

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY  
UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة  
Année 2020

Faculté des Sciences de la Terre  
Département de Géologie

# THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

**DOCTORAT EN SCIENCES**

Impact des retours d'eau d'irrigation sur la  
qualité des eaux des aquifères d'Annaba  
El Tarf, (Nord Est algérien).

Option : Hydrogéologie

Par : LEKOUI Samir

DIRECTEUR DE THÈSE : M. DJORFI Saadane Professeur, U.B.M., Annaba

DEVANT LE JURY

---

PRESIDENT : M. MAHIA Mohamed Professeur, U.B.M., Annaba  
EXAMINATEURS : M. GHRIEB Lassaad Professeur, Univ., Guelma  
M<sup>me</sup>. BAHROUN Sofia Docteur, Univ., El Tarf  
M. SAYAD Lamine Docteur, U.B.M., Annaba  
M. ZENATI Noureddine Docteur, Univ., Souk Ahras

## تأثير مياه السقي على نوعية المياه الجوفية ، عنابة، الطارف ، (شمال شرق الجزائر)

### ملخص:

في الجزء الشمالي الشرقي من الجزائر ، يعد سهل عنابة الطارف الأكثر استخداما في مجال النشاط الزراعي.

بسبب فقدان كميات كبيرة للمياه عن طريق عملية السقي والتي تؤدي الى تلوث المياه الجوفية بعد التبخر والتسرب.

الهدف من هذه الدراسة هو التركيز على تأثير تسرب مياه السقي على نوعية المياه الجوفية في محيط السقي للمنطقة. التحليل الفيزيائي الكيميائي بطرق مختلفة (خرائط التوزيع المكاني للعناصر ، مغنيسيوم ، كلوريد ...) اثبتت اولا وجود تلوث طبيعي بسبب التراكيز العالية وهذا راجع لانحلال الصخور الجيولوجية الموجودة ، التلوث الثاني بالعناصر النيتروجينية (النترات ، النتريت ، الأمونيوم والفوسفات) التي ترجع إلى الاستخدام المكثف للأسمدة الزراعية ومياه الصرف المنزلية و الصناعية..

تظهر خرائط التلوث بطرق مختلفة تدرج تلوث المعادن في اتجاه مجرى الانهار.

للحد من مخاطر تلوث المياه الجوفية بالمنطقة، أولا من حيث الزراعة ، الاستخدام العقلاني للأسمدة ، ثانياً ، يجب التحكم في مياه الصرف الحضرية والصناعية للحفاظ على التراكيز في حدود معايير جودة المياه وخاصة المعادن الثقيلة.

**الكلمات المفتاحية:** المياه الجوفية ، محيط السقي ، التمعدن ، التلوث ، عنابة، الطارف..

## **The Impact of irrigation water returns on the water quality of Annaba El Tarf aquifers, (Northeastern Algeria).**

### **Abstract**

In the North Eastern part of Algeria, The plain of Annaba El-Tarf, constitutes a privileged sector in agricultural activity, characterized by piezometric levels very close to those of a soil generally fertile, several modes of irrigation are practiced in which the gravitational one is the most used, This use causes significant loss of water pumped and groundwater pollution by irrigation return waters concentrated by evaporation and leaching.

The aim of this study is to focus on the impact of irrigation return waters on the quality of groundwater in the irrigated perimeter of Bounamoussa and for this purpose, sampling campaign and hydro chemical analysis was carried out through wells and boreholes of the study area, The physicochemical analysis by different methods (Piper diagram, PCA, AHC, Richard diagram) showed the presence, first, high mineralization producing a high salinity due to high concentrations of major elements (Calcium, magnesium, chloride...) which are due to the leaching of geological formations, second pollution by nitrogen elements (nitrates, nitrites, ammonium) and phosphates which are due to the intensive use of agricultural fertilizers and domestic discharges.

Pollution mapping by different methods (spatial distribution charts for concentrations, health EDR) shows a downstream upstream metal pollution gradient.

To reduce the groundwater pollution risk, firstly in terms of agriculture, rational use of fertilizers in agriculture and choose the type of plants that better adsorb nitrogen and sulfated compounds. Secondly, urban and industrial discharges must be controlled to keep the concentrations below water quality standards in particular for heavy metals.

**Key words:** groundwater, irrigated perimeter, mineralization, pollution, Annaba El-Tarf.

## **Impact des retours d'eau d'irrigation sur la qualité des eaux des aquifères D'Annaba El Tarf, (Nord Est algérien).**

### **Résumé:**

Dans la partie Nord Est Algérienne, La plaine d'Annaba El-Tarf, constitue un secteur privilégié en activité agricole, caractérisée par des niveaux piézométriques très proches de ceux d'un sol généralement très fertile, plusieurs modes d'irrigation sont pratiqués dont le plus utilisé est le gravitaire, Cette utilisation engendre des pertes appréciables d'eau pompée et une pollution des eaux souterraines par les retours d'eau d'irrigation concentrée par évaporation et lessivage.

