai de simulation numérique de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja. Mémoire d'ingénieur. Université d'Annaba, 79 p.

Mouchara N. (2004) : Hydrogéologie du massif dunaire de Bouteldja et les possibilités de réalimentation artificielle de la nappe, mémoire d'ingénieur, hydrogéologie. Université d'Annaba, 88 p.

Nafaa K. (1985) : Etude hydrogéologique du système aquifère Annaba-la Mafragh. Thèse 3^{ème} cycle USTL, Montpellier, 156 p.

Nazoumo Y. et Besbes M. (2000) : Simulation de la recharge artificielle de nappe en oued par un modèle à réservoirs. REVUE DES SCIENCE DE L'EAU, Rev. Sci. Eau 13/4(2000).379-404.

Nouacer R. (1993) : Essai de synthèse des caractéristiques hydrogéologiques et hydrochimiques de la nappe du massif dunaire de Bouteldja. Thèse de magister, IST, Université d'Annaba, 119p.

Principes de délimitation des bassins et de caractérisation de la vulnérabilité des captages, (BRGM/RP-57299-FR Aout 2009). 182p.

Ramdani A. (1996) : Hydrogéologie et modélisation de la nappe dunaire de Bouteldja. Mémoire de Magister. Université d'Annaba, 138 p.

Rasmussen H. et Rouleau A. (2003) : Guide de détermination d'aires d'alimentation et de protection de captages d'eau souterraine. Centre d'études sur les ressources minérales Université de Québec à Chicoutimi.182p.

Saadeli B. (2007) : Etude de la qualité des eaux des sources issue du massif dunaire de Bouteldja (Algérie extrême Nord orientale). Thèse de magister, Université d'Annaba, 110p.

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.

Seghir K. et Khérici N. (2008) : Étude de la Faisabilité de la Recharge Artificielle des Nappes Souterraines dans une Région Semi Aride: Cas de la Nappe Alluviale Tébessa-Hammamet (Ne Algérien). Journal International Network Environnemental Management Conflits, Santa Catarina – Brazil, 1(1), pp. 30-36, Dez. 2010.

Smida H. (2010) : Gestion quantitative et qualitative des ressources en eaux dans la région de Sidi Bouzid (Tunisie centrale) à l'aide d'un SIG : Etude de la recharge induite des nappes et leur vulnérabilité à la pollution. L'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax (TENIS). ESRI France 2011.

Toubal A. C. (1983) : "Etude hydrogéologique du massif dunaire de Bouteldja", thèse de 3^{ème} cycle, Université Bab Ezzouar Alger, 500p.

Toubal. A. C. (2002) : Anisotropie des sables éoliens de Bouteldja (Nord-Est de l'Algérie). Larhuss. Journal. N°03, juin 2004, 38-43 p.

Vernoux J. F., Wuilleumier A. et Dorfliger N. avec la collaboration de **Martin A. (2007)** : Délimitation des bassins d'alimentations des captages et de leurs vulnérabilités vis-à-vis des pollutions diffuses (Rapport intermédiaire). BRGM/RP-55332-FR (Mai 2007).293p.

Vernoux J. F, Wuilleumier. A, et Dorfliger. N, (2007) : Délimitation des bassins d'alimentations des captages et de leurs vulnérabilités vis-à-vis des pollutions diffuses (Rapport final).BRGM/RP-55874-FR (Septembre 2007).72p.

ANNEXES

Tableau A1: Les précipitations mensuelles en (mm) de la station d'Ain Assel (1990/2010).

Années	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
90/91	0	35,5	174,9	309,6	127	94,5	119,5	53,2	30,5	3,3	0	4,4
91/92	93,4	181,4	95,5	44,5	38,4	71,1	74,1	132,6	116,5	18,1	22,5	2,5
92/93	4,6	100,1	246,2	215,7	96,3	61,8	55,5	34,5	42,3	0,8	1,1	2,1
93/94	29,8	53,1	16,6	110,5	107,2	181,3	1	80,7	7,9	2	0	0
94/95	71,4	70,7	27,2	119	211,9	6,9	76,6	50,7	0	23,2	0	11
95/96	59	51,3	95,3	70,7	83,2	223	90,8	206,2	27,5	20,9	2,5	0
96/97	13,1	51,5	60,4	55	115,6	68,2	15	41	6	12,8	0	0
97/98	76,2	105,1	163,3	176,6	133	145,2	46,5	83,5	52,2	3,9	0	26,1
98/99	78,6	85,5	246,9	105,9	123,6	102,7	45,6	34,7	38,1	0,5	10,4	9,4
99/00	16,7	16,3	222,2	128,9	54,1	22,3	16	35,9	76,8	11,5	0	5,4
00/01	58,8	183,8	47,2	119,9	171,3	137,3	28,5	69	43,2	0	0	1,5
2001/2002	51,5	1	73,6	93,6	29,6	53,6	56,1	61,5	3,4	2	10,1	53,8
2002/2003	39,4	66,4	273,7	256,9	240,8	155,6	34,1	118,4	40,3	0	0	0
2003/2004	107,4	50,3	44,1	252,7	167,9	17,6	75	96,5	78,1	61	0,7	0
2004/2005	85,7	42,4	299,1	165,1	126,7	151,5	62,8	185,3	22,6	7,1	5	5,3
2005/2006	20,6	5,7	63	158,5	141,8	97	33,3	51,3	14,3	3	0	33,9
2006/2007	28,8	38,5	75,9	182,6	42,7	115,2	250,3	66,2	11,6	38,5	1,8	3
2007/2008	48,3	106,7	136,8	123,7	22,6	26,1	125,3	50,3	60,6	6,5	0	0
2008/2009	75	10	80	66	92	209	71	106	65	16	6	11
2009/2010	27	41	45	63	61	49	43,1	33	6	33,7	0	21

