



Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister

**Etude comparative des deux systèmes aquifères en zone humide et
en zone hyper aride : cas du massif dunaire de Bouteldja et de la
vallée de l'Oued souf.**

Option :
Hydrogéologie

Par
Boularouk wahiba
(Ingénieur d'état en Hydrogéologie)

DIRECTEUR DE MEMOIRE :

Mr : KHERICI NACER

Professeur - Université de Annaba

DEVANT LE JURY

PRESIDENT : Mr.DERRADJIF Pr UNIV. ANNABA

EXAMINATEUR : Mr. CHAFFAI .H M.C UNIV. ANNABA

EXAMINATEUR : Mr.LARABA. A.A M.C UNIV. ANNABA

Remerciement

Au terme de ce travail, je tien remercier Dieu avant tout ainsi que tous ceux qui ont participé à la réalisation de ce mémoire et qu'ils trouvent ici ma grande e ma sincère reconnaissance, et tout particulièrement :

Nombreuses sont les personnes qui m'ont aidé à réaliser ce travail, aux quelles je dois avec plaisir, présenter mes remerciements:

Mr.KHERICI mon directeur de mémoire, pour avoir accepté de m'encadrer.

J'adresse également mes remerciements aux membres de jury Mr.DERRADJI.F, Mr. CHAFFAI .H, Mr.LARABA pour avoir bien voulu lire, commenter et débattre mon travail.

J'adresse mes vifs et particulière remerciements a Mr.SNOUSSI SELIM et sa famille, Mr.LEMBARAK.Y et tous les gens de A .N.R.H de Touggourt.

Je tiens aussi à remercier tous les gens de la D.S.A d'El-Oued pour leur aide particulièrement Mme SIHEM .

Je tiens aussi à remercier tous les gens de la D.H.W d'El-Oued pour leur aide a leurs tête Mme AICHA, pour lui approvisionnement par des importants informations.

Je tiens aussi à remercier tous les gens de la D.H.W d'El-Oued pour leur aide.

Je tiens à remercier spécialement Mlle ATTOUI. Badra, Mme KEHAL.Amina, Pour leur aide a la mémoire.

Je remercie toute personne, qui de prés ou de loin ayant généreusement contribué à l'élaboration de ce travail.

-Si par mégarde, j'ai oublié quelqu'un, qu'il me pardonne et qu'il soit remercié pour tous.

Wahiba

ملخص

إن دراسة المقارنة بين نظامين مائيين تتطلب المعرفة المسبقة لكل من الخصائص: الجيولوجية، الجيومترية، الهيدروديناميكية، الهيدروديناميكية، الهيدرومناخية، الهيدروكيميائية .

هذه الدراسة هي مقارنة لجيبي الماء احدهما في منطقة مرتفعة التساقط وهي غشاء كتلة الكثبان الرملية لبوثلجة ، وأخرى في منطقة جد جافة تتمثل في الجيب المائي لوادي سوف، وذلك بهدف معرفة طريقة تفاعل كل نظام مائي ذوي الطبيعة الصخرية المختلفة الموضوعين تحت شروط مناخية مختلفة.

و نحدد من خلال ذلك الحالة النوعية و الكمية للاستعمال البشري و الزراعي، وكذا قابلية المياه لخطر التلوث باستعمال منهجية جديدة.

اختبار قابلية التلوث عن طريق منهجية (ن - خريسي 2008) المطبقة على جيبي الماء الرملين بين وجود أربعة مناطق للتلوث ذات درجات مختلفة .

الأولى ذات قابلية وخطر للتلوث تغطي مركز الكثبان الرملية لبوثلجة ، و الجزء الشمالي لجيب الماء السطحي الخاص بالوادي، هذه المناطق تتطلب إقامة منطقة للحماية، المنطقة الثانية ذات خطر تلوث ضعيف تشمل شمال كتلة بوثلجة و جنوب مركز الوادي . ومنطقة ثالثة ذات مساحات محفوظة سطحيا مع احتمال وجود خطر تلوث للمياه الجوفية و تمتد من الشمال الشرقي إلى الغربي لمنطقة الكثبان الرملية لبوثلجة، و أخيرا مناطق محمية مع غياب خطر التلوث تغطي جزء صغير من الكثبان الرملية لبوثلجة .

الكلمات المفتاحية: المقارنة، الكثبان الرملية، الطبقة السطحية لسوف، قابلية التلوث.

Abstract

The comparison study between two aquiferous systems requires the knowledge of: geological, geometric, hydrodynamical, hydroclimatological and hydrochemical factures.

This method of comparison had been applicated between aquifer systems, in humid zone of the massive stand-dune of Bouteldja, in a dehydrated place which is represented by the superficial aquifer of Souf.

The aim of this task is to know how to reflect two aquifers, have the same stony nature (sande) subjected to different climatic conditions.

We identify the quantity and the qualitification of water for the use in nourishment, for drinking water and for the irrigation of the aquifer layer. And we treat its vulnerability also risk of pollution using a new analyze method.

Vulnerability examination by (N.Kherici 2008) method, which is applicated on both sandy layers appeared four zones of different vulnerability degrees.

The first with pollution's vulnerability and risk, it occupies the centre of massive dune of Bouteldja and the free northern part of Souf's layer, these zone necessitate a protection one. The second with a faint of pollution, it covers north of Bouteldja, as south and centre of Souf. The third one is with safe terrains with possibility of risk of pollution localize in North and South of Bouteldja dune, at last, safe terrains and non risk of pollution, it occupies a small zone of the massive dune of Bouteldja.

Key words: comparison, massive dune, superficial aquifer of Souf , vulnerability.

Résumé

L'étude de comparaison entre deux systèmes aquifères exige la connaissance préalable de ces caractéristiques géologique, géométrique, hydrodynamique, hydroclimatologique et hydrochimique.

Cette méthode de comparaison était appliquée sur deux nappes aquifères en zone humide cas du massif dunaire de Bouteldja, et en milieu hyper aride cas de la nappe superficielle de Oued Souf .

Le but de ce travail est de voir comment réagissent deux nappes aquifères de même nature lithologique (sable) soumises à des conditions climatiques différentes. On identifie la quantification et la qualification des eaux pour l'AEP et l'irrigation des deux nappes aquifères, et traitant leur vulnérabilité et risque de pollution, on utilise une nouvelle méthode d'analyse.

L'examen de la vulnérabilité par la méthode de (N.Khérici 2008) appliquée sur les deux nappes sableuses montre quatre zones de degrés de vulnérabilité différents,

la première avec vulnérabilité et risque de pollution occupe le centre du massif dunaire de Bouteldja, et la partie Nord de la nappe libre de Souf, ces zones nécessitant une zone de protection, la deuxième, de faible risque de pollution couvre le Nord de Bouteldja, et le Sud et centre de Souf ,et une troisième avec des terrains protégés en surface avec possibilité de risque de pollution des eaux souterraines se localise dans la partie nord est et à l'Ouest du massif de Bouteldja, finalement des terrains protégés et absence de risque de pollution occupe une petite zone du massif de Bouteldja .

Mots clés : Comparaison, massif dunaire, nappe superficielle de Souf, vulnérabilité,

Table des matières

Remerciements

Table de matière

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale 1

Partie I : Cadre de la région d'étude

I .Situation géographique et Caractéristiques physiques de la région d'étude 3

I.1. Réseau hydrographique 5

I .2. Morphologie et relief 5

II. Le contexte géologique 7

II.1.Cadre régional 7

II.2.Description lithostratigraphique 7

III. Paléogéographie 12

IV. Conclusion 13

Partie II : Etude climatologique

I. Introduction 15

II. Stations de mesure 15

III. Étude des paramètres climatiques 15

III 1. Précipitation 15

a-Les moyennes mensuelles des précipitations 15

b- Les moyennes annuelles des précipitations	17
III 2. Température	18
- Les températures moyennes interannuelles	18
III 3. Caractéristiques climatique:	19
3.1. Diagramme pluviothermique	19
3.2 . Indice d'aridité	21
III 4. L'humidité :	21
III 5. Le vent	22
IV. Calcul du bilan hydrique	22
1. Estimation de l'évapotranspiration potentielle et réelle	22
IV .1. a. Formule de Turc	23
IV.1.b. Formule de Thornthwaite (bilan d'eau)	23
IV. 2. Ruissellement (R) :	24
IV. 3. Infiltration	24
IV .2. Interprétation du bilan de Thornthwaite	27
V. Conclusion	27

Partie III : Etude hydrogéologiques

I. Introduction	28
II. Les horizons aquifères	28
III. Aperçu comparatif entre la nappe côtière du massif dunaire de Bouteldja et la nappe saharienne phréatique d'El Oued	30
IV. La piézométrie	30
V. Caractéristiques hydrodynamiques	32
V .1. Transmissivité	32

V.2.Perméabilité	33
V.3: Porosité efficace (n_e)	33
VI. La granulométrie	33
VII. Mise en évidence des phénomènes de l'intrusion marine du massif de Bouteldja et de la remontée des eaux de la nappe superficielle de Souf	34
VIII. Conclusion	35

Partie IV :Aperçu hydrochimique

I. Introduction	36
II. Caractéristiques physico-chimiques	36
II. 1. Paramètres physiques	36
II.1.1. Température	36
II.1.2. Le pH	36
II.1.3. Conductivité	36
II.2.Paramètres chimiques	38
a- Diagramme de piper	38
b-Répartition des faciès	38
III. Potabilité des eaux	40
V. Conclusion	41

Partie V : Vulnérabilité et risque de pollution

I. Introduction	42
II. Objectif du travail	42
III. Réacteur sol-zone non saturée - nappe	44
IV- Calcul du Pouvoir épurateur	46

IV. 1. La nappe du massif dunaire	46
IV. 2. La nappe phréatique de Souf	47
V. Présentation de la méthode proposé par Mr : kherici.N en 2008 pour la détermination de la vulnérabilité et du risque de pollution des eaux	48
VI. Définition des indices de contamination (ICO) et (ICM)	50
VI.1 .Calcul de l'indice de contamination Organique (ICO)	50
VI.1.1Classification des éléments organiques	50
1. La DBO5	50
2. Nitrates (NO ₃)	51
3. Nitrite (NO ₂)	51
4. Ammonium NH ₄	52
VI.2 .Calcul de L'indice de contamination Minérale(ICM)	52
VI.1.2.Classification des éléments minérale	52
1. Le Plomb	52
2 . Le Fer	53
3. Le Cuivre	53
VII. Interprétation des la cartes de Vulnérabilité	54
VIII. Conclusion	58
Conclusion générale	59
Bibliographie	
Annexes	

I .Situation géographique et Caractéristiques physiques de la région d'étude :

A l'extrême Est algérien se localise les deux plus importantes des nappes phréatiques sableuses de l'Algérie, l'une est côtière s'étend sur un littoral de près de 10 Km et une superficie de 160 km² environ (Saadeli. B 2007), c'est la nappe du massif dunaire de Bouteldja, et l'autre s'éloignant du littoral de près de 420 km vers le Sud, sur 11738 km² de surface (Khechana. S 2007), c'est la nappe phréatique de Souf.

La première nappe fait partie du système aquifère Annaba –Bouteldja Nord-Est Algérien, inclus dans l'hydro système du bassin versant de la Mafragh, dans le territoire de la wilaya d'El Tarf (Fig I.1.), alors que la deuxième se situe au Sud-Est de l'Algérie fait partie du grand bassin oriental du Sahara septentrional, se trouve dans les territoires de la wilaya d'El Oued (Fig I.2.).

La nappe du massif dunaire de Bouteldja est limité naturellement par :

-  La mer méditerranée au Nord ;
-  par le massif du djebel Koursi à l'Est;
-  la chaîne argilo-gréseuse numidienne au Sud;
-  Oued Mafragh à l'Ouest.

Tandis que la nappe de Souf est entourée par :

-  les chotts Melghir et Merouane au Nord ;
-  L'extension de l'Erg oriental au Sud ;
-  Oued R'igh sud (La Wilaya de Ouargla) à l'Ouest ;
-  La frontière tunisienne à l'Est.

La région étudiée comporte deux sites de caractéristiques physiques différents dont l'un est situé à l'extrême Nord-Est algérien : le massif dunaire de Bouteldja et l'autre au Sud-Est algérien : La nappe superficielle d'Oued Souf.

I.1. Réseau hydrographique :

Notre bassin littoral est traversé par les deux cours d'eaux El Kebir-Est avec un débit moyen de $6,71\text{m}^3/\text{s}$ et celui de bounemoussa de $4,45\text{m}^3/\text{s}$, qui rejoignent la mer à l'embouchure sous le nom de la Mafragh (exutoire unique externe) son écoulement est de régime temporaire, ses eaux sont utilisées généralement pour l'irrigation. (**Fig. I .3**).

Par contre la région de Oued Souf ne contient aucun écoulement de surface, à l'exception du canal de Oued Righ ; c'est un canal artificiel avec un débit moyen de $4\text{m}^3/\text{s}$, son écoulement est permanent, les 2/3 Sud ont été creusés tandis que le 1/3 Nord est d'origine naturel (oued Khrouf), les eaux de ce canal se jettent dans le chott Merouane (exutoire interne). Ce canal était creusé dans le but de faire drainer les eaux en excès d'irrigation des palmeraies et l'évacuation des eaux usées.

I .2. Morphologie et relief:

Le bassin de la Mafragh appartient au domaine de l'Atlas tellien (reliefs jeunes), c'est un relief escarpé très compartimenté car il est le résultat de phases tectoniques alpines qui est à la fin du Tertiaire, ces reliefs ont été écaillées et charriées vers le Sud, et le socle et la série sédimentaire ont été violemment érodés.

La zone du massif Bouteldja présente une multiplicité morphologique (**Fig. I .3**) qui apparaît comme :

- **Le complexe alluvial de la vallée de l'oued El Kébir Est:** série de terrasses à faciès hétérogènes (de sable, graviers, limons et surtout d'argiles).

- **Le cordon dunaire.**

- **Les marécages et les lacs :** Mekada Mohacène et lac des oiseaux, développés dans la basse vallée d'El Kébir Est, ils forment un delta commun.

- **Les montagnes :** Les monts de la Chaffia formant une barrière Est – Ouest avec une altitude moyenne de 450m.

- **Les collines:** au niveau des terrasses déprimées au Nord-Est de Bouteldja.

Par contre la région d'El Oued, qui appartient au bas-Sahara relativement stable, où la tectonique est moins prononcée. La topographie ne présente pas de complexités morphologiques, il s'agit d'une surface des dunes de sables de direction (S-N) dans laquelle on peut distinguer l'existence des trois principales formes : (**Fig. I .4**):

- **Une zone sableuse**, qui se présente sous un double aspect, l'Erg et le Sahara.

- **Une forme de plateaux rocheux** qui s'étendent vers le Sud avec une alternance de dunes et crêtes.

- **Une zone de dépressions** caractérisées par la présence d'une multitude de chotts qui se plongent vers l'Est parmi lesquelles chott Melghir et chott Merouane.