Dans ce travail, nous avons essayé de faire le point sur l'impact de retour d'eau d'irrigation sur la qualité des eaux superficielles et souterraines dans le périmètre irrigué de Bounamoussa et pour cela une campagne d'échantillonnage et analyse hydro chimique ( T°C, pH et conductivité, les ions majeurs , les éléments azotés, phosphates ) a été effectué a travers des puits et des forages de la zone d'étude ,l'analyse physico-chimique par les différent méthodes (diagramme de piper, ACP,AHC, Richard ) a mis en évidence la présence premièrement d'une forte minéralisation produisant une forte salinité due aux fortes teneurs en éléments majeurs ( $\text{Ca}^{2+}$  ,  $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{Cl}^-$ ...) qui sont dues au lessivage des formations géologiques , deuxièmes une pollution par les éléments azotés (nitrate, nitrites, ammonium) et phosphates qui sont due à l'utilisation intensive des engrais agricole et aux rejets domestiques.

La cartographie de la pollution par différentes méthodes (cartes de distribution spatiale des concentrations, EDR santé) a montré un gradient de pollution métallique en amont en aval.

A fin de réduire les risques de pollution des eaux souterraines, il convient tout d'abord d'agir sur le domaine de l'agriculture par l'utilisation rationnelle des engrais agricoles et choisir le type de plantes qui adsorbe mieux les composés azotés et sulfatés. En deuxième lieu, les rejets urbains et industriels doivent être contrôlés pour maintenir les concentrations au-dessous des normes de qualité de l'eau, en particulier pour les métaux lourds.

**Mots clés:** eaux souterraines, périmètre irrigué, minéralisation, pollution, Annaba El-Tarf

## Remerciement

Je remercie d'abord El-Allah qui m'éclaire mon chemin,

En tout premier lieu, je remercie vivement mon superviseur M.Djorfi Saâdane d'avoir consacré une bonne période de son temps, pour sa ponctualité et sa patience durant la préparation de ce travail.

Egalement, Je remercie affectueusement le comité de jury d'avoir accepté l'évaluation de la qualité de travail.

Je précise Monsieur Dr. Foufou Atif de l'université d'El Djelfa, qu'il trouve ici mes sincères gratitude, pour son aide.

Mes remerciements vont également aux personnels du laboratoire de la raffinerie de Skikda Pour l'aide dans la réalisation des analyses chimique de l'eau.

Ma profonde reconnaissance envers M.Bouchebia Zakaria de l'ADE de Constantine pour sa contribution inestimable.

ET

A

Tout contribuant.

# TABLE DE MATIERES :

N°	PAGE
ملخص.....	..II
Abstract.....	..III
Résumé.....	..IV
Remerciement.....	..V
Table de matières.....	..VI
Liste des Tableaux.....	..XII
Liste des Figures.....	..XIV
<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>1</b>

## Chapitre I : Cadre physico géographique et économique

I.1. Situation de la zone d'étude.....	4
I.1.1. Historique.....	4
I.1.2. Situation hydrographique.....	6
I.1.2.1. Introduction.....	6
I.1.2.2. Le bassin Côtiers Constantinois Est.....	6
I.2. Aperçu Socio- économique.....	8
I.2.1. La Population.....	8
I.2.2. L'industrie.....	10
I.2.3. L'Agriculture.....	10
I.2.3.1 Céréaliculture.....	10
I.2.3.2.Cultures maraîchères.....	11
I.2.3.3. Cultures industrielles.....	11
I.2.3.3.1. Tomate industrielle.....	11
I.2.3.4. L'arboriculture.....	12
I.2.3.5. Les terrains incultes.....	12
I.2.3.6. Les terrains nus.....	12
I.2.3.7. Elevage bovin intensif.....	13
I.2.4.Tourisme.....	13
I.2.5. La Pêche.....	13
I.3. Ressource en eau.....	14
I.3.1. Besoins en eau du périmètre.....	14
I.3.1.1. Evolution des ressources en eau du périmètre.....	15
I.3.1.2. Problème du l'inondation du périmètre.....	16
I.4.Conclusion.....	17

## Cadre géologique et géomorphologique

II. Contexte géologique.....	18
II. 1. Géologie régionale.....	18
II. 1. 1. Complexe cristallophyllien.....	18
II. 1. 2. Subdivision du complexe.....	18
II. 1. 2. 1. L'unité supérieure.....	18
II. 1. 2. 2. L'unité intermédiaire.....	19
II. 1. 2. 3. L'unité de base.....	20
II. 1. 2. 4. Les roches ignées.....	21
II. 1. 2. 4. 1. Groupe microgranodioritique.....	21
II. 1. 2. 4. 2. Groupe rhyolitique.....	23
II. 1. 2. 5. Les roches sédimentaires.....	23
II. 1. 2. 5.1. Les calcaires marno gréseux (Flysch).....	23
II. 1. 2. 5.2. Les argiles et grès numidiennes.....	23

