

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

Année 2007

Faculté des Sciences de la Terre
Département de Géologie

MEMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de

MAGISTER

Option : Géosciences

THEME

**Etude de la qualité des eaux des sources
issues du massif dunaire de Bouteldja
(Algérie extrême Nord orientale)**

Présenté par : SAADALI Badreddine

Directeur de mémoire :

Mr DERRADJI El Fadel M.C. Univ.Badji Mokhtar-Annaba

DEVANT LE JURY :

Président: Mr KHERICI N.

Pr. Univ.Badji Mokhtar-Annaba

Examineurs:

Mr ZOUINI D.

M.C. Univ.Badji Mokhtar-Annaba

Mme BOUSNOUBRA H.

M.C. Univ.Badji Mokhtar-Annaba

REMERCIEMENT

*Je tiens à remercier avant tout « ALLAH » notre dieu le tout puissant,
qui nous a créés, instruits et grandis.*

*Je remercie ceux qui ont participé et qui m'ont aidé de près ou de loin
que se soit
physiquement ou moralement dans l'élaboration de ce travail.*

*Je tiens à citer mon encadreur
« Mr. DERRADJI. F »
Pour ces efforts considérables et ces conseils qui m'ont bien orienté.*

*Je remercie le laboratoire de Constantine et la station météo d'Annaba :
Mr Safi, Mr Mihoub, Mr Bouakkaz et aussi Mr Bharmia, et tous les
ami(e)s pour leur soutien au niveau du laboratoire..*

Je remercie tous mes enseignants de ma spécialité.

*Je remercie également les membres de jury qui ont accepté avec amabilité
d'examiner et de critiquer ce travail.*

*« sans oublier mon grand père MOHAMED que le dieu le garde en paix
dans son paradis »*

Résumé

La nécessité de préserver les ressources destinées à la consommation humaine est une priorité affichée tant au niveau national qu'à l'échelle de la demande progressive donc avoir des dispositions qui concernent tant la lutte contre les pollutions que la gestion quantitative des ressources.

De très nombreuses causes de pollution, d'origine naturelle (géologique) ou humaine (agriculture surtout), ont un impact sur la qualité des eaux naturelles.

La région d'étude est connue comme un important réservoir d'eau souterraine capable de stocker l'eau de pluie en vue de la nature du sol.

La forte exploitation de ces eaux et la progression de locataire rurale suivie par la vitalité agricole qui est la principale activité dans notre zone d'étude et qui est accompagnée par la forte demande en eaux pour diverses utilisations.

L'aggravation constante de la pollution agricole due à l'utilisation d'engrais et de produits de traitements des végétaux rend l'eau impropre à la consommation dans notre région.

A cet effet, il fallait prendre toutes les mesures susceptibles de garantir la qualité des eaux de ces ressources et la sécurité de l'approvisionnement en eau potable. Ce qui a conduit à établir la mise en place de zones de protection du champ captant nappe dunaire libre de Bouteldja en matière de la protection des ressources en eau.

Abstract

The need to preserve resources for human consumption is a priority displayed both nationally and across the gradual application therefore have provisions that concern both protection against pollution that the quantitative management of resources.

Numerous causes of pollution, both natural (geological) or human (especially agriculture), have an impact on the quality of natural waters.

The study area is known as an important water reservoir capable of storing rainwater in the soil.

The strong operating these waters and the progression of rural tenant followed by the agricultural vitality which is the main activity in our study area and which is accompanied by the strong demand for water for various purposes.

The worsening of agricultural pollution due to the use of fertilizers and treatment products plant makes water unfit for consumption in our region.

To this end, he had to take all measures to guarantee the water quality of these resources and the safety of drinking water. This has led to the establishment of protection zones of the field capturing slick dune free Bouteldja regarding the protection of water resources.

ملخص

إن ضرورة الحفاظ على الموارد المخصصة للاستهلاك البشري تمثل اولويه خاصة سواء على الصعيد الوطني عبر التطبيق التدريجي لأحكام و التي تتعلق اكثر بحماية هذه الموارد ضد التلوث عن التسيير الكمي في إدارة هذه الموارد.

للتلوث أسباب عديدة، سواء كانت طبيعية (جيولوجية) أو تحت تأثير الإنسان (ولا سيما الزراعة)، ويكون لها اثر على نوعية المياه الطبيعية.

منطقة الدراسة معروفة كخزان هام للمياه و قادرة على تخزين مياه الأمطار في التربة. القوى العاملة في هذه المياه وكيفية التقدم الريفي المستأجر تليها الزراعية الحيوية التي هي النشاط الرئيسي في المنطقة و الذي يكون مصحوبا بالطلب قوى على المياه لأغراض مختلفة. تفاقم التلوث الزراعي يعود إلى استخدام الأسمدة والمنتجات النباتية الخاصة و العشوائية يجعل المياه غير صالحة للاستهلاك في منطقتنا.

وتحقيقا لهذه الغاية، فقد كان يجب اتخاذ جميع التدابير اللازمة لضمان نوعية المياه من هذه الموارد وسلامة مياه الشرب. وقد أدى هذا إلى إنشاء مناطق الحماية من ميدان المياه الجوفية لبوتلجة فيما يتعلق بحماية الموارد المائية.

SOMMAIRE

Introduction : Qualité des eaux des sources issues du massif dunaire de Bouteldja

Introduction :1

Chapitre I : Cadre physique et aperçu géologique

I. Localisation géographique :	3
II. Caractéristique géomorphologique:	3
III. Le couvert végétal :	6
IV. Aperçu géologique:	8
IV.1. Stratigraphie:	8
IV.1.1.Le Secondaire:	8
IV.1.1.1. Crétacé supérieur (Sénonien) :	8
IV.1.2. Tertiaire:	8
IV.1.2.1. Oligocène moyen à supérieur :	8
IV.1.2.2. Série gréseuse:	10
IV.1.3. Quaternaire:	10
IV.1.3.1. Les éboulis de pente:	10
IV.1.3.2. Les terrasses:	10
IV.1.3.2.1. Basse terrasse d'Oued El Kébir Est:	10
IV.1.3.2.2. Moyenne terrasse de El Kébir Est:	10
IV.1.3.2.3. Haute terrasse d'El Kébir Est:	10
IV.2. Géologie des dunes:	10
IV.3. Le sable dunaire et la malasse bordière:	12
IV.4. Paléogéographie:	12
IV.4.1. Le premier cycle (régression):	12
IV.4.2. Le second cycle (transgression):	12
IV.5. La tectonique:	12
IV.6. Cadre structurale:	14
IV.7. Caractères physico- chimiques des sables dunaires:	14
IV.8.Conclusion :	16

Chapitre II : Etude hydroclimatologique

I. Les caractéristiques climatiques:	17
I.1.Introduction:	17
II. Station de mesure:	17
III. Facteurs climatiques :.....	17
III.1. Températures (T) :	17
III.1.1. Températures moyennes mensuelles (TMM) :	17
III.1.2. Températures moyennes annuelles (TMA) :	18
III.2. L'humidité relative de l'aire (Station des Salines) :	18
III.3. La vitesse des vents (Station des Salines) :.....	19
III.4. Précipitations (P) :	19
III.4.1. Précipitations moyennes mensuelles (PMM) :	19
III.4.2. Précipitations moyennes annuelles (PMA) :	20
III.5. Caractéristiques climatiques d'aridité:	22
III.6. Coefficient pluviométrique (H) :	22
IV. Ajustement graphique à la loi normale (Gauss)	23
IV.1. Etude des précipitations annuelles:	23
IV.2. Estimation de la période de retour et de récurrence théorique :	28
V. Courbe pluvio - thermique:	29
V.1.Type de climat:	29
V.2. Calcul du bilan hydrique selon la formule de C.W Thornthwaite:	31
V.3. Interprétation du bilan de Thornthwaite:	31
VI. Conclusion :	34

Chapitre III : Etude hydrogéologique

I. Introduction :	35
II. la nappe libre du massif dunaire :	35
II.1. Bassin de Bourdim:	36
II.2. Bassin de Bou Glès:	36
II.3. Bassin oued El B'haim :	36
III. Interprétation des coupes hydrogéologiques :	37
III.1. Coupe hydrogéologique (A) :	37
III.2. Coupe hydrogéologique (B) :	37
III.3. Coupe hydrogéologique (C) :	39
III.4. Coupe hydrogéologique (D) :	39

IV. La piézométrie :	39
IV.1. Les conditions aux limites:	41
V. Etude des débits des sources (Tarisement) :	42
V.1. Interprétation des courbes de récession :	43
V.2. Application du tarissement aux sources étudiées :	44
VI. Caractéristiques hydrodynamiques :	48
VI.1. Géométrie de l'aquifère :	48
VI.2. La répartition des forages dans le massif dunaire de Bouteldja :	49
VI.3. Interprétation des résultats des pompages d'essai :	49
VI.4. Caractéristiques hydrodynamiques de la nappe libre:	49
VI.4.1. Epaisseur saturée :	49
VI.4.2. Transmissivités :	50
VI.4.3. Perméabilités :	51
VI.4.4. Coefficients d'emmagasinement :	53
VI.5. Exemples d'interprétation des données de pompages d'essai :	54
VI.5.1. Au forage F2 :	54
VI.5.2. Essai par paliers de débits au forage 565 :	55
VI.5.3. Courbe de descente :	57
VI.6. Conclusion :	58

Chapitre IV : Etude hydrochimique

I. La chimie des eaux :	60
I.1. Introduction :	60
I.2. Mode d'échantillonnage et acquisition des données :	60
II. Etudes des paramètres physiques :	61
II.1. Le potentiel d'Hydrogène (pH) :	61
II.2. La Conductivité Electronique (CE):	61
II.3. La Température (T) :	62
III. Etude des paramètres chimiques:	63
III.1. Oxygène dessous (O ₂):	63
III.2. Résidu sec (Rs) :	63
III.3. Les ions majeurs :	64
IV. Faciès chimiques :	64
IV.1. Calcium (Ca ²⁺) :	65

IV.2. Magnésium (Mg^{++}) :	67
IV.3. Sodium, Potassium (Na^+ , K^+) :	67
IV.4. Chlorures (Cl^-) :	68
IV.5. Sulfates (SO_4^{2-}) :	69
IV.6. Bicarbonates (HCO_3^-) :	70
IV.7. Nitrates (NO_3^-) :	70
V. Origines de la minéralisation observée :	71

Chapitre V : Qualité des eaux

I. Qualité des eaux :	73
I.1.Introduction :	73
II. Degré d'altération des eaux des naturelles :	73
II.1.Classification des éléments chimiques par classes d'altération :	73
II.2.Calcul des indices d'altération (I.A) :	74
II.3.Etablissement de la carte d'altération des eaux des sources:	76
III. Périmètres de protection des eaux naturelles :	77
III.1.Types de périmètres de protection :	77
III.1.1.Le périmètre de protection immédiate :	77
III.1.2.Le périmètre de protection rapprochée :	77
III.1.3.Le périmètre de protection éloignée :	77
III.2.Inplantation des périmètres de protection:	77
III.2.1.Etude de la vulnérabilité des eaux:	77
III.2.2.Méthode de vulnérabilité des eaux:	78
III.2.3.Calcul de la limite du périmètre de protection:	78
III.2.4.Etablissement de la carte des périmètres de protection :	79
IV. L'effet de l'homme sur la qualité des eaux:	80

Conclusion : Qualité des eaux : résultats

Conclusion générale :	82
-----------------------------	----

Bibliographie et annexe

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Carte géographique du massif dunaire de Bouteldja	4
Figure 2 : Carte des unités géomorphologiques dans la wilaya d'El Tarf	5
Figure 3 : Carte du couvert végétal dans la wilaya d'El Tarf (D'après le plan d'aménagement de la wilaya d'El Tarf, 2001).....	7
Figure 4 : Extrait de la carte géologique de l'extrême Nord-Est Algérien (D'après J.M.VILA, 1978)	9
Figure 5 : Log stratigraphique	10
Figure 6 : Coupe géologique schématique dans le massif dunaire de Bouteldja "D'après les données de forage" (coupe AB)	11
Figure 7 : Carte schématique tectonique (D'après SONATRACH modifiée).....	13
Figure 8 : Coupe schématique géologique et tectonique dans l'extrême Nord Est Algérien (coupe CD)	14
Figure 9 : Analyses granulométriques au niveau des forages dans le massif dunaire de Bouteldja	15
Figure 10.A : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles aux stations des Salines et de Ben M'hidi (1979/06)	21
Figure 10.B : Histogramme des températures moyennes mensuelles aux stations des Salines et de Ben M'hidi (1979/06).....	21
Figure 11.A : Evolution des précipitations annuelles de la station des Salines durant la période d'observation (1979/2006)	24
Figure 11.B : Evolution des précipitations annuelles de la station de Ben M'hidi durant la période d'observation (1979/2006)	24
Figure 12 : Ajustement graphique à une loi de Gauss des précipitations moyennes annuelles pour la station des Salines (79/80 – 05/06).....	26
Figure 13 : Ajustement graphique à une loi de Gauss des précipitations moyennes annuelles pour la station de Ben M'hidi (79/80 – 05/06)	27
Figure 14 : Diagramme pluvio – thermique de la station des Salines (79/06).....	30
Figure 15 : Diagramme pluvio – thermique de la station de Ben M'hidi (79/06).....	30
Figure 16 : Représentation graphique du bilan de Thornthwaite de la Station des Salines (1979/80 – 2005/06)	33
Figure 17 : Représentation graphique du bilan de Thornthwaite de la Station de Ben M'hidi (1979/80 – 2005/06).....	33

Figure 18 : Carte de la répartition des bassins versants dans le massif dunaire de Bouteldja	37
Figure 19 : Coupes hydrogéologiques dans le massif dunaire de Bouteldja (D'après les coupes des forages et la géophysique).....	38
Figure 20 : Coupes hydrogéologiques dans le massif dunaire de Bouteldja (D'après les coupes des forages et la géophysique).....	40
Figure 21 : Carte piézométrique du massif dunaire de Bouteldja (année 1982, Kherici, 1985).....	41
Figure 22 : Carte des conditions aux limites de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja	42
Figure 23 : Relation pluie – débit pour le tarissement d'un point d'eau	43
Figure 24 : Illustration de la modélisation d'une courbe de récession (D'après A. Mangin, 1975).....	44
Figure 25 : Hydrogramme des débits des sources captant dans le massif dunaire de Bouteldja et leurs chaque courbe de tarissement (2006/07)	46
Figure 26 : Interprétation hydrogéologique (D'après B.Gaud, 1975).....	48
Figure 27 : Carte de la répartition des forages dans le massif dunaire de Bouteldja	49
Figure 28 : Carte d'égale épaisseur de la couche saturée de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja.....	50
Figure 29 : Carte de répartition des transmissivités en $10^{-3}m^2/s$ de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja	51
Figure 30 : Estimation de la perméabilité des sables dunaire de Bouteldja	52
Figure 31 : Carte de répartition des perméabilités en $10^{-5}m/s$ de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja	53
Figure 32 : Carte du coefficient d'emmagasinement de la nappe du massif dunaire de Bouteldja	54
Figure 33 : Log stratigraphique du forage 565 de Righia et sa localisation géographique.....	55
Figure 34 : Graphique de la descente et de la remontée dans le forage F2 (Bordj Ali Bey)....	56
Figure 35 : Graphique de descente par palier de Débits enchaînés $s = f(\log t)$ dans le forage 565.....	58
Figure 36 : Localisation géographique des onze sources dans le massif dunaire de Bouteldja.....	60
Figure 37 : Evolution du pH des eaux des sources dans le massif dunaire de Bouteldja	61
Figure 38 : Evolution de la conductivité électrique des eaux des sources dans le massif dunaire de Bouteldja	62

Figure 39 : Evolution de la température des eaux des sources dans le massif dunaire de Bouteldja	62
Figure 40 : Evolution de l'oxygène dessous des eaux des sources dans le massif dunaire de Bouteldja	63
Figure 41 : Evolution du résidu sec des eaux des sources dans le massif dunaire de Bouteldja	64
Figure 42 : Evolution du calcium des eaux des sources dans le massif dunaire de Bouteldja	65
Figure 43 : Diagramme de Stiff	66
Figure 44 : Evolution du magnésium des eaux des sources dans le massif dunaire de Bouteldja	67
Figure 45 : Evolution du sodium des eaux des sources dans le massif dunaire de Bouteldja	68
Figure 46 : Evolution du chlorure des eaux des sources dans le massif dunaire de Bouteldja	69
Figure 47 : Evolution du sulfate des eaux des sources dans le massif dunaire de Bouteldja	69
Figure 48 : Evolution du bicarbonate des eaux des sources dans le massif dunaire de Bouteldja	70
Figure 49 : Evolution des nitrates des eaux des sources dans le massif dunaire de Bouteldja	71
Figure 50 : Représentation graphique des indices d'altération des sources d'eau dans le massif dunaire de Bouteldja	75
Figure 51 : Etablissement de la carte d'altération des eaux des sources dans le massif dunaire de Bouteldja.....	76
Figure 52 : Etablissement de la carte des périmètres de protection des forages dans le massif dunaire de Bouteldja	80

LISTE DES TABLEAUX

Tableau n°1 : Peuplements forestiers dans la wilaya d'El Tarf (D'après le plan d'aménagement de la wilaya d'El Tarf,2001).....	6
Tableau n°2 : Les stations et leur période d'observation.....	17
Tableau n°3 : Les coordonnées géographiques	17
Tableau n°4 : Températures moyennes mensuelles en °C (1979/06)	18
Tableau n°5 : Températures moyennes annuelles en °C (1979/06).....	18
Tableau n°6 : Moyennes mensuelles et moyenne annuelle de l'humidité relative de l'aire à la station des Salines en % (1975/2005)	19
Tableau n°7 : Moyennes mensuelles et moyenne annuelle de la vitesse des vents à la station des Salines en m/s (1975/2005)	19
Tableau n°8 : Précipitations moyennes mensuelles en mm (1979/2006)	20
Tableau n°9 : Précipitations moyennes annuelles en mm (1979/2006)	20
Tableau n°10 : Indice d'aridité annuelle (D'après la formule DE.MARTONNE).....	22
Tableau n°11 : Coefficient pluviométrique des stations des Salines et de Ben M'hidi (1979/2006)	23
Tableau n°12 : Estimation de la moyenne \bar{P} et de l'écart type σ_P pour les deux stations	23
Tableau n°13 : Découpage de l'échantillon pour les valeurs correspondant aux fréquences à la station des Salines	25
Tableau n°14 : Découpage de l'échantillon pour les valeurs correspondant aux fréquences à la station de Ben M'hidi	28
Tableau n°15 : Estimation de la période de retour pour les deux stations de mesure en fonction de fréquence F	29
Tableau n°16 : Bilan hydrique selon la méthode de C.W.Thornthwaite pour la station des Salines (1976 - 2006)	32
Tableau n°17 : Bilan hydrique selon la méthode de C.W.Thornthwaite pour la station de Ben M'hidi (1976 - 2006).....	32
Tableau n°18 : Données des débits des sources dans le massif dunaire de Bouteldja (06/07).....	45
Tableau n°19 : Essai par paliers de débits au forage 565	57

Tableau n°20 : Formule ionique et faciès chimique des eaux des sources réparties dans le massif dunaire de Bouteldja (année 2007)	65
Tableau n°21 : Classification des concentrations des éléments chimiques par classes (D'après l'OMS).....	73
Tableau n°22 : Concentrations des éléments chimiques des sources eaux dans le massif dunaire de Bouteldja (2006/07).....	74
Tableau n°23 : Calcul de l'indice d'altération et la classification des points d'eau par classes d'altération	75

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 ".

Aujourd'hui, la qualité de l'eau et de l'environnement nous concerne tous. La qualité de l'eau est donc prioritairement une exigence de santé.

Gageons qu'il sera respectueux de l'eau et de l'environnement pour 6 milliards d'enfants, de femmes et d'hommes de notre humanité, aussi et surtout pour les générations futures.

L'eau est une substance remarquable. Bien qu'elle soit un composé simple. Elle est à la fois la source et le moteur de la vie. Sans eau, l'humanité toute entière - en vérité, toutes les formes de vie sur terre - périraient.

Issues de nappes d'eaux souterraines non polluées, profondes ou protégées des rejets dus aux activités humaines, les eaux dites de source sont des eaux naturellement propres à la consommation humaine.

Ces eaux de source sont en général consommées au niveau régional car leur transport en augmenterait trop le coût. C'est la raison pour laquelle, il est nécessaire de les prendre soin d'autant plus que le troisième millénaire sera purté en pollutions.

En Algérie, la forte croissance de population a entraîné une surexploitation par pompages effectués dans les nappes d'eau profonde et qui fait une diminution des stocks d'eau dans les nappes d'eau souterraines et influe sur le débit des eaux des sources.

Le massif dunaire de Bouteldja est considéré, avec la nappe profonde de la plaine de Annaba comme l'un des deux principaux aquifères de la région.

Il a retenu l'attention particulière des gestionnaires en vertu de l'intérêt qu'il constitue du point de vue ressource en eau pour les différents besoins sans cesse croissant et en absence des ressources en eaux superficielles mobilisables dans la région.

En effet, la nappe du massif dunaire de Bouteldja est actuellement fortement sollicitée, ce qui l'expose de jour en jour à la pollution qui est souvent constatée après ses méfaits.

Dans ce contexte, on a essayé d'étudier la qualité des eaux naturelles dans le massif dunaire de Bouteldja dans l'extrême Nord Est Algérien dont le thème est " l'étude de la qualité des eaux des sources issues de la nappe dunaire côtière de Bouteldja (Algérie Extrême Nord Oriental) ".

Dans le cadre de notre mémoire, on tente de mettre en point cette qualité et faire un périmètre afin de protéger les eaux de source de la pollution anthropique.

Pour mieux comprendre l'évolution de l'écoulement des sources, sa relation avec les précipitations et surtout son degré de pollution, il est préconisé de traiter le travail en le subdivisant en cinq chapitres:

- ♦ *Chapitre I* : il porte sur l'étude des caractères physiques externes et internes de notre zone d'étude, servant d'introduction à notre étude et qui se résume dans ces conditions géographiques, morphométriques et géologiques.
- ♦ *Chapitre II* : avec une interprétation climatique, consacrée à l'étude fréquentielle des bilans hydriques annuels, qui définit le comportement hydrogéologique des dunes par rapport aux contraintes climatiques.
- ♦ *Chapitre III* : une étude hydrogéologique, où on va essayer de déterminer les caractéristiques hydrogéologiques des dunes ainsi que la relation pluie/débit en se basant sur des données hydro pluviométriques permettant de mettre en évidence les principaux aspects de l'écoulement, et les quantifications des ressources en eaux.
- ♦ *Chapitre VI* : en s'intéressant à faire une étude hydrochimique, qui est consacrée au traitement des données hydrochimiques des sources et donc avoir une idée sur les faciès chimiques dominants dans le massif dunaire de Bouteldja.
- ♦ *Chapitre V* : enfin, on termine notre travail par une étude bien détaillée sur la qualité des eaux des sources afin de bien avoir un aperçu sur la vulnérabilité des sources à la pollution naturelle en présence d'une activité agricole acceptable et loin de l'activité industrielle, avec une influence progressive de l'eau salée et la détermination d'un périmètre de protection pour ces eaux souterraines.

Chapitre I

**” Cadre physique
et aperçu géologique ”**

I. Localisation géographique:

Situé à l'extrême Nord – Est Algérien, le massif dunaire de Bouteldja appartient au système aquifère Annaba – Bouteldja inclus dans l'hydro système du bassin versant de la Mafragh (fig.1). D'une superficie d'environ 160 Km², le massif dunaire de Bouteldja est

limité:

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

II. Caractéristique géomorphologique:

La géomorphologie de la région d'étude (fig.2) est caractérisée par un Quaternaire dominant la partie avale Nord – Est et Nord – Ouest.

Le massif dunaire est un cordon dunaire qui est 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).

On a les différentes unités géomorphologiques qui constituent notre région d'étude sont:

① Le complexe alluvial de la vallée de l'oued El Kébir Est, qui est caractérisé par une série de terrasses à faciès hétérogènes (de sables, graviers, limons et surtout d'argiles).

② Les marécages et les lacs où 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 comblés surtout au niveau des dépressions internes par les transports solides des différents oueds. Les marécages de Mekada Mohacène et lac des oiseaux (fig.2), développés dans la basse vallée d'El Kébir Est, ils forment un delta commun aux principaux oueds drainant la région.

③ Les oueds où on a principalement Bounamoussa à l'Ouest et El Kébir Est à l'Est (fig.2), deux grands cours d'eau rejoignent la mer à l'embouchure sous le nom de la Mafragh (exutoire unique).

④ Les montagnes, comme on a les montagnes de la Cheffia qui surplombent la partie avale du bassin formant une barrière Est – Ouest. Leurs altitudes avoisinent les 450 m, avec la présence des 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 (frontière Algéro - Tunisienne).

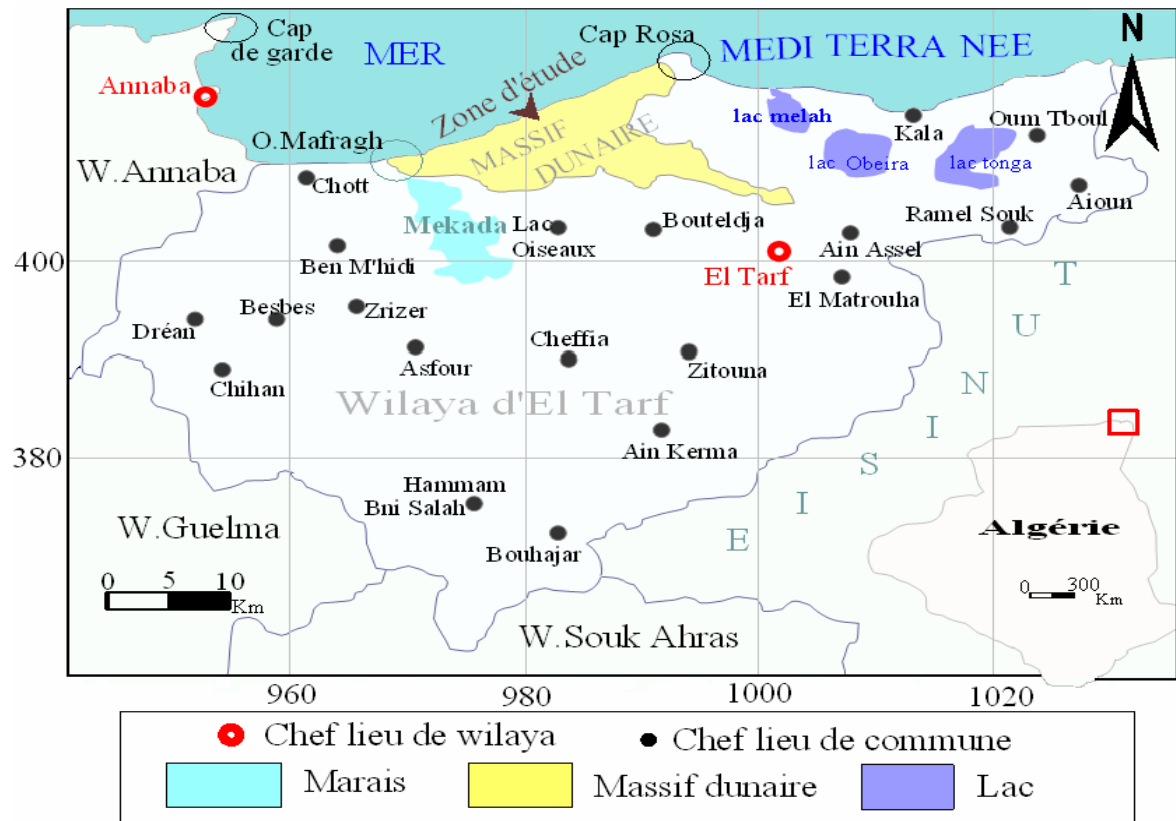


fig. 1 : Situation géographique du massif dunaire de Bouteldja

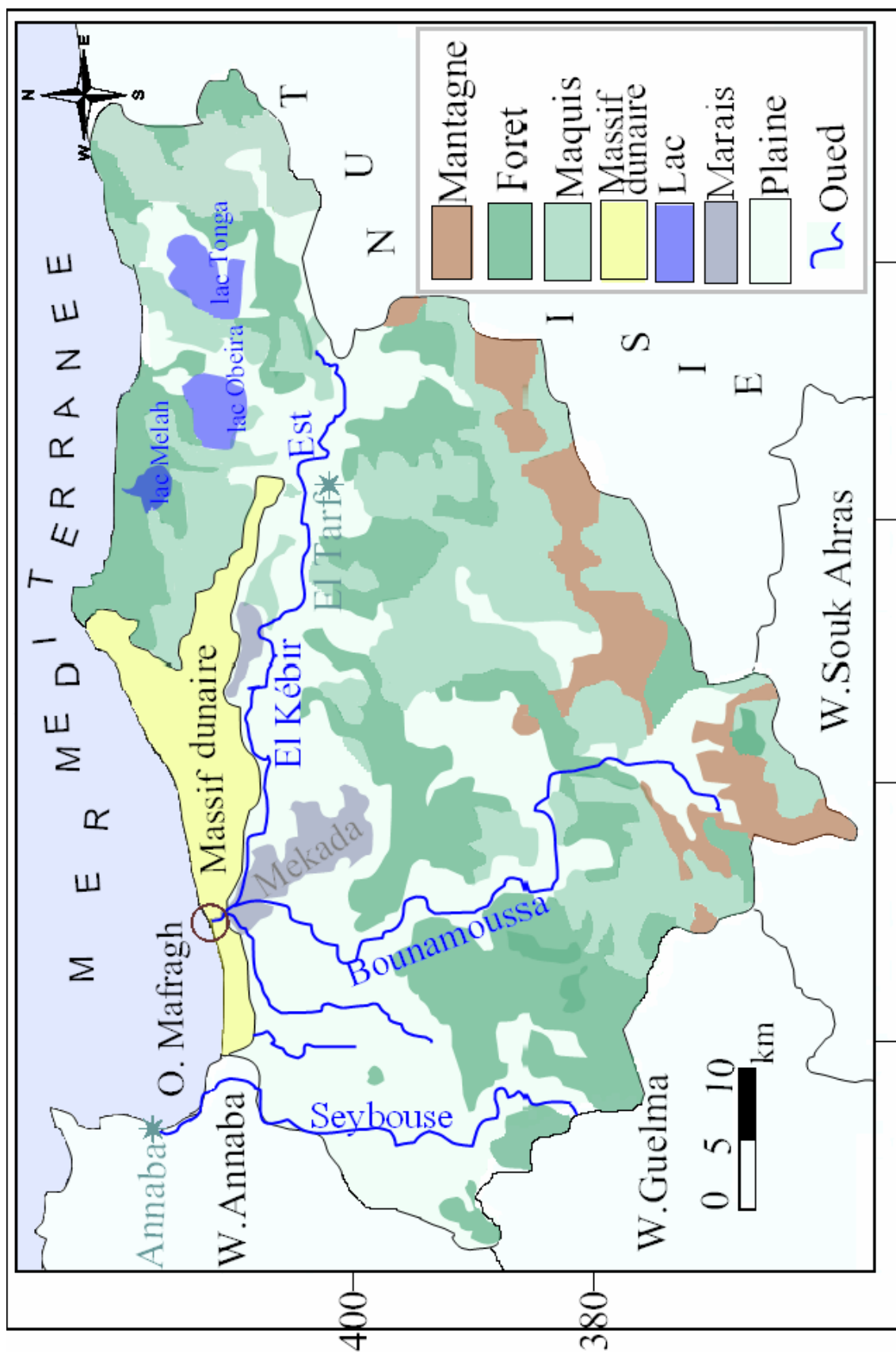


fig.2.6 Carte des unités morphologiques dans la wilaya d'El Oued

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

⑤ *Les collines* qui sont développées à la limite des plaines, au niveau des terrasses déprimées. 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 Numidiens qui forment une limite étanche à la formation sous jacente (Mouchara, 2004)

. III. Le couvert végétal :

La couverture végétale (fig.3) est représentée par une dominance des peuplements forestiers qui occupent une superficie de l'ordre de 167777 ha avec un pourcentage de 60 % de la superficie de la wilaya d'El Tarf (D'après le plan d'aménagement de la wilaya d'El Tarf, 2001). Cette étendue de végétation abrite des espèces floristiques où on compte entre 600 et 700 espèces. On a 63 % de ce patrimoine est représenté par divers peuplements, alors que 37% seulement sont constitués de maquis qui couvre les bas fond inter dunaire et à la surface des dunes au Nord - Ouest de la région (Sedrati, 2006).

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

Espèces	Superficie en (ha)	Participation en (%)
Maquis	62173	37.06
Chênes liège	59563	35.5
Pin maritime	18542	11.05
Eucalyptus	13047	7.78
Chênes zeen	6492	3.86
Clairière	4078	2.44
Peuplier	1278	0.76
Oléastre	1024	0.61
Autre espèces	850	0.51
Aulne	730	0.43
Total	167777	100 %

Tableau n°1 : Peuplements forestiers dans la wilaya d'El Tarf. (D'après le plan d'aménagement de la wilaya d'El Tarf, 2001).