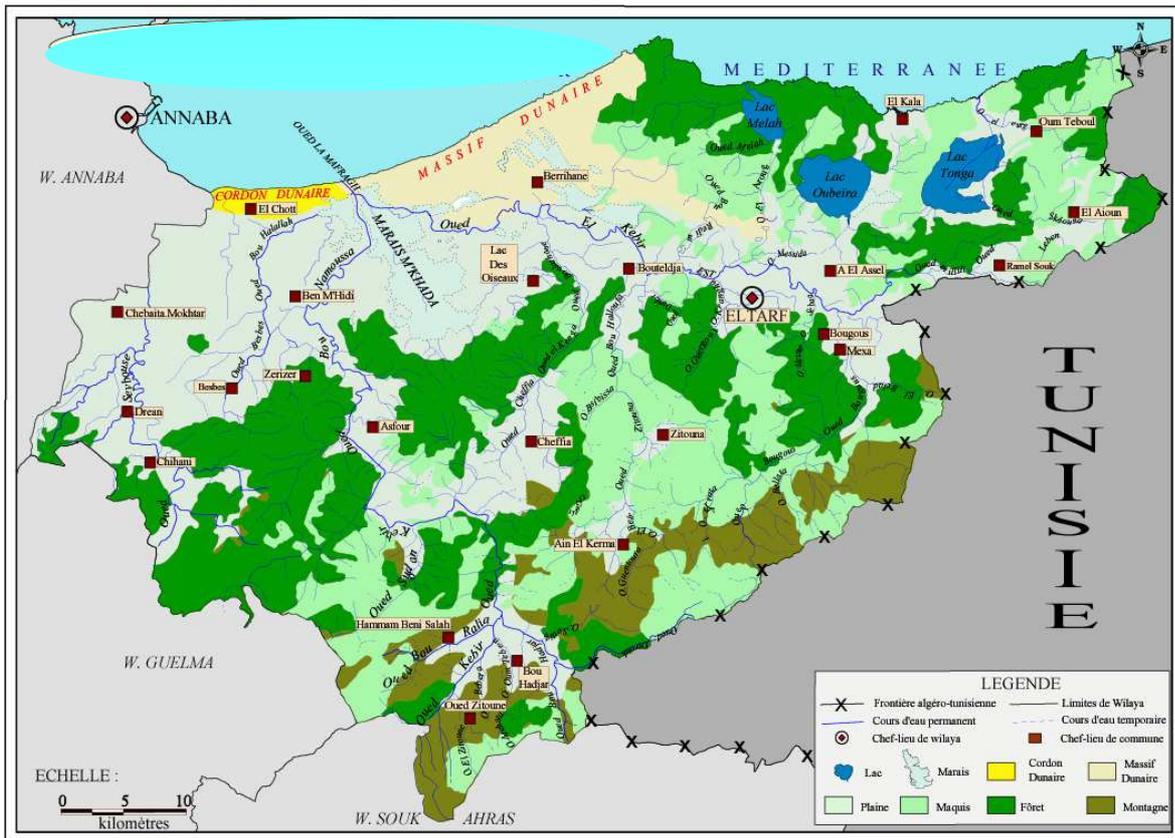


Fig. I.3- : Réseau hydrographique et géomorphologie de la wilaya de Tarf (Bahroun 2008)

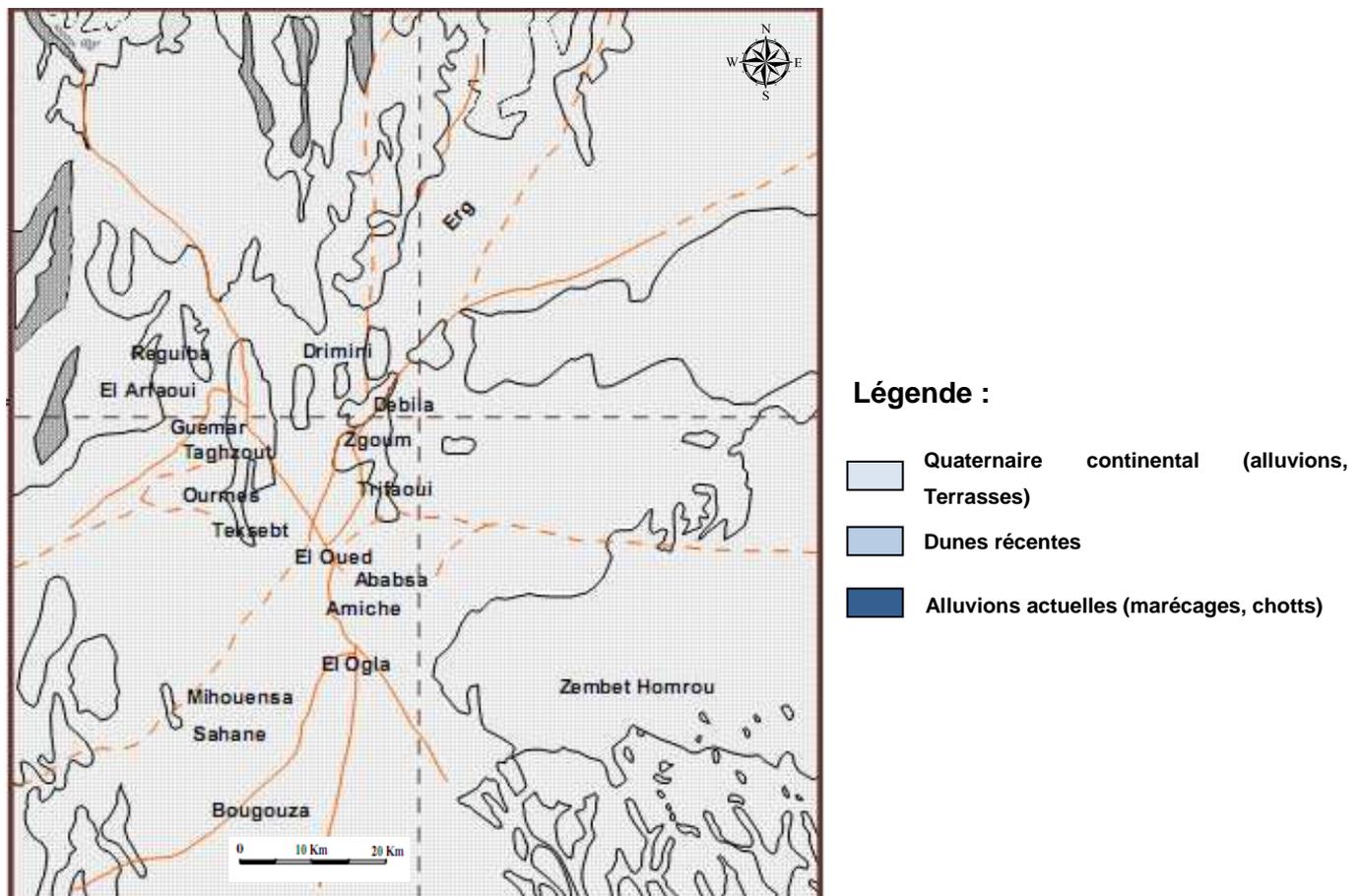


Fig. I.4- : Les principales unités géomorphologique de la wilaya d'El Oued Souf (Drouiche.A.M 2008)

II. Le contexte géologique :

II.1.Cadre régional :

Du fait que les limites des eaux souterraines dépassent de loin celles des eaux de pluie, les unités aquifères existantes ont une très grande extension et débordent largement les zones étudiées, du fait aussi de l'hétérogénéité locale et de la spécificité de chaque nappe, il nous a paru préférable de présenter la géologie générale et locale de chaque région et de donner par la suite en détail la géologie de chaque formation aquifère .

Du point de vu structural, l'Algérie est caractérisée du Nord au Sud par :

- L'Atlas tellien, constitué de reliefs et de plaines littorales ;
- Les hauts plateaux et les hautes plaines ;
- Le Domaine de l'Atlas Saharien ;
- Le Domaine de la plate forme Saharienne. (N.Chabour 2005).

Ces domaines sont divisés en deux unités tectoniques majeures séparées par la faille Sud atlasique.

Les trois premiers domaines portent l'empreinte de la tectonique alpine. C'est le domaine des séries plissées et charriées, où est inclus le massif de Bouteldja.

La plate forme Saharienne où la tectonique est moins prononcée (relativement stable), appartient au craton africain .Elle comprend un socle précambrien sur lequel repose en discordance une puissante couverture sédimentaire, structurée au Paléozoïque en plusieurs bassins sédimentaires. Ces derniers sont délimités par différents éléments tectoniques et dans lesquels la lithostatigraphie est plus ou moins complète, c'est dans cet environnement où s'est formée la vallée d'El Oued Souf.

II.2.Description lithostratigraphique:

Le Secondaire: On remarque l'absence du Crétacé inférieur jusqu'au Turonien dans le bassin de la Mafragh, il est présent seulement sur la zone saharienne. (Fig.I.7)

Crétacé Inférieur :

Le Barrémien: Dans la région d'El Oued il présente une alternance de grès avec passages d'argiles et parfois des intercalations de calcaire, dolomie, on rencontre également des sables avec présence de silex. L'épaisseur moyenne de cet étage est de l'ordre de (200à 230 m).

L'Aptien: De même que le Barremien, ce dernier est constitué principalement par des formations dolomitiques, marneuses et marno-calcaires. On remarque que cet étage a une très faible épaisseur (30m).

L'Albien: La limite inférieure est constituée par le toit de la barre Aptienne, tandis que sa limite supérieure correspond à l'apparition des faciès argileux carbonatés. L'épaisseur est de (91m).

Il présente une alternance de marnes, de grès de sables et surtout par des calcaires avec passages de silex et d'argile, son épaisseur est de l'ordre de (91m).

Le Vraconien: Sa limite constitue un terme de passage entre l'Albien sableux et le Cénomaniens argilo carbonaté. Cet étage est constitué principalement d'une alternance irrégulière de niveaux argilo dolomitiques. On trouve aussi des argiles sableuses et de rares passages de grès à ciment calcaire, ses volumes atteignent les (127m).

Crétacé supérieur :

Le Cénomaniens: La limite inférieure est nette, caractérisée par l'apparition des dolomies et d'anhydrite avec passages des calcaires, la limite supérieure correspond à l'apparition des bancs de calcaires. Cet étage est formé par des anhydrites, des calcaires, des marnes, des dolomies avec quelques intercalations d'argiles. Son épaisseur est de (204m).

Le Turonien: Les limites étant inférieures que supérieures, sont facilement identifiables; le Turonien est constitué par des dolomies micro-cristallines compactes, dures avec des intercalations de calcaire légèrement dolomitique. Il présente donc un intérêt hydrogéologique, son épaisseur est de l'ordre de (50m).

Le Sénonien: Dans la zone littorale il affleure en plusieurs endroits dans les monts de la Cheffia. Il est caractérisé par un faciès schisteux plus ou moins argileux, les épaisseurs varient de (5-10m).

Au Sahara, la plupart de la zone montre que le Sénonien est formé de deux ensembles très différents du point de vue faciès:

Le Sénonien lagunaire : situé à la base, présenté par des anhydrites blanches massives et dures avec quelques passages de dolomies et calcaire, l'épaisseur est de 270m.

Le Sénonien carbonaté: caractérisé par des alternances de dolomies, et d'anhydrites et de calcaires argileux à la limite inférieure correspondant au toit du Sénonien lagunaire, et par une alternance de marnes et de calcaire compactes à la limite supérieure. Son épaisseur dépasse parfois les (300m).

Le Tertiaire :

L'Eocène: la limite supérieure du bassin de la Mafragh est représentée par des argiles numidiennes on les rencontre dans les parties inférieures des versants ainsi au majeure partie des monts de la Cheffia et au Sud-Est de Bouteldja, ses volumes varie de (10-100m).

Dans la région d'El Oued, cet étage est formé du sables et d'argile, parfois on rencontre des gypses et des graviers. Dans cette région, l'étage de l'Eocène est carbonaté à la partie inférieure, sa partie supérieure est marquée par des argiles de type lagunaires.

L'épaisseur de cet horizon varie entre (150 et 200 m).

Oligocène moyen à supérieur: Dans la zone méditerranéenne il s'agit de formation numidiennes d'argiles constituant la base de la série gréseuse, elles sont rencontrées dans toute la partie Sud de la région (Les Monts de la Cheffia) et au Sud Est de Bouteldja. Ces argiles, formant la base de la série numidienne, ont été datées de l'Oligocène moyen à supérieur.

On remarque l'absence de l'Oligocène dans la région d'El Oued.

Le Mio-Pliocène:

Au dessus des formations argileuses de la Mafragh (d'âge Oligocène) viennent se superposer les grès numidiens en position allochtone d'âge Aquitanien (Haied.N 2008), à granulométrie bien réglée (du grains grossiers au grains fins).

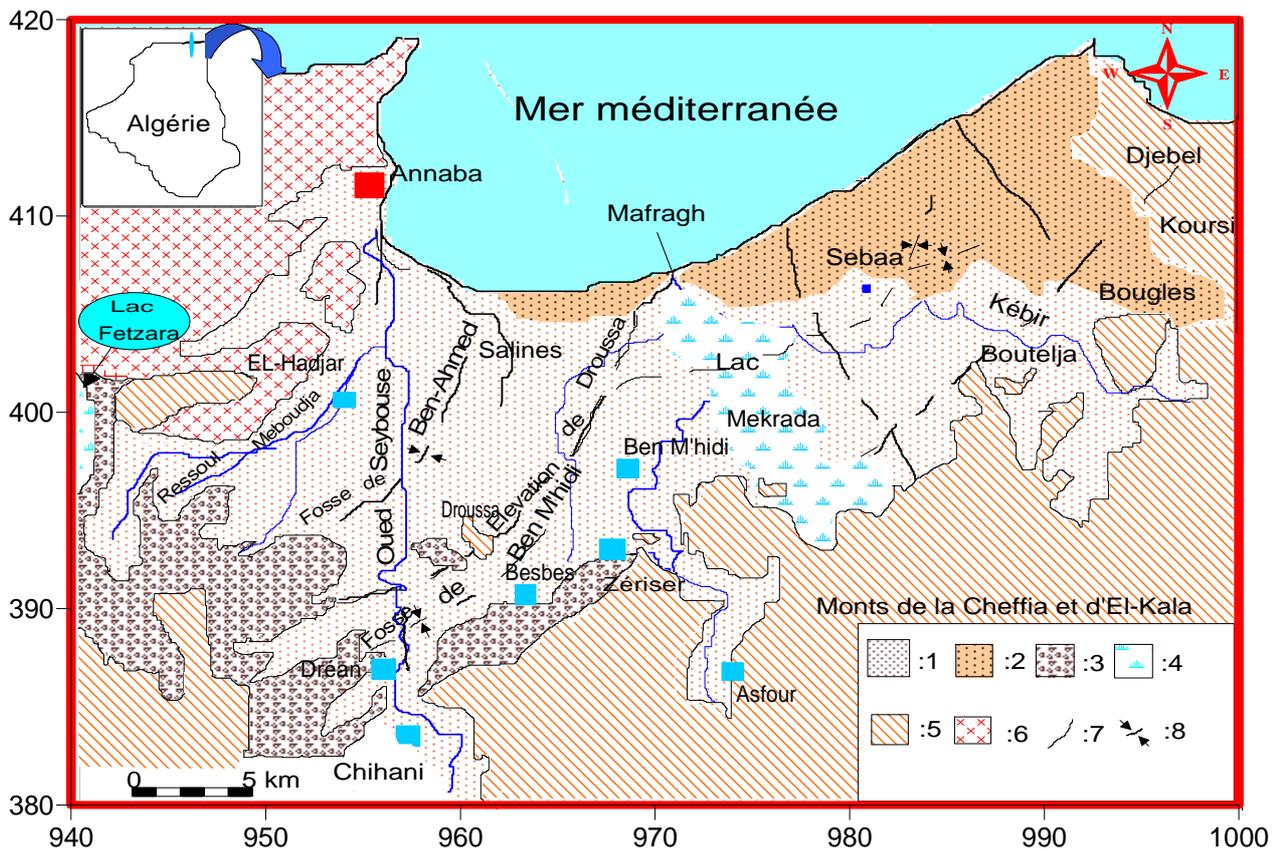
Dans la région de l'Oued repose en discordance indifféremment sur le Primaire d'une part et sur le Crétacé inférieur, le Turonien, le Cénomaniens et l'Eocène d'autre part, il appartient à l'ensemble appelé communément complexe terminale (C.T).