Tableau A2: Les précipitations mensuelles en (mm) de la station des Salines (1990/2010).

Années	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
90/91	2	30	107	181	92	73	96	24	61	14	0,3	9
91/92	52	100	67	29	69	81	65	112	83	15	11	0,6
92/93	0	36,4	126	143	83,7	42	81	59	66	3	0	4
93/94	0	55	20	160	84	86	5	79,2	17	13	0,1	0,4
94/95	18	46,8	19,4	109,9	180	20	74	37	10,1	29	0,1	4
95/96	75	10	80	66	92	209	71	106	65	16	6	11
96/97	27	41	45	63	61	49	43,1	33	6	33,7	0	21
97/98	118	103	215	141	70	87	35	85	49	6	0	32
98/99	64	237	61	63	157	103	48	44	38	9	13	4
99/00	16,6	30	11	136	50	24	31	20	115	10	0	16
00/01	19,3	105	37	108	112	75	19	40	28	4	0,4	3
2001/2002	4	47	60	82	29	49	32	62	15	0,3	13	67
2002/2003	24	73	118	147,1	186	86	21	91	26	0	0	0
2003/2004	67	39	20	171	110	23	69	97	75	32	2	3
2004/2005	81	21	179,6	185	135,9	179,5	61	123,2	10	3,4	1,5	7,1

2005/2006	29,3	15,1	55,1	184	131,2	72,6	45	15,3	26	7,4	1,5	29,8
2006/2007	16,1	35,5	61,1	142,7	35,4	51,4	203,7	27	17	52	3	3
2007/2008	32,8	102	83,7	125	13,7	16,5	98,5	16	41,9	2,4	7	0,2
2008/2009	42,4	299,1	165,1	126,7	151,5	62,8	185,3	22,6	7,1	5	5,3	4
2009/2010	38,5	75,9	182,6	42,7	115,2	250,3	66,2	11,6	38,5	1,8	3	2,60

Tableau A3 : Caractéristiques hydrodynamiques de quelques forages inventoriés dans le massif dunaire de Bouteldja.