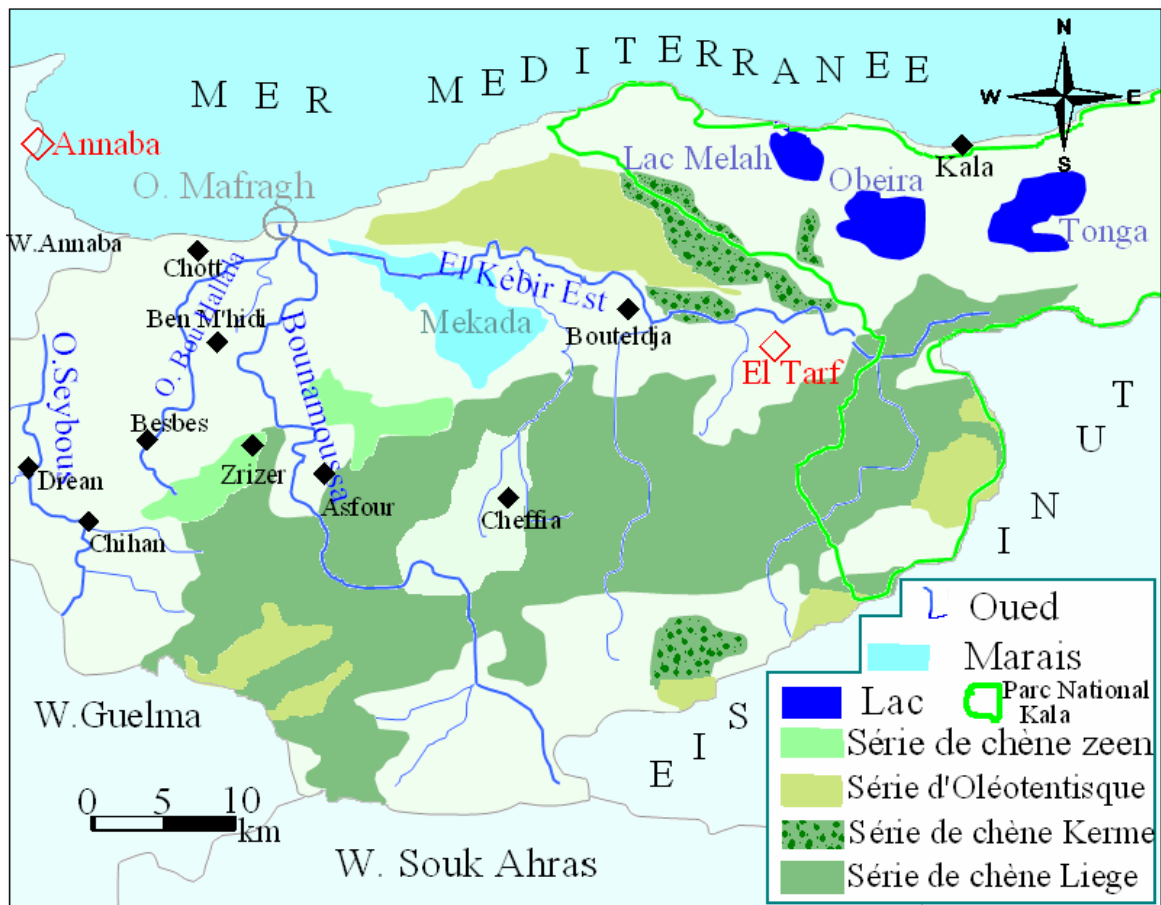


fig. 3: Carte du couvert végétal dans la wilaya d'El Tarf (D'après le plan d'aménagement de la wilaya d'El Tarf, 2001)

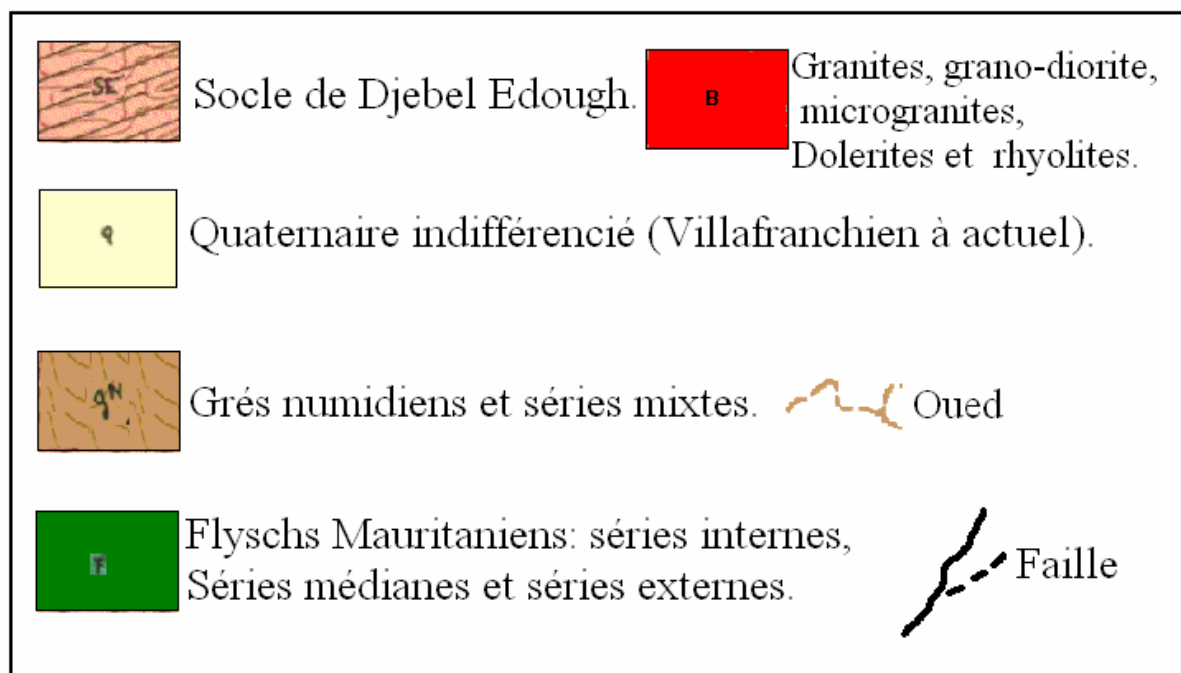
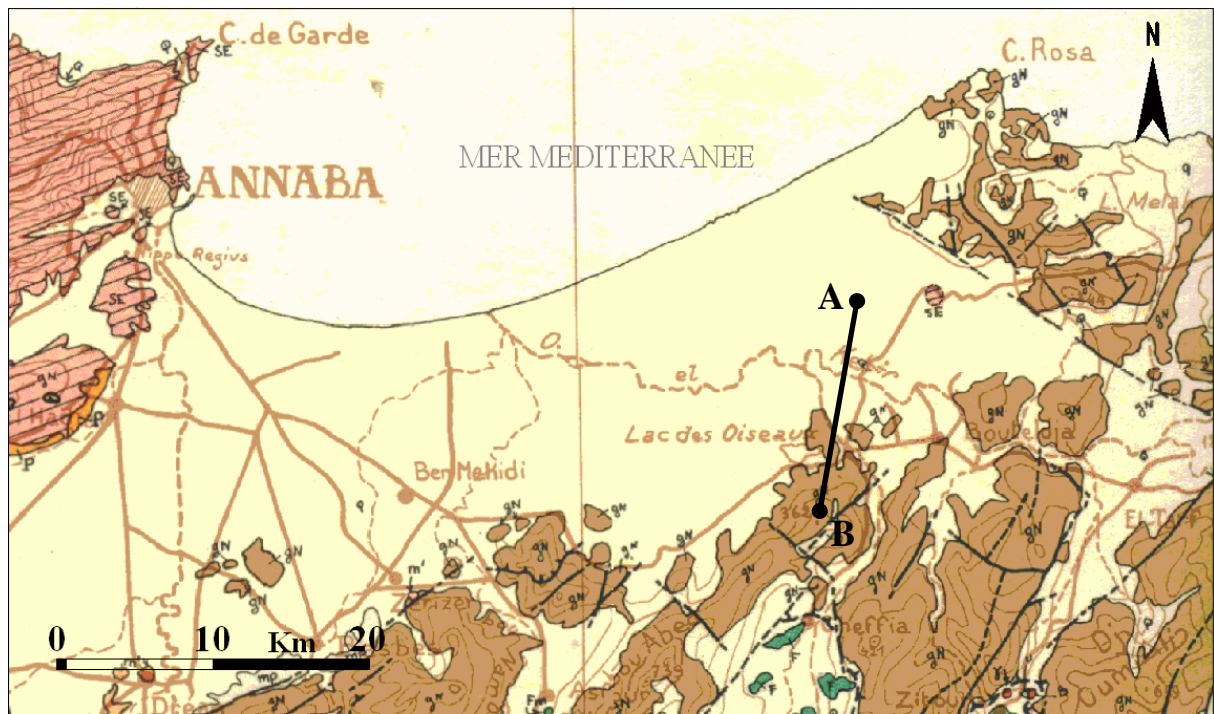


fig.4 : Extrait de la carte géologique de l'extrême Nord-Est Algérien (D'après J.M.VILA, 1978)

IV. Aperçu géologique:

Les travaux sur la géologie de la région (L.Jouleaud, 1936; Hilly, 1962; Flandrin, 1955; J M.Vila, 1978) ont mis en évidence la structure profonde des formations géologiques et leur lithostratigraphie. La région d'étude 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. 4).

La présence des grés numidiens forme l'ensemble des massifs.

IV.1. Stratigraphie:

Le chrono stratigraphie de la zone d'étude relève des terrains géologiques d'ages différents allant du Secondaire au Quaternaire récent.

IV.1.1. Le Secondaire:

IV.1.1.1. Crétacé supérieur (Sénonien):

Il affleure en plusieurs endroits dans les monts de la Cheffia. Cet étage rencontré par un sondage de reconnaissance dans la région de Cap Rosa, il comprend de bas en haut: des schistes plus ou moins argileux de couleur bleu ardoise avec des passées calcaires ou de micro- brèches inter stratifiés à microfaune déterminant un age sénonien supérieur. il s'agit de l'Ultra tellien.

IV.1.2. Tertiaire:

Il est représenté par des argiles numidiennes 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) l'épaisseur de ces formations varie de la dizaine à la centaine de mètre. Sur ces argiles se superposent des grés numidiens.

IV.1.2.1. Oligocène moyen à supérieur:

Ce sont des argiles varia colores dites sous numidienne d'age Oligocène moyen à supérieur (Lahondere, 1987). Argiles verts et rouges à tubotomaculum constituant la base de la série gréseuse.

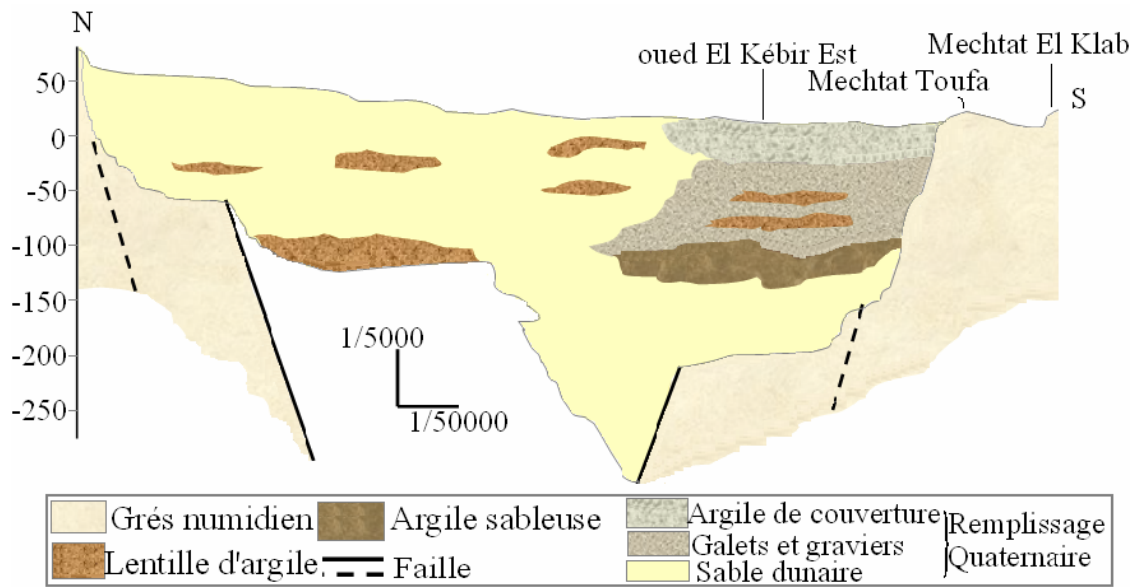


fig.6 : Coupe géologique schématique dans le massif dunaire de Bouteldja "D'après les données de forage" (coupe AB)

IV.1.2.2. Série gréseuse:

Série essentiellement gréseuse de type flysch, en gros bancs parfois dicométriques, bien réglée à grains hétérométriques de couleurs rougeâtre ou jaunâtre. Ces grés constituent les monts de la Cheffia et Bouteldja, donnant lieu à d'important réservoir d'eau alimentant la nappe. L'âge de la série gréseuse est Aquitanien (H. Rouvien) au dessus des grés, on a des argiles, des marnes et des silexes d'âge Burdigalien (fig. 5).

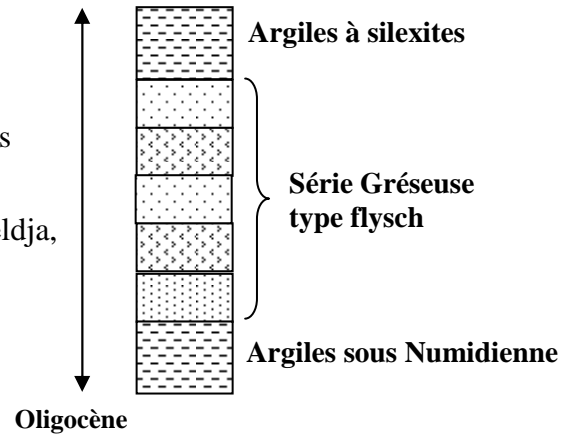


Fig. 5 : Log stratigraphique

IV.1.3. Quaternaire:

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

IV.1.3.1. Les éboulis de pente:

Qui est le résultat de l'érosion et l'altération de la série gréseuse. Ce sont des éboulis à blocs de grés numidiens surtout de quelques centimètres à quelques dizaines de centimètres.

IV.1.3.2. Les terrasses:

IV.1.3.2.1. Basse terrasse d'Oued El Kébir Est:

La pente de la terrasse d'oued El Kébir Est est très faible d'où la naissance des marécages qui sont répondus presque sur toute la plaine.

IV.1.3.2.2. Moyenne terrasse de El Kébir Est:

La moyenne terrasse d'El Kébir Est reflète une liaison avec la basse terrasse et le bassin versant. Elle est drainée par la basse terrasse.

IV.1.3.2.3. Haute terrasse d'El Kébir Est:

Elle est discontinue avec une série de faible puissance totalement drainée par le bassin versant sur les pentes.

IV.2. Géologie des dunes: (fig. 6).

Les dépôts du matelas dunaire résultent de l'érosion des paléo reliefs argilo - gréseux et gneissiques qui ont été ravinés par les cours d'eau conduisant une grande quantité de matériels détritiques vers la mer, dont la composition est très variée (éboulis argileux, sable gros homogène à lentilles argileuses).

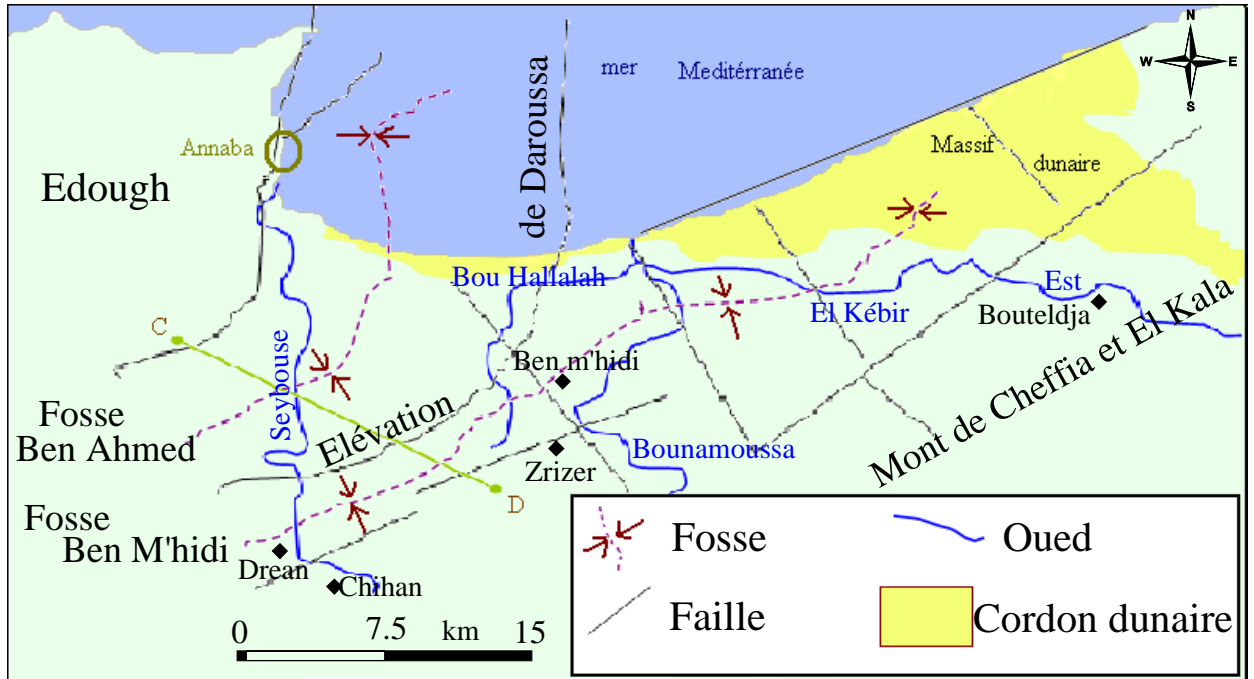


fig. 7 : Carte schématique tectonique (D'après SONATRACH modifiée).

IV.3. Le sable dunaire et la malasse bordière:

Le sable, roche détritique, provient de la dé lapidification des grés numidiens. Il est blanc ou jaune claire, fin meuble et renfermant une proportion plus ou moins forte d'argile fine. Il se trouve près des sources d'oued Boulathan, vers l'Est du massif le sable devient très argileux indiquant l'approche de la chaîne numidienne.

IV.4. Paléogéographie:

L'histoire géologique du massif dunaire qui parait extrêmement simple peut avoir subit au cours du quaternaire des modifications assez complexes surtout en ce qui concerne la formation des dunes de sables qui semble être s'effectuer en deux cycles de régression et transgression marines (Boudoukha, 1990).

IV.4.1. Le premier cycle (régression):

A donné des dunes anciennes qui ont été lapidifiées en bordure de la mer. C'est dans cette formation que les paléotalwegs se creusaient en conservant jusqu'à l'actuel leur allure qu'ils avaient avant la mise en place des sables.

IV.4.2. Le second cycle (transgression):

Moins remarquable, qui a donné la formation des dunes récentes et actuelles suivi par une phase d'érosion aboutissant aux éboulis récents provenant des massifs numidiens. Par la suite, des dunes ont été fixées par une végétation dense jusqu'à ce qu'elles deviennent inactives.

IV.5. 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 horst 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. 7).

- la coupe géologique et tectonique (fig. 8) minimise fortement le rôle des accidents dans les formations quaternaires or la forte épaisseur du "sable éolien" du massif dunaire de Bouteldja est le passage latéral très rapide entre les faciès argilo sablo graveleux alluviaux (nappe profonde des graviers) au niveau d'oued El Kébir Est pourrait s'expliquer par un contact faillé, qui d'ailleurs dans le substratum Numidien l'accumulation des sédiments du massif dominé s'est probablement faite dans une zone subsidence Sud – Est et Nord - Ouest, limitée par des failles actives lord de la mise en place de ces dépôts.

IV.6. Cadre structurale:

Les études de la Sonatrach (fig. 7) 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 grés Numidien, le substratum numidien se retrouve à plus de 900 mètres au cœur de la fossé de Ben M'hidi (fig. 8).

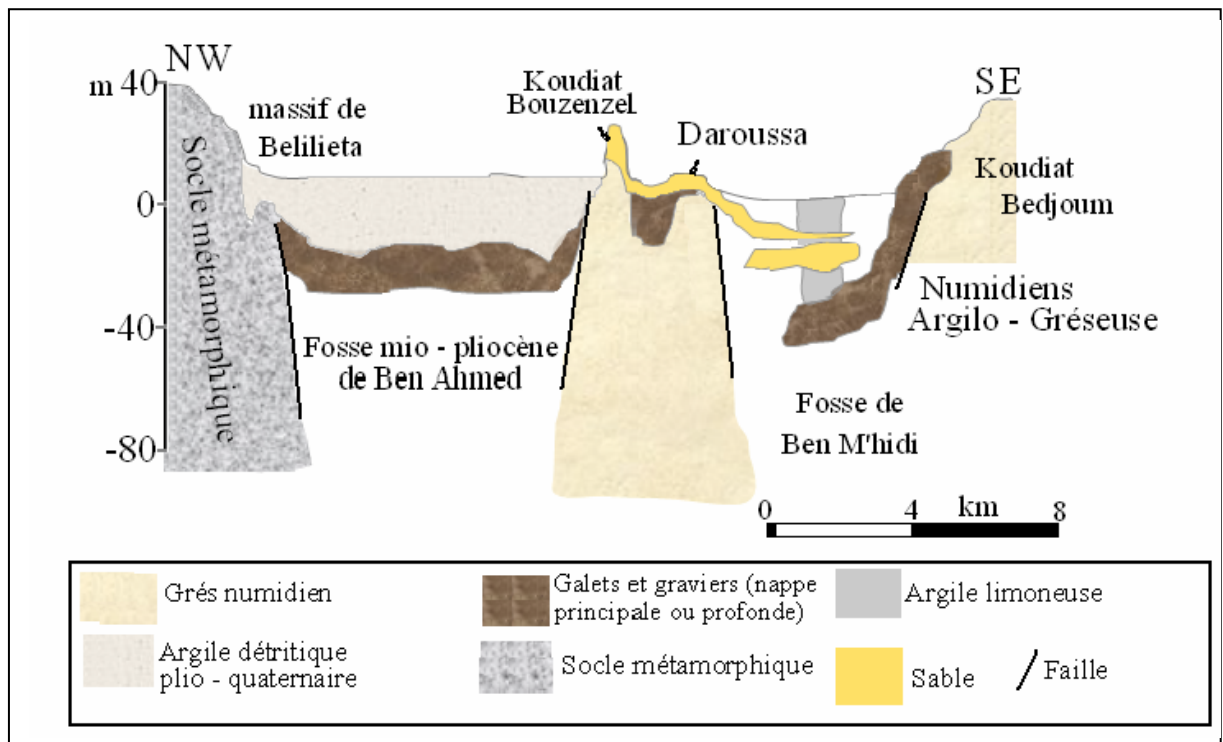


Fig.8: Coupe schématique géologique et tectonique dans l'extrême Nord Est Algérien (coupe CD)

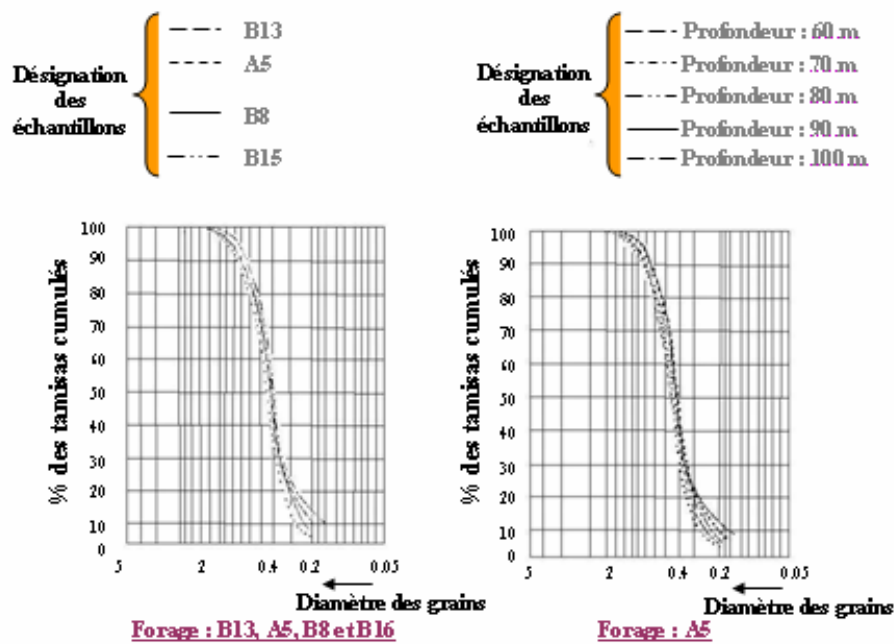


Fig 9 : Analyses granulométriques au niveau des forages dans le massif dunaire de Bouteldja

IV.7. Caractères physico- chimiques des sables dunaires: (fig. 9)

La délapidification progressive des grés numidiens et des roches métamorphiques a donc donné des sables qui à l'état pur renferment 80 à 90 % de silice. Leur couleur est jaune clair et leur texture fine, leur attribue le caractère de formation meuble coulant entre les doigts. Le plus souvent ces sables sont mêlés à des impuretés, (CaO, MgO, Fe₂O₃) ou accompagnés de minéraux (CaCO₃, MgO, Quartz, Tourmaline, Magnétite, Grenat, Zircon). Suivant la teneur en fer oxydé, ces sables prennent une coloration rouge, brune ou jaune. Quand le sable se charge en ciment de CaCO₃ il y a formation de grés dunaires et calcarenite.

Les analyses granulométriques (fig. 9) 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).

IV.8. Conclusion :

D'après la présentation géologique, tectonique et structurale de notre région d'étude, il ressort 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.

✦ Les formations aquifères du système alluvionnaire de la vallée d'El Kébir Est et des sables dunaires sont les meilleurs réservoirs.

I. Les caractéristiques climatiques:

I.1.Introduction:

L'établissement d'un bilan hydrique nécessaire pour comprendre le fonctionnement d'un système hydraulique de surface, implique la connaissance des paramètres suivants: les précipitations, l'évaporation, l'infiltration et le ruissellement qui conditionnent le bilan. Les études disponibles ont permis le calcul du bilan. Au préalable, quelques informations concernant les caractéristiques climatiques de la région ont été déterminées.

II. Station de mesure:

L'étude est basée essentiellement sur les données des stations des Salines et de Ben M'hidi. Le tableau (2) nous renseigne sur les périodes d'observation:

Stations	Périodes d'observation
Les Salines	1979/80 – 2005/06
Ben M'hidi	1979/80 - 2005/06

Tableau n°2 : Les stations et leur période d'observation.

Les coordonnées géographiques des stations de mesure sont représentées dans le tableau (3):

Coordonnées	X (Km)	Y (Km)	Z (m)
Les Salines	955.80	403.80	03
Ben M'hidi	961.62	397.30	07

Tableau n°3 : Les coordonnées géographiques.

III. Facteurs climatiques :

III.1. Températures: (T)

Les températures sont le deuxième facteur important dans l'étude climatique car agissant directement sur le phénomène d'évapotranspiration et donc le déficit d'écoulement annuel et saisonnier.

Les températures utilisées se rapportent aux stations des Salines et de Ben M'hidi (27ans d'observation).

III.1.1. Températures moyennes mensuelles: (TMM)

Les températures moyennes mensuelles mesurées dans les deux stations sur une période de 27 ans sont reportées dans le tableau (4) :

Mois Stations	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A
	Salines	23.03	20.01	15.61	13.11	11.53	11.65	13.25	15.13	18.25	21.90	25.00
BenM'hidi	23.30	19.70	15.39	12.31	10.74	11.19	13.15	14.98	18.32	21.89	24.48	25.66

Tableau n°4 : Températures moyennes mensuelles en °C (1979/06).

L'histogramme des températures moyennes mensuelles montre une différence assez proche entre les températures des deux stations (fig. 10.B).

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 Ben M'hidi).

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 Ben M'hidi).

III.1.2. Températures moyennes annuelles: (TMA)

Les températures moyennes annuelles pour les deux stations de mesure sur une période de 27 ans d'observation sont reportées dans le tableau ci – dessous:

Année	Les Salines	Ben M'hidi	Année	Les Salines	Ben M'hidi	Année	Les Salines	Ben M'hidi
79/80	16.80	16.23	89/90	18.64	18.14	98/99	17.94	17.66
80/81	17.68	16.66	90/91	17.70	17.33	99/00	18.27	17.76
81/82	18.69	17.92	91/92	17.16	17.28	00/01	17.96	18.15
82/83	17.06	17.47	92/93	17.83	17.94	01/02	17.71	17.57
83/84	17.54	17.07	93/94	18.24	17.82	02/03	18.54	18.59
84/85	17.67	17.23	94/95	18.80	18.02	03/04	17.68	17.71
85/86	17.83	16.73	95/96	18.59	17.68	04/05	17.38	18.21
86/87	17.97	17.39	96/97	18.15	17.45	05/06	17.75	18.35
87/88	18.87	18.47	97/98	18.02	17.34	moyen	17.85	17.59
88/89	17.57	16.77						

Tableau n°5 : Températures moyennes annuelles en °C (1979/06).

III.2. 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.

Le tableau (6) présente les valeurs de l'humidité relative de l'aire en %:

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	Humidité moyenne annuelle
Humidité moyenne mensuelle en %	72.32	74.58	76.52	77.15	78.43	74.28	75.48	74.60	74.97	72.92	70.07	71.39	74.47 %

Tableau n°6 : Moyennes mensuelles et moyenne annuelle de l'humidité relative de l'aire à la station des Salines en % (1975/2005)

III.3. La vitesse des vents: (Station des Salines)

Le vent est un paramètre climatique qui nous permet de déterminer les régimes pluvieux, l'évapotranspiration et donc du climat d'une région quelconque.

Les résultats des calculs de la vitesse des vents sont récapitulés dans le tableau ci-dessous:

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	Vitesse moyenne annuelle
Vitesse moyenne mensuelle en m/s	3.01	2.84	3.07	3.40	3.30	3.28	3.25	3.20	2.98	3.04	3.17	3.10	3.1 m/s

Tableau n°7 : Moyennes mensuelles et moyenne annuelle de la vitesse des vents à la station des Salines en m/s (1975/2005).

Le Nord –Est Algérien est dominé par des vents de direction Nord à Nord – Est, Sud – Ouest à Nord. La vitesse des vents est violente en hiver alors qu'en été devient plus faible, avec quelques épisodes de Sirocco augmentant la température.

III.4. Précipitations: (P)

Le terme précipitation désigne tout type d'eau qui tombe du ciel, sous forme liquide ou solide. Cela inclut la pluie, la neige, la grêle, etc. La précipitation est un facteur très important, qui conditionne l'écoulement saisonnier et influence directement sur le régime des cours d'eaux et l'alimentation des nappes aquifères.

Notre région d'étude est classée parmi les régions les plus pluvieuses dans notre pays l'Algérie et pour l'interprétation des données pluviométriques, nous avons utilisé des séries de précipitation allant de 1979 jusqu'aux 2006 soit 27 ans d'observation.

III.4.1. Précipitations moyennes mensuelles: (PMM)

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 (1979 - 2006) sont illustrées dans le tableau ci-dessous :

Mois Stations												
	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A
Salines	36.30	70.01	89.04	122.63	103.44	79.15	60.86	57.77	37.06	12.95	2.19	10.07
BenM'hidi	35.27	53.34	88.71	105.70	106.51	79.08	55.88	55.39	34.30	7.96	2.09	7.71

Tableau n°8 : Précipitations moyennes mensuelles en mm (1979/2006).

L'histogramme des précipitations moyennes mensuelles (fig.10.A) réalisé pour les stations des Salines et de Ben M'hidi montre un accroissement des précipitations allant du mois de septembre jusqu'au mois de janvier, au delà débute la baisse des précipitations qui se poursuit jusqu'au mois d'août.

Le maximum des pluies tombe aux mois de décembre aux Salines avec 122.63 mm et aux mois de janvier avec 106.51 mm à Ben M'hidi, et le minimum tombe au mois de juillet avec 2.19 aux Salines et 2.09 mm à la station de Ben M'hidi.

III.4.2. Précipitations moyennes annuelles: (PMA)

Les hauteurs des pluies moyennes annuelles enregistrées par les deux stations pour 27 ans d'observations sont comme suite:

Année	Les Salines	Ben M'hidi	Année	Les Salines	Ben M'hidi	Année	Les Salines	Ben M'hidi
79/80	609.20	542.17	89/90	535.00	540.55	98/99	841.00	751.80
80/81	633.00	614.97	90/91	689.30	689.30	99/00	559.60	435.20
81/82	760.00	761.77	91/92	684.60	684.60	00/01	550.70	514.00
82/83	678.10	523.52	92/93	644.10	720.50	01/02	460.30	408.10
83/84	937.80	897.76	93/94	519.70	550.90	02/03	842.10	783.00
84/85	927.00	908.67	94/95	548.30	594.70	03/04	708.00	531.80
85/86	543.00	498.24	95/96	807.00	656.70	04/05	987.70	875.46
86/87	909.30	905.35	96/97	422.80	322.20	05/06	612.50	573.80
87/88	491.00	411.43	97/98	941.00	809.60	moyen	681.47	631.95
88/89	557.00	556.56						

Tableau n°9 : Précipitations moyennes annuelles en mm (1979/2006).

Fig. 10.A: Histogramme des précipitations moyennes mensuelles aux stations des Salines et de Ben M'hidi (1979/06).