On remarque l'absence du Pliocène dans la région de Bouteldja.

Quaternaire:

Dans la Mafragh, il affleure au niveau de la plaine de Bouteldja, donnant naissance a la nappe aquifère, et aussi sous forme de terrasses de l'Oued El Kébir Est. (**Fig. I .5**)

A l'Oued, le Quaternaire est représenté par des dunes récentes et mélange de grès beiges et parfois blanchâtre, les sables sont fins de couleur beige et de paillettes de gypse.son épaisseur varie de 39 à 67m. (**Fig. I .6**)



Légende : 1 : Alluvions récentes et actuelles ; 2 : Dunes ; 3 : Alluvions anciennes ; 4 : Marécage ou lac ; 5 : Grés et argile numidiens ; 6 : Formations métamorphiques ; 7 : Faille ; 8 : Axe des fosses.

Fig. I .5– : Carte géologique de l'extrême Nord-Est Algérien (Atoui .B 2010)

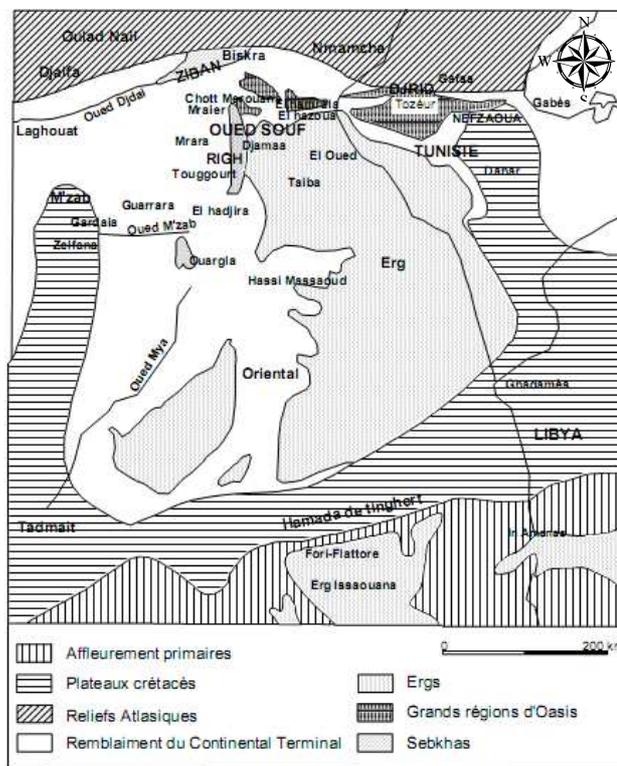


Fig. I .6– : Carte géologique des grandes unités géologiques au Sahara Algérien
(Recherche sur l'Algérie)

Coupe de forage d'El-Oued F1		X=885.300 Y=314.000 Z=98	Description géologique	Etages
0				
50				
100				
150				
200			Alternance d'argile parfois sableuse et de sable hétérogène à intercalation de gypse	Mio-Pliocène
250				
300		300		
350				
400				
450				
500			Alternance de calcaire fissuré et de calcaire massif	Eocène
550				
600				
650			Alternance de marne gris- verdâtre et de calcaire gris, compact et dur ;	
700				
750		740		
800		640	Alternance de dolomie beige compact d'hanydrite blanche et de calcaire argileux	Sénonien Carbonaté
850		840		
900				
950			Anhydrite blanche, massive dure avec passage de dolomie gris claire et intercalation de calcaire	Sénonien Lagunaire
1000				
1050				
1100			Dolomie beige microcristalline compacte, dure, avec passage de calcaire peu dolomitique	Turonien
1150		1167		
1200		1200	Anhydrite massive et calcaire argileux à passages de marnes	
1250		1270	Anhydrite avec passage de calcaire, de dolomie et de marne	
1300			Anhydrite avec passage de calcaire, marne et dolomie avec intercalation d'argile	Cénomaniens
1350		1374		
1400			Calcaire gris clair argileux à passage de dolomie compact, parfois microcristalline	Vraconien
1450		1498		
1500			Marne grise à passage d'argile gris-vert, intercalation de silex, à faible passage de grés calcaire	Albien
1550		1589		
1600				
1650			Dolomie, calcaire, marne	Aptien
1700		1613		
1750			Argile brune rouge à intercalations de grés	
1800		1683		
1850			Grés, dolomie, calcaire et sable, intercalation de silex	Barrémien

Fig.I.7 : Log de forage F1 à l'Albien (Khechana. S 2007)

III. Paléogéographie:

La formation du massif dunaire est faite au cours du Quaternaire selon deux périodes de régression et transgression marine.

Le premier cycle:

Le retrait progressif de la mer finira pour donner des dunes anciennes et favorise la création des lagunes marines qui sont transformées en marécages et lacs.

Le second cycle:

A permis la mise en place des dunes récentes et actuelles suivie d'une phase d'érosion des éboulis récents provenant des massifs numidiens. Par la suite un couvert végétal s'est installé favorisant l'engraissement des dunes par freinage de la vitesse du vent mettant fin à leur mouvement (dunes mortes).

Par contre, si on voit l'âge de formation des sables de Oued Souf, il revient à des périodes plus anciennes, de l'Albien (continental intercalaire), le Pontien (complexe terminal) et du Quaternaire pour la nappe libre superficielle.

Le Sahara a connu, au cours de son histoire géologique de longues phases de sédimentation alternativement marines et continentales qui ont affecté aussi la région de Oued Souf (**Fig.I.7**) .

Sur une plate-forme marine du Primaire vient se déposer le Trias, qui va subir des mouvements tectoniques qui se terminent par l'affaissement du Sahara Nord oriental.

Les matériaux du Hoggar et des Tassili sont arrachés et transportés par les eaux courantes vers la fosse de Berbérie .L'érosion devient moins vive et les écoulements moins puissants avec l'abaissement du relief au Nord.

Puis une phase de subsidence faite suivie par plusieurs transgression marines, le cas de Jurassique et du Crétacé inférieur avec des sables éoliens et fluviaux et des argiles continentales. L'ensemble de ces dépôts dont les sables ont été transformés en grés poreux est appelé "continental intercalaire". Ce nom vient de sa position à l'échelle stratigraphique entre les formations marines Primaires et celle du Cénomani.

Le caractère carbonaté de l'Aptien de la zone d'étude est dû à sa position géographique au Nord du bassin. Le moindre changement bathymétrique provoque une extension horizontale et verticale de la mer. Ces changements bathymétriques sont dus essentiellement au poids du sédiment déposé, et de la subsidence qui provoque l'invasion du continent par la mer durant le Cénomani.

Avec la migration de la mer vers le Nord au cours du Sénonien, la continentalité revient progressivement puis des mouvements compressifs et extensifs contribuent à la formation des sous bassins connus actuellement. Parmi ces sous bassins la cuvette du Souf qui sera chargée par des dépôts Mio-Plio-Quaternaire.

Dès la paléogéographie des deux formations sableuses on peut tirer les points suivants:

- Les deux formations du massif dunaire et d'El Oued, ont connu des phases de régression et transgression marines.
- La période de formation de chaque phase est différente de l'autre.
- Les deux sables sont d'origine éolienne.

IV. Conclusion :

De ce qui vient d'être exposé, on peut conclure que :

Les deux bassins se localise dans des zones de caractéristiques géographiques différents l'un est littoral au Nord et l'autre se trouve dans le Sahara au Sud.

La stratigraphie montre l'absence du Crétacé inférieur jusqu'au Turonien pour le bassin de la Mafragh, il est présent seulement sur la zone saharienne.

Les sables des deux régions du massif dunaire de Bouteldja et de la nappe libre de Souf sont d'origine éolienne.

Les sables représentent des zones d'alimentation et de stockage des eaux souterraines du massif dunaire de Bouteldja et de la nappe superficielle de Souf.

Malgré les positions géographiques différentes, les formations géologiques sableuses restent le meilleure réservoir d'eau pour les deux nappes étudiées.

Les deux tableaux suivants montrent les principales formations géologiques qui ont un intérêt hydrogéologique.

Tableau I.1: Synthèse hydrogéologique du bassin de la Mafragh (Sedrati.S. 2006).

Age		localisation	formation	Epaisseur	Intérêt hydrogéologie	
Quaternaire	c- Récent	Lacs et cordon dunaire	Lit de l'Oued (limons- sable-cailloux- surtout argile).		Intérêt hydrogéologie important.	
	b-Moyen	Pléistocène récent	Au niveau des marécage	Alluvion de basses terrasses	15-20 m au de dessus du thalweg	Réservoir d'eau souterraine important
		Pléistocène moyen		Alluvion de moyen terrasses	30m au dessus du thalweg	Réservoir d'eau souterraine important
		Pléistocène ancien	Bordure de Massif dunaire de Bouteldja	Alluvion de hautes terrasses		Intérêt hydrogéologie faible
	a-Ancien		Malasses calcaire marine et dunaire		Intérêt hydrogéologie faible.	
Tertiaire Eocène Sup-Oligocène		Monts de la cheffia et Sud-Est Bouteldja (Djebel Kourci+ Bourdim+Oum el Agereb) .	Argiles numidiens	100-150 m	Substratum imperméable des formations aquifères	
Secondaire (Crétacé-sup)		Monts de la Cheffia	Schiste plus au moins argileux	Dizaine de mètres.	Alimentation par ruissellement et infiltration dans les nappes souterraines	

Tableau I.2: Synthèse hydrogéologique régionale du bassin oriental du Sahara septentrional (Khechana. S 2007)

ERE	Etage		Lithologie	Nature Hydrogéologique
Quaternaire			Sables.	Nappe superficielle (la nappe phréatique) nappe superficielle de l'Oued Souf
			Argiles, évaporites.	Substratum (imperméable)
Tertiaire	Mio-Pliocène		Sables.	1 ^{ère} nappe des sables (Complexe Terminal).
			Argiles gypseuses	(semi-perméable)
	Eocène	Pontien	Sables, graviers et grès	2 ^{ème} nappe des sables (Complexe terminal).
		Moyen	Argiles lagunaires	Substratum
Secondaire	Crétacé	Inférieur		Nappe des calcaires (Complexe Terminal).
		Sénonien calcaire	Dolomies et calcaires	
		Sénonien lagunaire	Evaporites, argiles	Substratum
		Cénomaniens	Argiles, marnes	Substratum
		Albien Barrémien	Sables et grès	Nappe albienne (Continental Intercalaire).

I. Introduction:

Le climat algérien est de type Méditerranéen dans tout son étendu caractérisé par sa grande variabilité de précipitations et des températures annuelles, cette variation est due essentiellement aux irrégularités topographiques et aux influences opposées de la mer Méditerranée et du Sahara.

Dans ce chapitre, on va analyser les facteurs climatiques et ressortir les régimes pluviométriques à savoir la période humide et la période sèche et le type de climat caractérisant chaque région d'étude.

II. Stations de mesure:

L'étude est basée sur les données des trois stations, la station des salines et de Bouteldja pour la zone de Bouteldja, et celle de Guemar pour la région d'El Oued Souf.

Les données sont prises pour une période de 20 ans d'observations entre (1989-2009). Est voilà les repères géographiques de chaque station :

Tableau. II-1: Caractéristiques géographiques des stations climatiques.

N°	Station	Altitude (m)	Longitude	Latitude
01	Les Salines	2	7°46'E"	36°54'N
02	Bouteldja	20	7°46'E"	36°54'N
03	Guemar	64	06°47E	33°30'N

III. Étude des paramètres climatiques:

1. Précipitation:

Pour caractériser le climat des zones étudiées, nous disposons des relevés des données des trois stations : Les Salines, Bouteldja et Guemar.

a- Les moyennes mensuelles des précipitations:

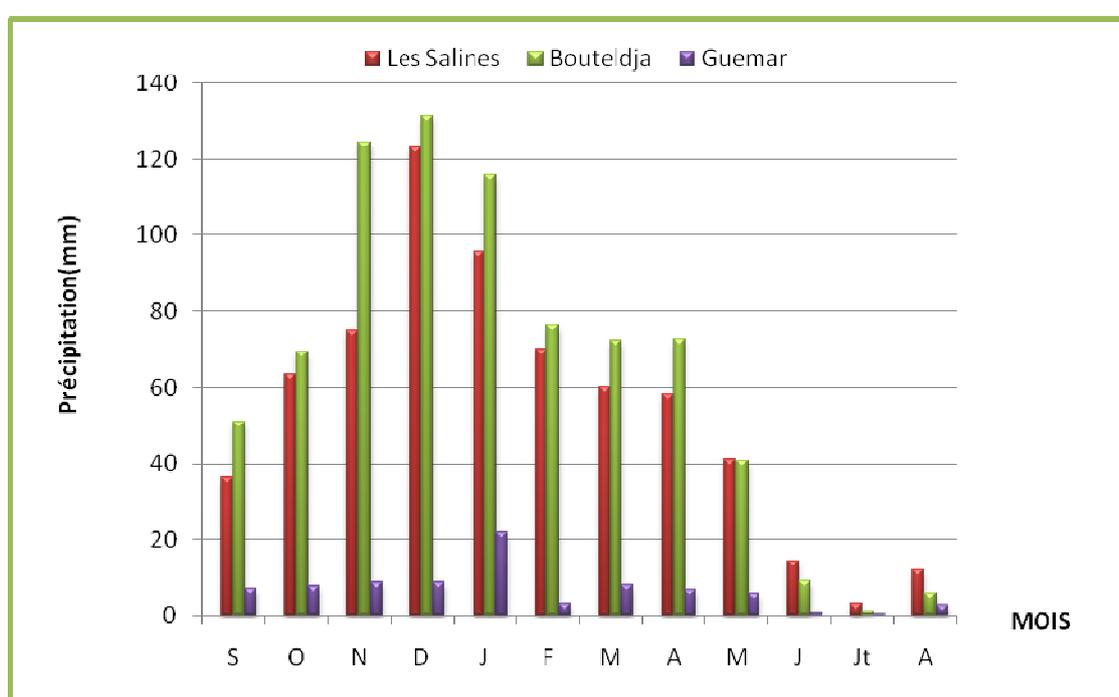
La précipitation moyenne mensuelle nous permet de donner un aperçu sur les variations mensuelles et pluriannuelles des précipitations en se basant sur des calculs de la moyenne arithmétique des hauteurs des précipitations du mois considéré pour un nombre d'années quelconques.