Forage	coordonnées		T (m ² /s)	Epaisseur mouillé (m)	K (m/s)	S (%)
	X	Y				
B1	881.800	410.800	5.6 10 ⁻⁵	154.4	3.6 10 ⁻⁷	
B3	980.950	406.820	3.0 10 ⁻³	138.4	2.1 10 ⁻⁵	
B4	980.100	406.000	1.0 10 ⁻³	102.85	9.72 10 ⁻⁶	
B6	986.100	411.800	0.9 10 ⁻³	191.55	4.69 10 ⁻⁶	1.4
B5	983.600	406.250	1.0 10 ⁻³	120.33	8.31 10 ⁻⁶	1.7
B7	987.700	410.300	2.0 10 ⁻³	110.4	1.8 10 ⁻⁵	19
B8	988.850	409.650	1.11 10 ⁻³	119.92	9.17 10 ⁻⁶	11
B9	989.400	408.550	2.5 10 ⁻³	146.98	1.7 10 ⁻⁵	16
B10	984.350	407.900	1.0 10 ⁻²	138.02	7.24 10 ⁻⁵	24
B11	989.500	407.250	1.4 10 ⁻³	137.15	1.0 10 ⁻⁵	22
B12	988.600	406.600	3.0 10 ⁻³	81.82	3.6 10 ⁻⁵	2
B13	992.000	406.600	0.9 10 ⁻³	147.05	6.12 10 ⁻⁶	
B14	985.000	406.950	2.99 10 ⁻⁴	127.18	7.86 10 ⁻⁷	
B17	985.300	407.400	2.7 10 ⁻⁴	138.19	1.9 10 ⁻⁵	
B18	975.800	405.700	1.4 10 ⁻³	104.36	1.3 10 ⁻⁵	
B20	978.350	406.800	3.2 10 ⁻³	151.52	2.1 10 ⁻⁵	12
6902	993.200	407.800	1.4 10 ⁻³	131.98	1.0 10 ⁻⁵	13
6906	987.100	409450	1.3 10 ⁻²	84.87	1.5 10 ⁻⁴	3
6907	985.900	410.200	3.0 10 ⁻³	137.8	2.1 10 ⁻⁵	
6909	985600	408.950	5.0 10 ⁻³	130.19	3.8 10 ⁻⁵	12
6910	988.300	408.950	4.0 10 ⁻³	140.34	2.8 10 ⁻⁵	15
6911	986.400	412.500	3.0 10 ⁻³	96.18	3.1 10 ⁻⁵	0.17
6912	990.000	409.000	4.0 10 ⁻³	127.18	3.1 10 ⁻⁵	
6917	990.400	407.300	7.1 10 ⁻³	70.5	1.0 10 ⁻⁴	
6918	991.500	405.950	1.0 10 ⁻²	136.52	7.32 10 ⁻⁵	0.12
6919	991.650	409.000	4.0 10 ⁻³	101.43	3.90 10 ⁻⁵	0.15
6920	993.600	406.500	6.0 10 ⁻⁴	61.46	9.7 10 ⁻⁶	0.17
6921	984.780	411.690	5.0 10 ⁻³	124.25	4.0 10 ⁻⁵	0.13

6923	995.100	405.900	$6.0 \cdot 10^{-3}$	54.61	$1.09 \cdot 10^{-4}$	
6925	994.950	406.950	$1.3 \cdot 10^{-2}$	36.98	$3.5 \cdot 10^{-4}$	
P19	983.800	414.100	$2.0 \cdot 10^{-3}$	110.02	$1.8 \cdot 10^{-5}$	0.21
565	988.050	405.800	$1.4 \cdot 10^{-3}$	106.16	$1.3 \cdot 10^{-5}$	
A5	978.850	406.850	$2.1 \cdot 10^{-3}$	133.87	$1.5 \cdot 10^{-5}$	

Tableau A4 : Hiérarchisation du réseau hydrographique par Sous-Bassins au 1/50.000

Sous-bassins	Ordre des affluents par Sous-bassin													
	Ordre 1		Ordre 2		Ordre 3		Ordre 4		Ordre 5		Ordre 6		Total	
	L(Km)	N	L(Km)	N	L(Km)	N	L(Km)	N	L(Km)	N	L(Km)	N	L(Km)	N
Kébir Est	972.5	3784	564.75	1692	237.75	688	154.50	398	109	17 4	56.25	40	2094.75	67 76
Bougous	212.1	245	69.3	54	41.45	13	9.6	04	24.6	01	/	/	357.05	31 7
Cheffia	220.65	500	94.95	120	48.2	34	24.85	10	9.75	3	8.2	1	406.6	66 8
Bourdim	47.85	163	14.9	26	7.8	7	9.85	4	1.05	1	/	/	81.45	20 1
B'haim : Ch Mabdoua Ch Aïn Hamida	19.35	58	11.75	16	7.40	5	8.75	2	7.05	1	/	/	54.30	81
	8	30	5	07	4.05	02	2.15	1	/	/	/	/	19.2	40
	11.35	28	6.75	9	3.35	3	6.6	1	/	/	/	/	28.05	41

Tableau A5: Classe du relief par sous-Bassin.

Sous bassin	Dénivelée spécifique	Classe du relief
Mafragh	429.94	Fort
Kébir-Est	219.17	Assez fort
Bougous	301.52	Fort
Cheffia	307.98	Fort
Bourdim	120.39	Assez fort.
B'haim	122.74	Assez fort.

Tableau A6: Note de calcul des dimensions d'un bassin d'infiltration.