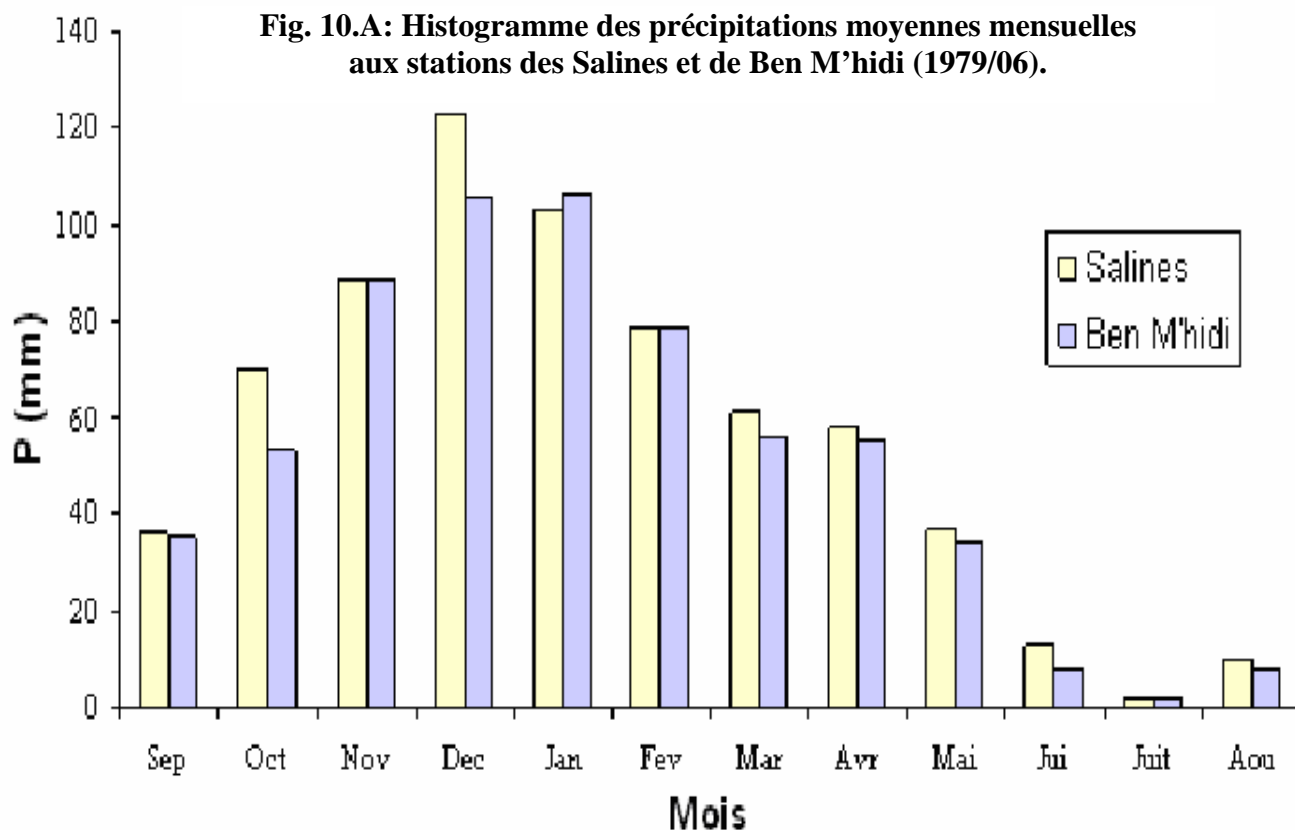
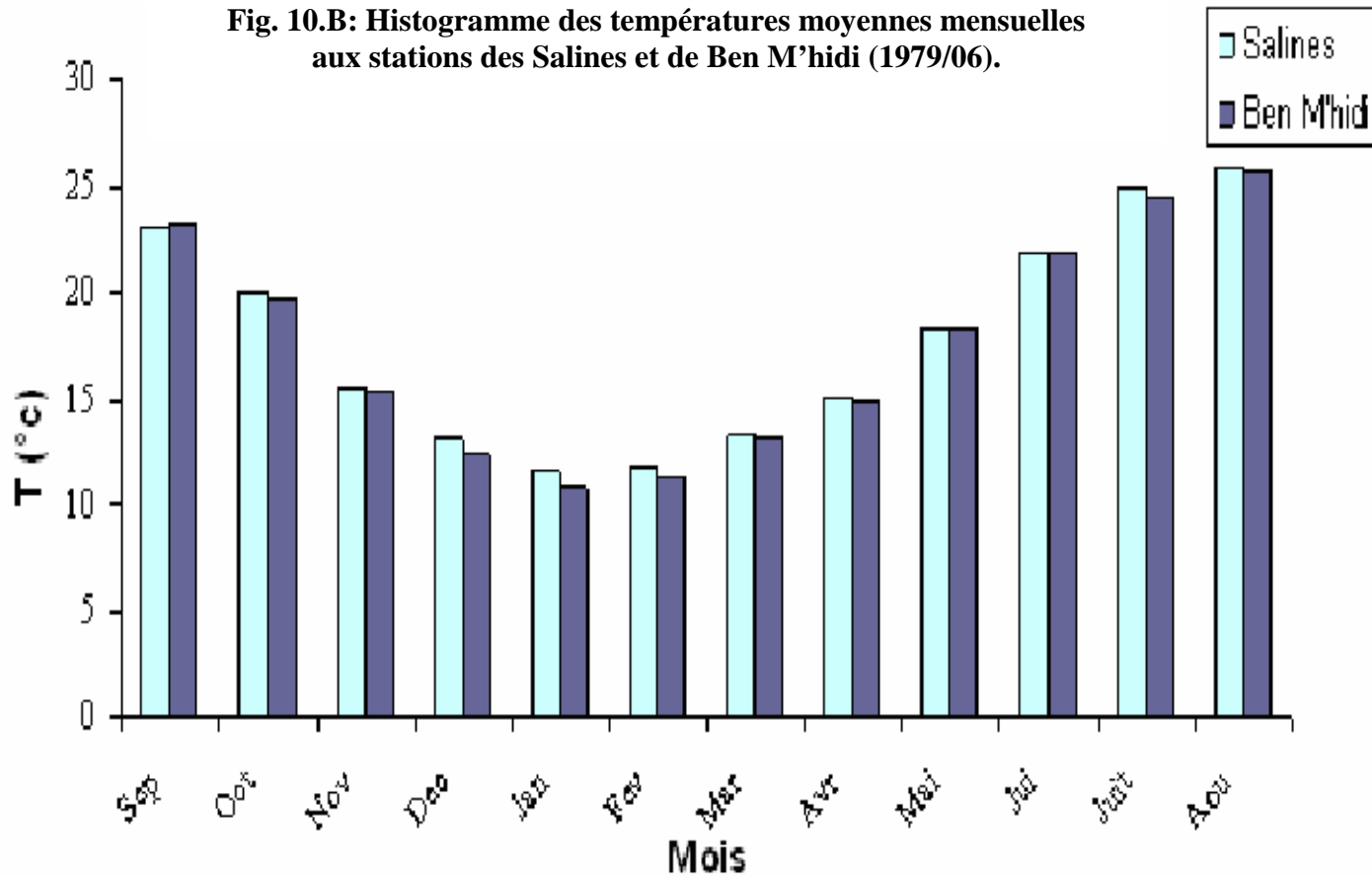


Fig. 10.B: Histogramme des températures moyennes mensuelles aux stations des Salines et de Ben M'hidi (1979/06).



III.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:

$$A = P / (T + 10) \quad (1)$$

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:

Stations	A
Les Salines	24.47
Ben M'hidi	22.90

Tableau n°10 : Indice d'aridité annuelle (D'après la formule DE.MARTONNE).

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.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;

$$H = P / \bar{P} \quad (2)$$

Avec:

H : coefficient pluviométrique;

P : pluviométrie d'une année en mm;

\bar{P} : pluviométrie moyenne en mm.

Le tableau qui vient après montre les variations de H au cours des années d'observation :

Année	H Les Salines	H Ben M'hidi	Année	H Les Salines	H Ben M'hidi	Année	H Les Salines	H Ben M'hidi
79/80	0.89	0.85	89/90	0.78	0.85	98/99	1.23	1.19
80/81	0.93	0.97	90/91	1.01	1.09	99/00	0.82	0.69
81/82	1.11	1.20	91/92	1.00	1.08	00/01	0.80	0.81
82/83	0.99	0.83	92/93	0.94	1.14	01/02	0.67	0.64
83/84	1.37	1.42	93/94	0.76	0.87	02/03	1.23	1.24
84/85	1.36	1.43	94/95	0.80	0.94	03/04	1.04	0.84
85/86	0.79	0.79	95/96	1.18	1.03	04/05	1.45	1.38
86/87	1.33	1.43	96/97	0.62	0.51	05/06	0.89	0.91
87/88	0.72	0.65	97/98	1.38	1.28	P moy	681.47	631.95
88/89	0.82	0.88						

Tableau n°11 : Coefficient pluviométrique des stations des Salines et de Ben M'hidi (1979/2006).

Les valeurs du coefficient pluviométrique obtenues montrent une alternance entre les années excédentaires et les années déficitaires. Cette évolution est indiquée par la figure 11 et qui met en évidence les différentes années excédentaires et les années déficitaires au niveau des deux stations (les Salines et Ben M'hidi).

IV. Ajustement graphique à la loi normale (Gauss):

IV.1. Etude des précipitations annuelles:

La mise en œuvre de la loi de Gauss correspond intégralement au dispositif commun de lancement et de présentation des résultats. Cette loi est définie sur $[-\infty, +\infty]$ et peut convenir à n'importe quel échantillon.

Il nous paraît seulement bon de préciser quelques points techniques. La fonction de répartition $F(P) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{u^2}{2}} du$ (3) avec $u = \frac{P_i - \bar{P}}{\sigma P}$ (4) dépend de deux paramètres qui sont la moyenne \bar{P} et l'écart-type σP . Ces paramètres (moyenne et écart type) sont évalués selon les estimateurs sans biais suivant :

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n} \quad (5) \quad \sigma P = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}{n}} \quad (6)$$

Le tableau ci - -dessous représente les calculs numériques des deux paramètres, la moyenne et l'écart :

Stations	\bar{P}	σP
Salines	681,47	165,35
Ben M'hidi	631,95	164,32

Tableau n°12 : Estimation de la moyenne \bar{P} et de l'écart type σP pour les deux stations

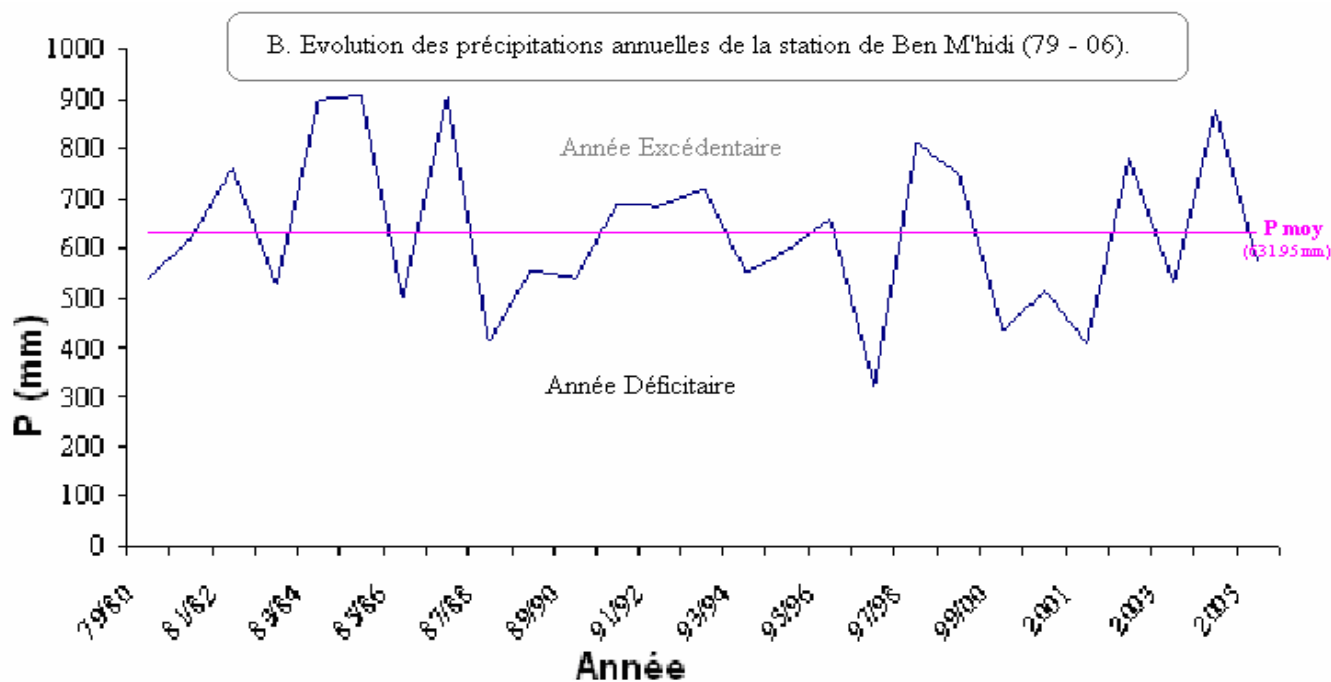
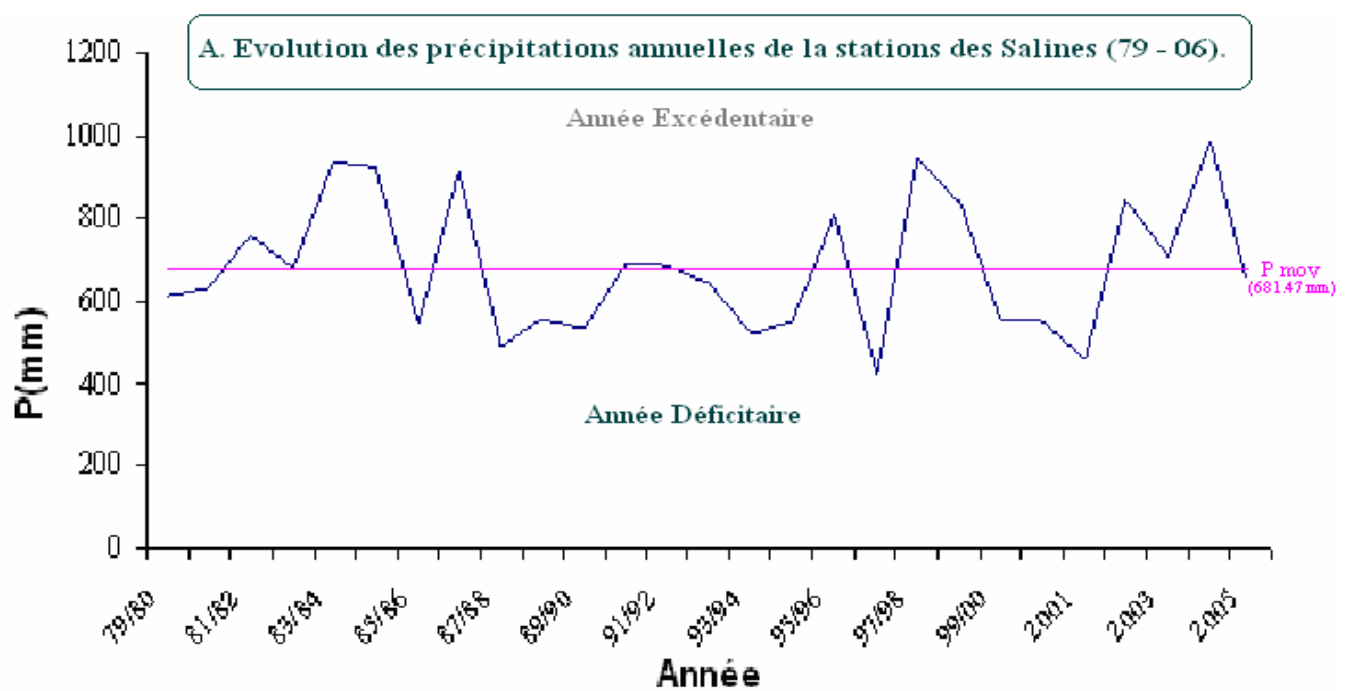


fig. 11 : Evolution des précipitations annuelles des deux stations durant la période d'observation (1979/2006).

On procède à l'arrangement des valeurs annuelles par ordre croissant en attribuant à chacune son rang, puis on calcule les fréquences expérimentales au non – dépassement correspondantes, par la relation suivante (les valeurs de $F(P_i)$ sont représentées dans le tableau voir annexe):

$$F(P_i) = \frac{i - 0,5}{n} \quad \text{Avec } \begin{cases} i: \text{ le rang} \\ n: \text{ la taille de l'échantillon} \end{cases}$$

Sur un papier de Gauss, on reporte en abscisses les fréquences et en ordonnées les valeurs observées des précipitations. Après l'estimation des paramètres d'ajustement \bar{P} et σP , on trace la droite figurative de la loi de Gauss ainsi ajustée (droite dite d'Henry) en choisissant des valeurs prises par la variable réduite de Gauss u :

$$F(P) = 0,50 \Rightarrow u = 0 \Rightarrow (P - \bar{P}) / \sigma P = 0 \Rightarrow P = \bar{P}$$

$$F(P) = 0,50 \Rightarrow P = 681,47 \text{ mm (les Salines)}$$

$$F(P) = 0,50 \Rightarrow P = 631,95 \text{ mm (BenM'hidi)}$$

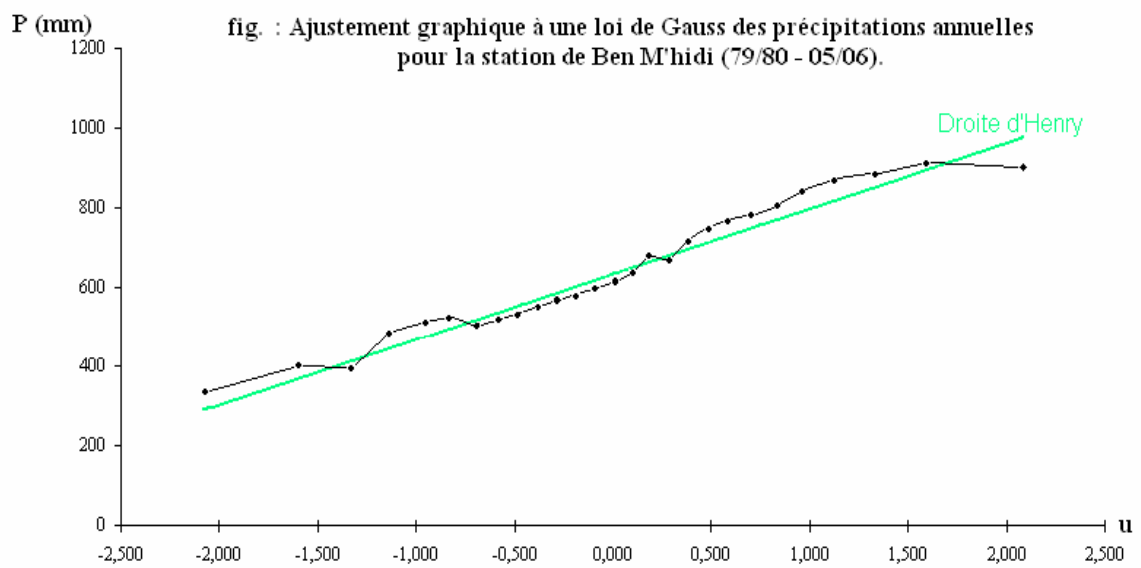
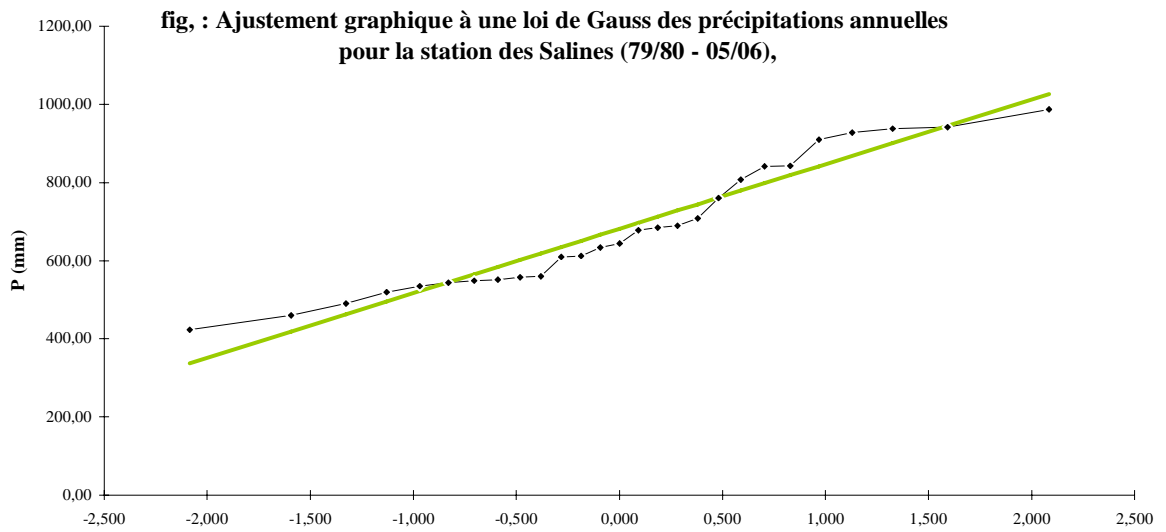
Pour accéder à la vérification graphique de la bonne adéquation de la loi de Gauss, il faut au préalable évaluer les fréquences expérimentales des différentes observations (voir tableau annexe). Les valeurs de l'échantillon sont rangées par ordre croissant et la fréquence expérimentale au non – dépassement sera estimée par la relation $F(P_i)$ décrite précédemment.

L'examen des points sur les deux figures (12 et 13), ne met pas en évidence un carbure net et nous admettons que l'ensemble des points peut être considéré comme aligné, donc ça veut dire que la loi de Gauss est bien adaptée.

Dans une première phase, nous découpons l'échantillon de n éléments en K classes de façon à ce que l'effectif théorique de chaque classe soit d'au moins 5 éléments. Alors, les précipitations annuelles (S^t des Salines), il paraît judicieux de découper les classes pour les valeurs correspondantes aux fréquences : 0,25 – 0,50 et 0,75 soit à 569,99 mm – 681,47 mm et 792,94 mm (voir tab n°13).

Classe	Limites (mm)	Effectif réel n_i	Effectif théorique n_i'
1	$x \leq 569,99$	12	5
2	$569,99 \leq x \leq 681,47$	4	6
3	$681,47 \leq x \leq 792,94$	6	7
4	$x \geq 792,94$	5	9

Tableau n°13 : Découpage de l'échantillon pour les valeurs correspondant aux fréquences à la station des Salines.



D'où l'on tire pour la valeur expérimentale du χ^2 :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^K \frac{(n_i - n'_i)^2}{n_i} = 8,44 \quad (8)$$

Le nombre degré de liberté est dans ce cas :

$$\delta = K - P - 1 \quad (9)$$

Avec :

K : le nombre de classe = 4 ;

P : le nombre de paramètres ajustés = 2.

Donc : $\delta = 4 - 2 - 1 = 1$

Les tables de χ^2 nous montrent que pour $\delta = 1$ et $P = 0,1$, on a un χ^2 qui est de 2,71. Il est donc clair que plus de 10% de chance pour dépasser 8,44 par le fait du hasard, on ne peut donc pas rejeter l'hypothèse selon laquelle l'ajustement est bon donc ce qui ne veut pas dire qu'un ajustement à une autre loi serait forcément mauvais.

Pour les précipitations annuelles à la station de Ben M'hidi, alors on découpe les classes pour les valeurs correspondantes aux fréquences : 0,25 – 0,50 et 0,75 soit à 521,17 mm – 631,95 mm et 742,73 mm (voir tab n°14).

Classe	Limites (mm)	Effectif réel n_i	Effectif théorique n'_i
1	$x \leq 521,17$	6	5
2	$521,17 \leq x \leq 631,95$	9	6
3	$631,95 \leq x \leq 742,73$	4	7
4	$x \geq 742,73$	8	9

Tableau n°14 : Découpage de l'échantillon pour les valeurs correspondant aux fréquences à la station de Ben M'hidi.

IV.2. Estimation de la période de retour et de récurrence théorique :

La période de retour (T) ou temps de récurrence est défini comme étant l'inverse de la fréquence au - non dépassement fond la fréquence de dépassement F_i :

$$\begin{aligned} \text{Si } F_i < 0,5 &\Rightarrow T = \frac{1}{F} \\ \text{Si } F_i > 0,5 &\Rightarrow T = \frac{1}{1-F} \end{aligned} \quad (10) \quad \left\{ \begin{array}{l} T : \text{période de retour en année} \\ F : \text{fréquence en } T^{-1} \end{array} \right.$$

Fréquences	Stations	Salines	Ben M'hidi
	Paramètres		
$F_i < 0,5$	Précipitation (min)	422,80 (1996/97)	322,20 (1996/97)
	u	-1,450	-1,820
	F	0,067	0,035
	T	15	29
$F_i > 0,5$	Précipitation (max)	987,70 (2004/05)	908,67 (1984/85)
	u	1,93	1,67
	F	0,97	0,95
	T	33	20

Tableau n°15 : Estimation de la période de retour pour les deux stations de mesure en fonction de fréquence F.

Les données contenues dans le tableau ci – dessus nous permettent de remarquer que la période de retour (T) de l'année de pluie minimale avec 15 et 29 ans respectivement pour les stations des Salines et de Ben M'hidi.

D'autre part, la pluviométrie est supérieure à celle de l'année pluie max tout les 33 et 20 ans respectivement pour les Salines et Ben M'hidi.

V. Courbe pluvio - thermique: (voir fig.14 et 15)

Le climat de la station des Salines se caractérise par une saison humide, cette dernière se caractérise par une forte pluviométrie et une baisse de température, elle s'étend du début du mois d'octobre avec une précipitation importante qui atteint son maximum pendant le mois de décembre (122.63 mm au Salines) et le mois de janvier (106.51 mm à la station de Ben M'hidi) et prend fin en mois de mai.

Pour ce qui est de la saison chaude qui s'étend du début de mai jusqu'à la fin de septembre, elle est marquée par une forte évaporation provoquée par l'augmentation de la température ($T > 25.50$ °c), et la diminution de la précipitation ($P < 3$ mm).

V.1.Type de climat:

La région d'étude est soumise à un climat méditerranéen qui est tempéré, se caractérise par deux saisons l'une humide et douce allant du mois d'octobre jusqu'au mois de mai et l'autre chaude et sèche relativement courte durant les mois de juin, juillet, août et septembre.

Fig. 14 : Diagramme pluvio – thermique de la station des Salines (79/06)

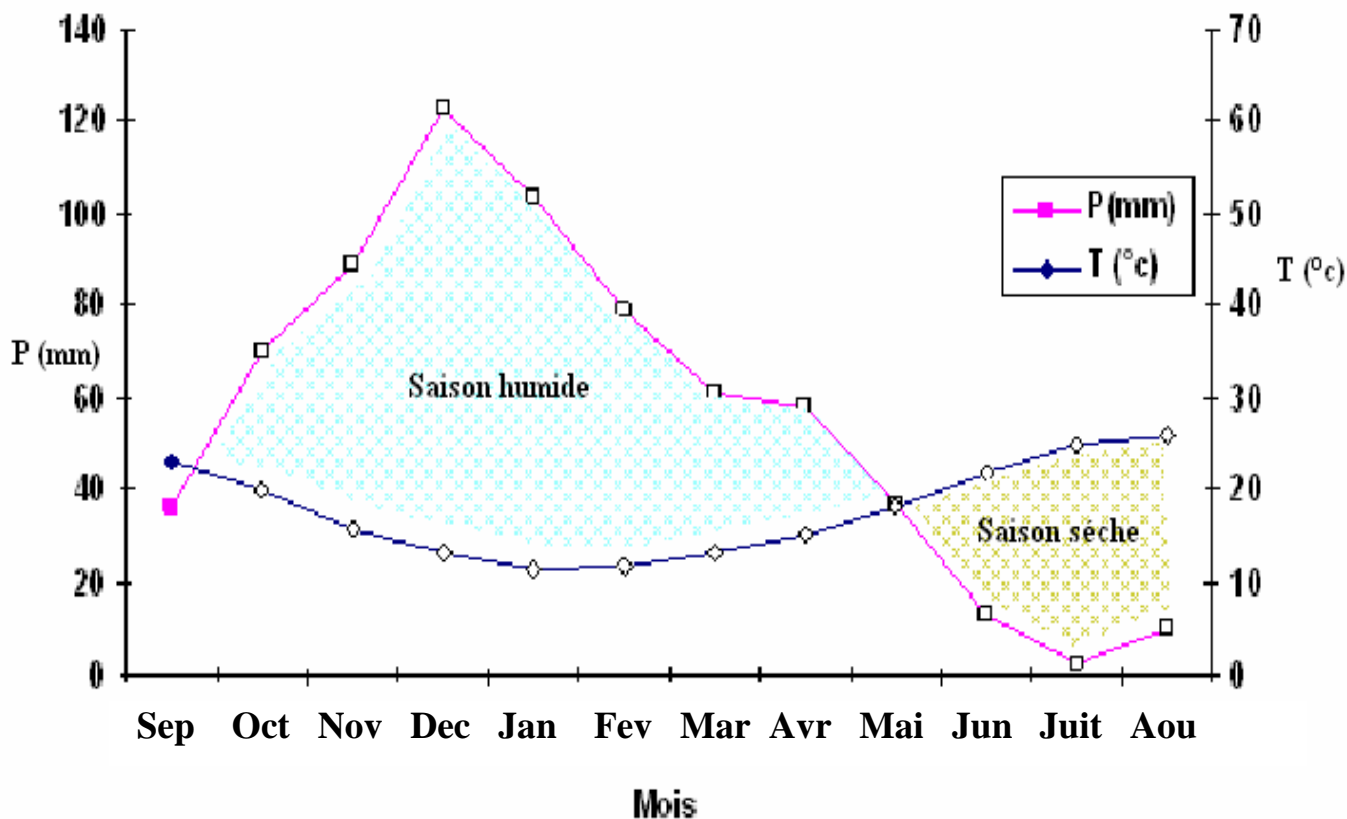
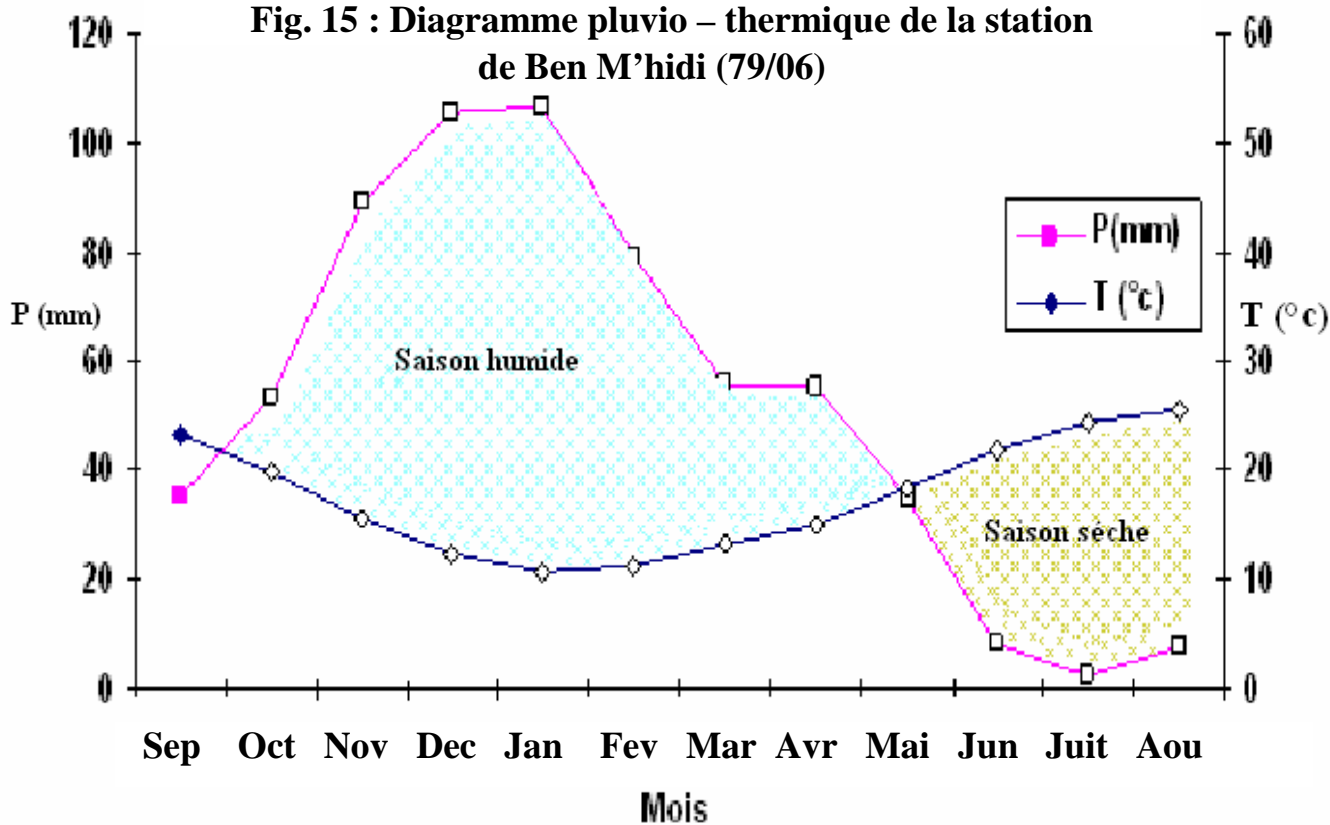


Fig. 15 : Diagramme pluvio – thermique de la station de Ben M'hidi (79/06)



V.2. Calcul du bilan hydrique selon la formule de C.W Thornthwaite:

Le bilan de Thornthwaite permet d'estimer pour chaque mois :

- L'évapotranspiration potentielle en mm;
- L'évapotranspiration réelle en mm;
- La réserve facilement utilisable (RFU) en mm;

Ce terme présente la quantité d'eau disponible dans le niveau superficiel du sol. La RFU est égale à 100 mm pour les deux stations (P. Brochet et Al, 1975).

- L'excédent d'écoulement (Ex) en mm dans le cas ou:

ETP = ETR donc la RFU est à son maximum (100 mm).

L'excédent, est appelé aussi pluie efficace, est le reste des eaux de pluie constituent l'écoulement et l'infiltration.

- Le déficit agricole (DA) en mm, il résulte de la différence entre l'ETP et l'ETR.

Il présente la quantité d'eau qu'il faudrait apporter aux cultures pour que la sécheresse ne l'atteigne pas.

Ici, l'évapotranspiration potentielle calculée d'après la formule de Thornthwaite est:

$$\text{ETP} = 16 (10 T / I)^a \cdot K \quad (11)$$

$$a = (1.6/100) I + 0.5 \quad (12)$$

Avec:

ETP : Evapotranspiration potentielle mensuelle en mm;

T : Température moyenne mensuelle en °C;

$$I : \text{Indice thermique annuelle où } I = \sum_1^{12} i \text{ et } i = (T/5)^{1.514} \quad (13)$$

V.3. Interprétation du bilan de Thornthwaite:

On remarque que lorsque la RFU est totale, il y a un surplus d'eau accompagnée par un écoulement et quand elle commence à diminuer, on a un épuisement du stock peu à peu au point qu'il sera complètement vide.

Ici, il y aura un déficit agricole (le déficit agricole à partir du mois de juin jusqu'au mois d'octobre pour les deux stations). La reconstitution du stock s'observe au mois de novembre avec une RFU égale à 51.83 mm à la station des Salines et 51.66 mm à la station de Ben M'hidi. La RFU atteint son maximum (100 mm) au mois de décembre et reste ainsi jusqu'au mois d'avril.

Pour la station des Salines, l'écoulement commence en décembre et ce termine au mois d'avril avec une somme de 216.31 mm et la même chose pour la station de Ben M'hidi avec une somme de 199.14 mm.

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	Tot
P(mm)	36.30	70.01	89.04	122.63	103.44	79.15	60.86	57.77	37.06	12.95	2.19	10.07	681.47
T(°C)	23.03	20.01	15.61	13.11	11.53	11.65	13.25	15.13	18.25	21.90	25.00	25.79	17.85
i	10.09	8.16	5.60	4.30	3.54	3.60	4.37	5.35	7.10	9.36	11.43	11.99	84.89
K	1.05	0.91	0.75	0.70	0.73	0.78	1.02	1.15	1.32	1.33	1.33	1.24	-
ETP(mm)	107.31	71.62	37.21	25.11	20.63	22.47	37.32	53.84	87.56	123.79	158.32	156.39	901.57
ETR(mm)	36.30	70.01	37.21	25.11	20.63	22.47	37.32	53.84	87.56	62.45	2.19	10.07	465.16
RFU(mm)	0	0	51.83	100	100	100	100	100	49.50	0	0	0	-
EXC(mm)	0	0	0	49.35	82.81	56.68	23.54	3.93	0	0	0	0	216.31
DA(mm)	71.01	1.61	0	0	0	0	0	0	0	61.34	156.13	146.32	436.41

Tableau n°16 : Bilan hydrique selon la méthode de C.W.Thornthwaite pour la station des Salines (1976 - 2006).



	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	Tot
P(mm)	35.27	53.34	88.71	105.70	106.51	79.08	55.88	55.39	34.30	7.96	2.09	7.71	631.95
T(°C)	23.30	19.70	15.39	12.31	10.74	11.19	13.15	14.98	18.32	21.89	24.48	25.66	17.59
i	10.28	7.97	5.48	3.91	3.18	3.39	4.32	5.27	7.14	9.35	11.08	11.89	83.08
K	1.05	0.91	0.75	0.70	0.73	0.78	1.02	1.15	1.32	1.33	1.33	1.24	-
ETP(mm)	110.77	70.60	37.05	23.00	18.68	21.52	37.80	54.08	89.71	125.18	153.58	156.07	898.04
ETR(mm)	35.27	53.34	37.05	23.00	18.68	21.52	37.80	54.08	89.71	52.55	2.09	7.71	432.80
RFU(mm)	0	0	51.66	100	100	100	100	100	44.59	0	0	0	-
EXC(mm)	0	0	0	34.36	87.83	57.56	18.08	1.31	0	0	0	0	199.14
DA(mm)	75.50	17.26	0	0	0	0	0	0	0	72.63	151.49	148.36	465.24

Tableau n°17 : Bilan hydrique selon la méthode de C.W.Thornthwaite pour la station de Ben M'hidi (1976 - 2006).