II. 1. 2. 6. Les roches métamorphiques.....	23
II. 1. 2. 6.1. Les Gneiss.....	24
II. 1. 2. 6.2. La série des micaschistes.....	24
II. 1. 2. 6.3. Les calcaires cristallins.....	24
II. 1. 3. Paléographie.....	24
II. 1. 4. contexte structural.....	25
II. 1. 4.1. Tectonique.....	25
II. 1. 4.1. 1. Accidents tectoniques importants.....	25
II. 1. 4.1. 2. Petites fractures.....	26
II. 1. 4.2. La minéralisation.....	26
II. 2. Géologie locale.....	28
II. 2.1. Les Formations Post-Nappes.....	29
II. 2.1.1. La Plaine d'Annaba/Boutheldja.....	29
II. 2.1.1.1. Remplissage Plio-Quaternaire.....	30
II. 2.1.1.2. Remplissage Quaternaire.....	30
II. 2.1.2. La formation des dunes.....	31
II. 2.1.3. Les Eboulis de Pente.....	31
II. 2.2. Les formations Anté-nappes.....	32
II. 2.2.1. Nappe numidienne (Argiles sous-numidiennes).....	32
II. 2.2.2. Les Flyschs Massyliens.....	33
II. 2.2.3. Le Tellien.....	33
II.3. Aperçu Géomorphologique.....	34
II.3.1. La Mafragh.....	34
II.3.2. La Seybouse.....	34
II.3.3. Les marécages et les lacs.....	34
II.3.4. Le lac Fetzara.....	35
II.3.5. Les montagnes.....	37
II.3.6. Les plaines.....	38
II.3.6.1. La plaine d'Annaba.....	38
II.3.6.2. La plaine d'El Hadjar.....	38
II.3.6.2. La plaine d'El Tarf.....	38
II.3.6.3. La plaine alluviale de Bouteldja.....	39
II.3.6.4. La plaine d'El Asfour.....	39
II.3.6.2. Les collines.....	39
II.3.7. le Sols et Le couvert végétal.....	39
II.3.7.1. Sols des versants.....	39
II.3.7.2. Sols alluvionnaires.....	40
II.4. Conclusion.....	44

## Hydro-climatologie

III. Cadre hydroclimatologique.....	46
III. 1. Introduction.....	46
III. 2. Climatologie de la zone d'étude.....	46
III. 2. 1. Stations de mesures.....	46
III. 2. 2. Les précipitations.....	47
III. 2. 2. 1. Les précipitations moyennes mensuelles.....	47
III. 2. 2. 2. Répartition saisonnière des précipitations.....	48
III. 2. 2. 3. Précipitations moyennes annuelles.....	50
III. 2. 2. 4. Variations des précipitations annuelles.....	53
III. 2. 3. La température.....	53
III. 2. 3.1. La température moyenne mensuelle.....	54

III. 2. 3.2. Température moyenne annuelle.....	55
III. 2. 3.3. Diagramme Ombrothermique.....	55
III. 2. 4. Le vent.....	58
III. 2. 5. L'humidité.....	58
III. 2. 3. Notion du bilan hydrique.....	59
III. 2. 3.1. Estimation des paramètres du bilan.....	59
III. 2. 3.1.1. L'évaporation /l'évapotranspiration.....	59
III. 2. 3.1.1. 1. Evapotranspiration potentielle (ETP).....	59
III. 2. 3.1.1. 2. Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR).....	60
III. 2. 3.1.2. Estimation de la lame d'eau écoulée.....	62
III. 2. 3.1.2.1. Ruissellement (R).....	62
III. 2. 3.1.2.2. Infiltration Efficace (I).....	63
III. 2. 3.2. La méthode du bilan d'eau selon C.W. Thornthwaite.....	63
III. 2. 3.2.1. Interprétation du bilan hydrique.....	69
III. 3. Conclusion.....	71

## Hydrogéologie

IV.1. Introduction.....	72
IV.2. Aquifère superficiel.....	72
IV.2.1. La nappe des gneiss altérés.....	72
IV.2.2. La nappe du cordon dunaire.....	72
IV.2.3. La nappe libre du massif dunaire.....	74
IV.2.4. La nappe des terrasses.....	74
IV.2.5. La nappe des alluvions récentes et actuelles.....	74
IV.3. Aquifère superficiel Aquifère profond.....	74
IV.3.1. La nappe des cipolins.....	75
IV.3.2. La nappe des graviers.....	75
IV.4. La nappe captive d'El-Tarf.....	75
IV.5. La piézométrie.....	79
IV.5.1. Etablissement de la carte piézométrique.....	79
IV.5.1.1. La piézométrie dans le périmètre irrigué de Bounamoussa.....	80
IV.5.2. Interprétation de la carte piézométrique.....	81
IV.5.2. 1.Gradient hydraulique.....	82
IV.6.Conclusion.....	84

## Hydrogéochimie

V. 1. Introduction.....	86
V. 2. Echantillonnage des eaux du périmètre irrigué de Bounamoussa.....	86
V. 3. Matériels et méthodes d'analyse.....	87
V. 3.1. Précision des analyses.....	87
V. 4. Interprétation des resultants.....	89
V. 4.1. Les caractéristiques physiques.....	89
V. 4.1.1. La température.....	89
V. 4.1.2. Conductivité électrique (CE).....	89
V. 4.1.3. PH.....	91
V. 4.1.4. Oxygène dissous (O <sub>2</sub> ).....	92
V. 4.2. Classification des eaux du périmètre irrigué de Bounamoussa.....	93
V. 4.2.1. Eléments chimiques majeurs dans les eaux du périmètre.....	93
V. 4.2.1.1. Calcium (Ca <sup>2+</sup> ).....	93
V. 4.2.1.2. Magnésium (Mg <sup>2+</sup> ).....	94
V. 4.2.1.3. Sodium (Na <sup>+</sup> ).....	95
V. 4.2.1.4. Potassium (K <sup>+</sup> ).....	96