Les moyennes mensuelles des hauteurs de pluies calculées sur la période de 20 ans (1989-2009) sont indiquées au tableau ci-dessous:

Tableau .II-2 : Moyennes mensuelles des précipitations (mm) (1989-2009).

Mois Station	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	Total
Les Salines	36,39	63,44	74,83	123,27	95,91	70,16	60,10	58,28	41,01	14,14	3,1	11,95	658,85
Bouteldja	51,05	69,49	124,53	131,56	115,83	76,33	72,19	72,76	40,57	9,1	1,01	5,8	770,27
Guemar	6,97	7,55	8,56	8,73	21,98	3,11	7,95	6,80	5,74	0,81	0,38	2,63	81,24

Ce tableau a permis d'établir l'histogramme ci-dessous (*Fig.II-1*) qui montre une variation de la pluviométrie avec une amplitude non constante :

**Fig .II-1 : Histogramme des moyennes mensuelles des précipitations en mm (1989-2009)**

Ces résultats montrent, une différence importante entre la région côtière du massif dunaire de Bouteldja qui est l'une des zones les plus arrosées de l'Algérie et celle d'El Oued Souf a caractère aride.

Sur le massif de Bouteldja la valeur maximale de pluies observées au mois de Décembre est de 123mm pour la station des Salines et de 131 mm pour celle de Bouteldja, et un minimum enregistré au mois de Juillet avec 3.1mm pour les Salines et 1.01mm pour la station de Bouteldja.

Différemment à Bouteldja, la région d'El Oued Souf enregistre des valeurs clairement faibles (caractère du climat saharien)

pour une valeur maximale au mois de Janvier d'environ 21mm, et un minimum de 0,38 marqué au mois de Juillet.

b-Les moyennes annuelles des précipitations :

Pour mieux visualiser l'année la plus pluvieuse durant la période d'observation, nous avons calculé les précipitations moyennes annuelles dont les résultats sont regroupés dans le tableau (II-3). La répartition annuelle des pluies est schématisée en figure n : (II-2) marquée par une irrégularité annuelle :

- Station des Salines et de Bouteldja :

L'année la plus arrosée est 2004/2005 avec une valeur de 988.2mm pour les Salines et de 1266.4mm pour la station de Bouteldja. L'année la plus sèche est celle de 1996/1997 avec une valeur de 422.8mm pour les Salines et (471.95) mm pour la station de Bouteldja .

- Station de Guemar :

L'année la plus arrosée est 2008/2009 avec une valeur de 191.9 mm et l'année la plus sèche est 1994/1995 avec une valeur de 24mm.

Tableau .II-3: Moyenne annuelle des précipitations (1989/2009)

Année	P (mm)			Année	P (mm)		
	Les Salines	Bouteldja	Guemar		Les Salines	Bouteldja	Guemar
1989/1990	534.2	560.75	173.6	1999/2000	459.6	741.22	78
1990/1991	689.3	988.03	74.2	2000/2001	550.7	711.3	28.1
1991/1992	684.6	916.4	67	2001/2002	460.3	394.8	50.5
1992/1993	644.1	793.1	35.3	2002/2003	772.1	1208.9	59.5
1993/1994	519.7	559.14	55.2	2003/2004	708	727.9	105
1994/1995	548.3	580.8	24	2004/2005	988.2	1266.4	91.6
1995/1996	807	833.5	151.1	2005/2006	612.3	616.7	112.6
1996/1997	422.8	471.95	30.3	2006/2007	647.9	655.55	65.4
1997/1998	941	885.2	75.2	2007/2008	539.7	541.8	26.4
1998/1999	841	765.7	130	2008/2009	853.6	1186.3	191.9

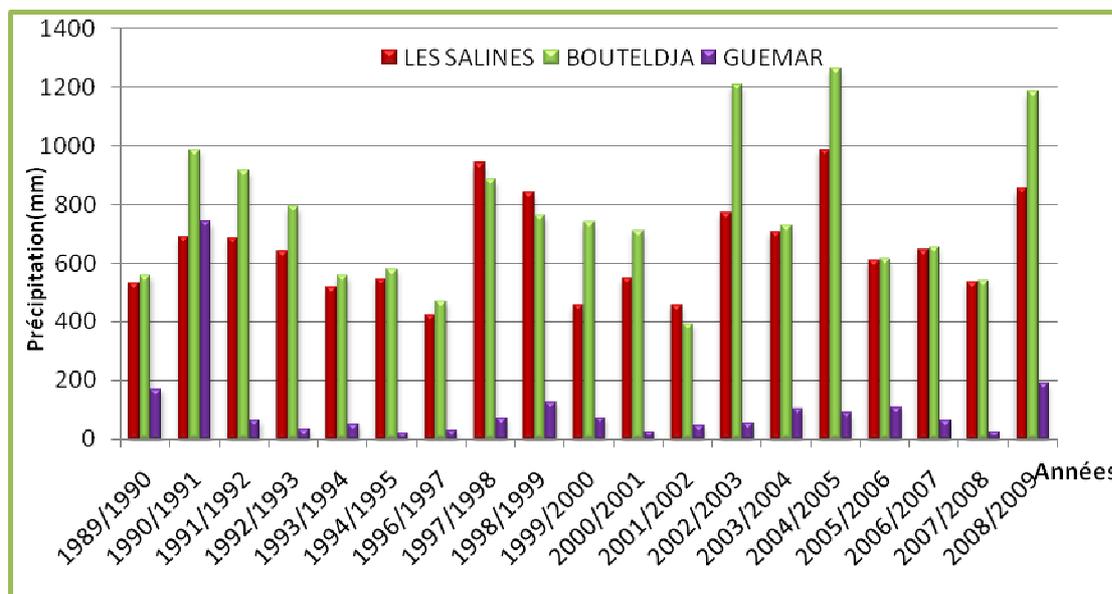


Fig. II.2 : Répartition annuelle de précipitation pour la période de (1989-2009)

A l'irrégularité des données disponibles à la station de Bouteldja, on se basera pour la suite étude des paramètres climatologiques, seulement sur les données de la station des Salines concernant la zone côtière et de Guemar pour la région d'El Oued Souf.

2. Température:

- Les températures moyennes interannuelles :

La répartition moyenne mensuelle interannuelle de la température est représentée au tableau II.4 et la figure II.3:

Tableau. II.4: Moyennes mensuelles de la température de l'air (°C) (1989-2009)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Moy
Station													
Les Salines	24.90	19.9	15.5	13.10	11.6	11.8	13.2	15.10	18.20	21.90	24.90	25.70	17.15
Guemar	29,11	23,90	16,18	11,52	10,66	12,87	19,61	20,91	26,26	31,17	33,97	33,65	22.48

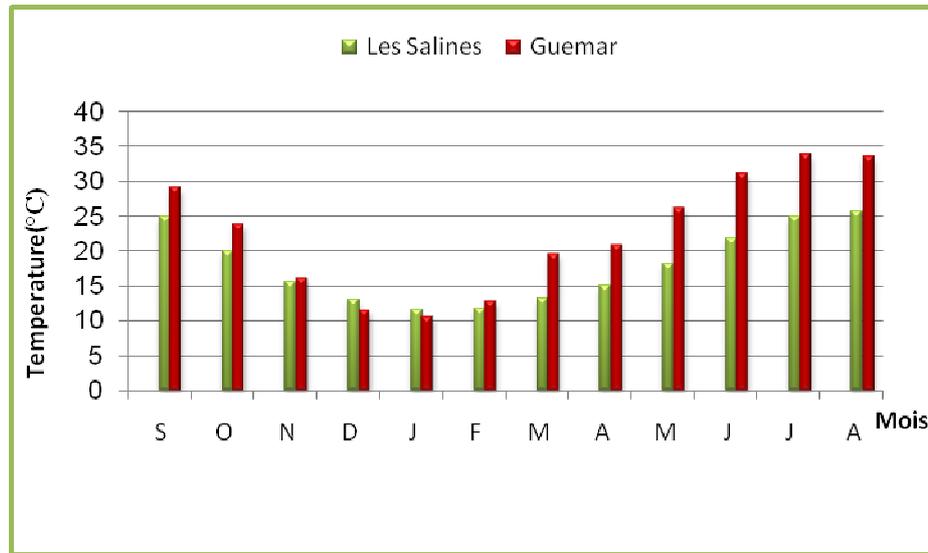


Fig .II.3 : Répartition moyenne mensuelle interannuelle de la température (1989/2009)

Les différences de température entre les deux zones traduisent, essentiellement, l'effet conjugué de l'altitude et le voisinage et l'éloignement de la mer.

Le gradient thermique a aussi son rôle sur ces intervalles thermiques. Selon (seltzer 1948), le gradient thermique en Algérie est de 0,5 C/100m. Ce gradient est, cependant, plus élevé dans le Sahara.

3. Caractéristiques climatique:

La combinaison des données des précipitations et celles des températures permet de mettre en évidence :

- Les saisons sèches et humides au cours de l'année grâce au diagramme pluviothermique de Gausсен;
- Le type de climat suivant la méthode de calcul de l'indice d'aridité.

3.1. Diagramme pluviothermique :

Cette méthode est basée sur la combinaison des deux paramètres climatiques, la précipitation et la température (Fig.II.4), où les températures sont portées à une échelle double des précipitations (in Baygnons).

Un mois sec est celui où le total moyen des précipitations (mm) est inférieur ou égal au double de la température moyenne (°C) du même mois.

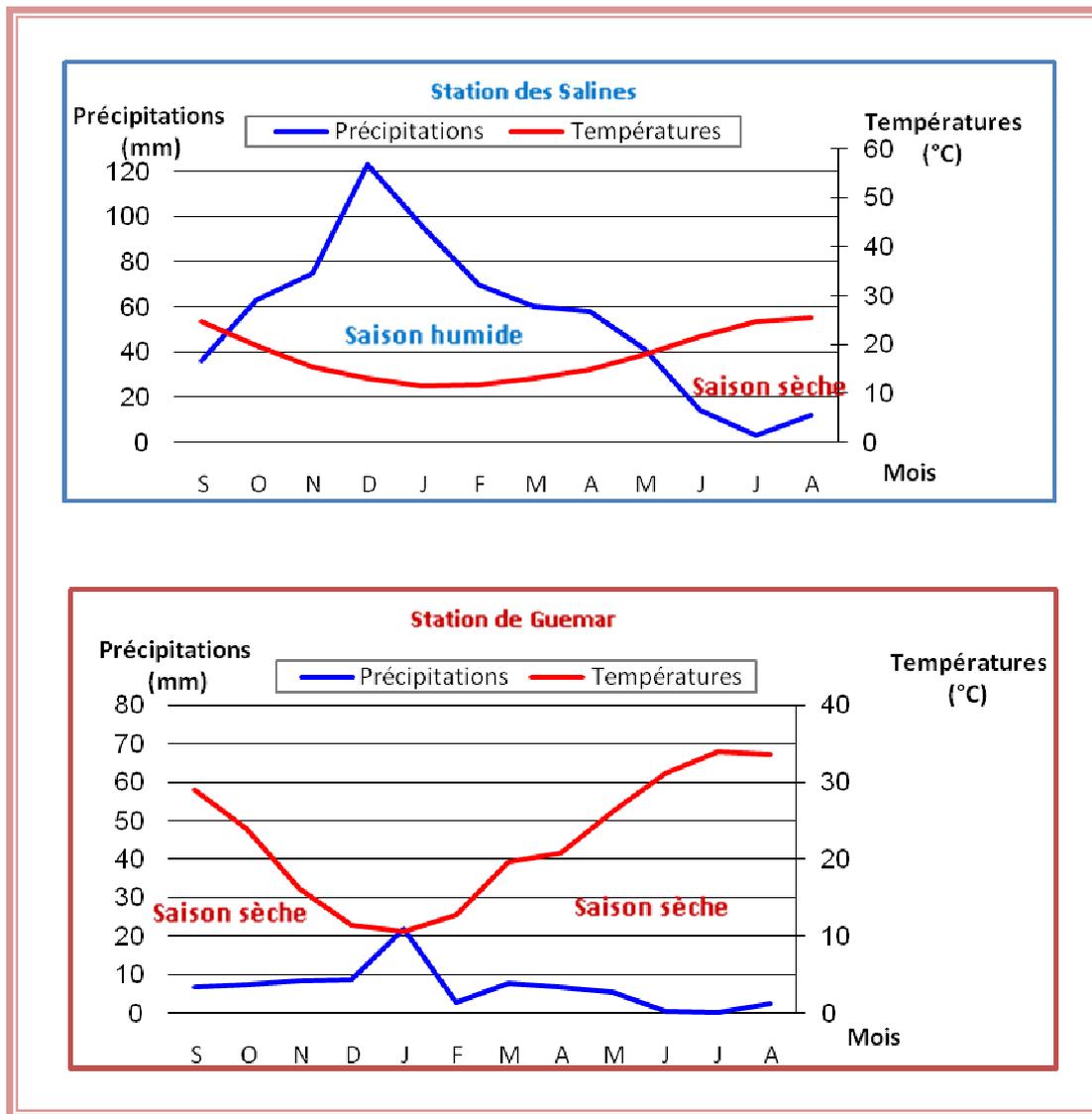


Fig.II.4 : Diagramme pluviothermique des deux stations des Salines et de Guemar (1989-2009)

A partir de ce diagramme, on peut dire que:

Le massif dunaire de Bouteldja est soumis à un climat méditerranéen tempéré, caractérisé 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 allant du mois de Mai jusqu'au mois d'Octobre. (Fig.II .4).

Alors que la zone de l'Oued Souf est marquée par une année hydrologique unique avec une période sèche longue et l'absence totale de la période humide, même pour le mois de Janvier qui est marqué par la température la plus basse 10.66 °C et la précipitation la plus élevée 21,98 mm.

La détermination de ces périodes a une importance primordiale pour les besoins en eau d'irrigation.

3.2 . Indice d'aridité : Cet indice dépend essentiellement des précipitations moyennes mensuelles en (mm) et la température annuelle en (°C), en appliquant la formule suivante :

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

I : Indice d'aridité.

P : Précipitation moyenne mensuelle (mm).

T : Température moyenne annuelle (°C).

-Pour les Salines $P = 658.85 \text{ mm}$; $T = 17.15 \text{ °C}$ donc $I = \frac{658.85}{17.15 + 10} = 24.26 \text{ mm/°C}$

-Pour Guemar $P = 81.24 \text{ mm}$; $T = 22.48 \text{ °C}$ donc $I = \frac{81.24}{22.48 + 10} = 2.47 \text{ mm/°C}$

Sur la base des fourchettes de l'indice d'aridité fixées par De Martone, nous pouvons tirer le type de climat de nos régions d'étude.