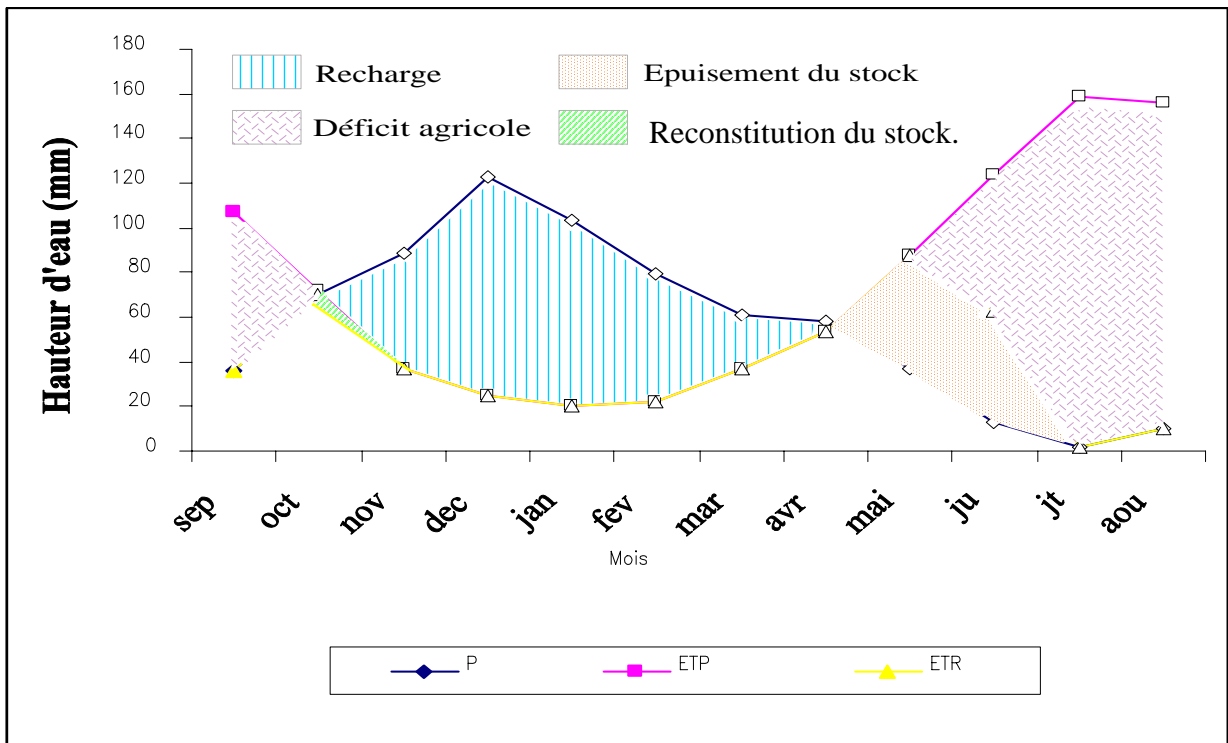


Fig.16 : Représentation graphique du bilan de Thornthwaite de la St des Salines (1979/80 – 2005/06)

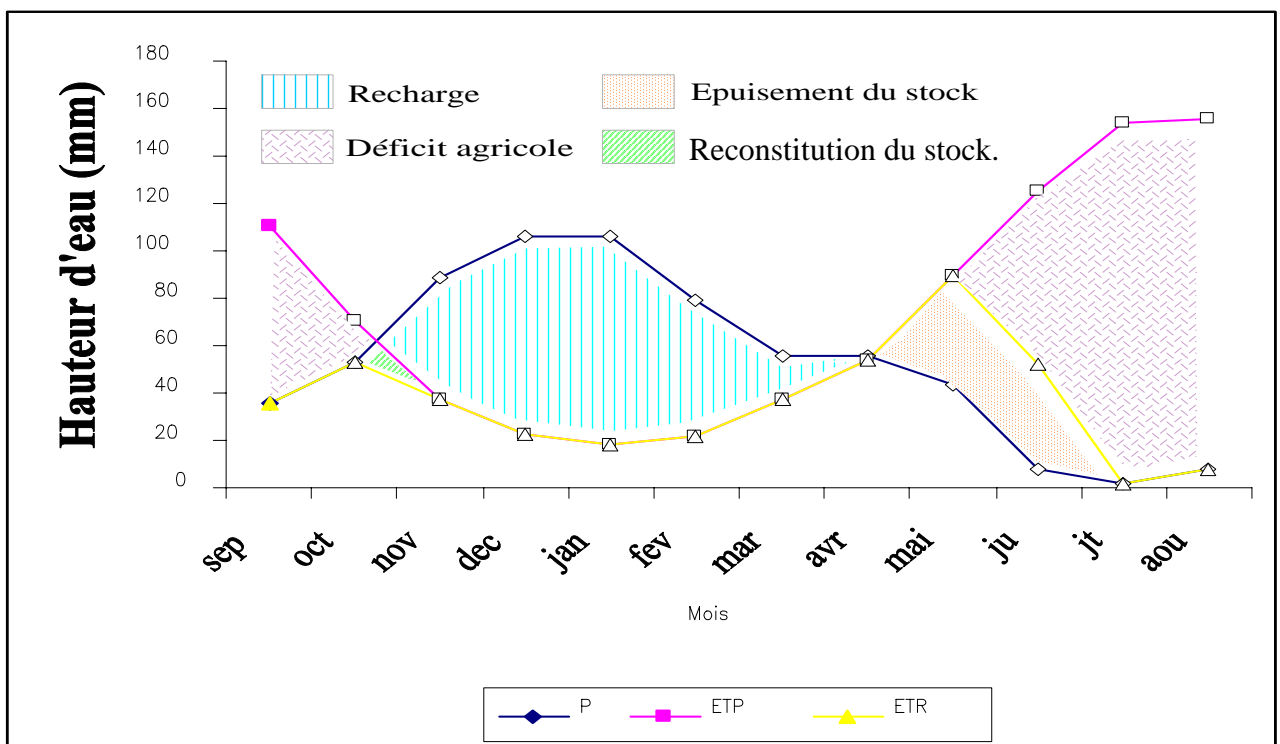


Fig.17 : Représentation graphique du bilan de Thornthwaite de la St de Ben M'hidi (1979/80 – 2005/06)

VI. Conclusion:

L'étude hydroclimatique est indispensable à la compréhension des processus d'alimentation et de la restitution des eaux souterraines d'une région donnée.

Les données climatiques attribuent à la région un climat méditerranéen caractérisé par deux saisons distinctes: l'une pluvieuse et humide et l'autre sèche et chaude.

La région d'étude reçoit des précipitations annuelles moyennes de l'ordre de 681.47 mm au Salines et 631.95 mm à Ben M'hidi et de températures annuelles moyennes de l'ordre de 17.85°C (Salines) et 17.59 °C (Ben M'hidi).

La moyennes annuelle de l'humidité relative de l'aire à la station des Salines est d'une valeur de 74,47 % (1975/2005), alors que la moyenne annuelle de la vitesse des vents est de 3,1 m/s pour la même station de mesure.

L'ajustement à la loi normale (loi de Gauss) pour les précipitations moyennes annuelles aux stations des Salines et de Ben M'hidi nous a permet de déduire un écart type de 165,35 pour la St des Salines et 164,32 pour Ben M'hidi.

L'estimation de la période de retour (T) des précipitations moyennes annuelles nous permet aussi de distinguer en fonction de la fréquence F : d'une part, une année de pluie minimale avec 15 et 29 ans respectivement pour les stations des Salines et de Ben M'hidi.

D'autre part, une pluviométrie qui est supérieure à celle de l'année pluie max tout les 33 et 20 ans respectivement pour les Salines et Ben M'hidi.

La reconstitution du stock commence au mois de novembre et s'achève au mois de mai. L'épuisement du stock du sol s'observe au mois de mai et la nécessité d'irriguer s'impose surtout pour la période allant du mois de Juin au mois d'octobre où l'on constate un déficit agricole pouvant atteindre 156.13 mm (Salines) et 151.49 mm (Ben M'hidi).

Chapitre III

"Etude Hydrogéologique "

I. Introduction:

Comme l'on a défini précédemment, le massif dunaire de Bouteldja fait partie du bassin versant de la Mafragh (associé avec la plaine des graviers de Bouteldja) et qui se subdivise en sous bassins versants " bassin de Bourdim, de Bou Glès et oued El B'haim".

Le principal oued est El Kébir Est (d'un apport moyen annuel de 270 millions de m³). Ce dernier traverse la région de Bouteldja depuis la Tunisie (la source) jusqu'à la sortie en rejoignant oued Bounamoussa à l'embouchure puis il se jette dans la mer (oued Mafragh) après un parcours de 46 Km (Boudoukha, 1990).

L'étude hydrogéologique contribue à la définition de la géométrie et de la structure de la nappe dans le but de bien comprendre les processus de circulation des eaux souterraines et des conditions aux limites (entrées et sorties d'eau), sans oublier la détermination des paramètres hydrodynamiques (Transmissivité, perméabilité, coefficient d'emmagasinement ... etc.).

II. la nappe libre du massif dunaire :

Le long du littoral, un énorme massif dunaire s'amplifie de l'Ouest vers l'Est, il prend alors une orientation NW – SE conforme aux vents dominants. Le massif dunaire de Bouteldja est essentiellement constitué de sables éoliens qui forment une nappe libre, avec des épaisseurs comprises entre 20 et 120 m et l'existence d'intercalations des lentilles argileuses qui correspondent à d'anciens fonds de marais (Ait Hamou, 1983) :

① La nappe libre du massif repose sur un substratum argilo – gréseux imperméable à semi perméable.

② La nappe du massif dunaire de Bouteldja 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.

③ La nappe du massif dunaire 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.

④ La partie orientale du massif dunaire est caractérisée par une augmentation progressive des épaisseurs, suivant une première direction Est – Ouest de l'oued Bourdim (20 m) à l'oued Bou Glès (75 m), puis une seconde direction NE – SW du Djebel Koursi (70 m) vers Nechaa

Righia (150 m). cet aquifère est considéré comme vulnérable du fait de la présence de la mer et des marécages salés à son pourtour.

⑤ Le massif dunaire de Bouteldja se subdivise en plusieurs bassins versants (fig.18) :

II.1. Bassin de Bourdim:

De l'Est en Ouest du massif dunaire, on retrouve le premier bassin drainé par l'oued Bourdim. Il récupère les eaux du ruissellement des dunes et s'écoule vers une vallée argilo - gréseuse. Du fait de son éloignement de la mer, ce bassin présente des sables plus fins qu'ailleurs.

En outre, les argiles du ruissellement colmatent les sables, d'où la faible perméabilité du milieu.

Les principales caractéristiques de ce bassin sont :

- Surface totale de 22,6 Km²;
- Surface des grés et des argiles de 14 Km²;
- Surface des sables de 8,5 Km²;
- Surface des marécages d'environ 0,1 Km²;
- Débit d'étiage de 60 l/s.

II.2. Bassin de Bou Glès:

Ce bassin se trouve au Nord de Bouteldja, au pied d'une falaise de sable où on rencontre la source de Bou Glès, Cette dernière résulte de l'affaissement du relief dans les dunes récentes.

Le bassin est d'orientation Nord – Sud avec les caractéristiques suivantes:

- Surface totale de 27,3 Km²;
- Surface des grés et des argiles de 10,2 Km²;
- Surface des sables – dunes de 17 Km²
- Surface des marécages d'environ 0.1 Km²;
- Débit exploité de 50 l/s.

II.3. Bassin oued El B'haim :

Ce bassin vient chevaucher le bassin de Bou Glès. Le cours de l'oued El B'haim grossièrement orienté Nord Est – Sud Ouest et draine environ 53 Km² de dune. Dans ce bassin, on attribue les plus importantes perméabilités et épaisseurs de sable. L'accroissement du débit de l'amont de l'oued en 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 51,7 Km²;
- Surface des terrains gréseux de 2 Km²;
- Surface des terrains dunaires de 47,7 Km²;
- Débit de l'Oued en amont de 20 l/s;
- Débit en aval de 150 l/s.



fig.18 : Carte de la répartition des bassins versants dans le massif dunaire de Bouteldja

III. Interprétation des coupes hydrogéologiques :

Pour bien expliquer la nature de l'aquifère libre du massif dunaire et suivre sa piézométrie et le sens de l'écoulement ainsi que la morphologie du substratum, quatre coupes hydrogéologiques ont été établies à partir des fiches techniques des forages et de la géophysique (Toubal, 2002).

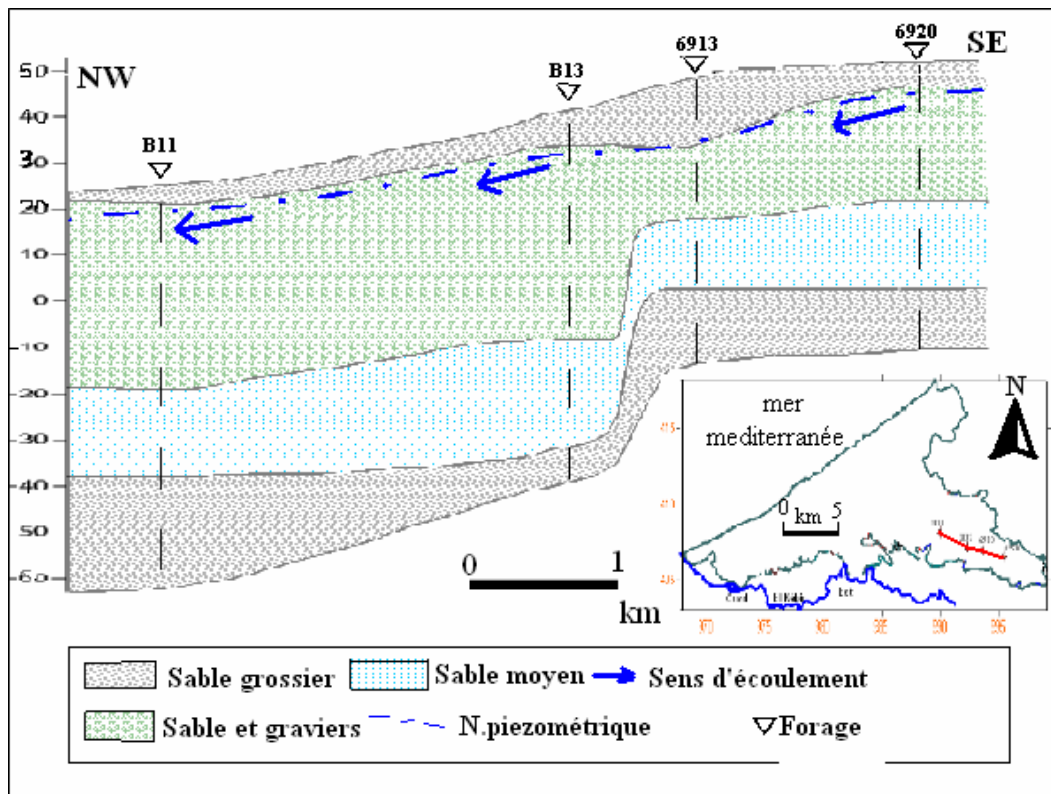
III.1. Coupe hydrogéologique (A): (fig.19)

De direction NW - SE, la nappe libre de Bouteldja, comme précédemment décrite, est contenue dans les sables éoliens généralement hétéro - métriques, contenant une forte proportion de sables fins, moyens et grossiers. Ces sables sont localement argileux, d'où la difficulté de représenter la proportion d'argile en tout point.

Le sens d'écoulement des eaux est de direction Est - Ouest où l'épaisseur des sables décroît en contact du numidien argileux de l'Est.

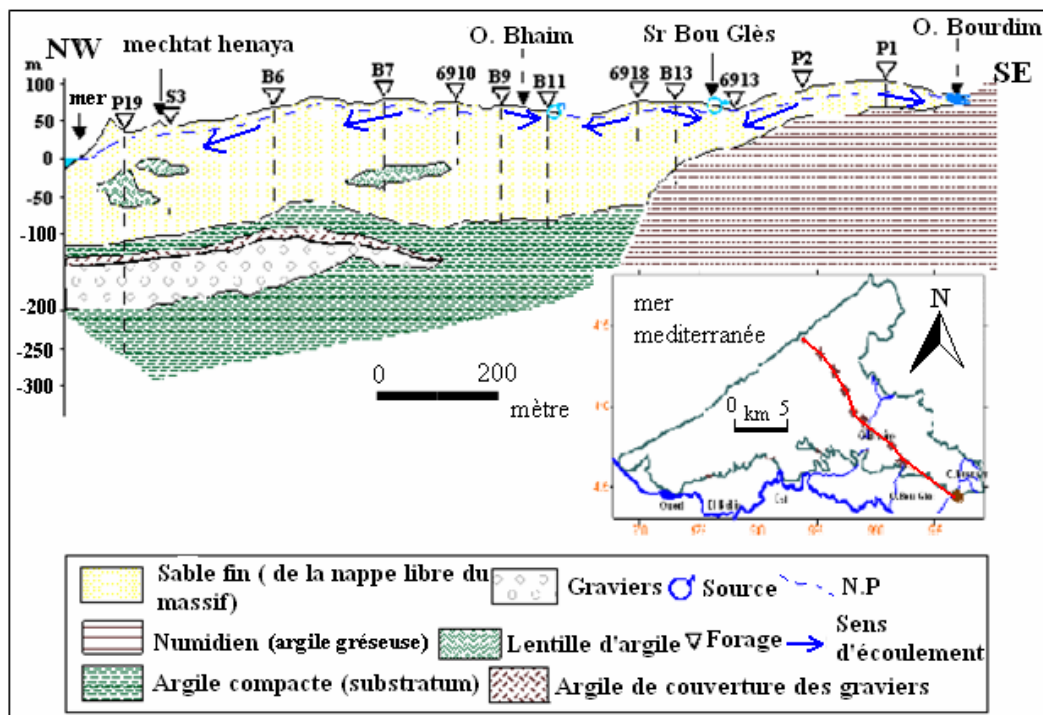
III.2. Coupe hydrogéologique (B): (fig. 19)

De direction NW - SE, la coupe montre que les formations aquifères reposent sur un substratum numidien à l'Est de Bou Glès et sur la surface d'érosion du remplissage mio - pliocène du fossé de Ben M' hidi à l'Ouest. Au Sud, les sables passent latéralement aux graviers de la nappe profonde. Des intercalations de lentilles argileuses sont remarquées dans les forages (P19, S3 et B7)



A

fig.19 : Coupes hydrogéologiques dans le massif dunaire de Bouteldja (D'après les coupes des forages et la géophysique)



B

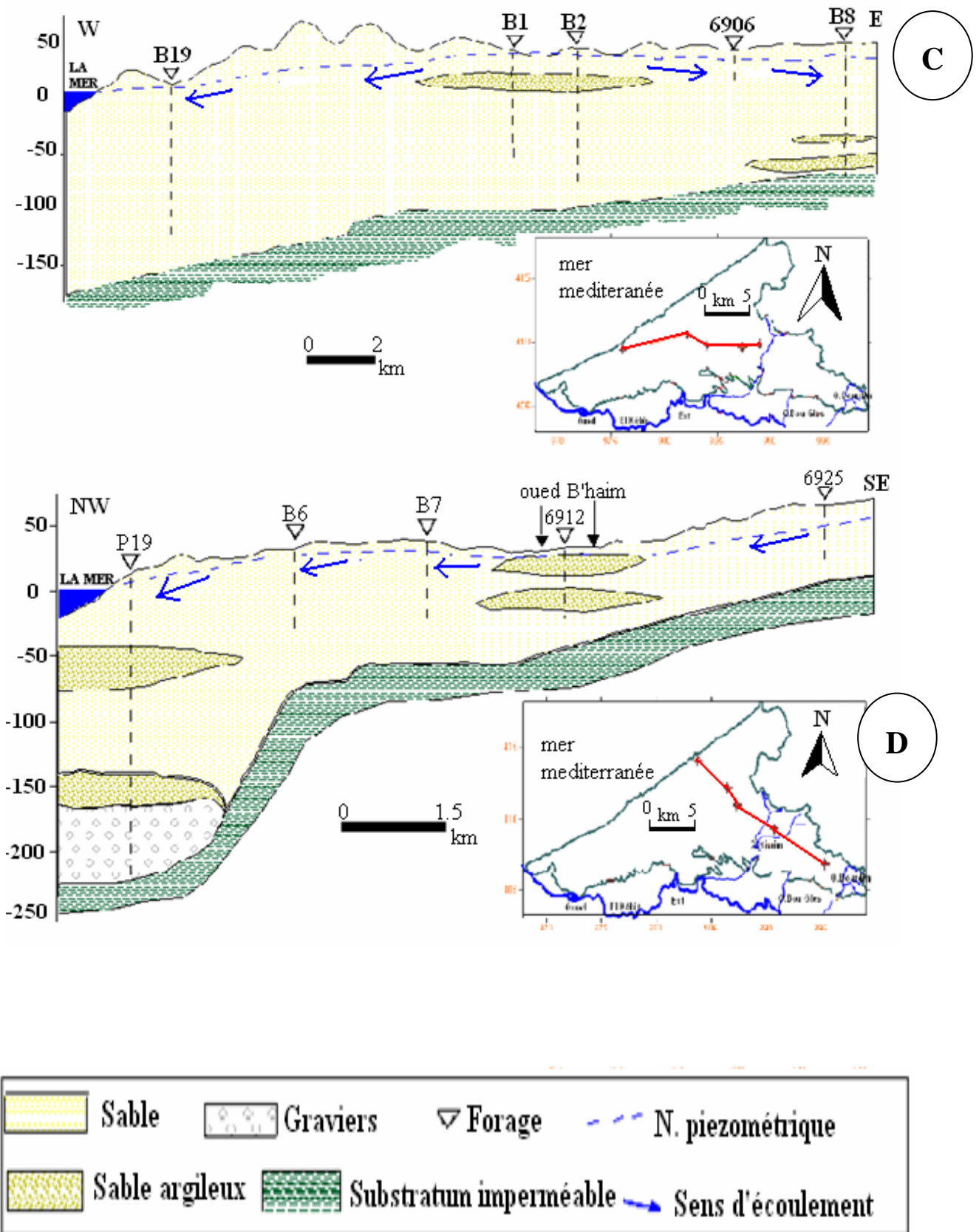


fig.20 : Coupes hydrogéologiques dans le massif dunaire de Bouteldja (D'après les coupes des forages et la géophysique)

Le sens d'écoulement des eaux prend une orientation selon la topographie des dunes sableuses avec une présence des sources d'eau, mais généralement la direction est SE - NW.

III.3. Coupe hydrogéologique (C): (fig. 20)

De direction Ouest - Est, la coupe montre que la nappe dunaire constitue de sables fins et moyens, de couleur beige et jaune : renferme souvent des intercalations argileuses sous forme de lentilles (B1, B2 et B8).

L'analyse des colonnes stratigraphiques des forages B19, B1, B2, 6906 et B8 montre que les épaisseurs de l'aquifère sableux varient de 62 m à l'Est jusqu'à 175 m à l'Ouest.

Le sens d'écoulement des eaux prend deux directions, l'une Est – Ouest vers la mer et l'autre Ouest – Est vers oued El B'haim suivant une topographie bien précise.

III.4. Coupe hydrogéologique (D): (fig.20)

De direction NW - SE. Une partie importante de la coupe présente les caractéristiques d'une nappe libre, formée essentiellement de sable dunaire d'une épaisseur allant de 20 m à l'Est et 220 m à l'Ouest, avec une présence des intercalations de lentilles argileuses (P19, 6912 et B7).

Le sens d'écoulement des eaux souterraines est SE – NW. On observe un passage latéral de faciès entre la nappe libre et la nappe profonde des graviers.

IV. La piézométrie:

Les points d'eaux que nous disposons pour établir la carte piézométrique (année 2006) sont concentrés dans des agglomérations rurales, ce qu'il ne permet pas d'avoir une idée claire sur l'écoulement de l'eau souterraine et donc ne permet pas de faire des extrapolations fiables.

C'est pour cette cause là que nous nous sommes basés sur des données de forage faites en 1982 (Kherici, 1985) pour établir la carte piézométrique compréhensible.

L'allure des courbes piézométriques (fig.21) est caractérisée par deux axes de drainage où l'écoulement suit la topographie du terrain.

La carte piézométrique nous montre que l'écoulement souterrain prend deux sens, un écoulement qui se dirige au Nord vers la mer et un second écoulement qui se dirige au Sud vers la nappe captive des graviers de la plaine d'El Kébir Est et les marécages de Mekada.

L'écartement des courbes piézométriques est fonction du gradient hydraulique, donné par la relation :

$$\Rightarrow \boxed{i = dH / dL}$$

Avec : i : le gradient hydraulique;
 dH : différence de charge;
 dL : distance entre deux courbes isopiezes concernées.

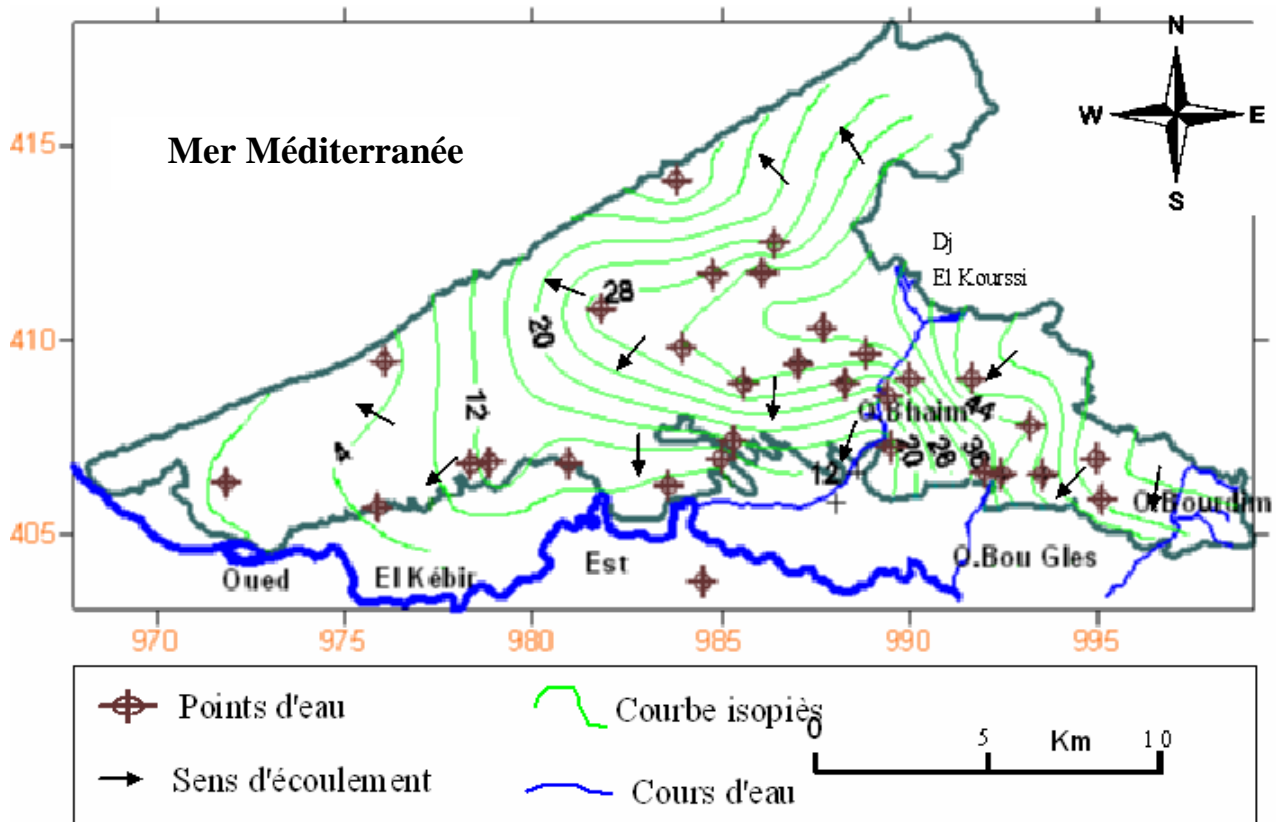


fig.21 : Carte piézométrique du massif dunaire de Bouteldja (année 1982, Kherici, 1985).

Quand les courbes piézométriques sont plus serrées, le gradient hydraulique est plus fort. Dans la partie Sud, Sud – Est et précisément dans la région d'oued El B'haim et Bou Glès les courbes sont plus serrées et qui traduit un très fort gradient.

Ce resserrement est dû essentiellement à la réduction de la surface d'écoulement. Par contre, dans la partie Nord – Ouest du massif dunaire de Bouteldja, les courbes isopiezes sont plus espacées et qui traduit un faible gradient.

IV.1. Les conditions aux limites:

Afin de bien reconnaître les lieux et les zones de communication de la nappe libre du massif dunaire (fig.22), on a pris en considération les mesures prises à partir de la carte piézométrique et aussi une vue détaillée sur les données géologiques. On a donc:

- Au Nord, la mer méditerranée représente un exutoire à la nappe;
- A l'Est, les formations du grés numidiens constituent soient des limites perméables si les grés sont peu argileux, soient des limites imperméables lorsque la trame argileuse est importante.

☉ Au Sud, suivant une ligne parallèle à l'oued El Kébir Est et en reliant Djebel Bourdim à la Mafragh, les bordures d'El Kébir Est représentent un second exutoire de la nappe libre. La relation oued – nappe est confirmée du débit d'El Kébir Est qui s'accroît régulièrement en allant de l'amont vers l'aval.

☉ A l'Ouest, un substratum qui semble profond qu'à l'Est, sur lequel repose la formation de l'aquifère libre. Il peut être imperméable à semi perméable (Kherici, 1985).

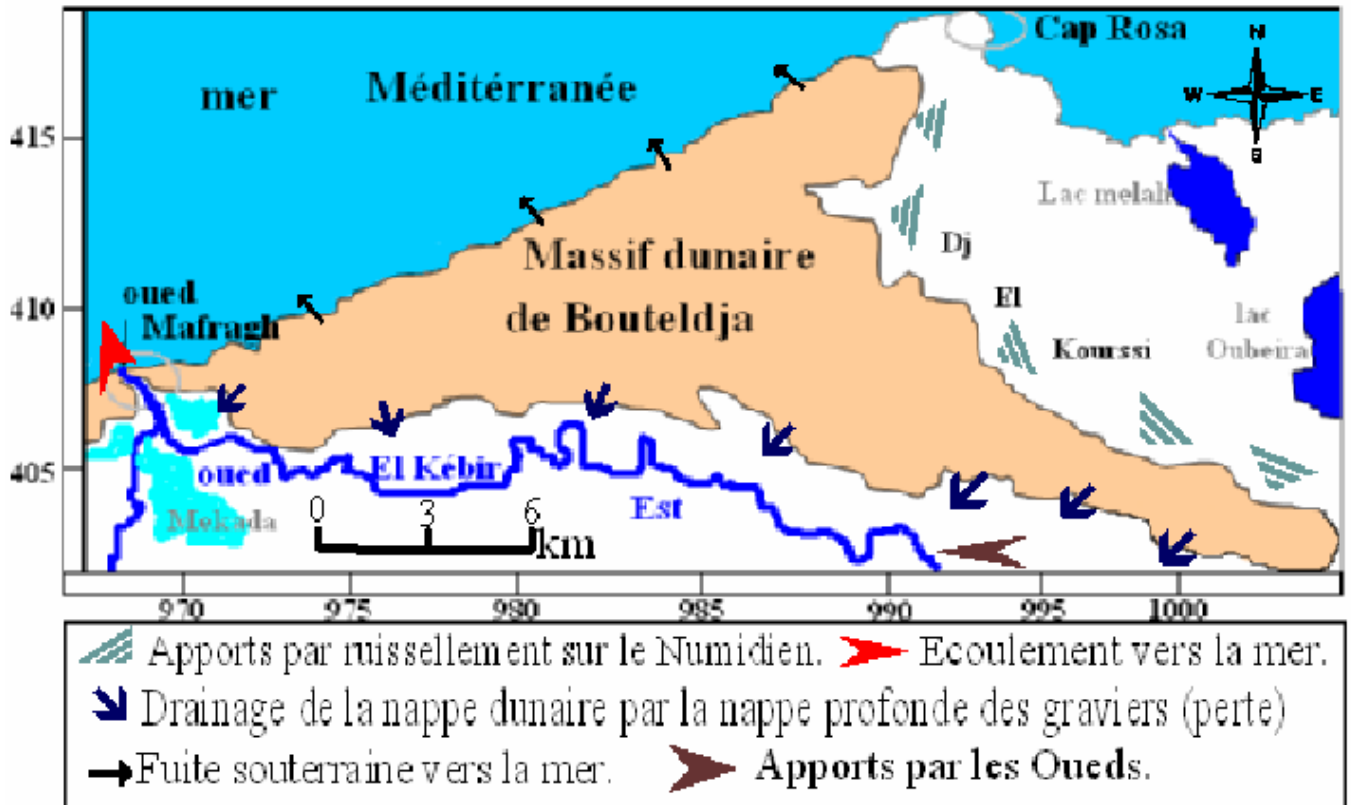


fig.22 : Carte des conditions aux limites de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja

V. Etude des débits des sources (Tarisement):

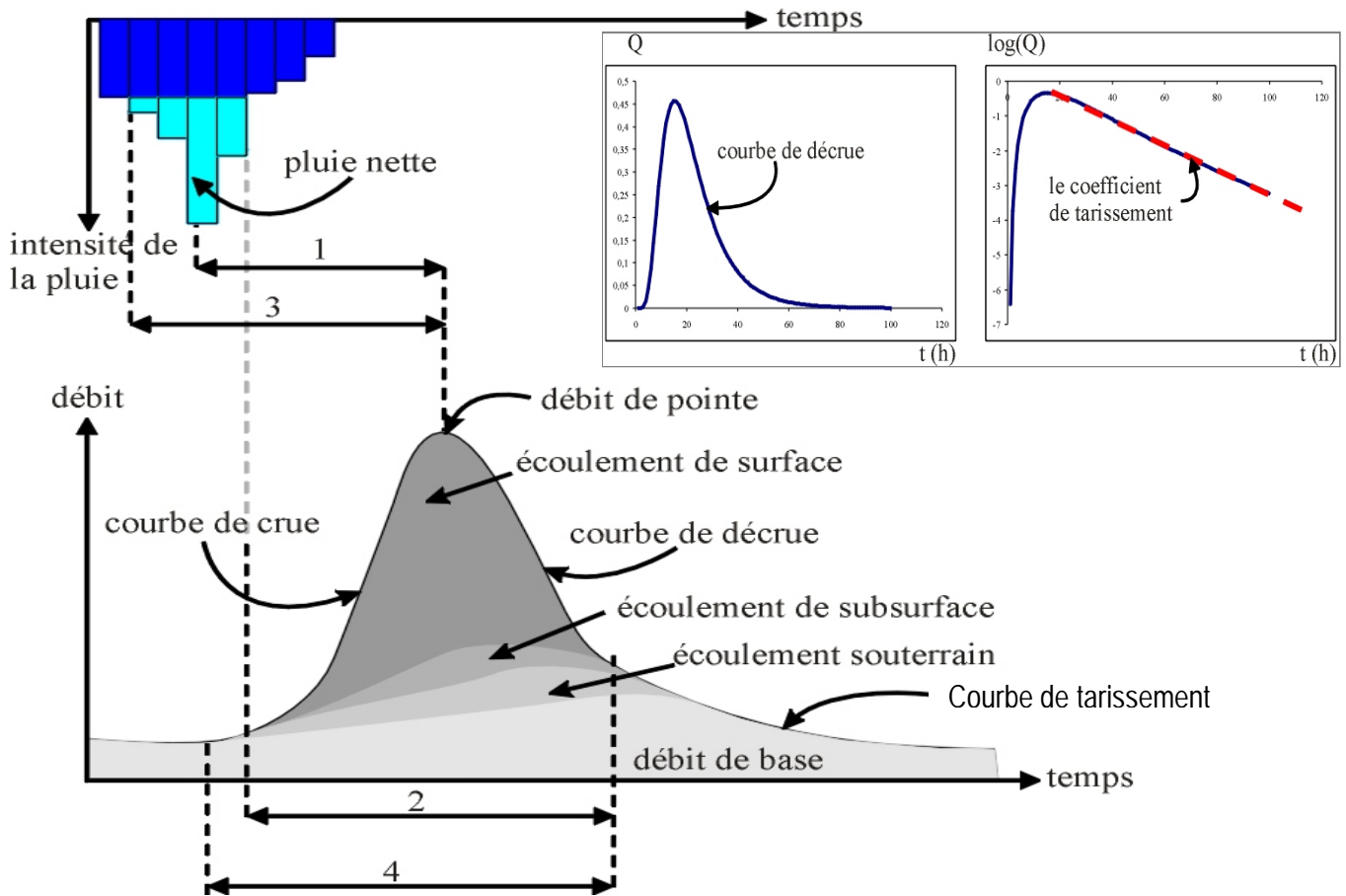
Le concept de *tarisement* désigne la vidange des nappes. Il serait intéressant de connaître les réserves aquifères totales de la nappe libre du massif de Bouteldja (fig.23).