V. 4.2.1.5. Chlorures (Cl <sup>-</sup> ).....	97
V. 4.2.1.6. Les sulfates (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ).....	98
V. 4.2.1.7. Bicarbonates (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ).....	99
V. 4.3. Faciès chimiques et classification des eaux.....	100
V. 4.3.1. Diagramme de Piper.....	100
V. 4.3.2. Diagrammes de Stiff et Stabler.....	102
V. 4.3.3. Diagramme de Durov.....	104
V. 5. Mécanismes de la minéralisation des eaux.....	107
V. 5. 1. Calcul des indices de saturation vis-à-vis des phases minérales.....	108
V. 5. 1. 1. Notion d'indice de saturation.....	108
V. 5. 1. 2. Saturation vis-à-vis des minéraux carbonatés.....	108
V. 5. 1. 3. Saturation vis-à-vis des minéraux évaporitiques.....	110
V. 5. 2. Corrélations entre les éléments majeurs.....	111
V. 5. 2.1. Corrélations ions majeurs/sulfates.....	112
V. 5. 3. Le couple Na <sup>+</sup> / Cl <sup>-</sup> .....	114
V. 5. 4. Corrélation Ca/Cl.....	115
V. 5. 5. Corrélation Mg <sup>2+</sup> /Cl <sup>-</sup> et Mg <sup>2+</sup> / Ca <sup>2+</sup> .....	116
V. 5. 6. La relation HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> / (Cl <sup>-</sup> + SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) – Conductivité électrique.....	117
V. 5. 7. Echanges de bases.....	118
V. 6. L'analyse en composante principale.....	121
V. 7. Ascendant Hiérarchique Classification (AHC).....	122
V. 8. Conclusion.....	123

### **Retour des eaux d'irrigation a la nappe**

IV. 1. Introduction.....	125
IV. 2. Le cycle de l'azote.....	126
IV. 2.1. La fixation de l'azote.....	127
IV. 2.2. La nitrification.....	127
IV. 2.3. L'absorption d'azote par les végétaux et les animaux.....	128
IV. 2.4. La décomposition des déchets.....	128
IV. 2.5. La dénitrification.....	128
IV. 3. Les facteurs qui peuvent modifier le cycle de l'azote.....	128
IV. 4. Lessivage et retours des eaux d'irrigation à la nappe.....	129
IV. 4.1. Méthodologie du travail.....	130
IV. 4.2. Variations spatiale des concentrations de nitrate, nitrite et l'ammonium.....	131
IV. 4.2.1. Les nitrates (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ).....	131
IV. 4.2.2. L'ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ).....	132
IV. 4.2.3. Les nitrites (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ).....	133
IV. 4.2.4. Phosphate (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ).....	134
IV. 4.3. Corrélation sulfates, chlorures et sodium, potassium et phosphate en fonction de l'indicateur (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ).....	135
IV. 4.4. Diagramme ammonium-nitrate.....	136
IV. 5. Aptitude des eaux à l'irrigation.....	137
IV. 5.1. Risque de sodicité et de salinité.....	137
IV. 5.2. Risque d'alcalinité et dureté.....	138
IV. 5.2.1. Alcalinité.....	138
IV. 5.2.2. Eau dure : Calcium et magnésium.....	138
IV. 5.3. Les normes de qualité des eaux destinées à l'irrigation.....	139
IV. 5.4. Calcul des paramètres des eaux à usage agricole.....	140
IV. 5.4.1. Interprétation des résultats.....	141
IV. 5.5. Cartographie de l'aptitude des eaux à l'irrigation.....	145
IV. 5.5.1. Carte d'aptitude des eaux à l'irrigation selon le diagramme de Richard.....	145

IV. 5.5.2. Carte d'aptitude des eaux à l'irrigation selon le diagramme de Wilcox.....	146
IV. 6. Les choix en matière de contrôle.....	147
IV.6.1. Les mesures agricoles préventives fondées sur une meilleure utilisation des engrais ( et des méthodes de culture adaptées.....	148
IV.6.1.1. L'utilisation rationnelle des engrais.....	148
IV.6.1.2. Les méthodes de culture.....	148
IV. 6.2. Les stratégies de gestion de l'eau.....	149
IV. 6.3. Les moyens de contrôle administratifs et juridiques.....	150
IV. 6. Conclusion	151