Valeur de l'indice	Type de climat
$0 < I < 5$	Hyper-aride
$5 < I < 10$	Aride
$10 < I < 20$	Semi-aride
$20 < I < 30$	Semi-humide
$30 < I < 55$	tempéré

Ce qui confirme que le massif dunaire de Bouteldja est de climat tempéré, et celui de l'Oued Souf est hyper aride.

3. L'humidité :

L'humidité moyenne des deux zones est représentée dans le tableau. II.5.

Tableau. II.5: Répartition moyenne mensuelle de l'humidité aux stations des Salines et de Guemar (%) (1976-2006)

Station \ Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Moy
	Les Salines	47,86	52,83	60,60	66,86	65,38	56,24	49,46	43,91	38,94	34,80	31,63	35,04
Guemar	72,41	74,7	76,18	76,97	78,4	74,29	75,31	74,49	72,87	72,78	69,95	71,86	74,35

L'humidité relative indique que l'atmosphère, se trouve dans un état plus ou moins proche de condensation, c'est à elle se rattache la sensation de l'humidité ou de sécheresse de l'aire.

La plus grande humidité relative de l'aire est marquée au période hivernale, elle atteint les 65,86% pour les Salines et 78,4% pour Guemar tandis que la plus petite en période estivale atteignant 31,63% sur les Salines et 69,95% pour la station de Guemar.

Les forst voisinage teneurs d'humidité dans les deux régions ont leurs causes particulière pour chaque région. Pour le massif de Bouteldja, le voisinage de la mer méditerranée joue un rôle primordial dans le climat, les surfaces d'eau libre telle que l'oued El Kebir-Est et celui de Bounemoussa ainsi que le nombre important de lacs et des marais et la densité du couvert végétale.

Pour l'Oued Souf les causes sont dues aux fortes valeurs de température ainsi les surfaces essentielles des chotts Melghir, Merouane et Djerid et Fedjedj (territoires tunisien), la proximité de la nappe libre à la surface, aussi on peut ajouter l'évaporation provenant des surfaces résultant du phénomène de la remonté des eaux.

4. Le vent :

Le vent est l'un des éléments les plus déterminant des régimes pluvieux, de l'évaporation et par conséquent du climat, il est déterminé par sa direction, sa vitesse et sa fréquence.

La région de Bouteldja est prédominée par des vents de direction NW-SE et leur vitesse moyenne est de l'ordre de 30Km/h. (B.Saadali 2007) pendant tous les mois de l'année, ce qui explique le grand développement des dunes de l'Est algérien. Cette région reste tributaire de la circulation des masses d'air propres à la méditerranée occidentale avec une ouverture des vents sahariens chauds dus aux Siroccos pendant la période sèche.

Sur l'Oued Souf les vents sont de 30 à 40 km/h.(S.khachana2007) de direction ENE, les plus dominants provenant de la méditerranée dits BAHRI. Le Sirocco (Chihili) présente le vent caractérisant la saison d'Eté souffle de direction Sud-Nord et jette des courants d'air chauds parfois avoisinant des vagues de sables.

IV. Calcule du bilan hydrique :

IV.1. Estimation de l'évapotranspiration potentielle et réelle:

L'évapotranspiration est la quantité d'eau évaporée à partir du sol, des surfaces d'eau libres et celle transpirée par les végétaux.

IV .1. a. Formule de Turc:

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

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

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

ETR : Evapotranspiration réelle annuelle en mm

P : Précipitation moyenne annuelle en mm

L : pouvoir évaporant, est une limite vers laquelle tend l'ETR lorsque le P devient grand

T : température moyenne annuelle en °C.

Tab.II.6: Résultats de l'application numérique de la formule de TURC

Station \ Paramètres	P (mm)	T (°C)	L	ETR (mm/an)
Les Salines	658.85	17.15	980.96	983.35
Guemar	81.24	22.48	1430.01	21.78

IV.1.b. Formule de Thornthwaite (bilan d'eau) :

Cette méthode est basée sur la notion de **RFU** (réserve en eau dans le sol facilement utilisable par les plantes). Dans nos cas la **RFU** admet 100 mm comme valeur maximale.

Outre que les données pluviométriques et la température, cette méthode introduit le coefficient thermique **K** et l'indice de température mensuel **i** pour l'estimation de l'ETR selon

la relation suivante :

$$i = (t/5)^{1.5}$$

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

$$\text{Et } a = 1.6/100I + 0.5$$

Avec

t : Température moyenne annuelle ° C

i : Indice thermique mensuel

I : Somme des indices mensuels

ETP : Evapotranspiration potentiel mensuelle en mm

K : terme correctif dépend de la durée d'insolation

Les résultats de calculs effectués selon cette méthode sont reportés dans les tableaux ci dessous.

IV. 2. Ruissellement (R) :

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

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

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

R : ruissellement en mm.

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

P : précipitation moyenne mensuelle en mm.

Avec :

ETP : évapotranspiration potentielle.

Les résultats calculés à partir de cette formule sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau .II.7 : Détermination du ruissellement dans les deux stations

Stations	Les Salines	Guemar
Paramètres		
P (mm)	658.85	81.24
R (mm)	123.83	0.13

Si on compare les résultats, la différence est grande, la lame d'eau ruisselée sur l'aire de l'Oued Souf est négligeable par rapport à celle de Bouteldja, cela est grâce à la nature du terrain et du climat de Oued Souf caractérisé par une forte perméabilité à savoir les formations sableuses et une faible pluviométrie et la forte évaporation.

IV. 3. Infiltration :

Elle est définie comme étant le mouvement de l'eau dans un sol en passant par la surface, calculée par la formule :

$$I = P - R - ETR.$$

Tableau .II. 8 : Détermination de l'infiltration dans les deux stations.

Paramètres	P(mm)	ETR (mm)	R(mm)	I(mm)
Stations				
Les Salines	658.85	481.1	123.83	53.92
Guemar	81.24	81.2	0.13	-0.09

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

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

Tableau II .9: Bilan de l'eau selon C.W Thornthwaite, station des Salines (1989/2009)

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Total
P(mm)	36,39	63,44	74,83	123,27	95,91	70,16	60,10	58,28	41,01	14,14	3,1	11,95	658,85
T(C°)	24,90	19,9	15,5	13,10	11,6	11,8	13,2	15,10	18,20	21,90	24,90	25,70	
I	11,4	8,1	5,5	4,3	3,6	3,7	4,30	5,30	7,1	9,4	11,4	11,9	85,9
K	1,03	0,98	0,89	0,88	0,9	0,87	1,03	1,08	1,18	1,18	1,20	1,14	
ETP (mm)	121,1	75,7	43	31	25,3	25,2	36,8	49,7	77,1	109,1	141,1	142,2	877,4
ETR(mm)	36,4	63,4	43,	31	25,3	25,2	36,8	49,7	77,1	78,1	3,1	12	481,1
RFU(mm)	00	00	31,8	100	100	100	100	100	63,9	00	00	00	
EXC(mm)	00	00	00	24	70,6	44,9	23,3	8,6	00	00	00	00	171,4
DA(mm)	84,7	12,3	00	00	00	00	00	00	00	31	138	130,3	396,3

Tableau II .10: Bilan de l'eau selon C.W Thornthwaite, station de Guemar (1989/2009)

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Total
P(mm)	6,97	7,55	8,56	8,73	21,98	3,11	7,95	6,80	5,74	0,81	0,38	2,63	81,24
T(C°)	29,11	23,90	16,18	11,52	10,66	12,87	19,61	20,91	26,26	31,17	33,97	33,65	
I	14,4	10,7	5,9	3,5	3,1	4,2	7,9	8,7	12,3	16	18,2	17,9	122,9
K	1,03	0,97	0,86	0,81	0,87	0,85	1,03	1,10	1,21	1,22	1,24	1,16	
ETP (mm)	138,2	80,8	28	12	10,1	15,6	52,2	64,1	122,8	187,4	235,7	218,7	1165,7
ETR(mm)	7	7,6	8,6	8,7	10,1	15,0	8	6,8	5,7	0,8	0,4	2,6	81,2
RFU(mm)	00	00	00	00	11,8	00	00	00	00	00	00	00	11,8
EXC(mm)	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
DA(mm)	131,2	73,3	19,5	3,3	00	0,6	44,2	57,3	117,1	186,6	235,3	216,1	1084,5

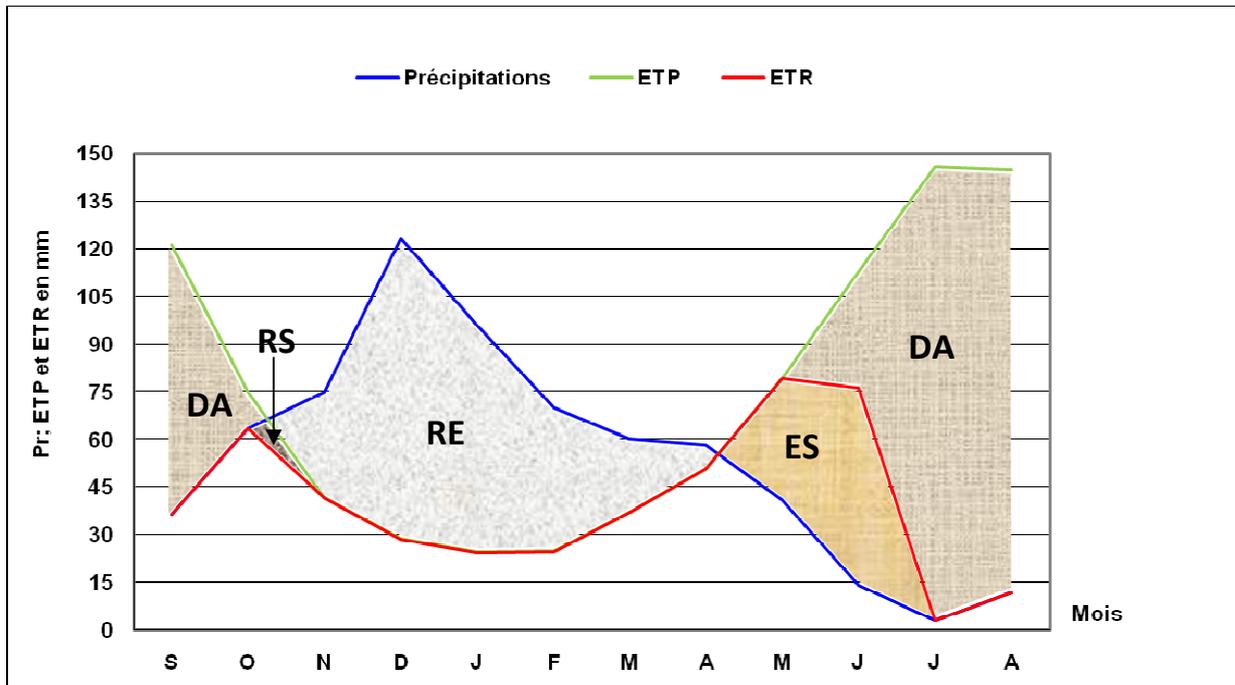


Fig II.5 : répartition graphique du bilan hydrique de Thornthwaite dans la station des Salines (1989/2009)

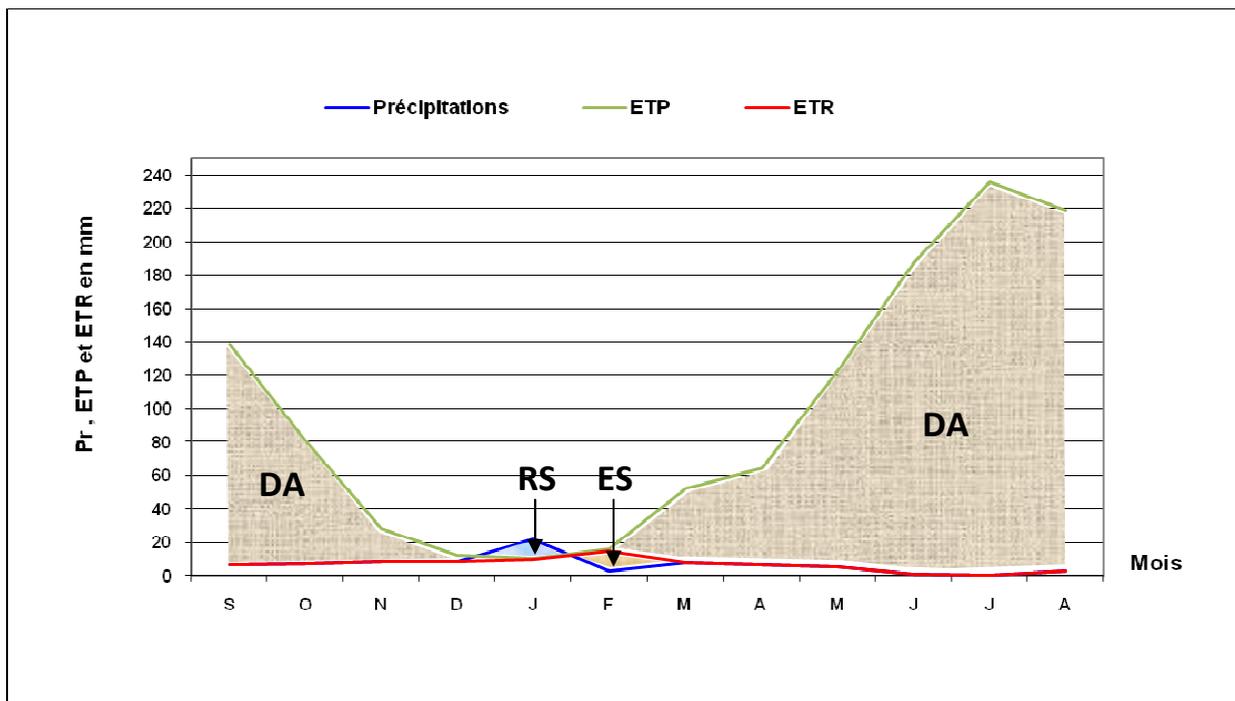
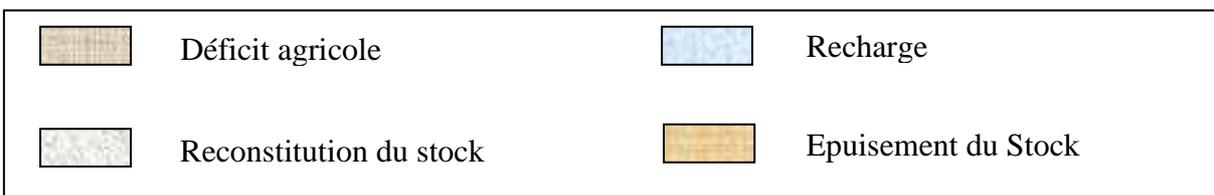


Fig II.6 : répartition graphique du bilan hydrique de Thornthwaite dans la station de Guemar (1989/2009)



IV .2.Interprétation du bilan de Thornthwaite:

L'établissement du bilan hydrique a pour but de connaître les différents paramètres (ETP, ETR, RFU, DA, EXC), qui nous aident à comprendre le fonctionnement des systèmes hydrologiques (Haied. N. 2008).