Théoriquement, le problème peut être résolu par l'étude du tarissement des sources. En effet, le tarissement peut être décrit par différentes lois et nous nous développerons ici que la "loi exponentielle simple" qui est l'un des lois les plus appliquées. Celle – ci s'exprime par la relation suivante avec le temps t en seconde (Castany, 1982) :

$$\Rightarrow Q = Q_0 \cdot e^{-\alpha t}, \text{ ou } \ln Q = Q_0 - \alpha t \text{ ou } \log Q = \log Q_0 - 0.434 \alpha t$$

Avec :

- Q : le débit à un instant donné t en m³/s;
- Q₀ : le débit à l'instant t₀, début du tarissement pur en m³/s;
- t : le temps de tarissement en seconde;
- α : le coefficient de tarissement.



Avec :

- (1) : temps de réponse
- (2) : temps de concentration
- (3) : temps de montée
- (4) : temps de base

fig.23 : Relation pluie – débit pour le tarissement d'un point d'eau

V.1. Interprétation des courbes de récession :

En hydrologie de surface, la courbe de récession (fig.24), partie de l'hydrogramme, allant de la pointe de crue à la fin du tarissement rend compte à la fois des modalités du ruissellement au sens large (courbe de décrue) et de la vidange des différents aquifères alimentant les cours d'eau en période non influencée (courbe de tarissement).

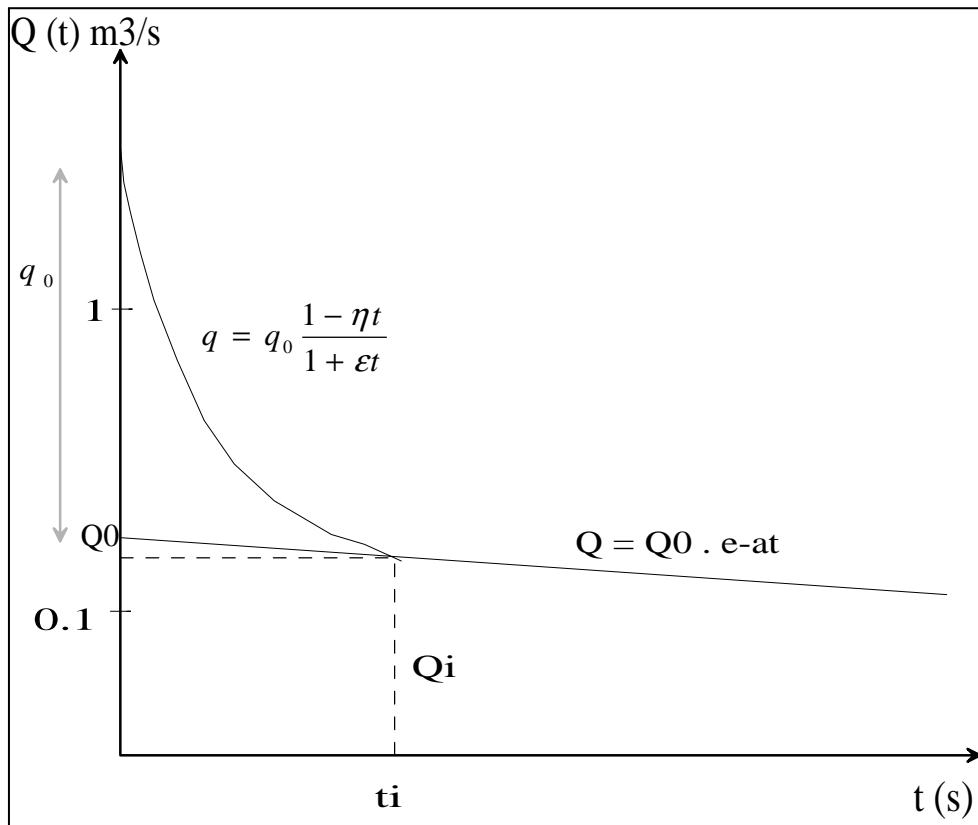


Fig.24: Illustration de la modélisation d'une courbe de récession (D'après A. Mangin in Gaud, 1976).

A. Mangin (1975) a proposé une méthode qui consiste à modéliser les courbes de récession dont l'équation est donnée par l'expression suivante :

$$Q(t) = q_0 (1 - \eta t) / (1 + \varepsilon t) + Q_0^{-\alpha t}$$

Avec :

$Q(t)$: débit en m^3/s ;

$\alpha, \varepsilon, \eta$: paramètres du système à ajuster ;

q_0 et Q_0 : débits en m^3/s caractéristiques de la crue définis sur la figure ci – dessus.

V.2. Application du tarissement aux sources étudiées :

La courbe de tarissement, qui est la fin de la courbe décroissante de l'Hydrogramme, exprime la loi de vidange de la couche aquifère. Elle permet par une solution graphique de calculer le coefficient de tarissement (α). La courbe de tarissement est construite en portant en abscisses le temps (jours) et en ordonnées les débits journaliers correspondants (m^3/s).

Par la formule de Maillet : $Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha t}$ et après avoir tracer la droite représentative de la courbe de tarissement (fig.25) on peut calculer α et on a :

01/09	0.0098
23/08	0.0100
12/08	0.0100
19/07	0.0110
08/07	0.0113
25/06	0.0124
16/06	0.0125
23/05	0.0133
05/05	0.0135
19/04	0.0140
03/04	0.0141
10/03	0.0137
15/02	0.0128
09/01	0.0120
12/12	0.0115
Dates	Débit (m ³ /s)

Sr Bou Glès

01/09	0.0074
23/08	0.0074
12/08	0.0075
19/07	0.0077
08/07	0.0079
25/06	0.0082
16/06	0.0083
23/05	0.0093
05/05	0.0097
19/04	0.0101
03/04	0.0103
10/03	0.0100
15/02	0.0095
09/01	0.0082
12/12	0.0078
Dates	Débit (m ³ /s)

Sr Bourdim

01/09	0.0135
23/08	0.0135
12/08	0.0136
19/07	0.0138
08/07	0.0140
25/06	0.0145
16/06	0.0148
23/05	0.0154
05/05	0.0155
19/04	0.0160
03/04	0.0161
10/03	0.0157
15/02	0.0151
09/01	0.0146
12/12	0.0141
Dates	Débit (m ³ /s)

Sr Titri

Tableau n°18 : Données des débits des sources dans le massif dunaire de Bouteldja (2006/07)

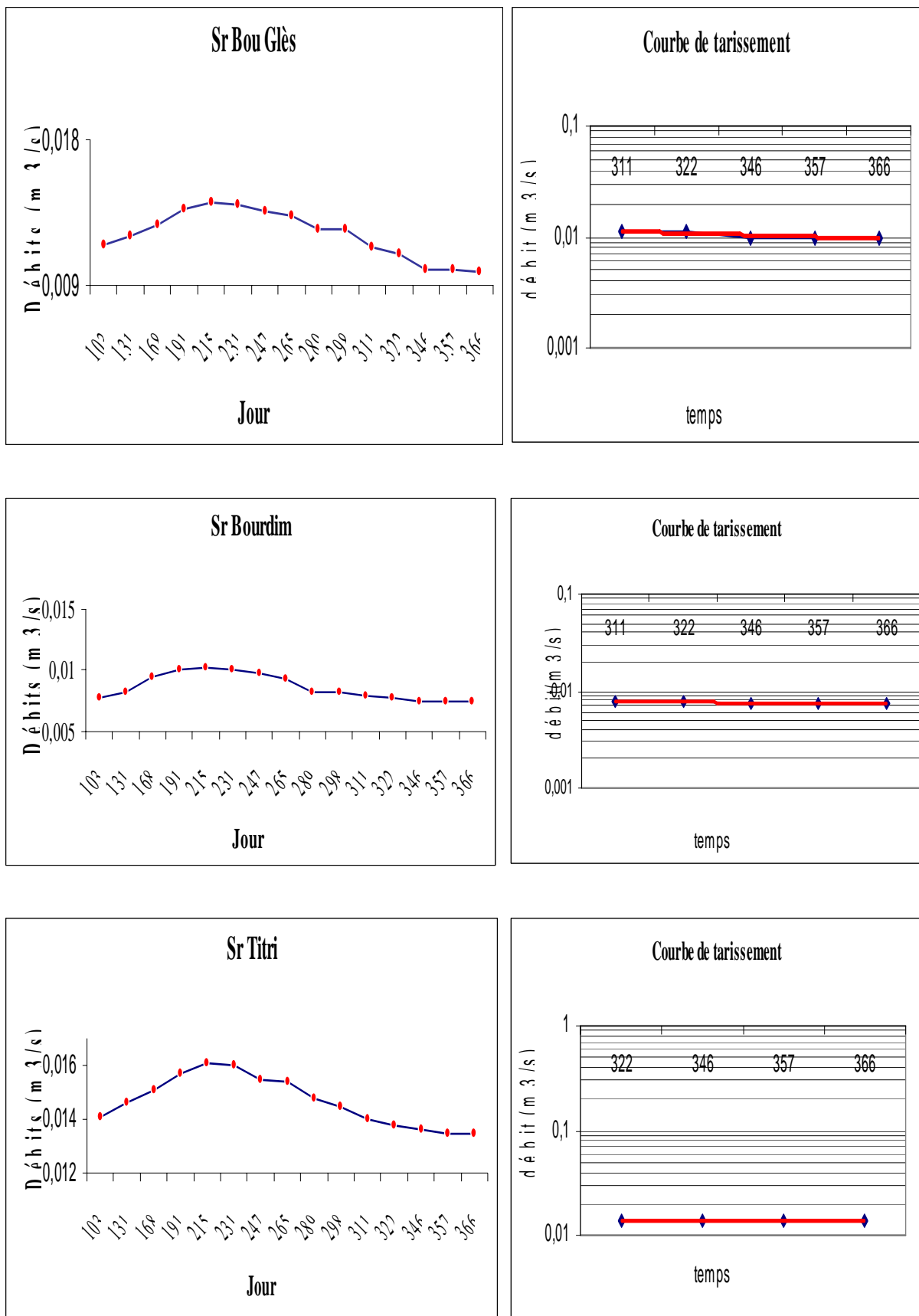


Fig. 25 : Hydrogramme des débits des sources captant dans le massif dunaire de Bouteldja et leurs chaque courbe de tarissement (2006/07)

Q_t est le débit à l'instant t en m^3/s ;

Q_0 est le débit du tarissement à l'instant t_0 ;

e égal à 2,718

α est le coefficient de tarissement en $jour^{-1}$;

t est le temps écoulé en jour.

Donc d'après la formule de Maillet on a :

$$\log Q_t = \log Q_0 - (\alpha \log e)t$$

$$\Rightarrow \log Q_t = \log Q_0 - (0,4343\alpha)t$$

$$\text{Donc : } \alpha = \frac{\log Q_0 - \log Q_t}{0,4343t}$$

Le coefficient de tarissement α à la source de Bou Glès par exemple est calculé comme suite :

- On a l'ordonnée à l'origine Q_0 dont la valeur est $0.013 m^3/s$
- On a pour $Q_t = 0.01 m^3/s$, on le temps $t = 357$ jours et donc :

$$\alpha = \frac{-1,886 + 2}{0,4343 \cdot 357} = 7,35 \cdot 10^{-4} \text{ jour}^{-1}$$

Le coefficient de tarissement α calculé à la source de Bourdim et Titri est respectivement :

- **Sr Bourdim** : $\alpha = 1,89 \cdot 10^{-4} \text{ jour}^{-1}$
- **Sr Titri** : $\alpha = 1,04 \cdot 10^{-4} \text{ jour}^{-1}$

A partir du coefficient de tarissement α , on peut calculer le volume d'eau emmagasiné (W) selon la formule suivante :

$$W = \frac{Q_0}{\alpha} = \frac{86400Q_0}{\alpha}$$

Donc le volume d'eau emmagasiné (W) à l'instant Q_0 dans la couche aquifère alimentant le débit de tarissement pour les sources captant du massif dunaire de Bouteldja est calculé comme suite :

- **Sr Bou Glès** : $\alpha = 7,35 \cdot 10^{-4} \text{ jour}^{-1}, W = 15,3 \cdot 10^5 m^3$;
- **Sr Bourdim** : $\alpha = 1,89 \cdot 10^{-4} \text{ jour}^{-1}, W = 36,6 \cdot 10^5 m^3$;
- **Sr Titri** : $\alpha = 1,04 \cdot 10^{-4} \text{ jour}^{-1}, W = 116 \cdot 10^5 m^3$.

VI. Caractéristiques hydrodynamiques :

L'étude hydrodynamique que nous allons présenter ci-dessous a pour principal objectif de faire la synthèse des principales connaissances acquises sur l'aquifère du massif dunaire de Bouteldja. Elle se fixe également pour objectif de déterminer les principaux paramètres entrant dans l'estimation du bilan.

VI.1. Géométrie de l'aquifère :

Les données des sondages mécaniques et électriques permettent de définir un aquifère continu dans les formations sableuses de granulométrie fine à moyenne. Localement, ces formations peuvent renfermer des proportions plus au moins importante d'argile.

Cet important réservoir repose sur un substratum argilo – gréseux du numidien dont la profondeur varie de 300 m dans la zone d'El Haraba à +50 m au Sud - Est de la région d'étude.

Les essais de corrélation entre les différents logs de sondages permettent de mettre en évidence une relation assez nette au Sud entre la nappe libre du massif dunaire et la nappe des graviers (fig.26). Cette dernière draine en fait la nappe libre sur toute la limite Sud.

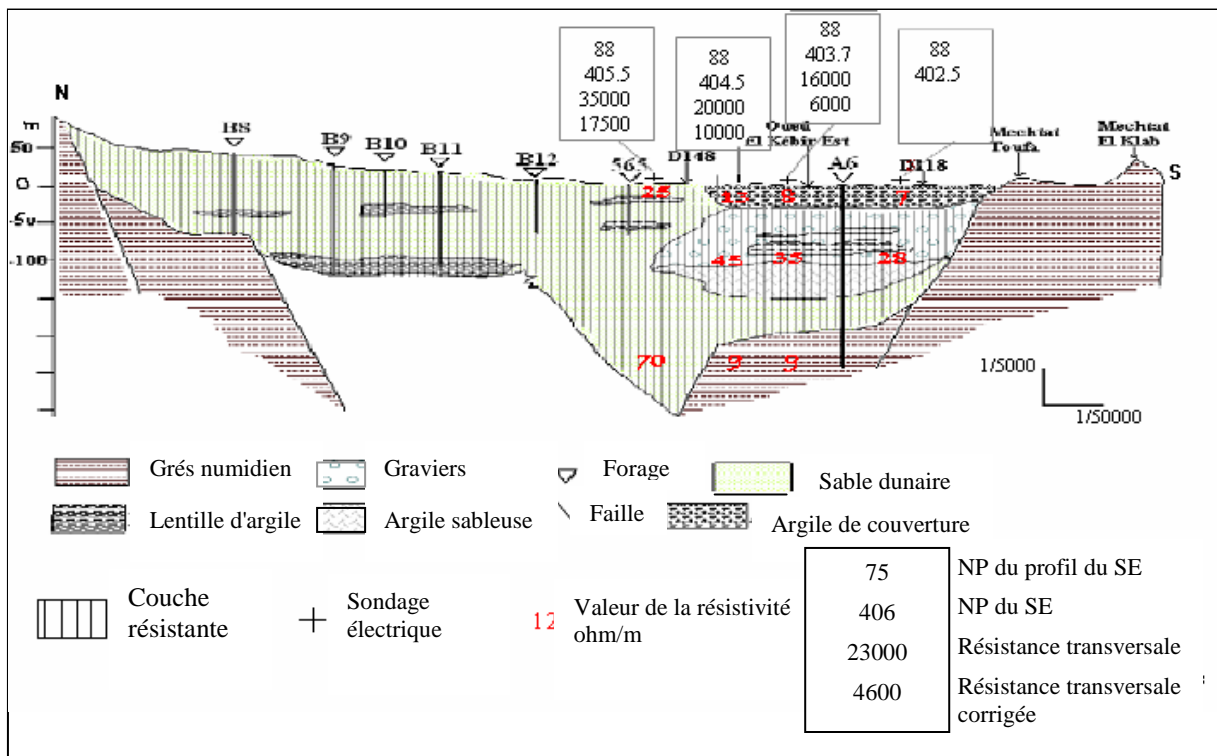


fig.26: Interprétation hydrogéologique (D'après B.Gaud, 1976).

VI.2. La répartition des forages dans le massif dunaire de Bouteldja :

Un grand nombre de forages de différentes profondeurs ont été implantés dans la nappe du massif dunaire, la plupart des forages se localise précisément dans la partie Est du massif dunaire (fig. 27). La profondeur de ces forages renseigne sur le type de la nappe.

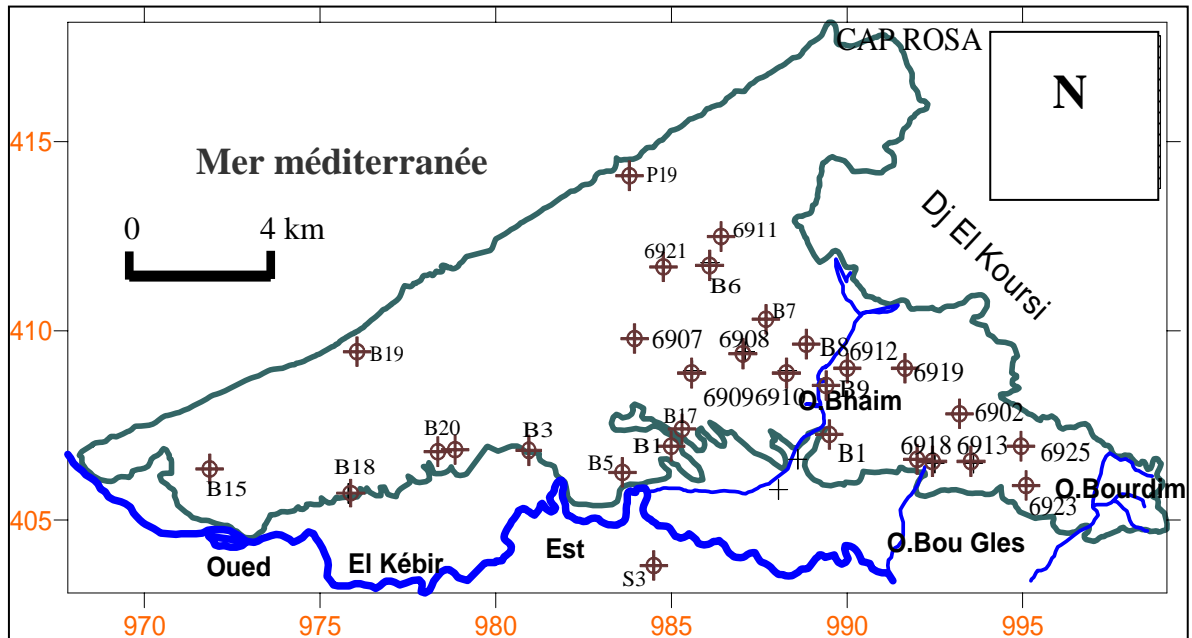


fig. n°27 : Carte de la répartition des forages dans le massif dunaire de Bouteldja.

VI.3. Interprétation des résultats des pompages d'essai :

Par application des méthodes graphiques: méthodes de Jacob, on a interprété les résultats des pompages d'essais.

VI.4. Caractéristiques hydrodynamiques de la nappe libre:

Les valeurs des paramètres hydrauliques de l'aquifère (épaisseurs saturées, transmissivités, perméabilités et coefficients d'emménagement) sont données dans le tableau (voir annexe).

En général, les forages ont montré une grande dispersion des valeurs de transmissivité provoquée essentiellement par des variations importantes de la puissance de l'aquifère et de sa perméabilité.

VI.4.1. Epaisseur saturée :

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 (fig.28):

- 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 Necha Righia et de Oum Lagereb.
- La puissance la plus faible est atteinte à l'Ouest dans la région de Bourdim, Dj.Siah, et Dj Kourssi 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.

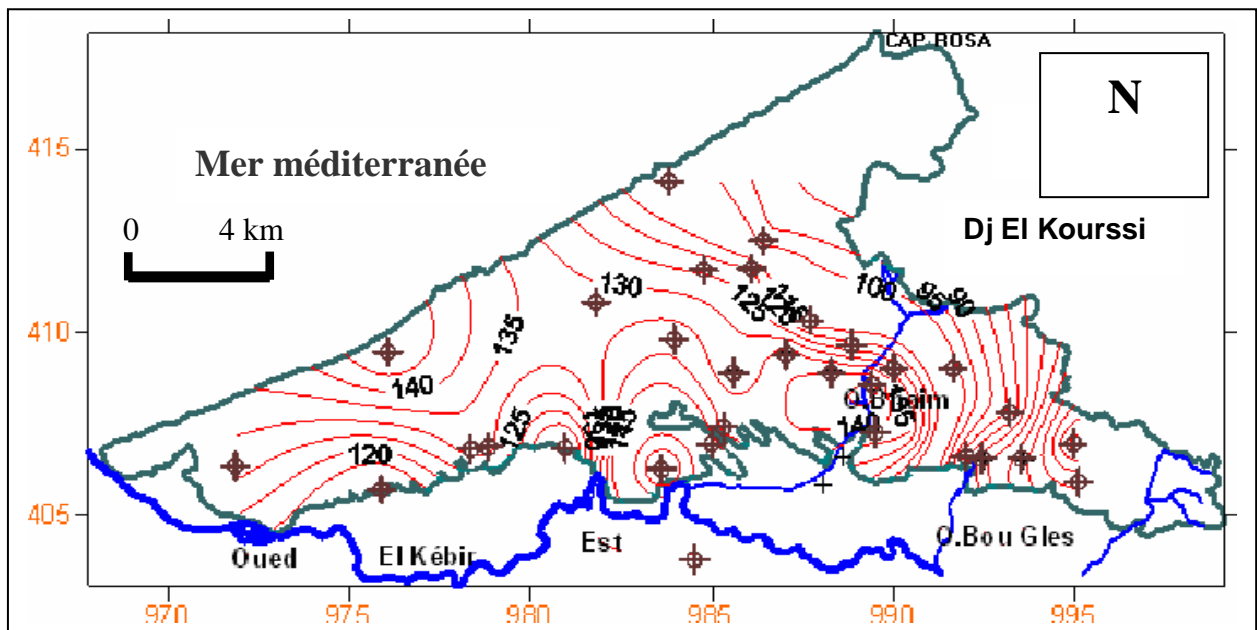


fig.28: Carte d'égal épaisseur de la couche saturée de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja.

VI.4.2. Transmissivités :

D'une façon générale, la répartition statistique des transmissivités montre une grande dispersion des valeurs. L'analyse de la carte des transmissivités 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 et qui constitue la zone franche avec les dunes.

Géographiquement (fig.29), nous remarquons que les valeurs de transmissivités comprises entre 1 et $3.10^{-3} m^2/s$ se répartissent de l'oued au Nord - Ouest de la zone d'étude. Au Sud, Sud Est par contre les transmissivités s'améliorent et passent de 1 à $0.7.10^{-2} m^2/s$.

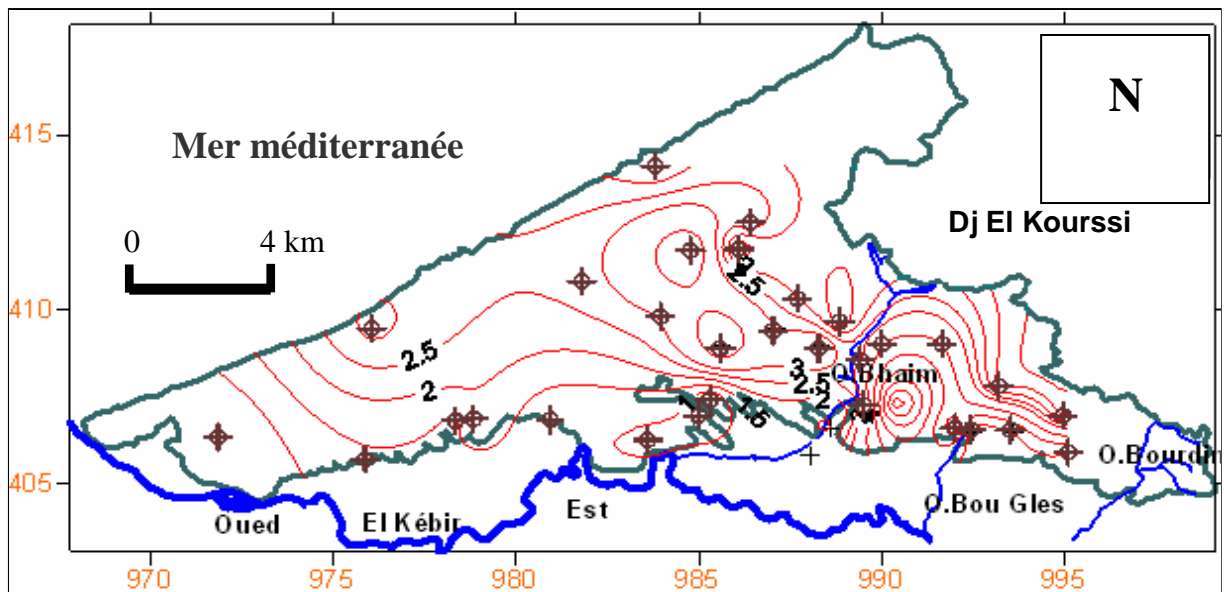


fig.29: Carte de répartition des transmissivités en $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja.

VI.4.3. Perméabilités :

Pour évaluer la perméabilité des formations dunaires, on a représenté sur la figure ci-dessous la transmissivité de chaque ouvrage en fonction de l'épaisseur saturée. Cette relation permet d'évaluer le coefficient de perméabilité (selon Darcy) K , qui est égale au rapport T/b de la transmissivité à la puissance de l'aquifère b .

D'une manière générale, on constate une très grande dispersion des valeurs, l'ensemble des 33 points se situe entre deux droites de pentes 2,5 et 1. Le coefficient de perméabilité est donc compris entre :

$$K = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$$

$$K = 1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s.}$$

La répartition statistique des valeurs de K , obtenues sur les 33 ouvrages en faisant le rapport de la transmissivité à l'épaisseur saturée, permet de déduire les caractéristiques suivantes (fig.30):

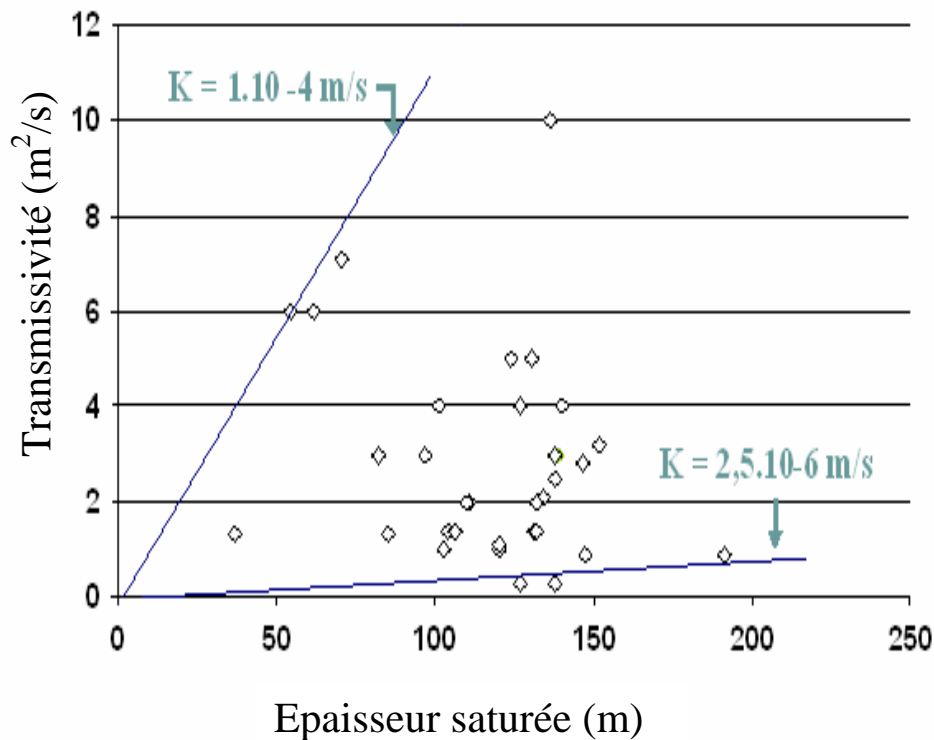


fig.30: Estimation de la perméabilité des sables dunaires de Bouteldja.

- La valeur moyenne est de $4 \cdot 10^{-5}$ m/s
- La valeur maximale obtenue sur le forage 6925 est de $3,5 \cdot 10^{-4}$ m/s
- La valeur minimale au forage B1 est de l'ordre de $3,6 \cdot 10^{-3}$ m/s. près de trois valeurs sur quatre (74%) sont comprises entre $5 \cdot 10^{-6}$ m/s et $5 \cdot 10^{-5}$ m/s.

Si on suit la répartition géographique des perméabilités (fig.31), on constate que les valeurs se distribuent de la manière suivante:

* Les plus fortes valeurs, perméabilités supérieures à $1 \cdot 10^{-4}$ 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 $1 \cdot 10^{-5}$ 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.

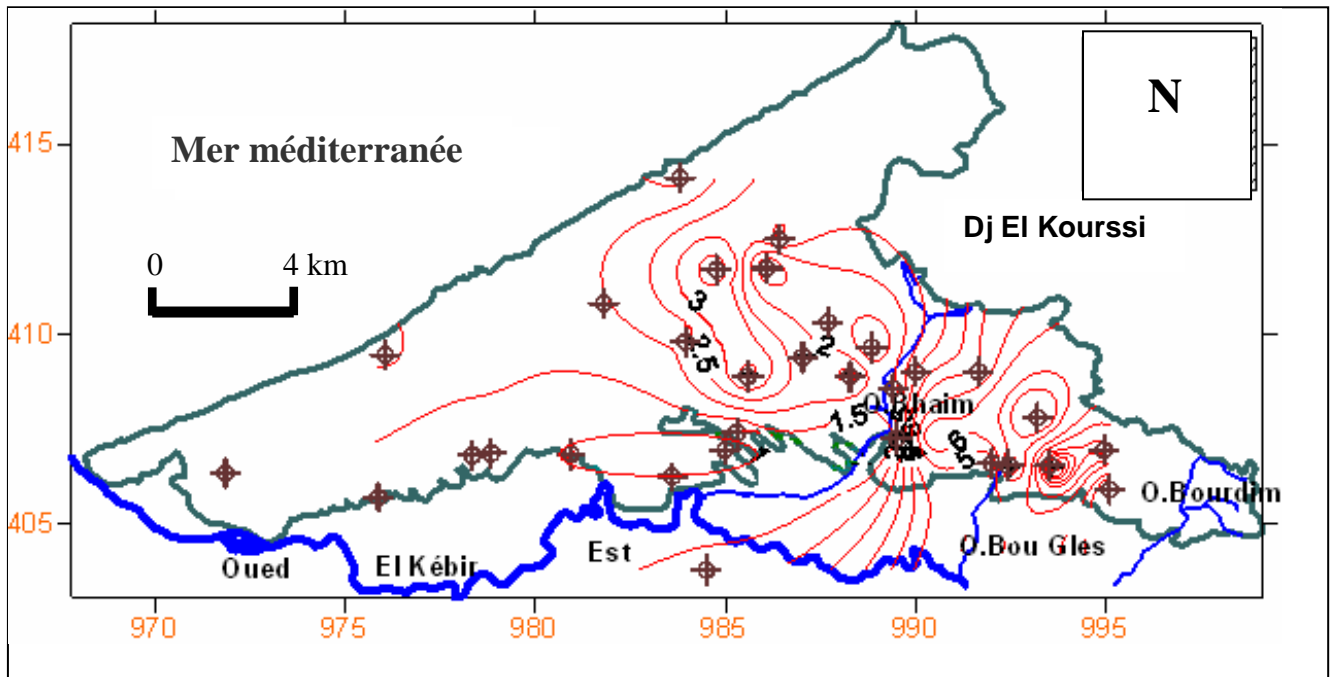


fig.31: Carte de répartition des perméabilités en 10^{-5} m/s de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja

VI.4.4. Coefficients d'emménagement :

Le coefficient d'emménagement est utilisé pour caractériser plus précisément le volume d'eau exploitable, il conditionne l'emménagement de l'eau souterraine mobile dans les vides du réservoir.