## **Evaluation et cartographie de la pollution**

VII.1. Introduction.....	153
VII.2. Évaluation de la pollution métallique.....	153
VII.2.1. Introduction.....	153
VII.2.2. Matériels et méthode d'échantillonnage.....	153
VII.2.3. Les métaux lourds.....	153
VII.2.4. Interprétation des résultats.....	155
VII.2.4. 1. Le Chrome (Cr).....	155
VII.2.4. 2. Le Plomb (Pb).....	157
VII.2.4. 3. Le Fer total (Fe. T).....	158
VII.2.4. 4. Le Manganèse (Mn).....	160
VII.2.4. 5. Le Zinc (Zn).....	161
VII.3. Evaluation du risque liée à la santé humaine.....	163
VII.3.1. Introduction.....	163
VII.3.2. Utilisation de l'Indice de Risque (IR).....	163
VII.3.2.1. Evaluation du risque (EDR) sur la santé.....	163
VII.3.2.2. La toxicité des métaux lourds.....	164
VII.3.2.2.1. Le Chrome (Cr).....	164
VII.3.2.2.1. 1. Impact sur l'environnement.....	164
VII.3.2.2.1. 2. Impact sur la santé.....	164
VII.3.2.2.2. Le Plomb (Pb).....	165
VII.3.2.2.2.1. Impact sur la santé.....	165
VII.3.2.2.3. Le Fer total (Fe).....	165
VII.3.2.2.3.1. Impact sur l'environnement.....	165
VII.3.2.2.3.2. Impact sur la santé.....	166
VII.3.2.2.4. Le Manganese (Mn).....	166
VII.3.2.2.4.1. Impact sur l'environnement.....	166
VII.3.2.2.4.2. Impact sur la santé.....	166
VII.3.2.2.5. Le Zinc (Zn).....	167
VII.3.2.2.5.1. Impact sur l'environnement.....	167
VII.3.2.2.5.2. Impact sur la santé.....	168
VII.3.3. Evaluation des risques des métaux lourds sur la santé.....	168
VII.3.3.1. Définition des concentrations d'exposition.....	168
VII.3.3.2. Estimation des doses d'exposition.....	168
VII.3.3.2.1. Dose journalière d'exposition (DJE).....	168
VII.3.3.2.2. DJE pour le contact dermique avec le sol.....	169
VII.3.3.2.3. Dose journalière acceptable (DJA).....	169
VII.3.3.2. Estimation du risque.....	169
VII.3.3.2.1. Estimation du risque non cancérigène.....	169
VII.3.3.2.2. Estimation du risque cancérigène.....	170
VII.4. Conclusion.....	174

<b>Conclusion Générale</b> .....	175
Référence bibliographiques.....	179

## LISTE DES TABLEAUX :

N°	Chapitre I	Page
<b>Tab. 1</b>	Répartition de la population de la région d'Annaba El Tarf (Source ONS 2008).....	8
<b>Tab. 2</b>	Bilan de la production d'eau (m <sup>3</sup> /j). D'après SEATA.....	14
<b>Chapitre II</b>		
<b>Tab.3</b>	Peuplements et formations forestières (Plan d'aménagement de la wilaya D'El Tarf 2001).....	42
<b>Tab.4</b>	Les déférentes formations forestières dans la wilaya d'Annaba (d'après la Direction des forets De wilaya d'Annaba 2007).....	43
<b>Chapitre III</b>		
<b>Tab.5</b>	Coordonnées géographiques des stations météorologiques.....	47
<b>Tab.6</b>	Précipitations moyennes mensuelles (1990 – 2016).....	47
<b>Tab.7</b>	Répartition saisonnière des précipitations (1990-2016).....	48
<b>Tab.8</b>	Les précipitations annuelles et les coefficients pluviométriques des trois stations (1990–2016).....	51
<b>Tab. 9</b>	La température moyenne mensuelle (1990-2016).....	54
<b>Tab. 10</b>	La température moyenne annuelle (1990–2016).....	55
<b>Tab.11</b>	Vitesse du vent en (m/s) à la station des Salines (1990-2014).....	58
<b>Tab.12</b>	Variations des humidités relatives moyennes mensuelles (en %) de La station des Salines (1990/2014).....	58
<b>Tab.13</b>	Résultats de l'ETP obtenus par la formule de « THORNTHWAITE » à la Station des Salines (1990-2016).....	60
<b>Tab.14</b>	Résultats de l'ETR obtenus par la formule de « TURC » (1990-2016).....	61
<b>Tab.15</b>	ETR annuelle selon la méthode de Coutagne.....	62
<b>Tab.16</b>	Résultats du ruissellement obtenus par la formule de TIXERONTBERKALOFF ROMANTCHOUK pour les trois stations (1990-2016).....	62
<b>Tab.17</b>	Estimation de l'infiltration par l'équation fondamentale du bilan hydrique.....	63
<b>Tab .18</b>	Bilan hydrique à la station des Salines pour la période (1990-2016).....	64
<b>Tab.19</b>	Bilan hydrique à la station de Ben M'hidi pour la période (1990-2016).....	66
<b>Tab .20</b>	Bilan hydrique à la station de Boutheldja pour la période (1990-2016).....	67
<b>Tab .21</b>	Comparaison des résultants d'ETR des trois méthodes.....	69
<b>Tab .22</b>	Résultats des valeurs de l'ETR par les trois méthodes.....	69

#### Chapitre IV

<b>Tab.23</b>	caractéristiques hydrogéologiques des aquifères de la plaine d'Annaba, El Tarf.	78
---------------	---	----