D'après la méthode de Thornthwaite, le bilan hydrique calculé pour les deux stations nous a permis de constater que la RFU (réserve facilement utilisable) commence à se reconstituer à partir du mois de Novembre pour atteindre son maximum (100 mm) de Décembre à Avril pour la station des Salines, alors que pour la station de Guemar la RFU ne s'effectue qu'au mois de Janvier avec une valeur de 11.8 mm et le reste de l'année est épuisée.

Le ruissellement sur les Salines se manifeste par un écoulement, il diminue à partir du mois de Mai jusqu'à ce qu'il soit totalement épuisé au mois de Juin accompagné par l'apparition du déficit agricole (DA) qui se poursuit jusqu'à Octobre. A Oued Souf, le ruissellement n'existe plus (climat Saharien) pendant toute la période, son déficit agricole est constant durant toute l'année sauf pour le mois de Janvier avec une moyenne annuelle de l'ordre de 1084.5 mm ce qui nécessite une irrigation presque sur toute l'année.

V.CONCLUSION :

L'analyse des caractéristiques climatiques des deux zones étudiées, relève que la région côtière de Bouteldja est marquée par des précipitations annuelles élevées 770.27mm/an, avec une certaine aridité à la fin du printemps et au cours de l'Eté surtout au mois de Juillet, alors que les précipitations de la zone de Oued Souf sont très faibles de l'ordre de 81.24mm/an, marquées par une période sèche. La mer Méditerranée avec sa grande surface d'eau, située au Nord de l'Algérie, a une influence remarquable sur le climat aussi bien au Nord (littoral) qu'au Sud (Sahara).

Les régions de Bouteldja, et de Oued Souf sont soumises à un climat Méditerranéen, la premier est caractérisé par une saison pluvieuse et humide allant du mois d'octobre jusqu'au mois de mai et une saison sèche et chaude du mois de juin jusqu'au mois de septembre, et la deuxième région de Oued Souf marquer par une période sèche et chaude se prolonge entre le mois de mars et novembre et une période humide et froide s'étale entre novembre et février.

D'après l'interprétation du bilan hydrique, on conclue que la reconstitution du stock sur le bassin de la Mafragh 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 jusqu'au mois d'Octobre, par contre, pour le bassin saharien, tous les mois sont déficitaires, ce qui nécessite une irrigation presque sur toute l'année.

I. Introduction:

Dans cette partie, il s'agit d'une étude hydrogéologique régionale regroupant deux entités géographiques et climatiques différentes, localisées, cependant, pratiquement dans différents bassins versants. S'agissant du bassin côtier de la Mafragh et de bassin oriental du Sahara septentrional.

L'hydrogéologie a pour but de déterminer le rôle des caractères lithostratigraphiques, en mettant en évidence, l'extension et la géométrie des nappes, les modalités de l'écoulement, ainsi la détermination des caractéristiques hydrodynamiques à partir des essais de pompage.

II. Les horizons aquifères :

La lithologie et des considérations hydrodynamiques permettent d'individualiser dans chaque zone les unités aquifères suivants :

Pour la zone côtière on note la présence de deux nappes confondues :

- 1- Une nappe libre, exploitée par un grand nombre de forages et composée essentiellement de sables, c'est la nappe du massif dunaire de Bouteldja.
- 2- Une nappe profonde semi captive reconnue par les forages profonds et par les compagnes géophysiques et constituée de graviers.

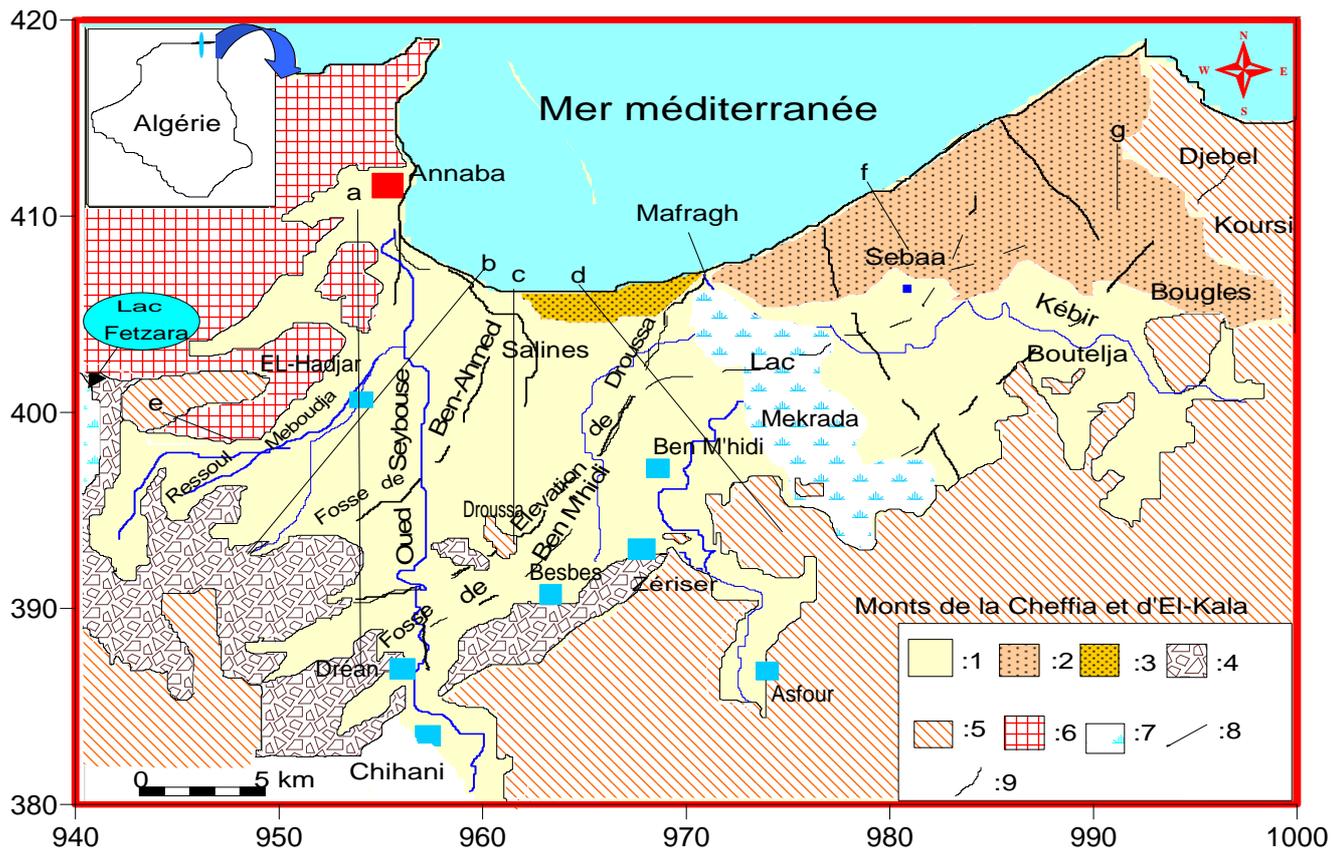
Tandis que la zone d'El Oued Souf est connue par la présence des trois nappes:

- 1- Une nappe phréatique ; celle concernant notre étude.

Et deux nappes fossiles captives :

- 2- La nappe du continental intercalaire (CI), aquifère profond composé de sable gréseux ou gréseux argileux,
- 3- La nappe du complexe terminal : composé de trois nappes superposées:
 - L'une dans les sables et argiles du Pliocène (CT 1).
 - L'autre dans les sables grossiers à graviers, du Miocène supérieur (CT 2).
 - La troisième dans les calcaires fissurés, plus ou moins karstiques, de l'Eocène inférieur (CT 3). (Helel.F et Ourihane.D 2004)

Ces deux systèmes hydrauliques font du Sahara algérien une région considérée comme très riche en ressources hydriques.



1 : Nappe des formations superficielles ; 2 : Nappe des sables du massif dunaire de Bouteldja ; 3 : Nappe des sables du cordon dunaire ; 4 : Nappe des alluvions de haut niveau ; 5 : Grès et argiles du Numidien ; 6 : Formations métamorphiques (nappe des cipolins) ; 7 :Marrécages ; 8 : Failles ; 9 : Fosses.

Fig.III.1– Les différentes nappes aquifères dans la région Annaba-Bouteldja (Attoui.B 2010)

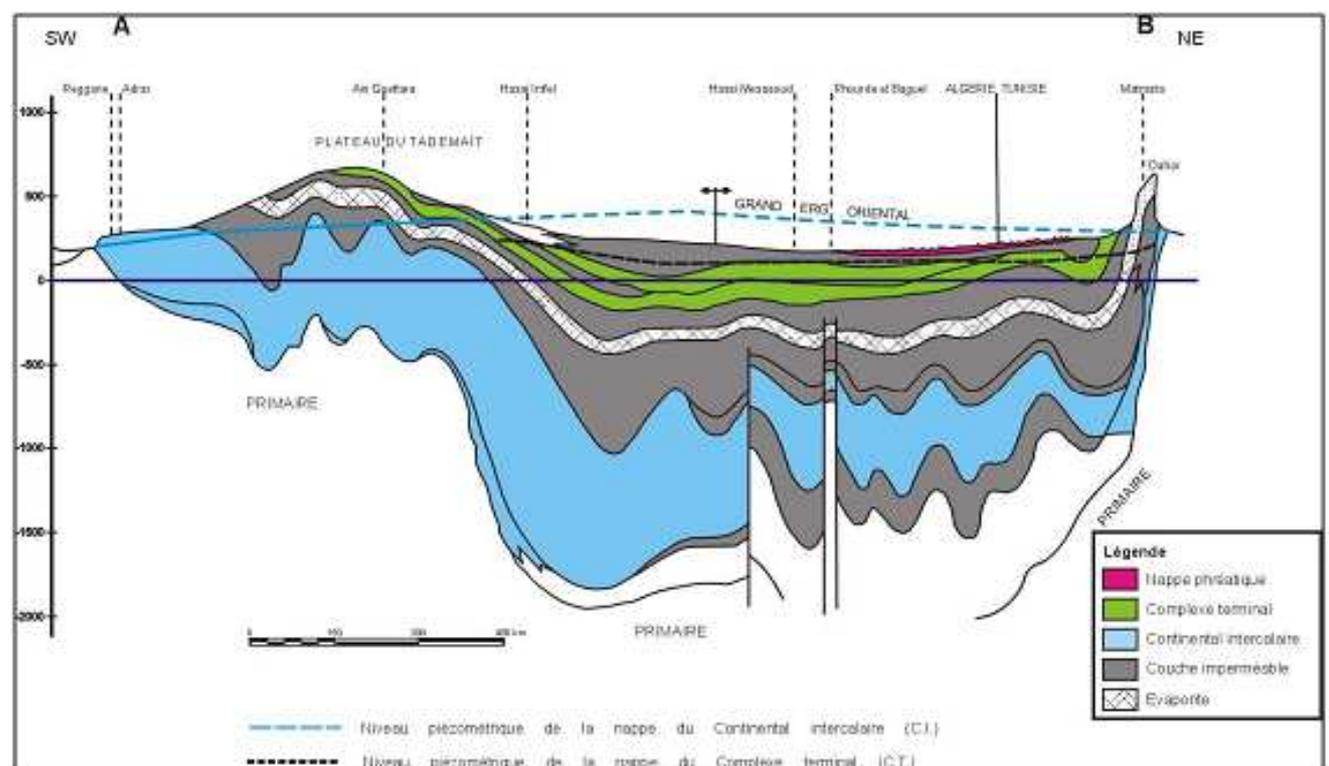


Fig.III.2– Les différents horizons aquifères à travers le Sahara (d’après UNESCO 1972).

III. Aperçu comparatif entre la nappe côtière du massif dunaire de Bouteldja et la nappe saharienne phréatique d'El Oued :

Le long du littoral se localise le massif dunaire de Bouteldja couvrant une superficie de près de 180 km², par ailleurs la nappe phréatique de Souf s'éloigne de la mer de près de 420 km et s'étale sur toute l'étendue de la région d'El Oued Souf avec 11738 km².

Les deux formations sont constituées de sables éoliens formant deux nappes libres d'origine différente dans deux zones très éloignées, l'épaisseur de la première nappe est variable comprise entre 20 et 120 m, elle est relativement importante par rapport à celle de l'Oued Souf dont l'épaisseur moyenne de 40 mètres.

L'alimentation du massif dunaire de Bouteldja est faite à partir des pluies abondantes de la saison pluvieuse, et des écoulements souterrains de la nappe de grés numidiens (infiltration et ruissellement), qui sont visibles par les sources au pied du massif gréseux dans sa limite Est. Par contre l'alimentation de l'aquifère quaternaire du Souf est assurée par l'infiltration des eaux de rejets pour l'AEP et l'irrigation des forages profonds (CT et CI) et par les rares et faibles précipitations typiquement sahariennes.

La nappe côtière de Bouteldja repose sur un substratum argilo – gréseux imperméable à semi-perméable ce qui permet la drainance de la nappe libre par la nappe des graviers. Alors que la nappe de Souf porte une bonne assise argileuse compacte ou plastique imperméable d'une épaisseur de 20m.

Les deux ensembles aquifères présentent selon les coupes hydrogéologiques (Fig.III.3 et III.4) des lentilles d'argile par fois mélangées avec des sables ou des gypses (cas de Souf) .

L'exutoire de la nappe du massif de Bouteldja est dirigé vers la mer, alors que les eaux de la nappe de Souf sont dépourvues d'exutoire naturel.

IV. La piézométrie:

D'après l'allure des courbes piézométriques des cartes (Fig :III.5 et III.6) on remarque en général pour les deux nappes de Bouteldja et de l'Oued Souf, un axe de drainage ou d'écoulement qui se fait du Sud vers le Nord et suit la topographie du terrain.

On note pour la région de Bouteldja, un second sens d'écoulement vers les terrasses de l'oued El Kebir au Sud. On ajoute pour l'Oued Souf la présence des zones où la surface piézométrique dépasse la surface du sol cela est dû au problème de la remontée des eaux de la nappe superficielle causé par la surexploitation des nappes CT et CI, et des problèmes de réseau d'assainissement.

Localement, Le massif de Bouteldja peut être mis sous pression à la faveur de niveaux argileux imperméables alors que la nappe de Souf est libre sur toute l'étendue de la zone.