Dans l'ensemble, les valeurs du coefficient d'emménagement sont assez homogènes avec une moyenne de 13%. Valeurs conformées à celle obtenues par B.Gaud (1976) et N. Kherici (1985).

Les valeurs se situent entre 24% au niveau du B11 et 1.4% au forage B5. Localement, la nappe peut être sous pression sous les formations argileuses et les valeurs du coefficient d'emménagement pourraient être plus faibles (fig.32).

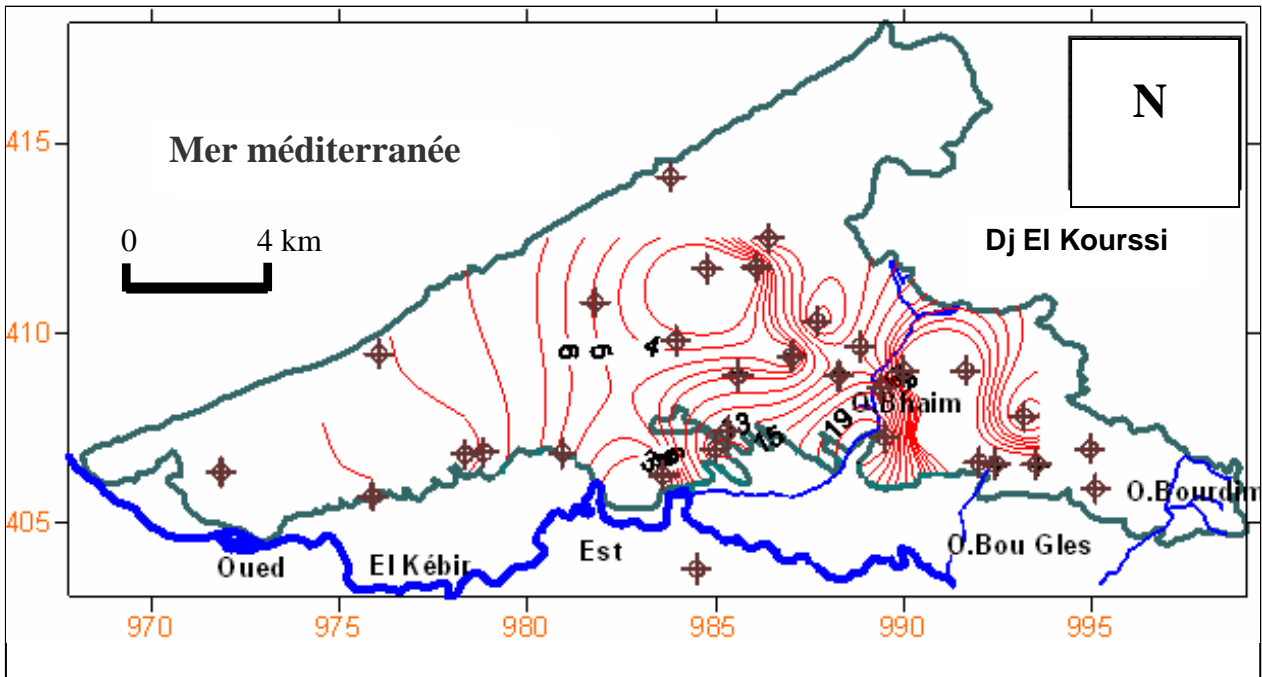


fig.32: Carte du coefficient d'emmagasinement de la nappe du massif dunaire de Bouteldja.

VI.5. Exemples d'interprétation des données de pompages d'essai :

Pour illustrer les essais effectués dans la nappe du massif dunaire nous donnerons ci - après quelques exemples (Forage F2 et 565):

VI.5.1. Au forage F2 :

Le forage F2 a été réalisé en 1989 dans la région de Bordj Ali Bey (X= 492.150m:Y=408.400 m), le forage a traversé 81 m de sables aquifères.

Pendant le pompage de 48 h à débit constant $Q = 4.5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ le niveau statique dans le forage est à 7.55 m. La remontée des niveaux dynamiques, après arrêt du pompage, a été observée pendant 22 h. Les données pompage d'essai, rabattements en mètre et temps de pompage en secondes reportées sur un papier semi-logarithmique donnent la droite représentative (fig. 34). La pente de la droite permet de calculer la transmissivité de l'aquifère au voisinage du forage :

$$T = \frac{0,183 \cdot 0,045}{0,6} = 5,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 / \text{s}$$

Les rabattements résiduels reportés sur un papier semi-logarithmique, en fonction de la quantité $(1 + t_p/t_r)$, donnent la droite de la figure 34 :

$$T = \frac{0,183 \cdot 0,045}{2,7} = 3,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 / \text{s}$$

On constate que les deux valeurs sont très proches et permettent de déduire une valeur moyenne de T de l'ordre de $4,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

VI.5.2. Essai par paliers de débits au forage 565 :

Le forage 565 a été implanté dans la région de Righia (X = 989.05 : Y = 405.80) (fig.33) et à travers la coupe géologique suivante :

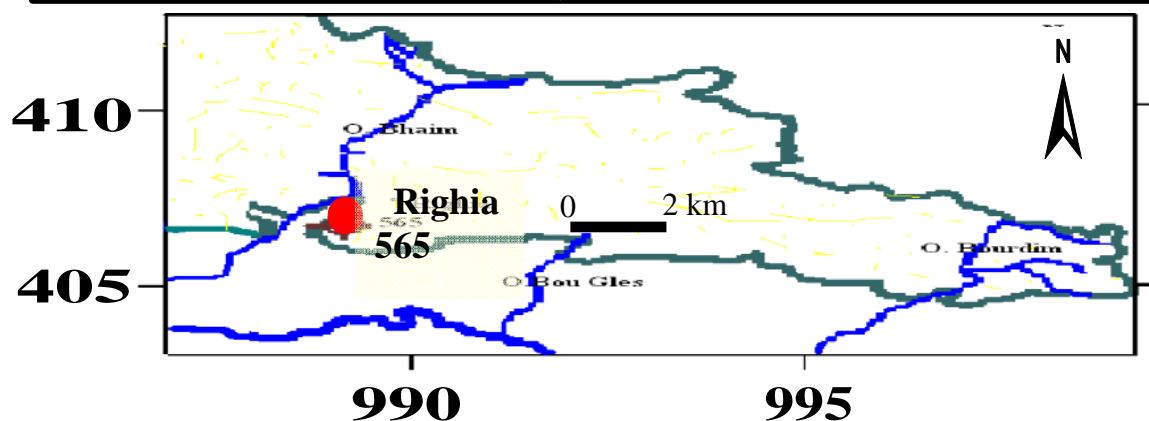
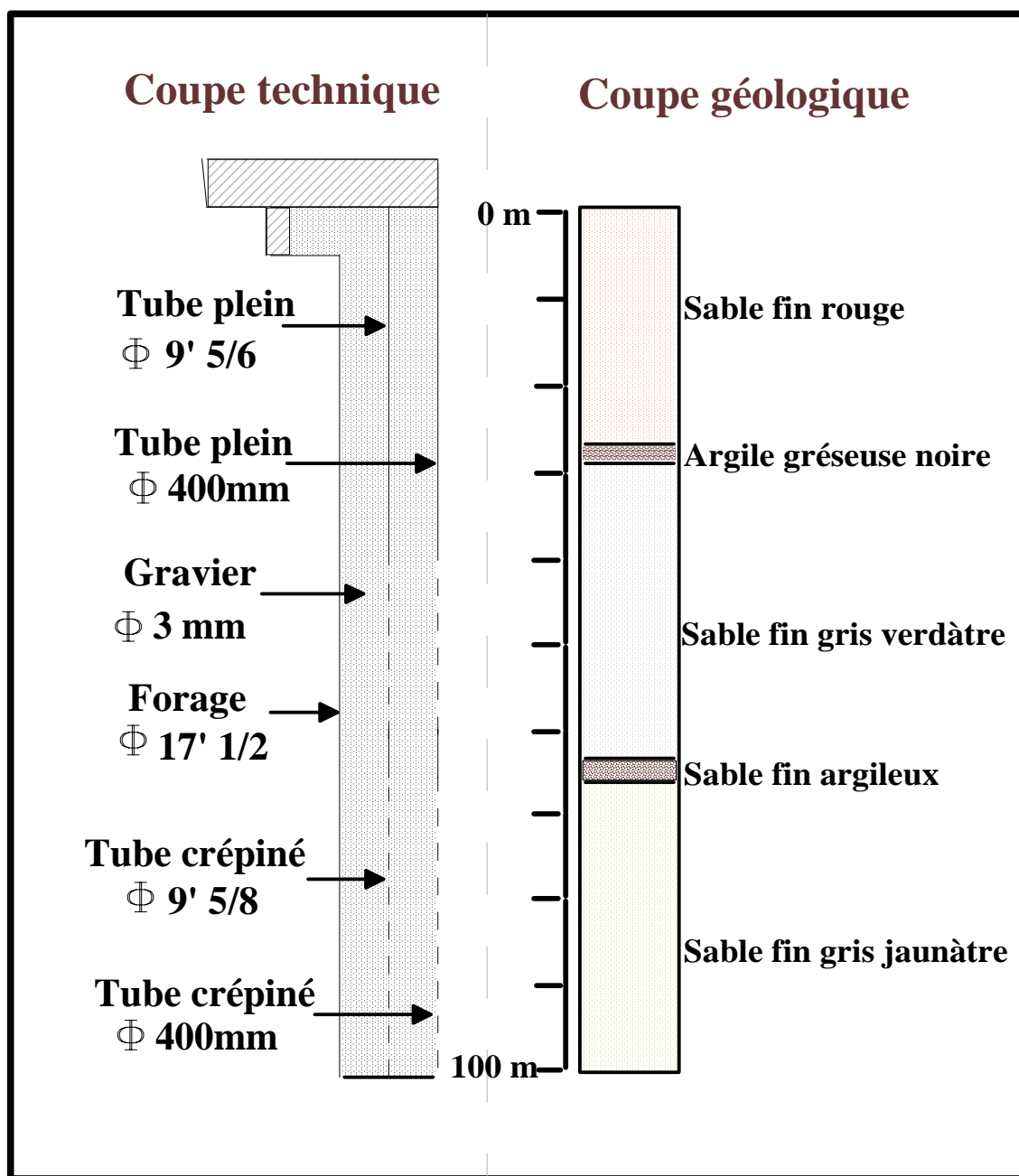


Fig.33 : Log stratigraphique du forage 565 de Righia et sa localisation géographique.

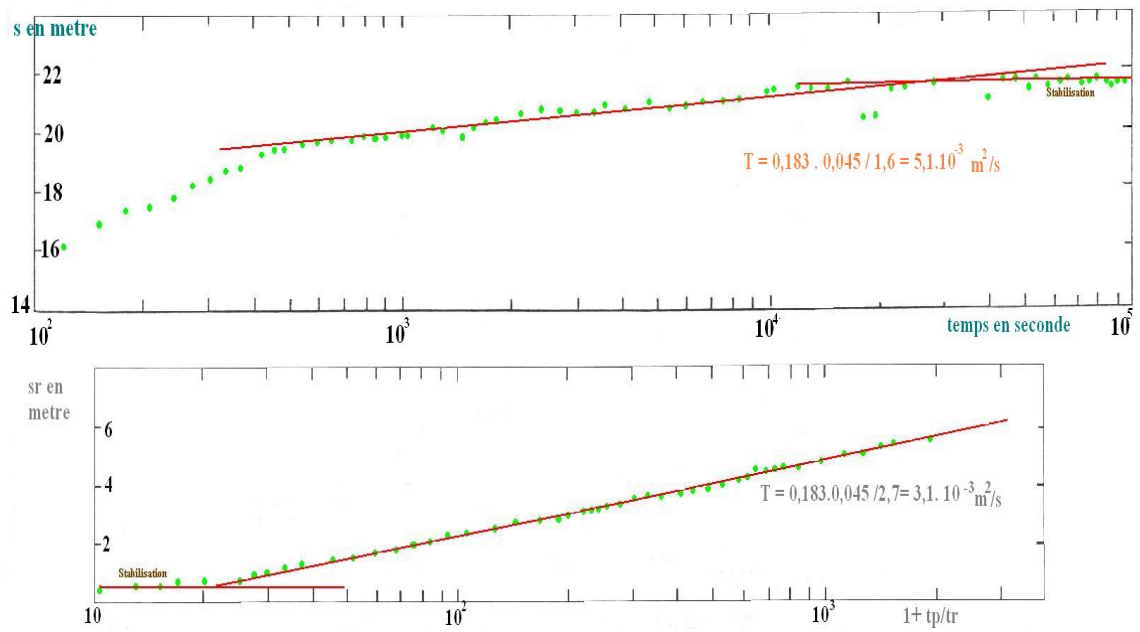


fig.34 : Graphique de la descente et de la remontée dans le forage F2 (Bordj Ali Bey).

- 0 à 26,5 m : sable fin rouge;
- 26,5 à 28,5 m : argile gréseuse noire;
- 28,5 à 62 m : sable fin gris verdâtre;
- 62 à 65 m : sable fin argileux;
- 65 à 100 m : sable fin gris jaunâtre.

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.

L'espace entre ces deux colonnes étant remplis de graviers de 0 à 3 mm de diamètre (fig.33). 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 :

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

Tableau n° 19 : Essai par paliers de débits au forage 565

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.

VI.5.3. Courbe de descente :

☞ Courbe $s/Q = f(t)$;

Les données du pompage par paliers enchaînés, rabattements spécifiques (s/Q en m/l/s) et le temps (t en seconde), reportées sur un papier semi_ logarithmique donnent les droites représentatives (fig. voir annexe). Les valeurs de la transmissivité sont :

① Le 1^{er} palier pour $Q = 8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ on aura :
 $T = 0.183 / c = 0.183 / 0.089 \cdot 10^3 = 2.1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

② Le 2^{eme} palier pour $Q = 1.2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ on aura :
 $T = 0.183 / 0.014 \cdot 10^3 = 4.1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

③ Le 3^{eme} palier pour $Q = 2.02 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ on aura :
 $T = 0.183 / 0.018 \cdot 10^3 = 2.35 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

Fig. : Log stratigraphique du forage 565 de Righia et sa localisation géographique

Pour la courbe de remontée (fig. 35) ;
La transmissivité calculée est de $8,8 \cdot 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$.

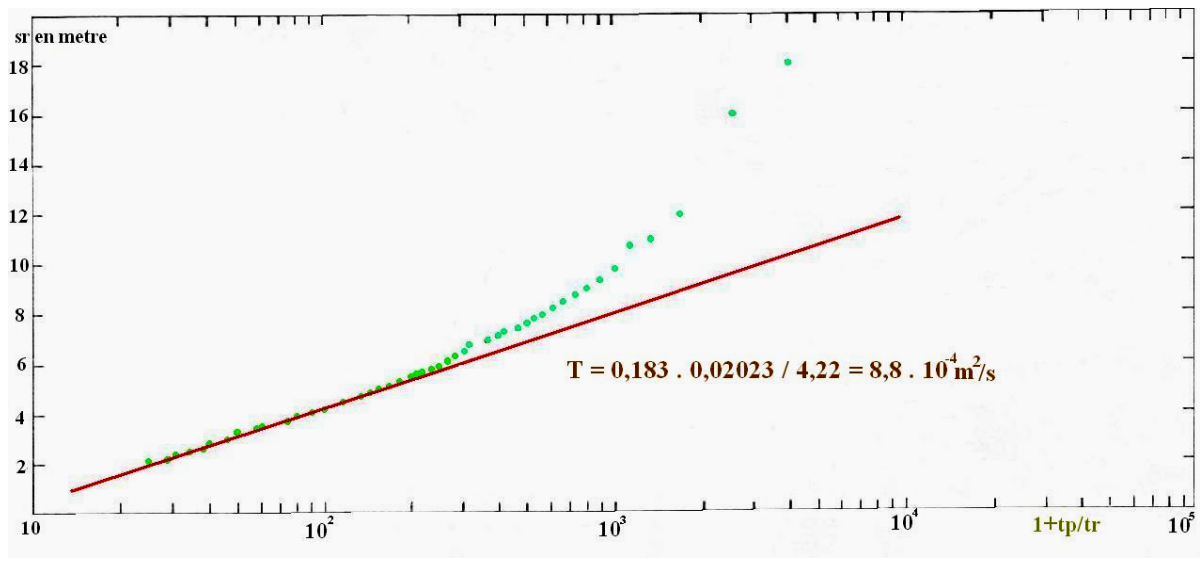


fig.35 : Graphique de remontée par palier de Débits enchaînés $s = f(\log t)$ dans le forage 565.

VI.6. Conclusion :

L'étude piézométrique nous a permis de distinguer deux directions d'écoulement souterrain bien distinctes :

✱ Un écoulement se dirige du centre du massif dunaire vers la mer au Nord : l'alimentation de la nappe se fait essentiellement à partir des précipitations abondantes et la nature pétrographique des dunes sont favorables à une infiltration importante.

✱ Un écoulement qui se dirige vers le Sud et alimentant les marécages, les oueds et la nappe des graviers. Les profondeurs du niveau de la nappe se situent entre + 0.75 m (dans les forages de l'oued El B'haim) et -16.6 m (dans le forages B1).

Les mécanismes de l'écoulement des eaux naturelles (conditions aux limites) s'expliquent comme suite :

- Au Nord, la mer méditerranée représente un exutoire à la nappe;
- A l'Est, les formations du grès numidiens constituent soient des limites perméables si les grès sont peu argileux, soient des limites imperméables lorsque la trame argileuse est importante.

- Au Sud, suivant une ligne parallèle à l'oued El Kébir Est et en reliant Djebel Bourdim à la Mafragh, les bordures d'El Kébir Est représentent un second exutoire de la nappe libre.

La relation oued – nappe est confirmée du débit d'El Kébir Est qui s'accroît régulièrement en allant de l'amont vers l'aval.

○ A l'Ouest, un substratum qui semble profond qu'à l'Est, sur lequel repose la formation de l'aquifère libre. Il peut être imperméable à semi perméable.

Les sources étudiées sont toutes pérennes (débitent durant toute l'année). L'étude du tarissement des sources d'eau captant de la nappe dunaire de Bouteldja (Sr Bou Glès, Sr Bourdim et Sr Titri) nous a permis de calculer le volume d'eau emmagasiné (W) dans la couche aquifère alimentant le débit de tarissement à partir du coefficient de tarissement (α) :

- Sr Bou Glès : $\alpha = 7,35 \cdot 10^{-4} \text{ jour}^{-1}$, $W = 15,3 \cdot 10^5 \text{ m}^3$;
- Sr Bourdim : $\alpha = 1,89 \cdot 10^{-4} \text{ jour}^{-1}$, $W = 36,6 \cdot 10^5 \text{ m}^3$;
- Sr Titri : $\alpha = 1,04 \cdot 10^{-4} \text{ jour}^{-1}$, $W = 116 \cdot 10^5 \text{ m}^3$.

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 Bou Glès avec des valeurs supérieures à $5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, tandis que les zones à faibles transmissivités ($< 5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$) 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 $3,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

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

✧ Les coefficients d'emmagasinement varient de 1,4% à 24% avec une valeur moyenne de 18%. Les essais n'ont pas permis de mettre en évidence les zones où la nappe est en charge les formations argileuses.

Chapitre IV

"Etude Hydrochimique "

I. La chimie des eaux :

I.1. Introduction :

L'étude chimique de l'eau joue un rôle important dans la détermination de sa qualité, donc de la possibilité de son utilisation pour l'alimentation en eau potable ou pour d'autres usages (irrigation, industrie....).

La composition chimique de l'eau peut évoluer durant son transit, ainsi l'information recueillie au niveau de la source est fonction de la nature du réservoir et également des minéraux rencontrés, du temps de transit et des conditions permettant ou non la conservation des hétérogénéités du réservoir à l'exutoire.

I.2. Mode d'échantillonnage et acquisition des données :

Cette étude chimique est fondée sur une analyse complète des échantillons au niveau des sources réparties dans le massif dunaire de Bouteldja (les coordonnées géographiques sont montrées dans l'annexe) (fig. 36).

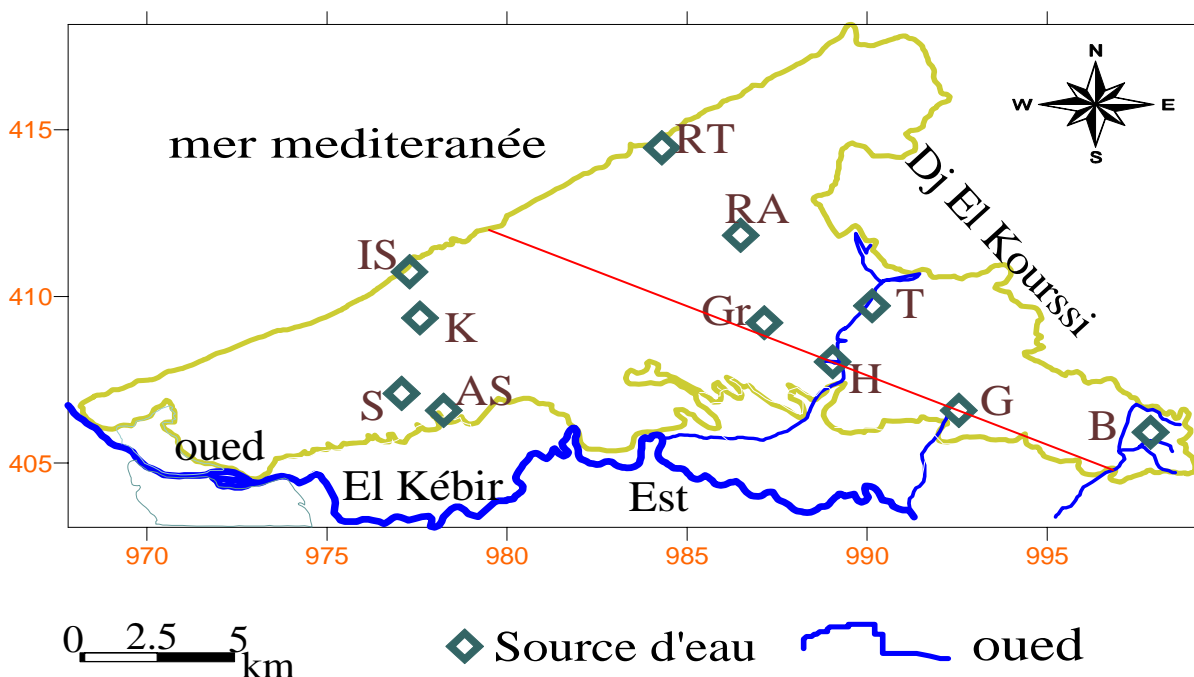


fig. 36 : Localisation géographique des onze sources dans le massif dunaire de Bouteldja.

Pour atteindre cet objectif, deux (02) campagnes de prélèvement et d'analyses ont été réalisées, la première se rapporte au mois de janvier 2007 et l'autre concerne le mois de juillet 2007. Onze (11) sources réparties à travers le massif dunaire de Bouteldja ont fait l'objet de mesures sur site et ont porté sur les paramètres physiques suivant : pH, conductivité électrique

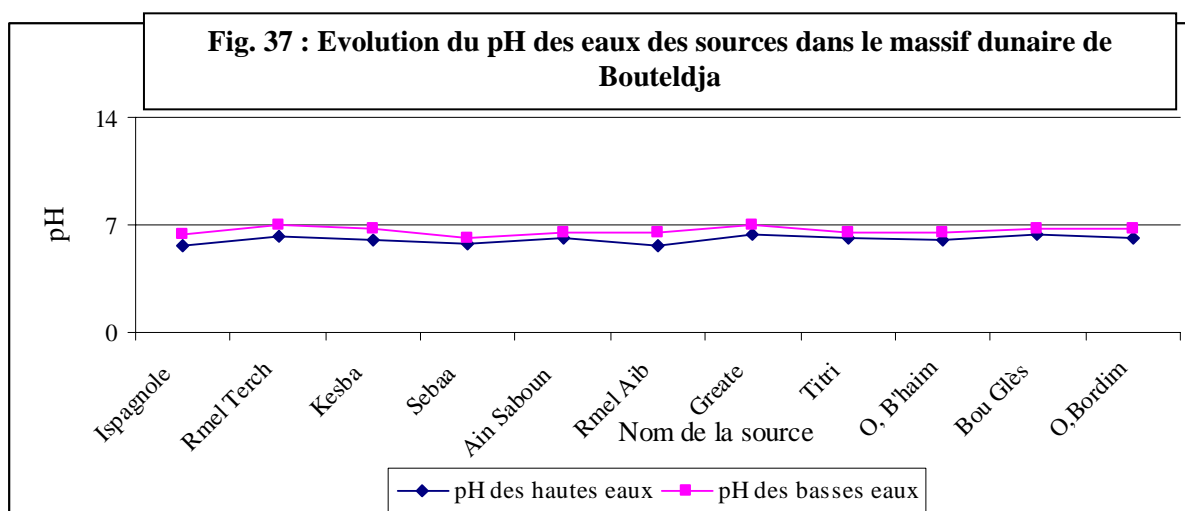
et la température. Par ailleurs, l'analyse chimique effectuée en labo a porté sur les éléments suivants: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- et aussi sur l'oxygène dissous, le résidu sec, l'ammonium, les nitrites et les nitrates (les analyses ont été faites au niveau du laboratoire centrale de Constantine).

II. Etudes des paramètres physiques :

II.1. Le potentiel d'Hydrogène (pH) :

Le pH (potentiel Hydrogène) mesure la concentration en ions H^+ de l'eau. Il traduit ainsi la balance entre acide et base sur une échelle de 0 à 14, 7 étant le pH de neutralité. 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 résultats des mesures du pH sont enregistrés sur le tableau.

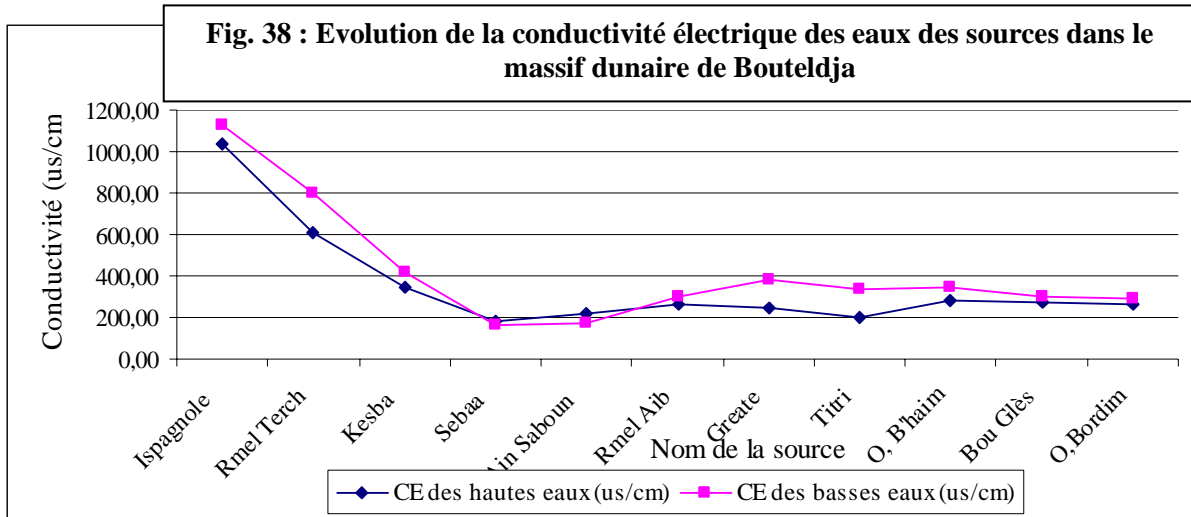


Le pH des eaux naturelles est lié à la nature des terrains traversés. D'une manière générale les eaux du massif dunaire de Bouteldja (fig.37) présentent un pH oscillant entre 5.5 et 7 proche de la neutralité. Donc, les eaux de la nappe dunaire de Bouteldja sont dans l'ensemble acides.

II.2. La Conductivité électrique (CE):

La conductivité mesure la capacité de l'eau à conduire le courant entre deux électrodes. La plupart des matières dissoutes dans l'eau se trouvent sous forme d'ions chargés d'électron. La mesure de la conductivité permet donc d'apprécier la quantité de sels dissous dans l'eau.

La conductivité est également fonction de la température de l'eau : elle est plus importante lorsque la température augmente. Les résultats de mesure doivent donc être présentés en terme de conductivité équivalente à 25°C. Les appareils de mesure utilisés sur le terrain effectuent en général automatiquement cette conversion.

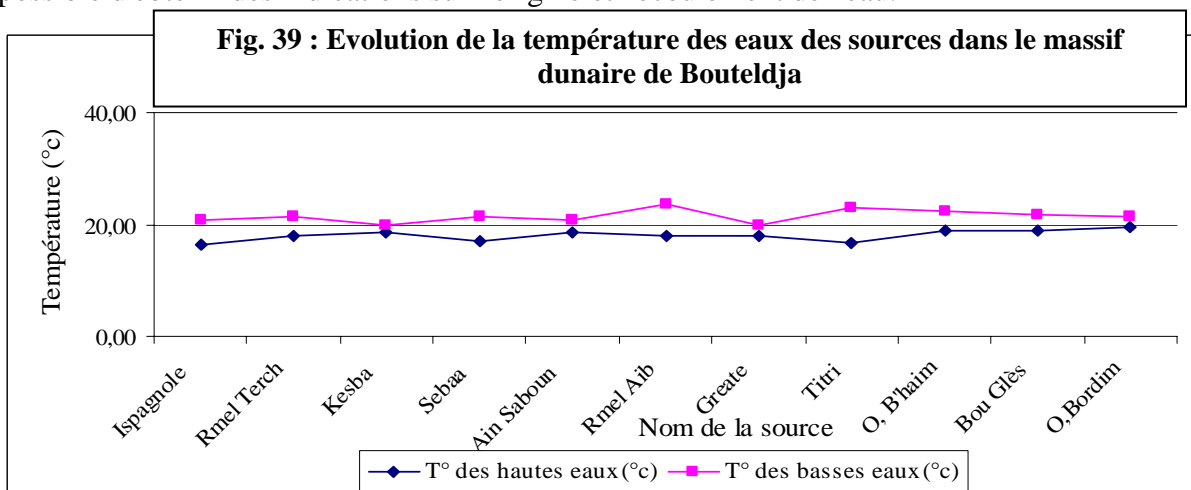


Les résultats des mesures ont permis d'observer la variation de la conductivité (fig.38), montrant que celle-ci variée entre 150 et 1100 $\mu\text{s}/\text{cm}$ et ceci pendant les deux périodes considérées. Les valeurs de CE diminuent en s'éloignant du littoral en allant à l'intérieur du massif dunaire. La présence des marécages influence de plus sur l'augmentation de CE (le cas de Greate et le secteur oued B'haim).

II.3. La Température (T):

La température de l'eau est un paramètre important car elle permet de déterminer l'utilisation des eaux pour le confort des usagers. Elle permet également de corriger les paramètres d'analyse dont les valeurs sont liées à la température (conductivité notamment).

De plus, en mettant en évidence des contrastes de température de l'eau sur un milieu, il est possible d'obtenir des indications sur l'origine et l'écoulement de l'eau.



La température des eaux (fig.39) avoisine toujours 20°C et ceci durant les deux périodes d'observations.

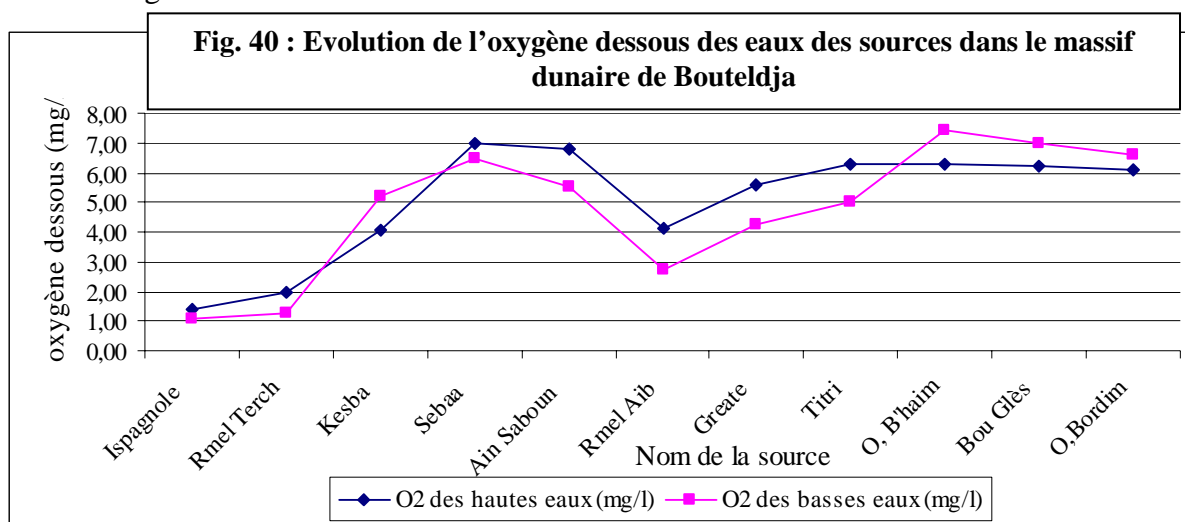
III. Etude des paramètres chimiques:

III.1. Oxygène dessous (O₂):

Exprime la concentration en (mg/l) d'oxygène dessous, sa présence dans les eaux superficielles joue un rôle dans le maintien de la vie aquatique. La diminution de sa teneur génère un milieu favorable à la fermentation et aux dégagements d'odeurs.

L'appauvrissement du milieu en O₂ dissous provoque le développement d'algues et végétaux ainsi que l'apparition de pollution bactériologique (Rodier, 1996).

Sa solubilité baisse avec l'augmentation de la température et sa densité diminue dans un milieu chargé en sel.