#### CHAPITRE V

<b>Tab.24</b>	Statistiques descriptives des analyses des eaux du périmètre irrigué de Bounamoussa (Octobre 2017).....	88
<b>Tab.25</b>	Balances ioniques des analyses des eaux du périmètre irrigué de Bounamoussa (Octobre 2017).....	88
<b>Tab.26</b>	Variations de l'oxygène dissous des eaux du périmètre irrigué de Bounamoussa (Octobre 2017)	92
<b>Tab.27</b>	Classification de l'eau du périmètre de Bounamoussa basée sur le diagramme de Durov. (Lloyd et Heathcoat, 1985).....	106
<b>Tab.28</b>	Indices d'échanges de Bases des analyses des eaux du périmètre irrigué de Bounamoussa, (Octobre 2017).....	119

#### CHAP. VI

<b>Tab.29</b>	Degré relatif de dureté de l'eau selon la quantité de carbonate de calcium.....	138
<b>Tab.30</b>	Barème de qualité pour l'eau d'irrigation.....	139
<b>Tab.31</b>	Paramètres de la qualité de l'eau d'irrigation (Octobre 2017).....	142

#### CHAPITRE VII

<b>Tab.32</b>	Comparaison des normes internationales de métaux lourds pour les eaux de consommation (OMS, États-Unis, CEE, France).....	154
<b>Tab.33</b>	Les normes de rejets.....	154
<b>Tab.34</b>	Sources anthropique et naturelle des métaux lourds.....	155
<b>Tab.35</b>	Indice du risque total pour l'usage des eaux du périmètre irrigué de Bounamoussa, Octobre 2017.....	170

## LISTE DES FIGURES :

### Chapitre I

- Fig.1** Situation géographique de la zone d'étude..... 5
- Fig.2** Carte de situation et réseau hydrographique dans la région d'Annaba-El-Tarf..... 6

### Chapitre II

- Fig.3** Carte géologique du massif de l'Edough. (Laouar R., et al. 2002)..... 20
- Fig.4** Colonne lithologique du massif de L'Edough (D'après Aissa D.E. (1985)..... 22
- Fig.5** Esquisse structurale des plaines d'Annaba-Bouteldja (Sonatrach, 1969 in Hani, 2003)..... 27
- Fig.6** Situation géologique et structurale des plaines de la région d'Annaba-Bouteldja. (D'après Strojexport, 1975, modifié par A. HANI 2002)..... 28
- Fig.7** Les unités morphologiques dans la région d'Annaba El-Tarf (Direction des forêts d'Annaba) Saadali B., 2007(modifié) ..... 35
- Fig.8** Coupe par le piémont de la bordure Sud du lac Fetzara Source (A. Marre, 1992)..... 36
- Fig.9** Carte du couvert végétal d'Annaba-El Tarf (Direction des forêts d'Annaba et Saadali .B.2007 (modifiée)..... 43

### Chapitre III

- Fig.10** Précipitations moyennes mensuelles pour les trois stations (1990–2016)..... 48
- Fig.11** Répartition saisonnière des précipitations à la station Ben M'hidi (1990-2016)..... 49
- Fig.12** Répartition saisonnière des précipitations à la station des Salines (1990-2016)..... 50
- Fig.13** Répartition saisonnière des précipitations à la station de Bouteldja (1990-2016)..... 50
- Fig.14** Les variations du coefficient pluviométrique pour les trois stations (1990–2016)..... 52
- Fig.15** Variations des précipitations annuelles des stations de Ben M'hidi, de Bouteldja et des Salines (1990–2016)..... 53
- Fig.16** Histogramme de la température moyenne mensuelle aux stations des Salines, Ben M'hidi et Bouteldja (1990-2016)..... 55
- Fig.17** Diagramme Ombrothermique de la station des Salines (1990–2016)..... 56
- Fig.18** Diagramme Ombrothermique de la station de Ben M'hidi (1990–2016)..... 57
- Fig.19** Diagramme Ombrothermique de la station de Bouteldja (1990–2016)..... 57
- Fig.20** Moyenne pluriannuelle des éléments climatiques à la station des Salines pour la période (1990-2016)..... 65

<b>Fig.21</b>	Diagramme de la variation de la RFU, du Déficit Agricole et de l'Excédent à la station des Salines pour la période (1990-2016).....	65
<b>Fig.22</b>	Moyenne pluriannuelle des éléments climatiques à la station de Ben M'hidi pour la période (1990-2016).....	66
<b>Fig.23</b>	Diagramme de la variation de la RFU, du Déficit Agricole et de l'Excédent à la station de Ben M'hidi pour la période (1990-2016).....	67
<b>Fig.24</b>	Moyenne pluriannuelle des éléments climatiques à la station de Boutheldja pour la période (1990-2016).....	68
<b>Fig.25</b>	Diagramme de la variation de la RFU, du Déficit Agricole et de l'Excédent à la station Bouteldja pour la période (1990-2016).....	68