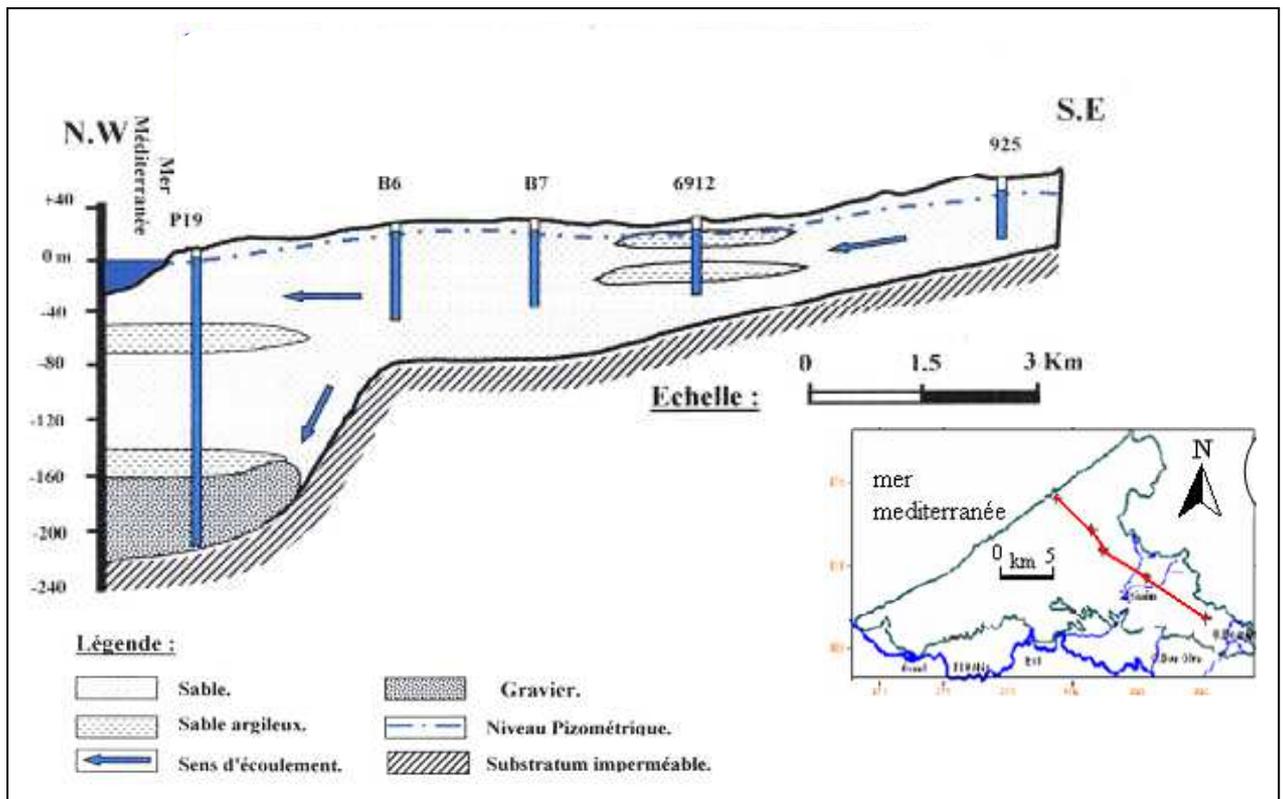
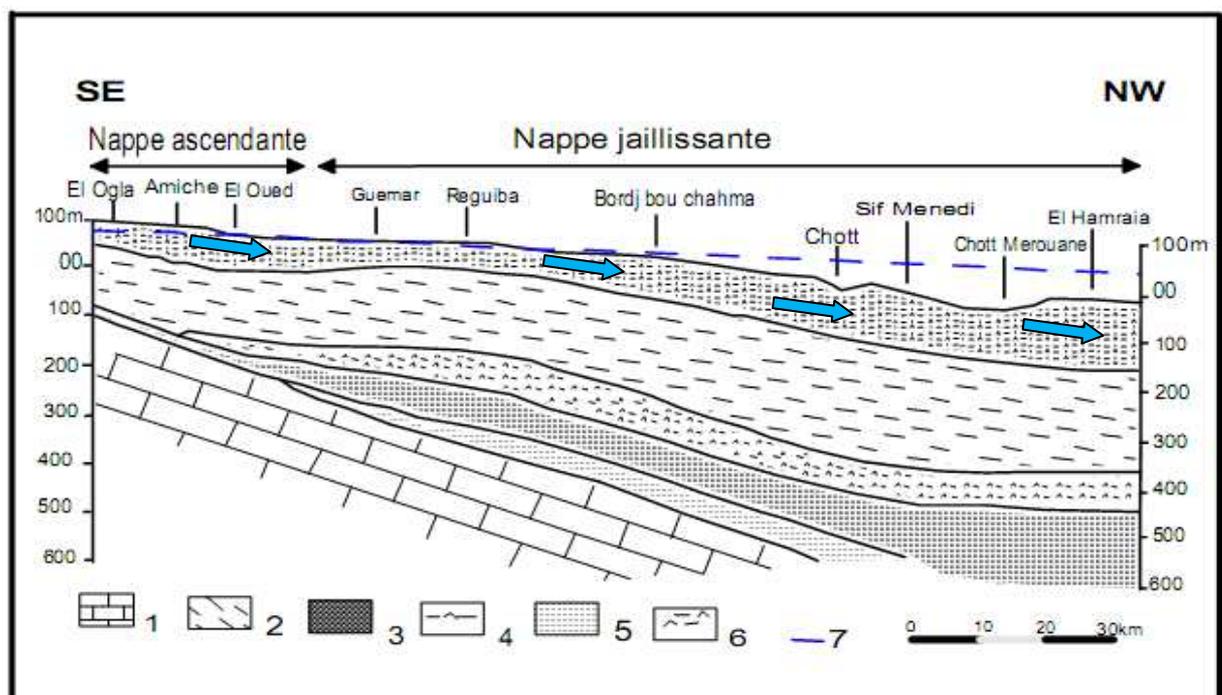


Fig.III.3- .coupe hydrogéologique dans le massif dunaire de Bouteldja(Haied.N2008)



1- calcaire de l'Eocène inférieur marin et de l'Eocène moyen évaporitique. 2- Argiles sableuses et marnes de la base du continental terminal. 3- Sable grossiers à graviers du Pontien inférieur. 4- Argiles et gypse dominants. 5- Argiles et sable dominants. 6- Argile sable et gypse (les trois derniers étages appartiennent au Mio-Pliocène supérieur). 7- Niveau hydrostatique de la nappe du Pontien inférieur.

Fig.III.4- .coupe hydrogéologique du Souf (Derouiche A, M. 2008)

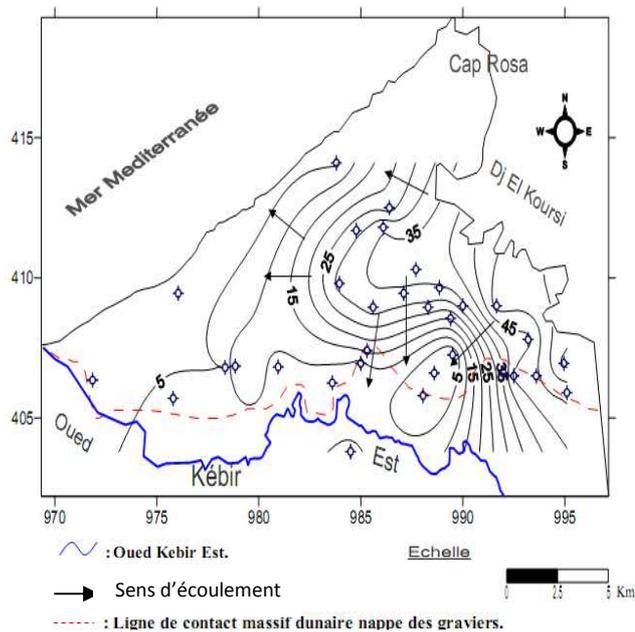


Fig.III.5– :Carte piézométrique de la nappe du massif dunaire de Bouteldja en 1982 (Khérici. N ; 1985).

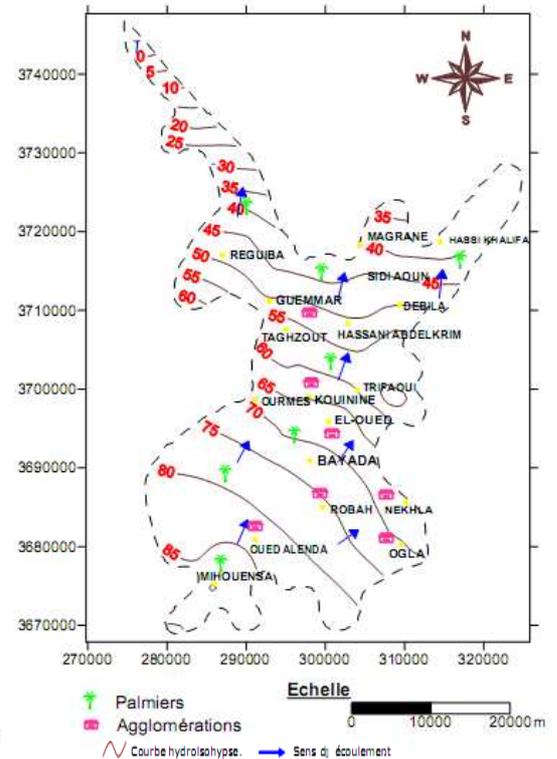


Fig.III.6– : Carte piézométrique de la nappe libre de Oued Souf Juillet 1994 (Derrouiche A.M 2008)

V. Caractéristiques hydrodynamiques:

V.1.Transmissivité :

Pour les deux zones, on remarque que les écarts sont peu importants d'une station à une autre pour une même zone.

Les valeurs de transmissivité dans le massif de Bouteldja varient de 1 à $7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ où on marque de 1 et $3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ répartissant au Nord-Ouest de l'Oued El-Kébir et au Sud-Est les valeurs s'améliorent et passent de 1 à $0,7 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ (B.Saadali 2008).

Pour la région d'El-Oued on note de 1 à 6 entre les extrêmes avec $1,54 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ à Kouinine et $8,3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ à Nakhla. La transmissivité moyenne est de $3,77 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. (rapport final de HPO/BG 2002).

Cette variation des valeurs de transmissivité au massif de Bouteldja ou dans la nappe de Souf est due au changement de l'épaisseur des sables et à la perméabilité des formations.

V.2. Perméabilité :

D'une façon générale, les écarts dans les deux zones et d'une station à l'autre sont peu importants.

On remarque pour le massif de Bouteldja que la perméabilité augmente d'Ouest en Est avec un maximum de $3,5 \cdot 10^{-4}$ m/s et un minimum inférieur à $1 \cdot 10^{-5}$ m/s se localise à l'Ouest jusqu'à la mer au Nord, la valeur moyenne est de $4 \cdot 10^{-5}$ m/s.

Pour la région d'El Oued l'augmentation des valeurs se fait du Nord vers le Sud, de l'ordre de 1 à 7 entre les extrêmes de $2,9 \cdot 10^{-5}$ m/s à Kouinine (Nord du Souf) et $1,89 \cdot 10^{-4}$ m/s à Nakhla (Sud de Souf). La perméabilité moyenne est de $8,54 \times 10^{-5}$ m/s.

D'après les valeurs de la perméabilité moyenne on peut dire qu'elles correspondent à des perméabilités de sables dunaires, et que la perméabilité le Souf est plus importante que celle du massif de Bouteldja.

Les faibles valeurs dans les deux zones sont fortement influencées par les fortes proportions d'argile dans l'aquifère.

V.3: Porosité efficace (n_e):

Elle est généralement considérée comme équivalente au coefficient d'emménagement pour les nappes captives. Elle est utilisée pour caractériser plus précisément le volume d'eau exploitable.

Elle varie de 10% et 30%, avec 19% en moyenne au massif dunaire (Haied.N 2008), et à Souf on trouve des valeurs de 6% à Kouinine et 23% à Nakhla, soit 12 % en moyenne (rapport final de HPO/BG 2002). Ces valeurs sont usuelles pour des sables fins.

VI. La granulométrie :

Les sables éoliens du massif dunaire de Bouteldja sont connus par leur finesse et granulométrie uniforme ou le diamètre des grains est de (0.15-0.5mm) pour un pourcentage de 75 % , et le sable de Souf est homogène, isotrope, dans toute l'étendue de l'Erg, que le sable soit pris en surface ou en profondeur, à diamètres réguliers, compris entre (0.06 ou 0.01 à 0.25 ou 0.4 mm).

VII. Mise en évidence des phénomènes de l'intrusion marine du massif de Bouteldja et de la remontée des eaux de la nappe superficielle de Souf :

L'intensification des prélèvements dans la nappe des sables dunaires de Bouteldja a eu pour conséquence une diminution significative du débit global des sources et une baisse de la surface piézométrique.

En effet, l'évolution des débits des trois principales sources montre une décroissance assez régulière des valeurs de 1982 à 1997.

On note une chute du débit global des sources de (360 l/s) en 1980 à moins de (130 l/s) en 1994.

Le pompage intensif dans les forages a eu également pour conséquence l'apparition d'une intrusion marine (Heni.A 2003). La mise en évidence de ce phénomène, amorcé déjà à partir de 1982 par une étude géophysique, qui a permis de montrer que le secteur ouest à proximité de la Mafragh est le plus touché.

Cependant à Souf l'un des problèmes qui constitue une menace sérieuse pour l'environnement et pour le développement de l'agglomération est incontestablement la remontée de l'eau de la nappe superficielle.

La sur-utilisation de la ressource en eau pour l'A.E.P et en irrigation a induit une remontée du niveau piézométrique de la nappe superficielle, cela a conduit à plusieurs conséquences parmi lesquelles les teneurs élevées en sels.

Ce phénomène est due à :

- exploitation intensive des ressources en eau des nappes souterraines profondes CT et CI.
- Fuites des réseaux A.E.P.
- Absence d'un réseau d'assainissement.
- Insuffisance de drainage des eaux d'irrigation.
- Absence d'exutoire.

VIII. Conclusion :

La coupe hydrogéologique au travers le massif dunaire de Bouteldja présente deux nappes : la nappe du massif dunaire de Bouteldja, et la nappe profonde semi captive.

Tandis que la zone d'El-Oued fait apparaître trois nappes: Une nappe libre, et deux nappes fossiles captives.

L'allure des cartes piézométriques montre, pour les deux nappes, un même axe de drainage de Sud vers Nord qui suit la topographie .

Les valeurs de transmissivité dans le massif de Bouteldja varient de ($1 \text{ à } 7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$) et en moyenne de $3,77 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ pour le Souf.

La perméabilité de Bouteldja est de $4 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$, et de $8,54 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ pour Souf.

Porosité efficace est de 19% en moyenne au massif de Bouteldja, et de 12 % en moyenne pour les sables de Souf.

Le diamètre des grains de sable est de (0.15-0.5mm) au massif de Bouteldja, et (0.06 ou 0.01 à 0.25 ou 0.4 mm) pour les sables de Souf.

La surexploitation de la nappe de massif dunaire conduit au baissement de la surface piézométrique ce qui a provoqué l'apparition d'une intrusion marine.

La remontée de l'eau de la nappe superficielle de Souf est due principalement à l'exploitation intensive des deux nappes fossiles (CT et CI).

I. Introduction :

Dans ce bref chapitre on va essayer de voir les caractéristiques physico-chimiques des eaux de chacune des nappes.

Cette étude joue un rôle important dans la détermination de la qualité des eaux de chacune des nappes, pour estimer leurs aptitudes pour l'alimentation en eau potable ou pour d'autres usages (irrigation, industrie...).