NOTE DE CALCUL

			Compléter :
K :	COEFFICIENT DE PERMEABILITE DU SOL DE LA PROPRIETE	K = 0 m/s

			Compléter :
s :	SURFACE D'INFILTRATION DU BASSIN à définir arbitrairement	s = 0 m2

			Compléter :
Sa :	SURFACE ACTIVE : total des surfaces imperméabilisées (toitures, terrasses, parkings, ...)	 0 m2

Q :	DEBIT DE FUITE	$Q = K \times s \times 1000 =$	0,00 l/s
-----	----------------	--------------------------------	----------

q :	DEBIT SPECIFIQUE PAR RAPPORT A LA SURFACE ACTIVE	$q = 3600 \times Q / Sa =$	#DIV/0! mm/h
-----	--	----------------------------	--------------

ha :	CAPACITE SPECIFIQUE DE STOCKAGE	reporter q sur abaque	#DIV/0! mm
------	---------------------------------	-----------------------	------------

V :	VOLUME TOTAL A STOCKER	$V = ha \times Sa / 1000 =$	#DIV/0! m3
-----	------------------------	-----------------------------	------------

VOLUME DU BASSIN DE D'INFILTRATION :		V =	#DIV/0! m3
--------------------------------------	--	-----	------------

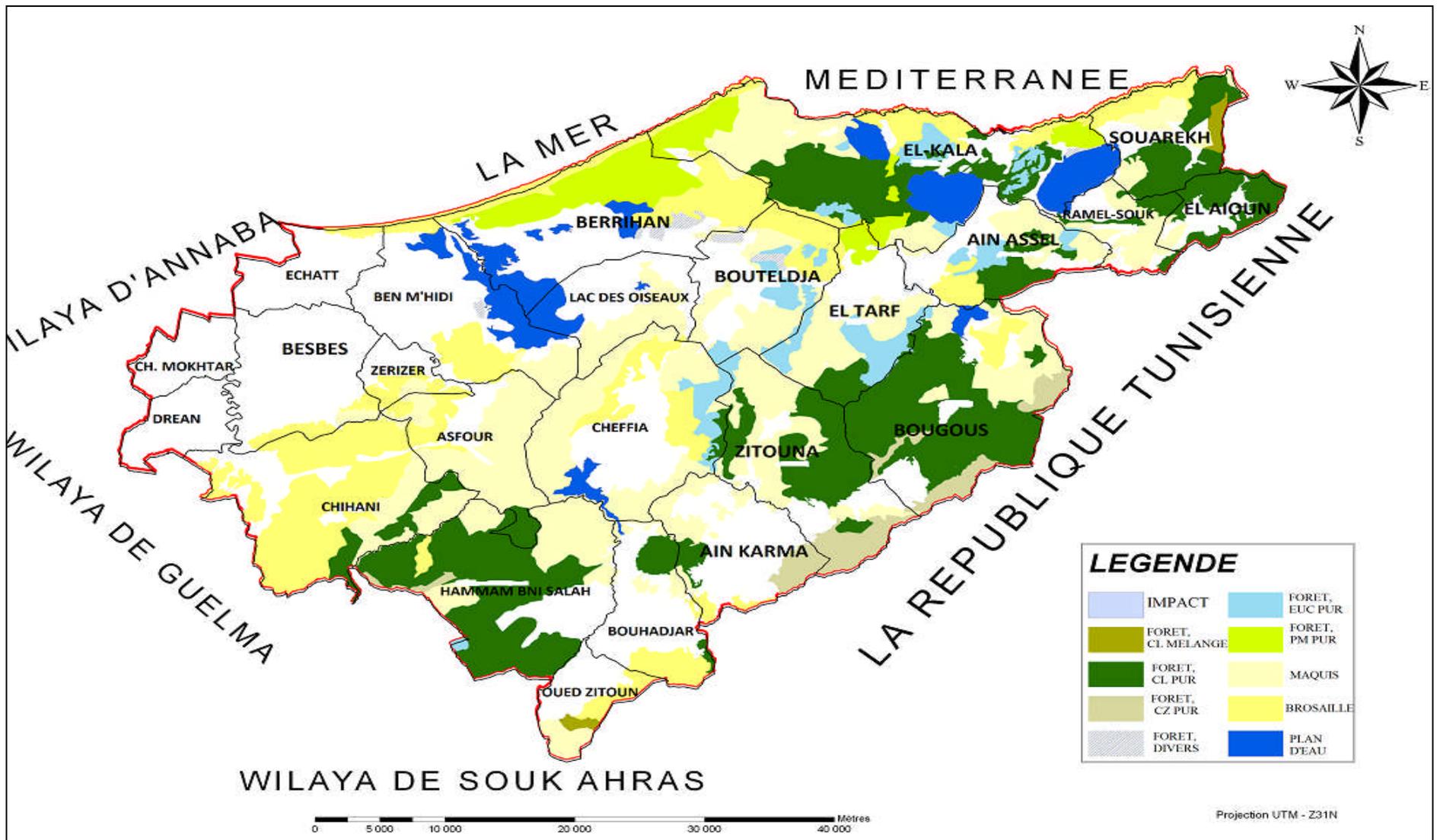


Figure A1 : Carte d'occupation des sols de la wilaya d'El Tarf (direction des forêts 2010).