#### **Chapitre IV**

<b>Fig.26</b>	Carte géologique simplifiée des différentes nappes de la région de Annaba (PNE, 2010).....	73
<b>Fig.27</b>	Coupe géologique montrant les différentes nappes de la plaine d'Annaba (D'après D.G.R.H.A 1967) modifiée.....	76
<b>Fig.28</b>	Coupes Hydrogéologiques au travers la plaine d'Annaba (ANRH, 1976, in Hani, modifiées).....	77
<b>Fig.29</b>	Représentation Géographique du périmètre irrigué dans des plaines de la région d'Annaba-El-Tarf.....	79
<b>Fig.30</b>	Carte piézométrique de la nappe superficielle du périmètre irrigué Avril 2017.....	80
<b>Fig.31</b>	Carte piézométrique de la nappe superficielle du périmètre irrigué Octobre 2017.....	81
<b>Fig.32</b>	Mesures du gradient hydraulique (moi d'Octobre 2017).....	83

#### **CHAPITRE V**

<b>Fig.33</b>	Carte d'inventaire des points d'échantillonnage Octobre 2017.....	87
<b>Fig.34</b>	Carte des conductivités ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), Campagne d'Octobre 2017.....	89
<b>Fig.35</b>	Variation de la conductivité électrique en fonction de la minéralisation totale.....	90
<b>Fig.36</b>	Carte du pH, Campagne d'Octobre 2017.....	91
<b>Fig.37</b>	Carte de l'Oxygène dissous, Campagne d'Octobre 2017.....	92
<b>Fig.38</b>	Carte de répartition des teneurs en $\text{Ca}^{2+}$ (mg/l), Campagne d'Octobre 2017.....	93
<b>Fig.39</b>	Carte de répartition des teneurs en $\text{Mg}^{2+}$ (mg/l), Campagne d'Octobre 2017.....	95
<b>Fig.40</b>	Carte de répartition des teneurs en $\text{Na}^+$ (mg/l), Campagne d'Octobre 2017.....	96
<b>Fig.41</b>	Carte de répartition des teneurs en $\text{K}^+$ (mg/l), Campagne d'Octobre 2017.....	97
<b>Fig.42</b>	Carte de répartition des teneurs en $\text{Cl}^-$ (mg/l), Campagne d'Octobre 2017.....	98
<b>Fig.43</b>	Carte de répartition des teneurs en $\text{Cl}^-$ (mg/l), Campagne d'Octobre 2017.....	99

<b>Fig.44</b>	Carte de répartition des teneurs en $\text{HCO}_3^-$ (mg/l), Campagne d'Octobre 2017.....	100
<b>Fig.45</b>	Diagramme de Piper des eaux du périmètre irrigué de Bounamoussa, Octobre 2017	102
<b>Fig.46</b>	Diagrammes de Stabler et Stiff des eaux du périmètre Octobre 2017.....	103
<b>Fig.47</b>	Répartition des eaux du périmètre selon le diagramme Stiff, Octobre 2017.....	104
<b>Fig.48</b>	Diagramme de Durov illustrant les processus hydrogéochimiques impliqués dans les eaux du périmètre de Bounamoussa. (Lloyd et Heathcoat1985).....	105
<b>Fig.49</b>	Saturation des eaux du périmètre irrigue vis-à-vis des minéraux carbonatés. (Aragonite, Calcite).....	109
<b>Fig.50</b>	Saturation des eaux du périmètre irrigue vis-à-vis.(Aragonite ,Calcite).....	109
<b>Fig.51</b>	Saturation des eaux du périmètre périmètre vis-à-vis (Anhydrite, Halite).....	111
<b>Fig.52</b>	Corrélations entre Na, Cl, Mg et $\text{SO}_4$ .....	112
<b>Fig.53</b>	Corrélation entre Ca, $\text{HCO}_3$ et $\text{SO}_4$ .....	112
<b>Fig.54</b>	Corrélation Ca vs $\text{HCO}_3$ , et indice de saturation du Gypse.....	113
<b>Fig.55</b>	Correlation $\text{HCO}_3+\text{SO}_4$ vs Ca.....	113
<b>Fig.56</b>	Variation du rapport Na/Cl des eaux du périmètre.....	115
<b>Fig.57</b>	Variation du rapport Ca/Na et Ca/Cl des eaux du périmètre irrigué de Bounamoussa.....	115
<b>Fig.58</b>	Rapport $\text{Mg}^{2+}/\text{Cl}^-$ et Mg/ Ca des eaux du périmètre irrigué de Bounamoussa.....	117
<b>Fig.59</b>	Variation du rapport $\text{HCO}_3^- / (\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})$ – Conductivité électrique.....	118
<b>Fig.60</b>	Echanges de bases dans les eaux du périmètre irrigué de Bounamoussa (Octobre 2017).....	120
<b>Fig.61</b>	Projection des variables selon le plan F1.F2.....	121
<b>Fig.62</b>	Valeurs propres et pourcentage de variabilité exprimée.....	122