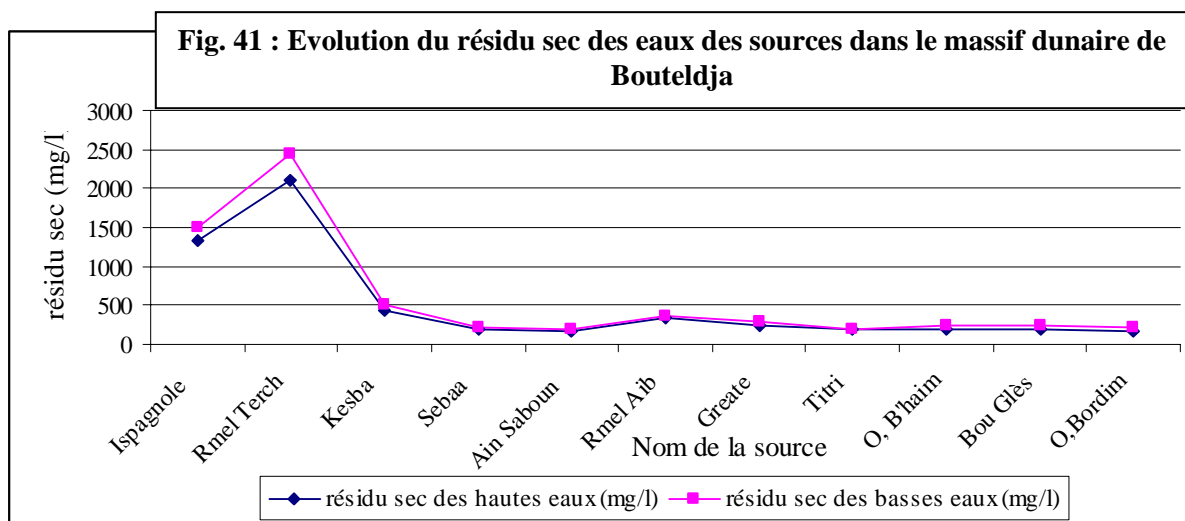


D'une façon générale, les teneurs en oxygène dessous (O₂) sont comprises entre 1 et 7 mg/l (fig.40), ces teneurs n'expriment pas une forte pollution organique.

Les faibles teneurs sont remarquées au niveau de Rmel Terch et la source Espagnole (<2).

III.2. Résidu sec (Rs):

Les analyses chimiques des résidus secs dans le massif dunaire de Bouteldja montrent que les valeurs les plus répandues s'échelonnent entre 150 et 250 mg/l. La faiblesse du résidu sec s'explique par le fait que les eaux de la nappe dunaire circulent rapidement dans des terrains essentiellement siliceux où les ions solubles ont été en grande partie lessivés.



Les valeurs les plus basses, inférieure à 200 mg/l, apparaissent au niveau du secteur oued B'haim, secteur Sebaa, Bou Glès et Bourdim dans le massif dunaire de Bouteldja, il y a toutefois dans le secteur, une anomalie à 300 mg/l qui contourne la zone marécageuse d'El Goureate et Sr Kesba.

Alors que dans la zone proche du littoral et la moitié occidentale du massif dunaire semblent être caractérisées par un résidu sec plus élevé, atteignant les 2500 mg/l pour la source de Rmel Terch mettant ainsi en évidence le rôle de l'évaporation dans l'augmentation de la salinité et donc sur la teneur du résidu sec (fig.41).

III.3. Les ions majeurs :

La minéralisation de la plupart des eaux est dominée par huit ions appelés couramment les ions majeurs. On distingue les cations : calcium, magnésium, sodium et potassium, et les anions : chlorures, sulfates, et bicarbonates et nitrates.

Notre étude hydrochimique a été menée sur les onze (11) sources (fig.36), la critique des données est faite par la vérification de la précision des analyses chimiques en calculant la balance ionique (BI) qui est la suite (Djabri, 1996) :

$$BI = \frac{(\sum \text{cations} - \sum \text{anions})}{(\sum \text{cations} + \sum \text{anions})} \times 100 \%$$

Dans l'ensemble, les échantillons analysés ont des BI < 6 %, on les a considéré comme fiables, malgré les erreurs dues à la méthodologie employée et aux éléments non dosés.

IV. Faciès chimiques :

Cependant le rapport des valeurs, après avoir calculer la balance ionique, nous a permet de déterminer les faciès chimiques de chaque une des sources qui sont réparties dans le massif dunaire de Bouteldja. Le tableau ci – dessous représente les faciès chimiques des sources :

La source	Formule ionique	Faciès chimique
<i>Sr Bou Glès (G)</i>	$rNa^+ > rMg^{++} > rCa^{2+}, rCl^- > rSO_4^- > rHCO_3^-$	Chloruré sodique
<i>Sr Titri (T)</i>	$rNa^+ > rMg^{++} > rCa^{2+}, rCl^- > rSO_4^- > rHCO_3^-$	Chloruré sodique
<i>Sr oued Bourdim (B)</i>	$rNa^+ > rMg^{++} > rCa^{2+}, rCl^- > rSO_4^- > rHCO_3^-$	Chloruré sodique
<i>El Greate (Gr)</i>	$rNa^+ > rMg^{++} > rCa^{2+}, rCl^- > rSO_4^- > rHCO_3^-$	Chloruré sodique
<i>Sr Ain Saboun (AS)</i>	$rNa^+ > rMg^{++} > rCa^{2+}, rCl^- > rSO_4^- > rHCO_3^-$	Chloruré sodique
<i>Sr Sebaa (S)</i>	$rNa^+ > rMg^{++} > rCa^{2+}, rCl^- > rSO_4^- > rHCO_3^-$	Chloruré sodique
<i>Sr Rmel El Terch (RT)</i>	$rNa^+ > rMg^{++} > rCa^{2+}, rCl^- > rSO_4^- > rHCO_3^-$	Chloruré sodique
<i>Sr Espagnole (IS)</i>	$rNa^+ > rMg^{++} > rCa^{2+}, rCl^- > rSO_4^- > rHCO_3^-$	Chloruré sodique
<i>Sr Kasba (K)</i>	$rNa^+ > rMg^{++} > rCa^{2+}, rCl^- > rSO_4^- > rHCO_3^-$	Chloruré sodique
<i>Sr Rmel El Aib (RA)</i>	$rNa^+ > rMg^{++} > rCa^{2+}, rCl^- > rSO_4^- > rHCO_3^-$	Chloruré sodique
<i>Sr oued B'haim (H)</i>	$rNa^+ > rMg^{++} > rCa^{2+}, rCl^- > rSO_4^- > rHCO_3^-$	Chloruré sodique

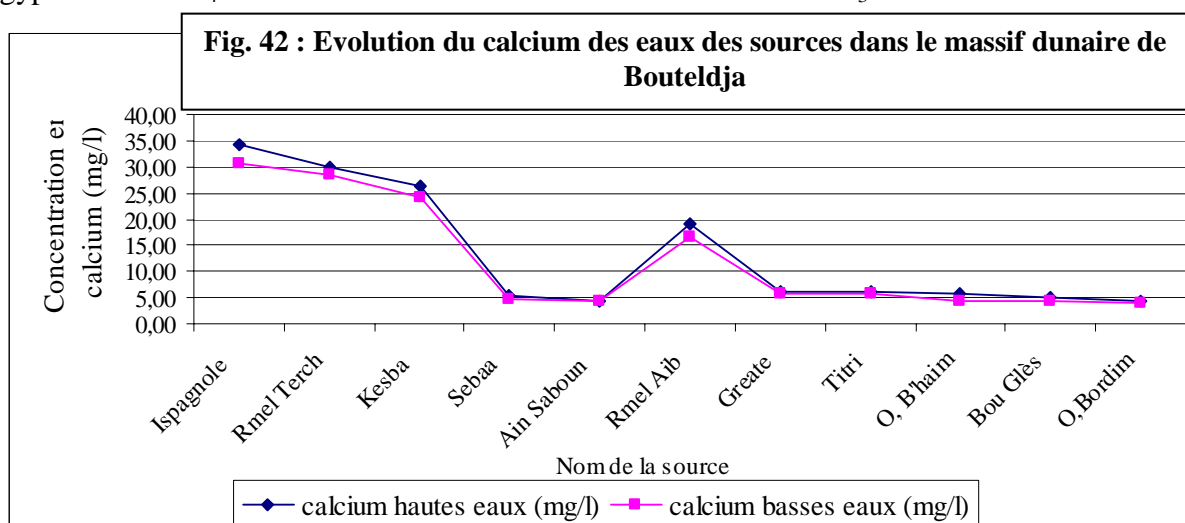
Tableau n°20 : Formule ionique et faciès chimique des eaux des sources réparties dans le massif dunaire de Bouteldja (année 2007).

Les résultats d'analyse chimique effectués et reporté sur le tableau ci - dessus, indiquent qu'au coté cation, le sodium est le cation dominant suivi par le magnésium. Au niveau des anions, les chlorures dominant et sont suivis par les bicarbonates. Pour visualiser cette répartition on a déterminé les faciès chimiques en utilisant le diagramme de STIFF.

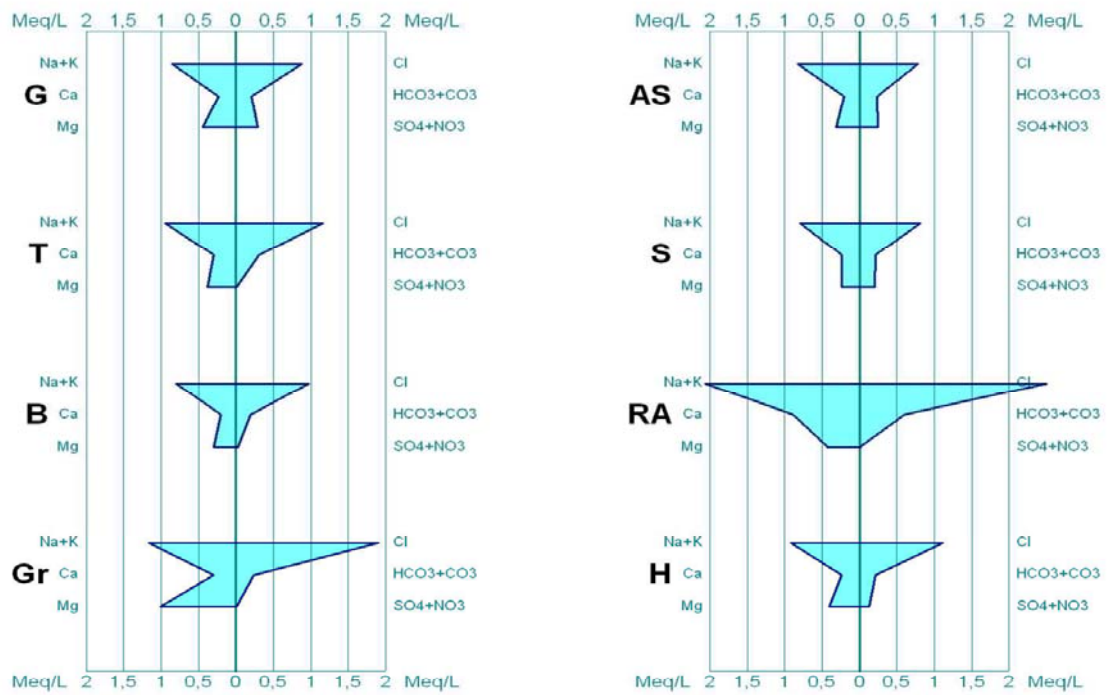
Dans leur totalité, les eaux de la nappe dunaire de Bouteldja présentent (fig.43) un faciès chloruré sodique, en relation avec le lieu de prélèvement et sa géologie locale.

IV.1. Calcium (Ca²⁺) :

Le calcium est un élément essentiel en raison du rôle qu'il joue dans l'utilisation industrielle ou domestique des eaux. Péetrographiquement, la présence des ions de calcium dans l'eau est liée principalement à deux origines naturelles, soit la dissolution des formations gypseuses CaSO₄ et la dissolution des formations carbonatées CaCO₃



Milliequivalent maximal : 2 , interval Meq : 0.5



Milliequivalent maximal : 20 , interval Meq :4

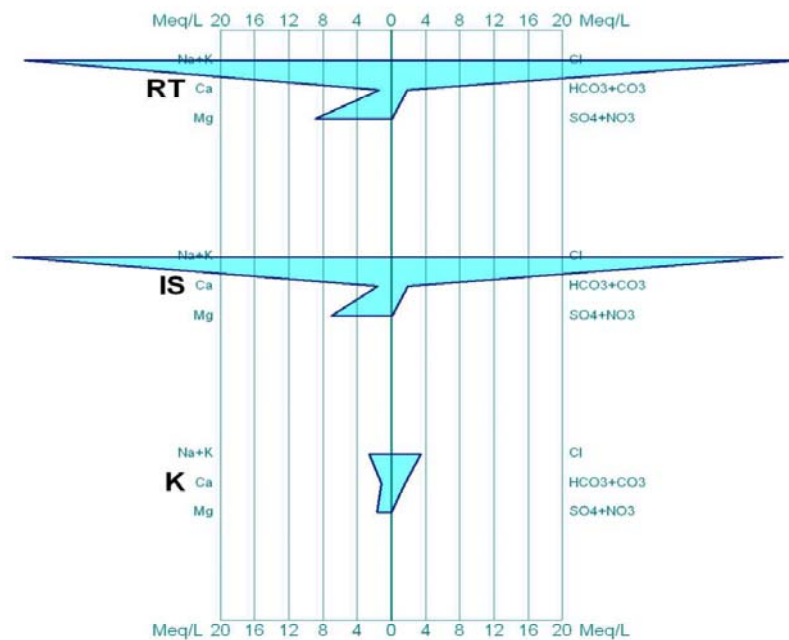


fig.43:Diagramme de Stiff

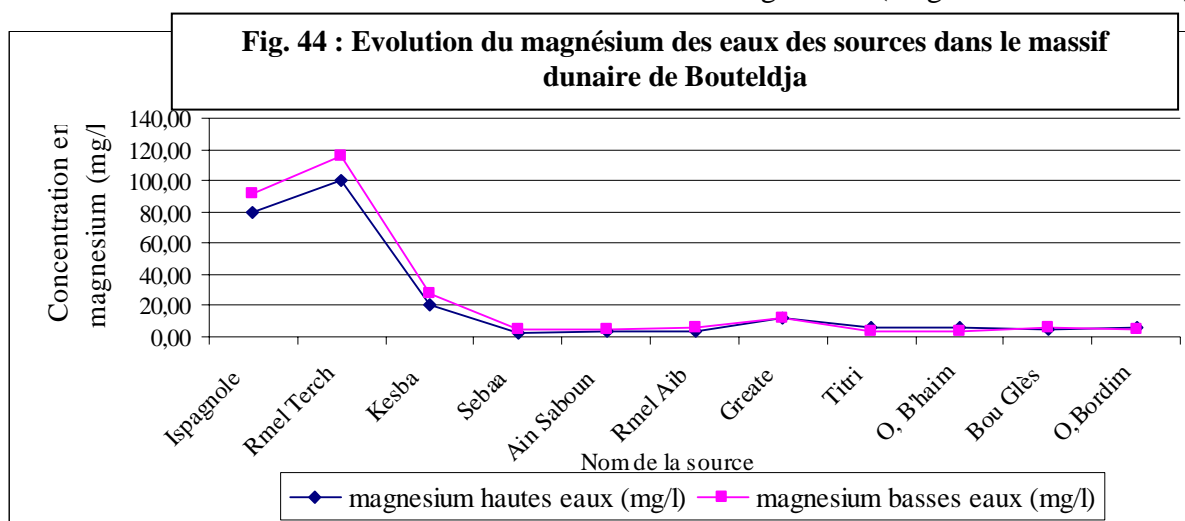
La source Espagnole (fig.42), avec des concentrations en calcium plus importantes atteignant 35 mg/l, indique les plus fortes teneurs et ceci durant les deux périodes d'observations. Pour les sources situées dans le secteur de Sebaa et la partie orientale du massif dunaire, les concentrations en Ca semblent faibles d'une moyenne de 5 mg/l. La répartition de l'élément Ca^{2+} ne semble pas évoluer en fonction du climat.

Dans la nappe dunaire de Bouteldja, la présence du sol en CO_2 libre dissous devrait permettre la mise en solution de quantités élevées de carbonates de calcium CaCO_3 .

Mis à part la source Ispagnole et Rmel Terch où l'on observe une concentration élevée, les eaux demeurent agressives. Cet état de fait nous paraît lié à un lessivage pratiquement complet des ions Ca au niveau du massif dunaire de Bouteldja.

IV.2. Magnésium (Mg^{++}) :

Les origines du magnésium sont comparables à celles du calcium, car il provient de la dissolution des formations carbonatées à forte teneur en magnésium (magnésite et dolomites).



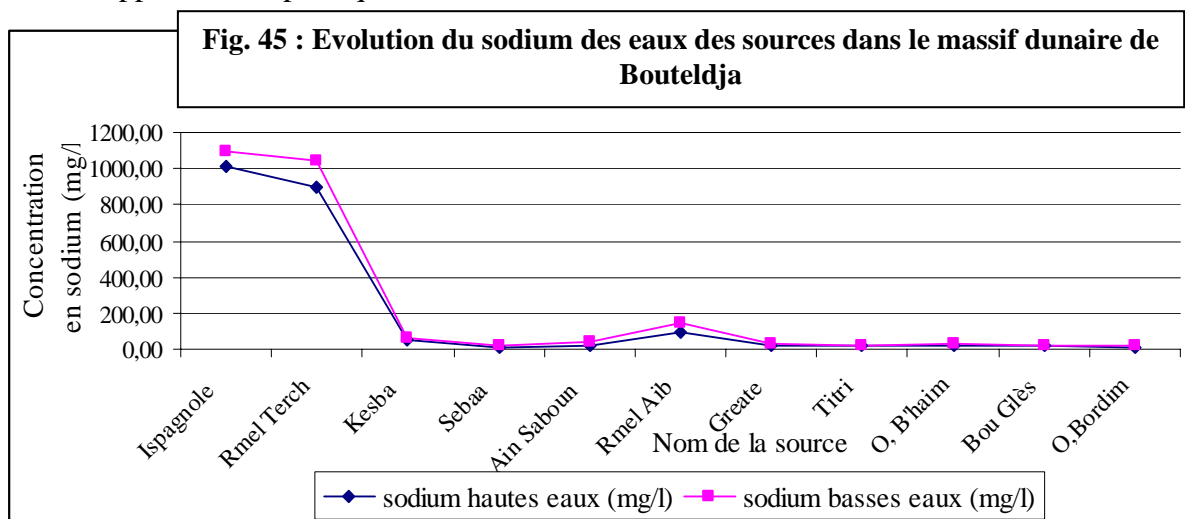
Les teneurs en Mg^{2+} généralement inférieures à 20 mg/l, tendent à croître en dirigeant vers le littoral. Sur l'ensemble de la nappe dunaire de Bouteldja, les teneurs en magnésium sont relativement plus élevées que celles en calcium (fig.44).

Nous pensons qu'il faut voir là un effet de la mise en solution de cet élément, les ions ayant été presque totalement lessivés que celles en Ca.

IV.3. Sodium, Potassium (Na^+ , K^+) :

Le sodium est souvent présent dans les eaux naturelles. En proportions très variables, il provient :

- De l'altération des minéraux silicatés, échanges de cations avec les minéraux argileux ou des substances organiques.
- Des rejets des eaux usées, ainsi que l'épandage des engrais chimiques qui augmentent aussi les concentrations en sodium.
- Apports atmosphériques.



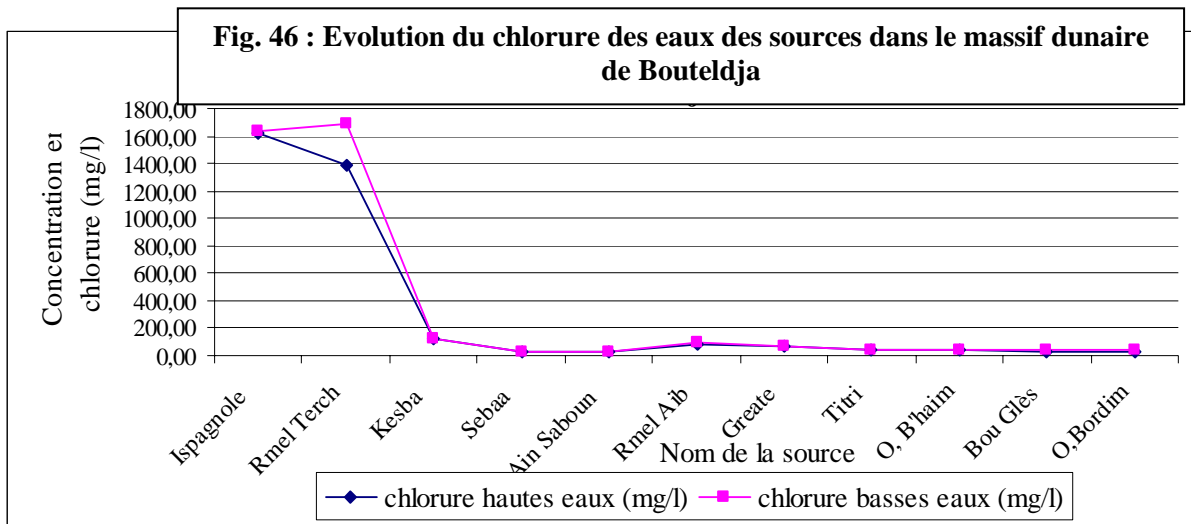
Les teneurs en $\text{Na}^+ + \text{k}^+$ dans la majorité des sources sont généralement inférieures à 25 mg/l (période des basses eaux), l'origine du sodium est liée principalement au couche argileuse imperméable (échange de base) et certains formations évaporatiques.

Les eaux de la source Espagnole, Rmel Terch et Rmel Aib sont riches en sodium (fig.45), particulièrement lors de la période de hautes eaux, ce qui laisse supposer un apport d'eau riche en sodium.

La courbe de celle du sodium révèle la même succession de zone et anomalie ponctuelle que la courbe de la conductivité et de chlorures.

IV.4. Chlorures (Cl^-) :

L'origine des chlorures est liée principalement à la dissolution des formations salifères et à l'effet de la salinité marine. Ils proviennent aussi de la pollution anthropique et de l'évaporation intense qui provoque l'augmentation des concentrations en ions Cl^- , et qui se produit dans les régions où le niveau statique est proche de la surface du sol (Labar, 2003) .



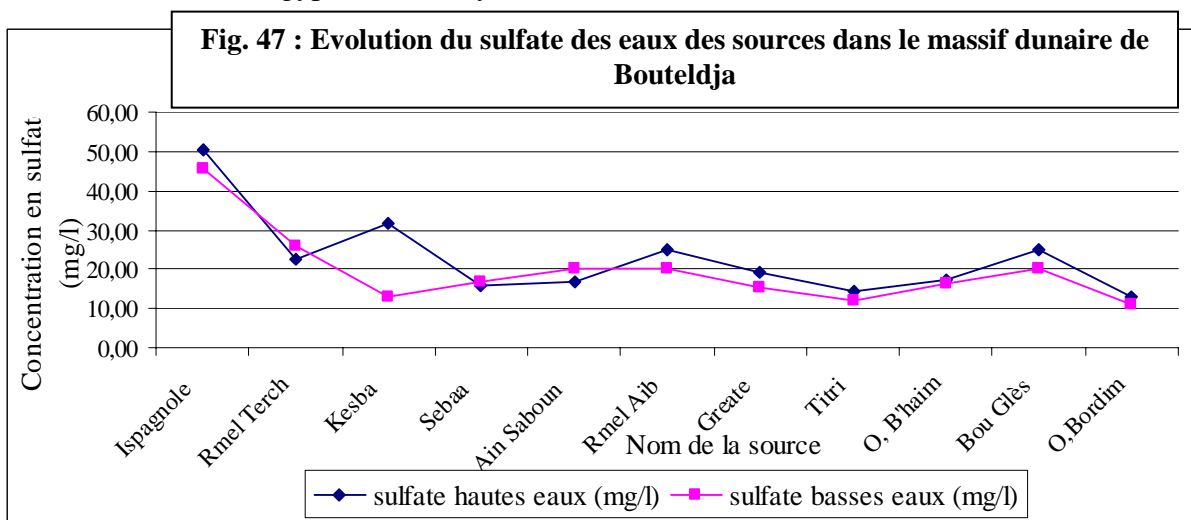
Le contenu en chlorure varie le plus fréquent de 25 à 70 mg/l à l'étiage. Des valeurs supérieures à 70 mg/l sont enregistrées Au Nord et le long du littoral en relation sans doute à la forte concentration en chlore des pluies et aussi le biseau salé. On observe une diminution des concentrations en chlorure du littoral vers l'intérieur du continent (fig.46).

Durant les deux périodes d'observation, le décalage observé entre les valeurs des deux courbes reste faible.

IV.5. Sulfates (SO₄²⁻) :

La présence des ions de sulfate dans l'eau est liée essentiellement à :

- l'oxydation du soufre présent dans l'atmosphère lors des précipitations ;
- l'oxydation des minéraux sulfurés présents dans les calcaires (pyrite) ou par dissolution de gypse ou d'anhydrite dans les terrains traversés.



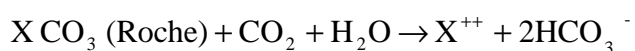
Les sulfates (fig.47), sont importants aux cours de la période de hautes eaux, ce qui indique un apport riche en sulfates provenant des massifs gréseux de la région. Les sources montrent une évolution inverse entre les deux périodes, les sources ; Ain Saboun, Sebaa et Rmel Terch

montrent une augmentation des concentrations par contre les autres sources montent une baisse des concentrations en sulfate.

Des valeurs en sulfate relativement plus élevées apparaissent dans la zone occidentale – littoral du massif dunaire. Alors que les faibles valeurs du sulfate sont apparues au niveau de la zone de contact massif – plaine du El Kébir Est et le long de celle – ci.

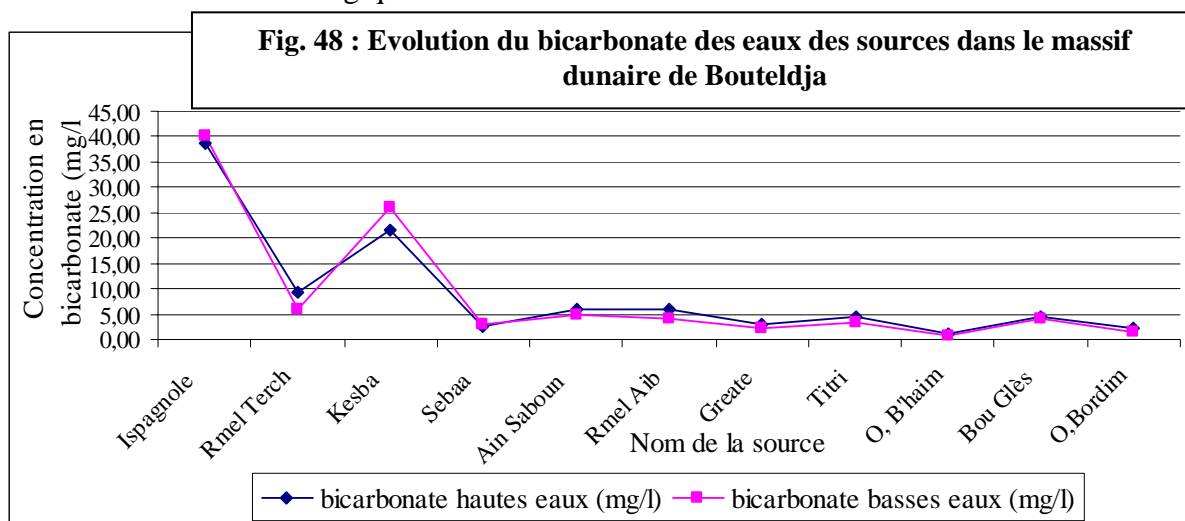
IV.6. Bicarbonates (HCO₃⁻) :

Les bicarbonates représentent le résultat de l'équilibre physico-chimique entre la roche, l'eau et le gaz carbonique, selon l'équation générale :



Les concentrations en bicarbonates dans les eaux naturelles sont fonction :

- Du pH de l'eau ;
- De la température ;
- De la concentration en CO₂ dissous ;
- De la nature lithologique.



Les concentrations en bicarbonates (fig.48) augmentent en période de hautes eaux pour toutes les sources.

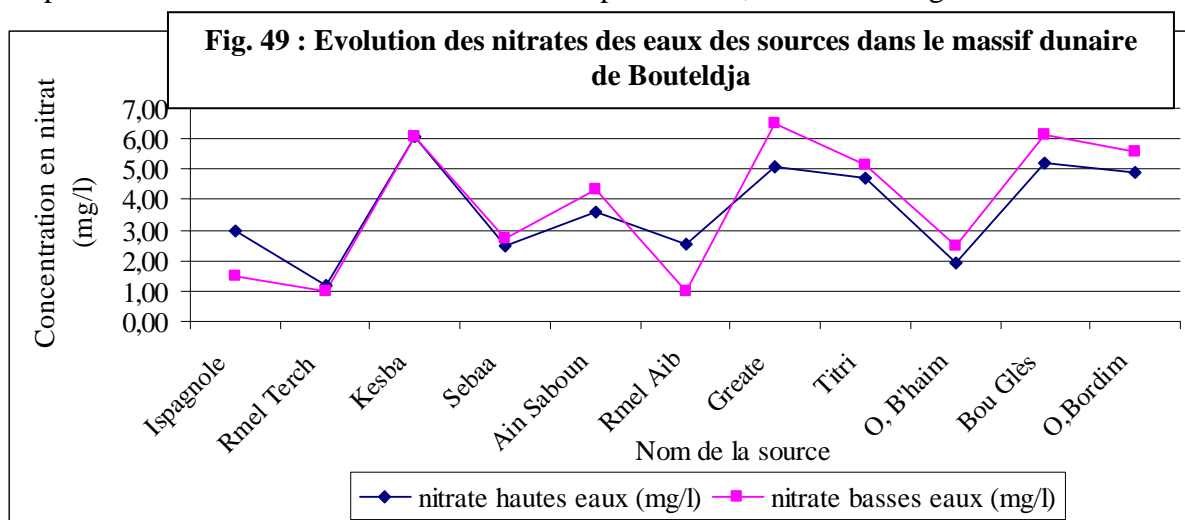
IV.7. Nitrates (NO₃⁻) :

En l'absence de toute fertilisation azotée, on trouve néanmoins toujours des nitrates dans les sols. Ceux-ci proviennent de la fixation de l'azote atmosphérique par certaines espèces végétales, les légumineuses, qui sont capables, grâce à des bactéries qui vivent en symbiose avec elles, de capter l'azote et de le transformer en matière organique azotée dans leur racines.

Quand la plante a fini son cycle saisonnier, cette matière organique azotée est peu à peu décomposée par les bactéries nitrifiantes du sol, et transformée en nitrates. Ces nitrates sont à leur tour utilisés par les autres espèces végétales pour leur propre croissance (Dejoux, 1987).

Produits naturellement dans le sol superficiel, ou apportés sous forme d'engrais, les nitrates en excès vont être entraînés vers la profondeur par l'eau de pluie qui s'infiltré dans les sols.

Cette infiltration va se faire en hiver parce que la pluie qui tombe au printemps et en été ne s'infiltré en général pas en profondeur, elle est reprise rapidement par la végétation et évaporée. Les nitrates descendent donc vers la profondeur, mais cette migration est lente.



Les nitrates (fig.49) sont importants au niveau de la source de Rmel Aib et Espagnole où les concentrations sont élevées en période humide. Pour la majorité des sources, les fortes valeurs des nitrates, en période sèche, sont dues d'une part de la présence importante de la matière organique dans le sol, d'une part de l'apport d'engrais azotés en agriculture. Cet apport peut se faire soit directement sous forme de nitrates, soit sous forme d'ammoniac, où dans lesquels se transformeront dans le sol en nitrates, comme cela se fait pour l'ammoniac de l'urine ou la matière organique naturelle azotée (Mariotti, 1977).

V. Origines de la minéralisation observée :

Le massif dunaire de Bouteldja, une région à forte pluviométrie, constitue de grés et de sables purement siliceux ayant permis un lessivage complet. L'absence de carbonates, en particulier, donne des eaux à résidu sec très faible, très souvent de l'ordre de quelques centaines de mg.

Le CO₂ dissous, fonction de la pression partielle du CO₂ de l'atmosphère des sols, la même qu'ailleurs, donne certes un certain nombre d'ions HCO₃ et CO₃ par dissolution. Mais ceux-ci ne sont pas augmentés de ceux que fournirait la dissolution des carbonates, ici absents de

ces roches. Le CO_3 combiné est donc faible. Il n'y a que quelques milligrammes à quelques dizaines de milligrammes (Hani, 2003).

Comme les ions Ca ne se trouvent qu'en très petite quantité, il y a plus de CO_2 libre que CO_2 d'équilibre. Il y a par conséquent du CO_2 agressif, et les eaux peuvent avoir des pH très faibles de l'ordre de 5 à 6. la teneur en Cl et en SO_4 , quoique pouvant être plus faible que dans les eaux des terrains calcaires, peut devenir égale à la teneur en CO_3 , ou même le plus souvent la surpasser par faiblesse du CO_3 combiné. La teneur en Ca est liée à celle du CO_3 qui est faible. Il en est de même de Mg. De ce fait, rNa est lié à rCl.

Chapitre V

**" Qualité
des eaux "**

I. Qualité des eaux :

I.1.Introduction :

La qualité des eaux, d'une façon générale, doit être évaluée aujourd'hui car on sait bien que les eaux souterraines sont vulnérables aux pollutions diffuses, qui se manifestent souvent après un temps d'accumulation (Jourda, 1991).

La qualité des eaux souterraines s'est dans l'ensemble beaucoup dégradée. Même si les responsabilités sont partagées, les pollutions d'origine agricole restent les premières responsables de la dégradation récente. La qualité naturelle des eaux souterraines, va donc être naturellement influencée par ce que les géologues appellent le « fonds géochimique ».

L'évolution de l'indice d'altération et l'étendue des périmètres de protection à partir des méthodes de vulnérabilité nous permet de bien avoir une idée sur la pollution de l'eau et pour la protection des nappes d'eaux souterraines et donc de garder une bonne qualité des eaux.

II. Degré d'altération des eaux des naturelles :

II.1.Classification des éléments chimiques par classes d'altération :

Les éléments chimiques analysés (Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- et R.S) sont classés par tranches en fonction des teneurs des éléments et selon les normes de l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé).

Le tableau ci – dessous montre les concentrations des éléments chimiques représentés en quatre (4) classes selon les normes de l'OMS :

Classe Elément (mg/l)	1	2	3	4
Mg²⁺	< 50	50 – 60	60 – 70	> 70
Na⁺	< 150	150 – 180	180 – 210	> 210
K⁺	< 12	12 – 14,4	14,5 – 16,9	> 16,9
Cl⁻	< 200	200 – 240	240 – 280	> 280
SO₄²⁻	< 250	250 – 300	300 – 350	> 350
NO₃⁻	< 50	50 – 60	60 – 70	> 70
R.S	< 1500	1500 – 1800	1800 – 2100	> 2100

Tableau n° 21 : Classification des concentrations des éléments chimiques par classes (D'après l'OMS).

Les concentrations des éléments chimiques analysées (la moyenne des valeurs pour les hautes et basses eaux) des sources d'eaux situées dans le massif dunaire de Bouteldja sont consignées dans le tableau ci-dessous :

Elément Point d'eau	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	R.S
Bou Glès	5.46	19.62	<10	31.29	22.5	5.65	215
Titri	4.71	21.68	<10	41.49	13.25	4.91	194
Bourdim	3.66	18.51	<10	34.69	12	5.25	200.5
Greate	12.36	26.66	<10	67.85	17.25	5.8	267.5
Ain Saboun	3.88	19.31	<10	27.87	18.4	3.95	182
Sebaa	3.01	18.46	<10	28.72	16.35	2.62	196
Rmel Terch	109.3	985.6	>20	1688.0	24.14	1.1	2275
Espagnole	85.12	1017	>20	1621	48	1.28	1410
Kesba	21.41	61.29	<10	124.3	22.45	6.07	479
Rmel Aib	5.27	47.48	<10	88.81	22.55	1.75	362
o.B'haim	5.08	21.29	<10	39.31	16.9	2.21	218.5

Tableau n° 22 : Concentrations des éléments chimiques des sources eaux dans le massif dunaire de Bouteldja (2006/07).