Les résultats ont été pris du mémoire de Saadali.B 2008 sur le massif de Bouteldja, et de l'étude de BG faite en Avril 2002 pour la nappe de Souf.

II. Caractéristiques physico-chimiques :

II. 1. Paramètres physiques :

II.1.1. Température :

La température de l'eau joue un rôle dans la solubilité des sels et surtout des gaz, dans la dissolution des sels dissous donc sur la conductivité électrique.

La température des eaux du massif dunaire voisine les 20°C, et sur le Souf elle ne dépasse jamais les 23.2° C, elle varie entre 15.3 et 23 °C.

Les températures dépendent des facteurs climatiques. Pour être comparables, il faudrait que les mesures puissent être faites à la même heure, à la même profondeur et le même jour, ce qui n'est pas réalisable.

II.1.2. Le pH :

Le pH des eaux naturelles est lié à la nature des terrains traversés. Les eaux du massif de Bouteldja présentent un pH oscillant entre 5.5 et 7 proche de la neutralité. Donc, les eaux sont acides. Pour le Souf le pH est situé dans la norme maximale et acceptable généralement comprise entre 7 et 7.7.

II.1.3. Conductivité :

La conductivité traduit le degré de minéralisation d'une eau, elle augmente en fonction de la matière en suspension.

Les résultats des mesures ont permis de montrer que les valeurs varient entre 150 et 1100µs/cm au massif de Bouteldja (Fig IV.1). Ces valeurs diminuent en s'éloignant du littoral et

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).

Les mesures effectuées à Souf ont permis de définir trois grandes zones (Fig IV.2) ;

-La zone 1 : de très forte conductivité plus de 13000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ située au Nord. Ces fortes valeurs sont dues aux sels provenant du Sud par l'écoulement des eaux souterraines, en plus c'est une zone des chotts où l'évaporation est forte.

- La zone 2 : au centre entre Foulia et El-Oued, la conductivité est relativement élevée, variant entre 9600 et 13500 $\mu\text{s}/\text{cm}$, c'est a cause de l'évaporation des Ghouts ennoyés ou humides.

-La zone 3 : de faible conductivité entre 1800 et 4500 $\mu\text{s}/\text{cm}$, elle est caractérisée par les cultures traditionnelles.

D'après ces résultats il est légèrement clair que les eaux de la nappe phréatique d'El Oued sont trop chargées en matières minérales que les eaux du massif dunaire de Bouteldja.

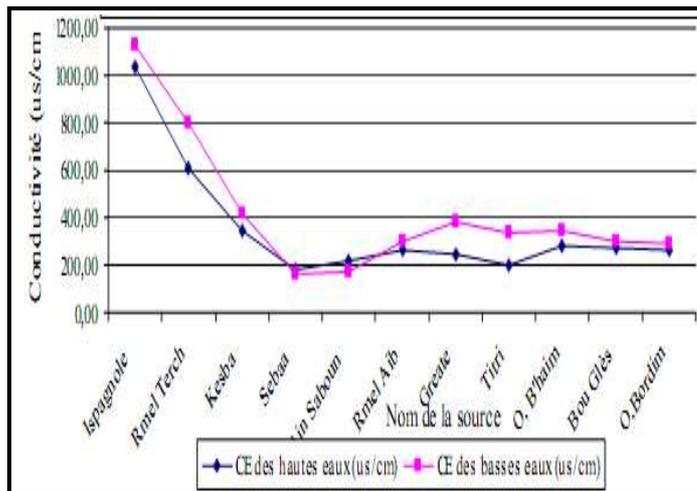


Fig.IV. 1: Evolution de la conductivité des sources dans le massif dunaire de Bouteldja. (Saadali.B 2008)

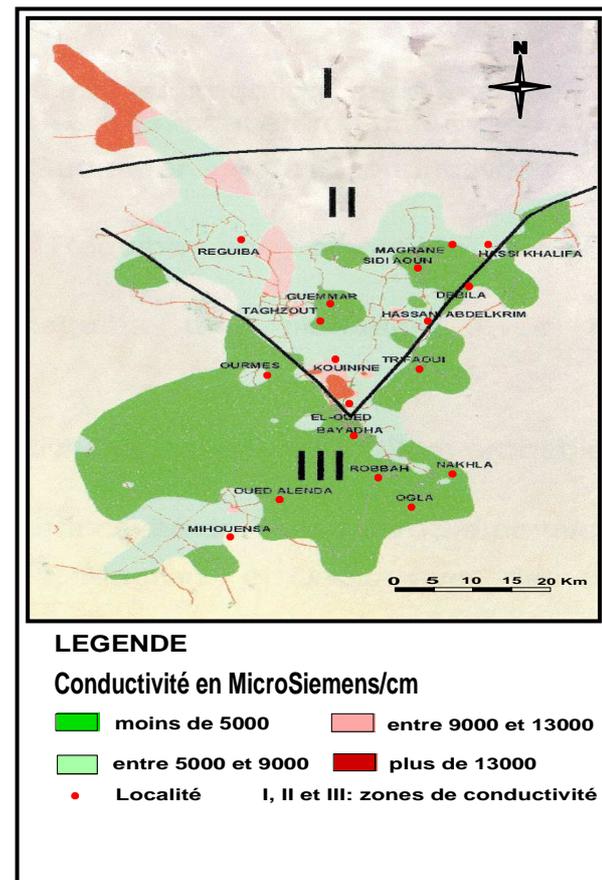


Fig.IV. 2: Carte de la conductivité de la nappe phréatique de Souf (BG 2002).

II.2. Paramètres chimiques :

Les éléments chimiques ont été expliqués par plusieurs formes qui permettent de comparer les eaux des deux nappes, et de les classer en familles chimiques. Les représentations les plus utilisées sont :

a- Diagramme de piper :

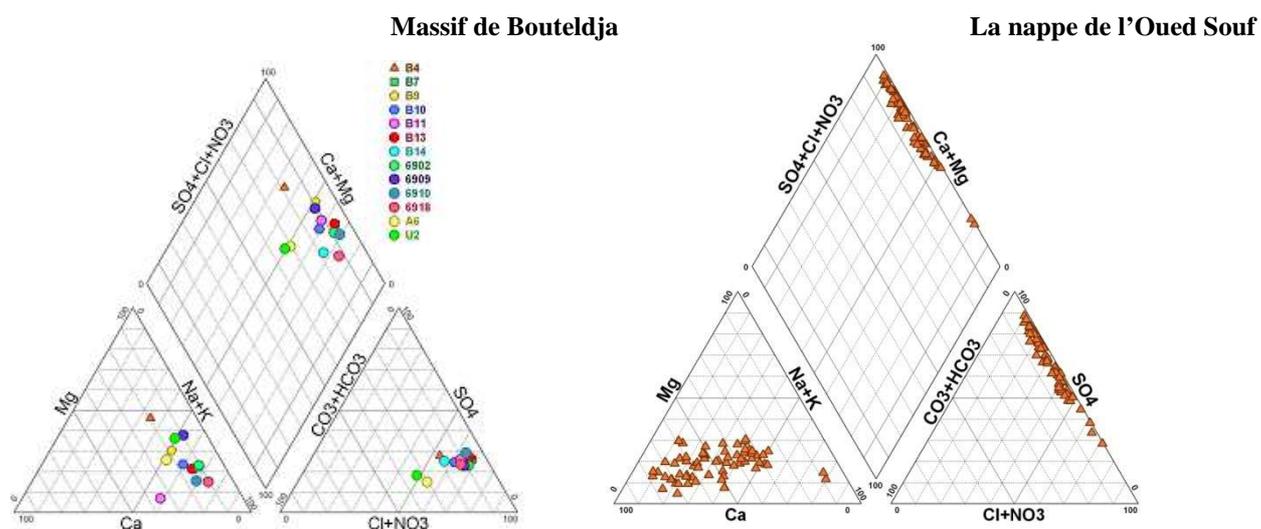


Fig.IV.3– Diagramme de Piper des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja et celle de Souf successivement.

La représentation graphique de l'analyse chimique des points d'eau de la nappe du massif dunaire montre la dominance du faciès chloruré sodique en relation avec le lieu de prélèvement et sa géologie locale, et les faciès sulfaté magnésique et sulfaté sodique pour la nappe de Souf, ce qui est dû à la dissolution des évaporites telles que le gypse de la formule géochimique $(Ca,Mg So_4,2H_2O)$ (Fig.IV.3).

b-Répartition des faciès:

Les résultats précédents ont été confirmés par la méthode des formules ioniques.

Tableau.IV.1: Faciès chimiques et formules ioniques massif dunaire de Bouteldja (année 2007)

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

Tableau.IV.2: Faciès chimiques et formules ioniques pour la nappe de Souf(Mars 2002)

Echantillon (puits)	Nombre d'échantillons	Formules ioniques	Faciès chimique
H01, H03, H07, H09, H26, P39, P35, H38, H4, H37 et H35	11	$r(Na^+ + K^+) > rCa^{++} > rMg^{++}$ $rSO_4^{2-} > rCl^- > rHCO_3^-$	Sulfaté – sodique
H33, P36 et P01	03	$r(Na^+ + K^+) > rCa^{++} > rMg^{++}$ $rCl^- > rSO_4^{2-} > rHCO_3^-$	Chlorure – sodique
H80, H86, H103, H110, H61, P23, P38, H67, H29, H63, H74 et H49	12	$rMg^{++} > r(Na^+ + K^+) > rCa^{++}$ $rSO_4^{2-} > rCl^- > rHCO_3^-$	Sulfaté–Magnésique
H06, H11, H13 et H78	04	$rCa^{++} > r(Na^+ + K^+) > rMg^{++}$ $rSO_4^{2-} > rCl^- > rHCO_3^-$	Sulfaté – calcique

Le faciès chimique prédominant pour la nappe du massif dunaire est le chloruré sodique, et pour le Souf on a les résultats suivants :

- Le faciès chimique prédominant est sulfaté – magnésien (12 échantillons).
- 11 échantillons ont un faciès chimique sulfaté – sodique.
- 04 échantillons ont un faciès chimique sulfaté – calcique.
- 03 échantillons ont un faciès chimique chloruré – sodique

III. Potabilité des eaux :

La qualité d'une eau est déterminée en fonction de ses caractéristiques physico-chimiques et sa teneur admissible selon l'O.M.S.

Tableau.IV. 3: Normes de potabilité chimique de l'O.M.S.

Eléments chimiques (mg/l)	Normes O.M.S	
	Concentration maximale acceptable (mg/l)	Concentration maximale admissible (mg/l)
Ca ⁺⁺	75	200
Mg ⁺⁺	50	150
Na ⁺	150	250
SO ₄ ⁻⁻	200	500
Cl ⁻	200	400
NO ₃ ⁻	50	100

D'après les analyses chimiques réalisées par (Saadali.B.2008) et selon (le tableau.IV.3) la nappe du massif dunaire de Bouteldja offre une eau douce d'excellente qualité pour l'AEP et l'irrigation (pas de pollution chimique).

Tandis que pour la nappe phréatique d'El-Oued selon l'étude de (HPO.BG 2002) on remarque que la concentration des Sulfates (SO₄⁻²) et du Calcium (Ca⁺⁺) sont supérieures à la concentration maximale admissible, et il y a d'autres éléments qui dépassent les normes comme les Nitrates, ce qui veut dire que ces eaux ne sont pas potables.

❖ L'Aptitude des eaux de la nappe phréatique de Souf à l'irrigation :

La qualité de l'eau d'irrigation est déterminée par la concentration et la composition des sels dissous dans l'eau.

Pour cela, on a utilisé la méthodes de RICHARD (1954). Cette méthode combine la conductivité et le SAR.

Le SAR est défini par la formule :

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{(Ca^{++} + Mg^{++})}}$$

Le Na⁺, mg⁺⁺ et Ca⁺⁺ sont exprimés en mg / l, et la conductivité électrique de l'eau par le micro-siémens/cm.

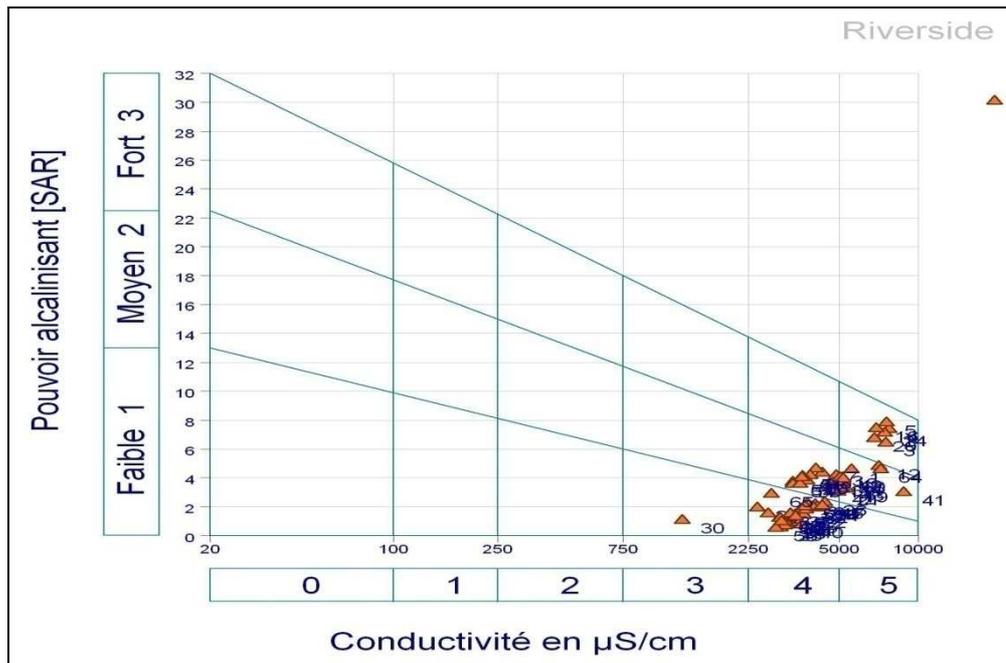


Fig. IV.4 - Le diagramme de Richard des eaux de la nappe phréatique de Souf.

Le diagramme de RICHARD (Figure IV.4), montre que l'eau de la nappe phréatique d'El-Oued est très salée, et elle est de mauvaise qualité pour l'irrigation.

V. CONCLUSION :

Cet aperçu hydrochimique sur les eaux des deux nappes superficielles nous a permis d'apprécier leur qualité chimique, qui constitue un point essentiel pour notre étude sur les deux régions.

Les eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja présentent un faciès chloruré sodique, alors que le faciès dominant à Souf est le sulfaté – magnésien et le sulfaté – sodique.

Les eaux du massif dunaire se caractérisent par une faible conductivité comprise entre 150 et 1100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ce qui traduit une faible minéralisation, contrairement à la nappe de Souf où les valeurs sont très fortes et dépassent les normes avec un taux de minéraux trop élevé.

Les eaux du massif dunaire de Bouteldja sont douces, d'excellente qualité pour l'AEP et l'irrigation. Tandis que celles de Souf et à cause de leur salinité élevée sont défavorables à l'irrigation.