II.2. Calcul des indices d'altération (I.A) :

Afin de calculer l'indice d'altération des points d'eau dans la nappe dunaire de Bouteldja, on attribue pour chaque élément chimique, et selon sa concentration, un chiffre correspondant à chacune des quatre (4) classes déduites précédemment.

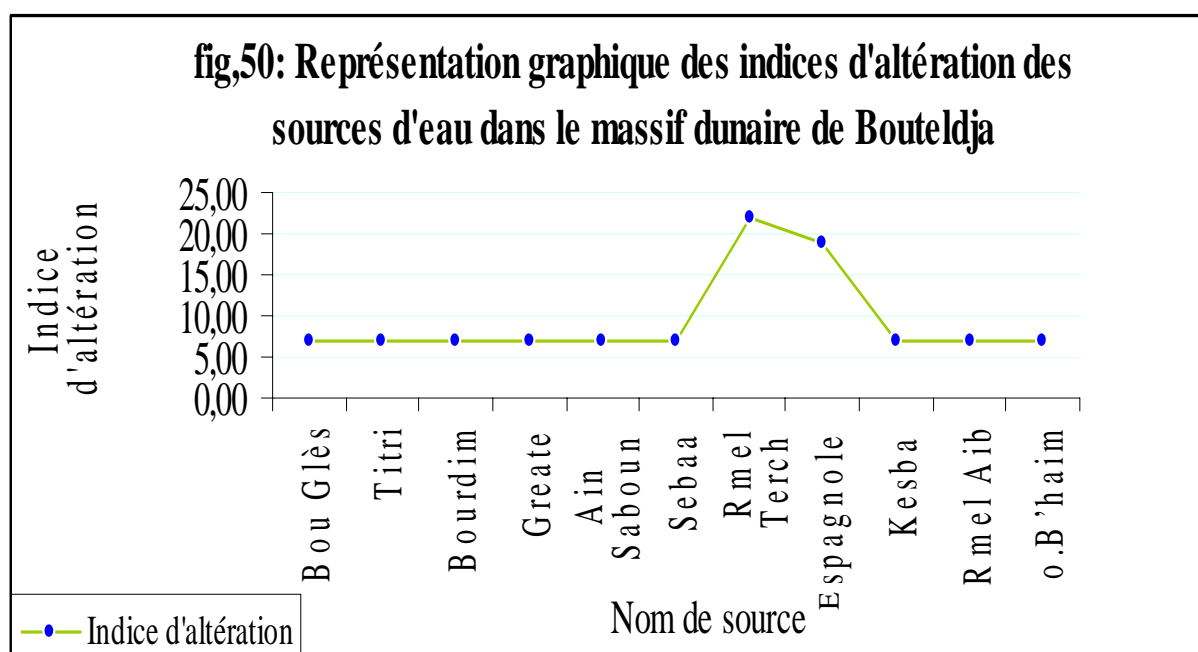
Par exemple, on attribue à l'élément chimique le chiffre « 1 » lorsque sa concentration se localise dans la classe « 1 ». La somme des chiffres des points d'eau correspondants aux classes nous donnent l'indice d'altération (Derradji, 2004).

Le tableau ci – après représente les indices d'altération des points d'eau et leurs classes d'altérations :

Elément point	I.A	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	R.S
Bou Glès	7	C1	C1	C1	C1	C1	C1	C1
Titri	7	C1	C1	C1	C1	C1	C1	C1
Bourdim	7	C1	C1	C1	C1	C1	C1	C1
Greate	7	C1	C1	C1	C1	C1	C1	C1
Ain Saboun	7	C1	C1	C1	C1	C1	C1	C1
Sebaa	7	C1	C1	C1	C1	C1	C1	C1
Rmel Terch	22	C4	C4	C4	C4	C1	C1	C4
Espagnole	19	C4	C4	C4	C4	C1	C1	C1
Kesba	7	C1	C1	C1	C1	C1	C1	C1
Rmel Aib	7	C1	C1	C1	C1	C1	C1	C1
o.B'haim	7	C1	C1	C1	C1	C1	C1	C1

Tableau n° 23 : Calcul de l'indice d'altération et la classification des points d'eau par classes d'altération.

Les indices d'altération obtenus pour chaque source d'eau et qui sont déduits dans le tableau n°23 sont ainsi représentés graphiquement (fig.50) :



D'après le tableau et la figure montrés ci – avant, on remarque que la source de Rmel Terch est la plus polluée représentant un indice d'altération très fort « 22 », suivie de l'Espagnole « 19 », donc ces deux sources sont les plus altérées.

Tandis que la plupart des sources d'eau situées dans le massif dunaire de Bouteldja représentent un indice d'altération faible « 7 » donc les eaux sont peu altérées.

II.3.Etablissement de la carte d'altération des eaux des sources:

La carte d'altération des eaux des sources situées dans le massif dunaire de Bouteldja (fig.51) est établie à partir des valeurs des indices d'altérations des différents points d'eau et qui nous renseigne sur la qualité des eaux en vue de leur éventuelle exploitation pour les différents usages (A.E.P, A.E.I, A.E.A).

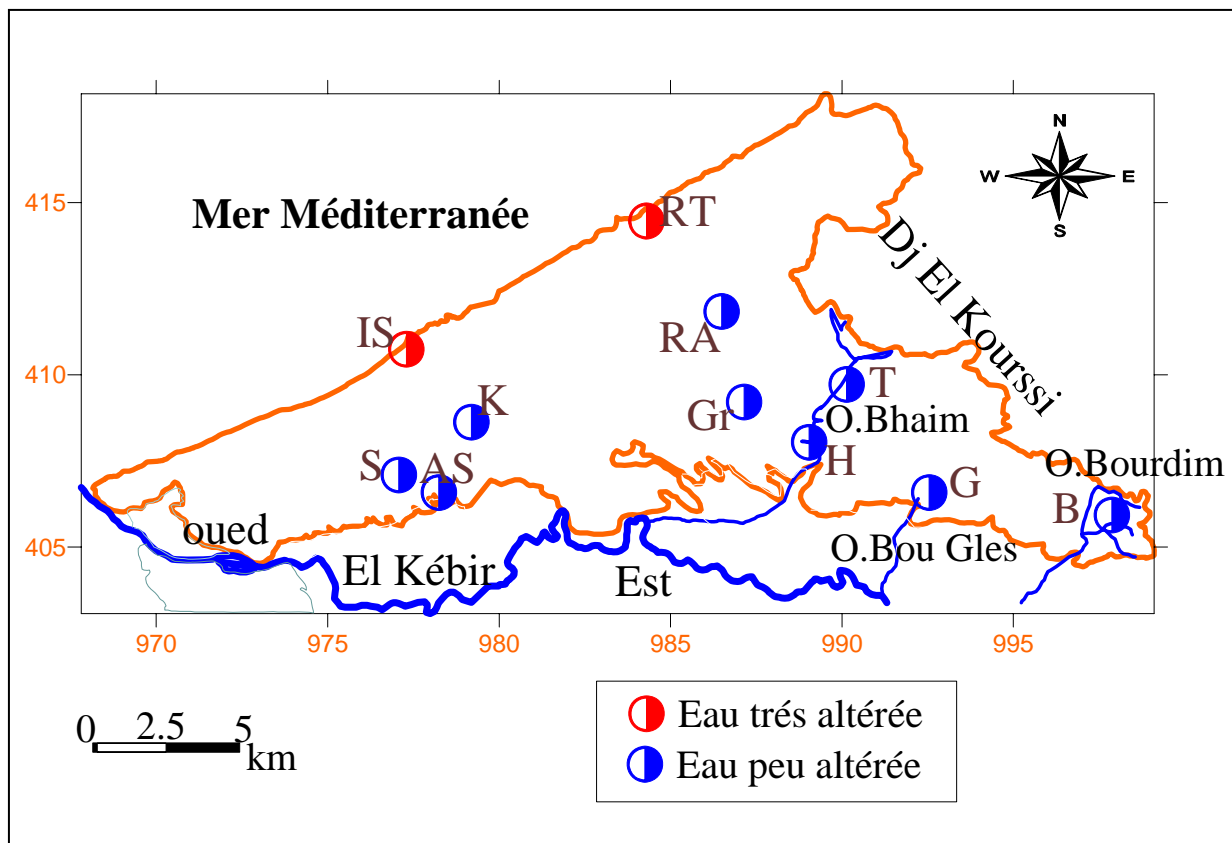


Fig.51 : Etablissement de la carte d'altération des eaux des sources dans le massif dunaire de Bouteldja.

L'établissement de la carte d'altération des eaux des sources a permis de connaître la qualité des eaux grâce au calcul de l'indice d'altération des eaux. Ainsi que les eaux des Rmel Terch et l'Espagnole sont les plus altérées.

III. Périmètres de protection des eaux naturelles :

Les périmètres de protection d'un captage sont définis après une étude hydrogéologique et prescrits par une déclaration d'utilité publique. Ils visent à protéger les abords immédiats de l'ouvrage et son voisinage, ainsi qu'à interdire ou réglementer les activités qui pourraient nuire à la qualité des eaux captées.

Ils prennent la forme de trois zones dans lesquelles des contraintes plus ou moins fortes sont instituées pour éviter la dégradation de la ressource.

III.1.Types de périmètres de protection:

III.1.1.Le périmètre de protection immédiate :

Il vise à éliminer tout risque de contamination directe de l'eau captée et correspond à la parcelle où est implanté l'ouvrage. Il est acquis par le propriétaire du captage et doit être clôturé, Toute activité y est interdite.

III.1.2.Le périmètre de protection rapprochée :

Il a pour but de protéger le captage vis-à-vis des migrations souterraines de substances polluantes. Sa surface est déterminée par les caractéristiques de l'aquifère, Les activités pouvant nuire à la qualité des eaux sont interdites.

III.1.3.Le périmètre de protection éloignée :

Ce dernier périmètre n'a pas de caractère obligatoire. Sa superficie est très variable et correspond à la zone d'alimentation du point d'eau. Les activités peuvent être réglementées compte tenu de la nature des terrains et de l'éloignement du point de prélèvement

III.2.Inplantation des périmètres de protection:

III.2.1.Etude de la vulnérabilité des eaux:

La vulnérabilité caractérise l'aptitude d'une ressource en eau à être atteinte par une pollution. Elle est fonction des facteurs du milieu qui déterminent les grands types de circulation d'eau et de l'occupation du sol (Hafed, 1999).

Ainsi, la vulnérabilité se définit comme la sensibilité d'un territoire à un aléa. Cette sensibilité se décline en termes de dommages aux personnes et aux biens, et de perturbation de l'activité socio-économique.

L'étude de vulnérabilité aux pollutions constitue une base d'information essentielle pour la gestion des ressources en eau et par conséquent la mise en place de mesures destinées à la prévention des pollutions accidentelles (périmètre de protection).

III.2.2.Méthode de vulnérabilité des eaux:

La vulnérabilité des eaux souterraines doit être comprise comme un défaut de protection ou de défense naturelle des aquifères contre des menaces de pollution, en fonction des conditions hydrogéologiques locales.

L'idée de la limitation des périmètres de protection due à la facilité et la rapidité suivant lesquelles des matières polluantes d'origine superficielle peuvent atteindre l'eau souterraine et dégrader ses qualités, en fonction des défauts de défense " passive " (caractères structuraux), voire " active " (processus hydrodynamiques, hydrochimiques ou biochimiques en zone non saturée).

Parmi les méthodes de vulnérabilité choisies pour le calcul des limites des périmètres de protection des ouvrages d'eau on a celle de W. REHESE. 1977, cette méthode prend en considération la lithologie du milieu et l'écoulement de l'eau en fonction de la topographie.

III.2.3.Calcul de la limite du périmètre de protection:

La détermination du périmètre de protection dans des forages d'eau répartis dans le massif dunaire de Bouteldja selon la méthode de W.REHESE se fait comme suite :

1. le calcul de l'épaisseur de la zone non saturée (H) par la différence entre la valeur topographique (Z) et la valeur piézométrique (Hp) par la relation : $H = Z - H_p$.

2. le calcul du pouvoir épurateur du sol dans la couverture de la zone non saturée (Md) par la relation : $Md = H.i$

Avec : H : épaisseur de la zone non saturée en mètre;

i : indice correspondant à la formation non saturée.

D'après REHESE, la valeur de i change Selon les matériaux constituant la zone non saturée (voir tableau annexe).

Si $Md > 1$: la couche est naturellement protégée (pas besoin du périmètre de protection) ;

Si $Md < 1$: la couche n'est pas protégée (périmètre de protection est certain).

3. le calcul du pouvoir épurateur du sol dans l'aquifère de la zone saturée (Mr) par la relation : $Mr = 1 - Md$

Avec : Md : pouvoir épurateur du sol dans la couverture de la zone non saturée en mètre.

4. le calcul de la limite (L) de la zone de protection par la relation suivante :

$$L = \frac{1 - Md}{I_a} = \frac{Mr}{I_a}$$

Avec : L : la limite du périmètre de protection ;

Md : pouvoir épurateur du sol dans la couverture de la zone non saturée en mètre ;

Mr : pouvoir épurateur du sol dans l'aquifère de la zone saturée en mètre ;

I_a : index correspond au milieu aquifère dépend de la vitesse (V) d'écoulement :

$$V = Q / S = K.i$$

Avec : V : la vitesse d'écoulement en m/s ;

Q : le débit en m³/s ;

S : la section en m² ;

K : la perméabilité calculée par la relation T/E mouillée en m/s ;

i : gradient hydraulique.

L'index I_a est déduit à partir des valeurs de la vitesse d'écoulement V calculées (en m/jours) correspondantes à chaque types de matériaux de l'aquifère considéré d'après W.REHESE (voir tableau annexe). Donc les valeurs de L calculées sont représentées dans le tableau (voir annexe).

III.2.4.Etablissement de la carte des périmètres de protection :

La vulnérabilité des eaux souterraines doit être comprise comme un défaut de protection ou de défense naturelle des aquifères contre des menaces de pollution, en fonction des conditions hydrogéologiques locales, donc l'idée d'établir une carte des périmètres de protection est de garder la qualité des eaux souterraines propre sans aucune contrainte externe.

La protection de la nappe sera d'autant meilleure que le sol et la zone non saturée sont épais, que leur granulométrie est fine, que la vitesse de percolation de l'eau dans la nappe est faible. En revanche, ce type de nappe une fois contaminée par un polluant le reste longtemps.

La figure ci – après montre la répartition des forages dans le massif dunaire de Bouteldja et la limite des périmètres de protection qui correspond à chaque ouvrage (Albinet et Margat, 1970).

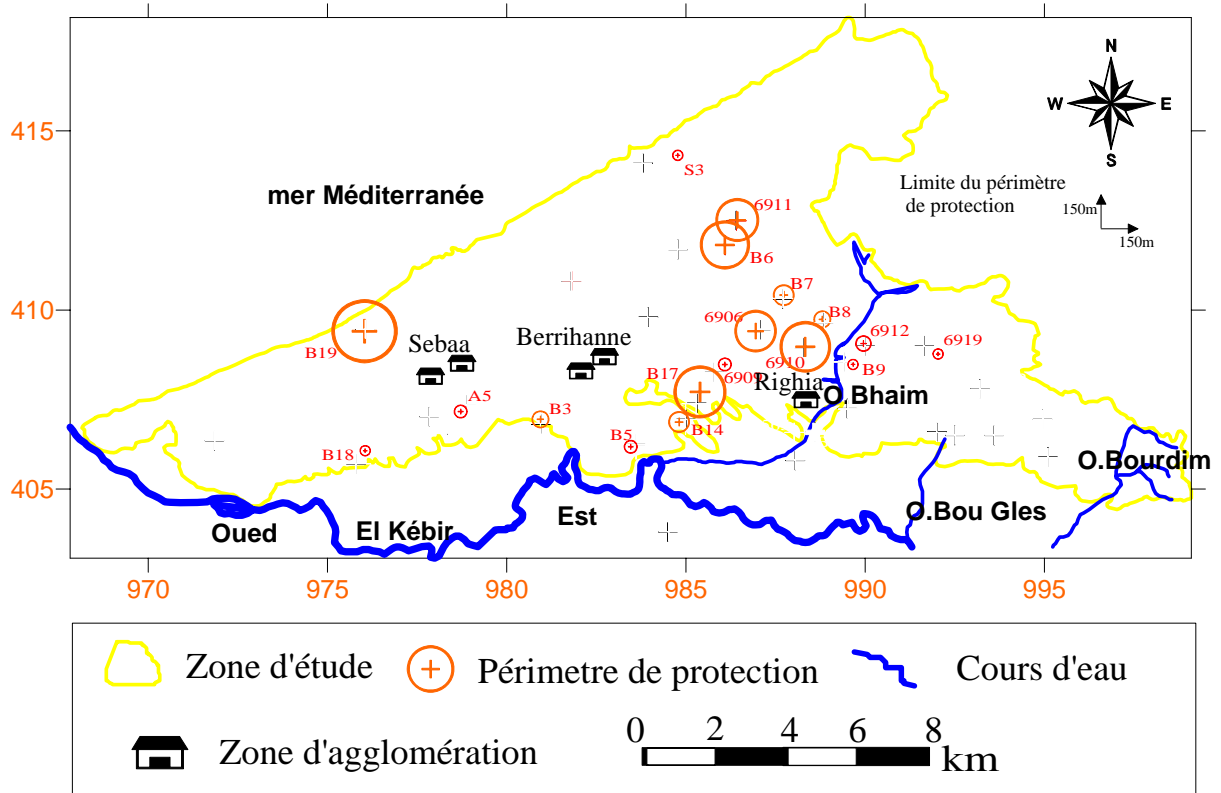


Fig.52 : Etablissement de la carte des périmètres de protection des forages dans le massif dunaire de Bouteldja.

IV. L'effet de l'homme sur la qualité des eaux:

Les nappes d'eau souterraines plus ou moins abondantes, et plus ou moins renouvelables, sont donc fondamentales à l'activité et même à la vie humaine. Le suivi de leur qualité est donc particulièrement important.

Une nappe souterraine est d'autant plus vulnérable aux pollutions qu'elle est mal défendue et que sa résilience est faible (Rouabhia et Kherici 2001) .

De très nombreux facteurs, d'origine naturelle ou humaine, ont un impact sur la qualité des eaux de surface. L'agriculture, le secteur dominant dans la région, exerce un effet sur la qualité des eaux naturelles dans le massif dunaire de Bouteldja.

Les activités agricoles sont plus pratiquées dans les régions à forte habitation et qui se concentrent surtout dans les régions ; Righia, Berrihan et Sebaa.

Les principales pressions qu'exerce l'agriculture sur la qualité de l'eau proviennent des matières fertilisantes (engrais de ferme : fumiers, lisiers, engrais minéraux), des pesticides, des pratiques culturales et des aménagements hydroagricoles.

Les ressources en eau exploitées dans la nappe dunaire de Bouteldja sont menacées par la pollution engendrée par le développement urbain et agricole, notamment, les eaux usées des agglomérations avoisinantes qui ne disposent pas de système d'assainissement, des ordures ménagères, des carrières utilisées comme dépotoir des rejets divers, du réseau routier et des activités agricoles.

A cet effet, il fallait prendre toutes les mesures susceptibles de garantir la qualité des eaux de ces ressources et la sécurité de l'approvisionnement en eau potable. Ce qui nous a conduit à établir la mise en place d'un périmètre de protection de protection du champ captant de la nappe de notre région.

Conclusion

"Qualité des eaux :

Résultats "

Conclusion générale :

Le massif dunaire de Bouteldja est localisé dans la partie Nord Est de l'Algérie, 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, à l'Est par le massif de Cap Rosa, au Sud par la plaine des graviers de Bouteldja et à l'Ouest par oued Mafragh. Le tapis végétal est à vocation forestière de maquis et de chênes liège limitant les phénomènes d'érosion.

La géologie du massif dunaire de Bouteldja est caractérisée par des dunes constituées de sables éoliens mio – plio - Quaternaire dominant la partie avale Nord – Est et Nord – Ouest.

Les grés numidiens sont répartis dans les montagnes qui entourent notre zone d'étude.

La région d'étude est soumise à un climat méditerranéen qui est tempéré, caractérisé par deux saisons distinctes, l'une pluvieuse et humide et l'autre sèche et chaude.

Les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre de 681.47 mm au Salines et 631.95 mm à Ben M'hidi et de températures annuelles moyennes de l'ordre de 17.85°C (Salines) et 17.59 °C (Ben M'hidi). Leur ajustement à la loi de Gauss a permis de déduire un écart type de 165,35 pour la St des Salines et 164,32 pour Ben M'hidi. L'estimation de la période de retour a permis de déterminer une année de pluie minimale avec 15 et 29 ans et maximale tout les 33 et 20 ans respectivement pour les Salines et Ben M'hidi.

Hydrogéologiquement, le massif dunaire de Bouteldja se subdivise en sous bassins versants, bassin de Bourdim, de Bou Glès et oued El B'haim. Il est d'une orientation NW – SE conforme aux vents dominants, essentiellement constitué de sables éoliens qui forment une nappe libre, avec des épaisseurs comprises entre 20 et 120 m et l'existence d'intercalations des lentilles argileuses.

L'écoulement des eaux souterraines est marqué par deux directions bien distinctes, l'une se dirige du centre du massif dunaire vers la mer au Nord et l'autre qui se dirige vers le Sud et alimentant les marécages, les oueds et la nappe des graviers.

Les mécanismes de l'écoulement des eaux naturelles sont : au Nord où la mer méditerranée représente un exutoire à la nappe, à l'Est d'où les formations du grés numidiens, au Sud suivant une ligne parallèle à l'oued El Kébir Est et en reliant Djebel Bourdim à la Mafragh et à l'Ouest avec un substratum qui semble profond qu'à l'Est, sur lequel repose la formation de l'aquifère libre.

D'après la courbe de tarissement des sources d'eau captant de la nappe dunaire de Bouteldja, le volume d'eau emmagasiné (W) calculé à partir du coefficient de tarissement (α) est de $15,1 \cdot 10^5 \text{ m}^3$, $36,6 \cdot 10^5 \text{ m}^3$ et $116 \cdot 10^5 \text{ m}^3$ respectivement pour les sources de Bou Glès, Bourdim et Titri).

Les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère dunaire de Bouteldja sont caractérisés par la perméabilité qui varie entre 10^{-4} et 10^{-6} m/s, la Transmissivité est au moyenne de $5 \cdot 10^{-3}$ m²/s et le coefficients d'emmagasinement varient de 1,4% à 24% avec une valeur moyenne de 18%.

Les eaux souterraines de la nappe dunaire de Bouteldja sont dominées par un faciès chimiques chloruré – sodique. Physiquement, les eaux sont dans l'ensemble acides, douces peu minéralisées. Chimiquement, la majorité des échantillons présentent des teneurs en éléments majeurs inférieures à la norme de l'OMS, sauf le cas des sources où certains éléments dépassent les normes tel que les chlorures et le sodium dues essentiellement au contact avec l'eau de mer: échange au niveau du biseau salée, contamination de l'eau d'infiltration par les embruns salés. L'eau de la nappe devient plus ou moins saumâtre. L'invasion de la nappe d'eau douce par l'eau salée est accélérée par les pompages et le rabattement de la nappe aux intrusions marines.

On remarque la présence de formation géologique (grés numidien, argile numidien et sable) qui ont une influence directe sur la composition chimique de l'eau. Les eaux en contact avec les roches argileuses sont chargées en sels, avec très souvent des résidus secs de plusieurs grammes, tantôt le SO_4 l'emporte sur le Cl tantôt c'est l'inverse. Donc les hautes valeurs de SO_4 amènent de hautes valeurs de Cl et de hautes valeurs de Na.

Les échanges de bases sont très fréquents en contact des roches argileuses, les argiles sodiques échangent les ions Na contre des ions Ca et Mg de l'eau alors que les argiles calciques échangent de leurs ions Ca contre Na et Mg.

Les teneurs acceptables des nitrates dans les eaux sont témoins d'une contamination du milieu due en majeure partie au activité agricole (engrais, pesticides, ...) et au rejets domestiques près des agglomérations rurales intenses.

Les eaux souterraines de la nappe dunaire de Bouteldja sont en majorité d'excellente qualité (RS entre 20 et 300 mg/l). L'établissement de la carte d'altération des eaux des sources montre que l'ensemble des sources d'eau représente un indice d'altération faible donc l'eau est peu altérée sauf pour les sources de Rmel Terch et l'Espagnole où l'indice d'altération est très fort donc l'eau est très altérée.

La détermination des zones de vulnérabilité, basés sur le calcul du pouvoir épurateur du sol sur le trajet vertical et la hauteur de la zone non saturée (selon W.REHESE) nous a permis d'établir des périmètres de protection des ouvrages avec des limites faibles entre 10 et 50 m et donc une vulnérabilité faible localisée dans la partie occidentale de la zone d'étude, des limites fortes supérieures à 70 m donc très vulnérable surtout dans les zones d'agglomération intense et les zones marécageuses.

Dans la partie Sud – Est de notre zone d'étude les ouvrages n'ont pas besoin d'un périmètre de protection tel que le secteur de Bou Glès et de Bourdim où les potentialités de la nappe sont fortes.

La vulnérabilité des captages et leur protection n'ont pas fait l'objet d'études ou de mesures suffisantes et bon nombre de nappes sont exploitées alors qu'elles sont encore très exposées à des risques de pollution de surface dans leurs périmètres de protection rapprochées ou éloignées (en zone rurales ou semi rurales et même aux abords de grandes agglomérations).

Les activités agricoles sont plus pratiquées et très intenses, et la forte utilisation des produits chimiques azotés dans le massif dunaire de Bouteldja peu à peu, devient de plus en plus forte dans les prochaines décennies avec la forte croissance des populations et l'inexistence d'un système de l'évacuation des rejets domestiques qui se fait directement dans le sol est qui pose un grand problème à la qualité des eaux naturelles et par conséquent les zones contaminées seront découvertes et d'autres ressources en eaux seront contaminées et se déversent dans les terres humides.

Références bibliographiques

- Ait Hamou. M.A, (1983)** : Etude hydrogéologique de la terrasse de l'oued El Kébir Est dans la région de Bouteldja et El Tarf et la relation avec le massif dunaire. Mém d'Ingénieur. Univ de Annaba, 120 p.
- Albinet M. et J.Margat, (1970)** : Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine, Bull B.R.G.M (2) section III. N° 4. pp 13-22.
- Aoun Sebaiti. B, (2003)** : Etude de l'origine de la salinité et modélisation du système aquifère de Annaba, Mém. de Magister. Univ d'Annaba, 120 p..
- Bouchagoura. L, (2003)** : Mise en évidence des divers pollutions dans la nappe alluviale de Tébéssa. Thèse de Magister. Univ de Annaba, 79 p.
- 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). Mem d'Ingénieur. Univ de Annaba, 168 p.
- B.R.G.M, (1985)** : Etude par modèle mathématique de la nappe de Annaba-Bouteldja, 78p.
- Castany. G, (1962)** : Interprétation des cartes piézométriques et caractéristiques des couches aquifères libre, Bull B.R.G.M n°3, 140 p, Orléans.
- Castany. G, (1968)** : Prospection et exploitation des eaux souterraines. Ed. Dunod, Paris, France, 683p.
- Castany. G, Margat, (1977)** : Dictionnaire français d'hydrogéologie. Bur rech, géologie minière, 249p.
- Castany. G, (1982)** : Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Dunod edit. Paris, 334p.
- Dejoux et Al, (1987)** : la contamination par les nitrates des puits privés en milieu rural. Prévention des risques à la santé, vecteur environnement 37 (2) pp 61-66.

- 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, univ de Annaba, 200p.
- Djabri. L, (1996) :** Mécanisme de la pollution et vulnérabilité des eaux de la Seybouse. Origine géologique, industrielle, agricole et urbaine. Thèse de Doctorat d’Etat, univ de Annaba page 128-132.
- Djedel. M, (2003) :** Etude hydrochimique des nappes côtières : cas de nappe du littoral de Annaba -El Kala (Nord – Est Algérien). Mém. De Magister, univ d’Annaba.
- Gaud. B, (1974) :** Etude des ressources en eau souterraine du Nord de la willaya d’Annaba. Compte rendu de la campagne de forage. Plan quadriennal 70-73 opération 11-01-0-60.
- Gaud. B, (1976) :** Etude hydrogéologique du système aquifère Annaba-Bouteldja. Système de reconnaissance et recherche des conditions de modération, rapport d’étude INRH d’Annaba.
- Hafed. H, (1999) :** Evaluation of the vulnerability to pollution in Metheline aquifer (North – East of Tunisia). Conférence international. Los Angeles (USA). Pp 845-847.
- Hani. A, (2003) :** Analyse méthodologique de la structure des processus anthropiques. Application aux ressources en eaux d’un bassin côtière méditerranéen. Thèse de Doctorat d’Etat, univ d’Annaba, pp 123-125.
- Joleaud. L, (1936):**Etude géologique de la région de Bône-la Calle, B.S.G.A (2), n°12, 199 p.
- Jourda. J.P, (1991) :** Pollution des eaux souterraines en France. Bilan des connaissances. Impacts et moyens de prévention, manuels et méthode, n°22.3.éd, par BRGM 262 P.
- Kherici. N, (1985) :** Aquifère sableux de bord de mer, hydrodynamique et hydrochimie ; exemple de la nappe de Bouteldja (Nord – Est Algérien), Doctorat de 3^{ème} cycle, univ de Montpellier, France, 202 p.
- Kherici. 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, univ de Annaba.

Labar. S, (2003) : Contribution à l'identification des aires inondables et qualité physico-chimique des eaux stagnantes temporaires dans la vallée de la Mafragh. Mém de Magister. Univ de Annaba, 111 p.

Lahondere. J. C, (1987) : Les séries ultra telliennes d'Algérie Nord Orientale et les formations environnantes dans leur cadre structurale. Thèses de doctorat d'Etat. Univ Paul Sabatier, France, 242 p.

Mariotti. A, (1977) : Dénitrification in situ dans les eaux souterraines. Processus naturels provoqués. Une revue hydrogéologique n° 3 51994 43-68 p.

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

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

O.M.S, (1994) : Directive de qualité pour l'eau de boisson 2^{ème} édition, recommandations Genève, Suisse.

Ramdani. A, (1996) : Hydrogéologie et modélisation de la nappe dunaire de Bouteldja. Mém de Magister. Univ de Annaba, 138 p.

Rouabhia. A, Kherici.N et Djabri. L, (2001) : Vulnérabilité et impact des activités anthropiques sur les eaux souterraines de la région d'El Ma El Abiod N.E de l'Algérie. Vecteur environnement. Section scientifique, volume 37, n°3, mai 2004, 26-30 p.

Rodier. J, (1996) : L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer. 8^{ème} édition, Dunod, Paris.

Saadali. B, Remita. R, (2004) : Contribution à l'étude hydrogéologique et hydrochimique dans le bassin versant de la Mafragh (oued Bounamoussa et oued Kébir Est). Mém d'Ingénieur, hydrogéologie. Univ de Annaba, 115 p.

Sedrati. N, (2006) : Vulnérabilité et impact des agglomérations sur la qualité des eaux du massif dunaire de Bouteldja. Mém de Magister. Univ de Annaba, 106 p.

Station météo Annaba : Données des précipitations et de température 1979/2006, stations des Salines et de Ben M'hidi.

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

Vila. J. M, (1978) : La chaîne alpine d'Algérie orientale et ses confins algéro-tunisiens. Thèse de doctorat Es Science. Univ de Pierre et Marie Curie. Paris, 640 p.

- **Carte topographique au 1/50 000** : Feuille n° 7 – 8 Bône, feuille n° 3 – 4 Blandan : carte d'Algérie , univ d'Annaba.

- **Outils de recherche Internet** : Google, Altavista et Yahoo.

Bibliographie

"Références, thèses et mémoires"

Et annexe

" Les données "

LA POTABILITE : LA NORME

On peut réaliser différents types d'analyses :

1. Des analyses bactériologiques (réduite, sommaire ou complète)
2. Des analyses physico-chimiques (réduite, sommaire, complète et particulière)
3. **Les analyses physico-chimiques complètes sont les seules qui décèlent la présence de fluor, potassium, ammonium, calcium, sulfates... Bien sûr ces analyses complètes, plus coûteuses, sont réalisées moins fréquemment**

norme française pour les paramètres physico - chimiques		norme française pour les substances indésirables	
Chlorures	200 mg/l (cl)	Nitrates	50 mg/l (NO3)
Sulfates	250 mg/l (SO4)	Nitrites	0,1 mg/l (NO2)
Magnésium	50 mg/l (Mg)	Ammonium	0,5 mg/l (NH4)
Sodium	150mg/l (Na)	Azote Kjeldahl....	1mg/l (en N)

source : "Eaux destinées à la consommation Humaine. Code de la santé publique - première partie - Ministère de la santé publique et de l'assurance maladie" juin 1995

Description du matériau	H (m)	i = 1/H
Humus, 5-10% humus, 5-10% argile	1.2	0.8
Argile, humus argileux, sable très argileux	2.0	0.5
Silt argileux à silt	2.5	0.4
Silt, sable silteux, sable peu silteux et peu argileux	3-4.5	0.33-0.22
Sable fin à moyen	6	0.17
Sable moyen à grossier	10	0.1
Sable grossier	15	0.07
Gravier silteux riche en sable et argile	8	0.13
Gravier peu silteux, beaucoup de Sable	12	0.08
Gravier fin à moyen, riche en sable	25	0.04
Gravier moyen à grossier, peu de sable	35	0.03
Galets	50	0.02

**Tableau : Pouvoir épurateur du sol dans la couverture (zone non saturée)
d'après W. REHESE (1977)**

Description du matériau	Vitesse effective (m/j)	L (m)	I _a = 1/L
Gravier peu silteux, riche en sable	V < 3	100	0.01
	3 < V < 20	150	0.007
	20 < V < 50	170	0.006
	V < 50	200	0.005
Gravier fin à moyen riche en sable	V < 3	150	0.007
	3 < V < 20	200	0.005
	20 < V < 50	220	0.0045
	V < 50	250	0.004
Gravier moyen à grossier, peu sableux	V < 3	200	0.005
	3 < V < 20	250	0.004
	20 < V < 50	270	0.0037
	V < 50	300	0.0033
Gravier et gamets	V < 3	300	0.0033
	3 < V < 20	340	0.0029
	20 < V < 50	360	0.0028
	V < 50	400	0.0025

**Tableau : Pouvoir épurateur du sol dans l'aquifère (zone saturée)
d'après W. REHESE (1977)**