## CHAP. VI

<b>Fig.63</b>	Le cycle de l'azote.....	126
<b>Fig.64</b>	Schéma des processus de transport et de transformation de l'azote dans le système eau-sol-plante.....	130
<b>Fig.65</b>	Répartition des teneurs en nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ).....	131
<b>Fig.66</b>	Répartition des teneurs en Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ).....	132
<b>Fig.67</b>	Répartition des teneurs en nitrites ( $\text{NO}_2^-$ ).....	133
<b>Fig.68</b>	Répartition des teneurs en Phosphate ( $\text{PO}_4^{3-}$ ).....	134
<b>Fig.69</b>	Corrélation sulfates, chlorures et sodium, potassium et phosphate en fonction de l'indicateur ( $\text{NO}_3^-$ ).....	135

<b>Fig.70</b>	Diagramme d'équilibre nitrate Ammonium : application aux eaux du périmètre irrigué de Bounamoussa.....	136
<b>Fig.71</b>	Diagrammes de Richards (1954) pour les eaux du périmètre Octobre, 2017.....	143
<b>Fig.72</b>	Diagrammes de Wilcox (1948) pour les eaux du périmètre Octobre, 2017.....	144
<b>Fig.73</b>	Carte d'aptitude (Octobre 2017) des eaux à l'irrigation pour la nappe superficielle selon le Diagramme de Richard (1948).....	146
<b>Fig.74</b>	Carte d'aptitude (Octobre 2017) des eaux à l'irrigation pour la nappe superficielle selon le Diagramme de Wilcox (1954).....	147

## CHAPITRE VII

<b>Fig.75</b>	Variations de la teneur en Chrome des eaux du périmètre.....	156
<b>Fig.76</b>	Carte des teneurs en Cr (mg/l), Campagne d'Octobre 2017.....	156
<b>Fig.77</b>	Variations de la teneur en Plomb des eaux du périmètre.....	157
<b>Fig.78</b>	Carte des teneurs en Pb (mg/l), Campagne d'Octobre 2017.....	158
<b>Fig.79</b>	Variations de la teneur en Fer Total des eaux du périmètre.....	159
<b>Fig.80</b>	Carte des teneurs en Fer Tot (mg/l), Campagne d'Octobre 2017.....	159
<b>Fig.81</b>	Variations de la teneur en Manganèse des eaux du périmètre.....	160
<b>Fig.82</b>	Carte des teneurs en Mn (mg/l), Campagne d'Octobre 2017.....	161
<b>Fig.83</b>	Variations de la teneur en Zinc des eaux du périmètre.....	162
<b>Fig.84</b>	Carte des teneurs en Zinc (mg/l), Campagne d'Octobre 2017.....	162
<b>Fig.85</b>	Indice du risque total du Cr dans le périmètre irrigué de Bounamoussa.....	171
<b>Fig.86</b>	Indice du risque total du Pb dans le périmètre irrigué de Bounamoussa.....	172
<b>Fig.87</b>	Carte de L'IR du Pb pour l'enfant (le périmètre irrigué de Bounamoussa, (Octobre 2017).....	172
<b>Fig.88</b>	Carte de L'IR du Pb pour l'adulte (le périmètre irrigué de Bounamoussa, (Octobre 2017).....	173

***INTRODUCTION GENERALE***

### **Introduction générale**

Pour assurer son indépendance, industrielle et agricole, l'Algérie avait lancé deux Révolutions, l'une industrielle et l'autre agricole. Le but de ces deux révolutions était d'arriver à une auto prendre en charge des matières premières nationales. A ce titre et indépendamment du secteur étudié, et de ses vocations primaires (agricoles ; pastorales...), des complexes géants ont été édifiés sur tout le territoire de la partie Nord Est d'Algérie, nous citons les cimenteries, les complexes pétroliers, les raffineries, la sidérurgie, la valorisation des terres agricoles et les micros entreprises particulièrement celles consacrées à l'industrie artisanale (tanneries, poteries...). Ce panel de transformation mis en place au cours d'un temps très court, n'a pas pris en considération l'impact de ces transformations sur l'environnement et la ressource en eau. Encore ; des villes entières ont été construites à la vite au mépris des règles élémentaires d'assainissement. De ce fait les eaux usées sont rejetées dans la nature sans traitement préalable, générant souvent des problèmes de cross connexion, entre les réseaux (eaux usées et eaux potable).

Comme tout le territoire national, notre secteur d'étude (La plaine d'Annaba ; El-Tarf) a connu durant ces dernières années, une certaine expansion économique et particulièrement agricole, et ce après l'application du Programme National de Développement de l'Agriculture (PNDA) en 2000 et celui du Fond National pour la Régulation du Développement Agricole (FNRDA) en 2001. Ceci a conduit à l'extension de la surface agricole utile (SAU) par la mise en valeur en irrigué. En effet, les prélèvements en eau de l'irrigation représentent, en Algérie environ 65% des ressources existantes, ce qui est énorme. En outre, toute cette eau ne parvient pas aux plantes car les pertes sont importantes, surtout lorsqu'il s'agit de techniques d'irrigation traditionnelles. Or, celles-ci sont employées sur la quasi-totalité des surfaces irriguées en Algérie, ces pertes sont dues soit à l'évaporation de l'eau à la surface des sols, soit à des retours à la nappe (infiltration) avec toutes les conséquences que peuvent survenir sur la qualité des eaux souterraines d'où l'intérêt de cette étude, qui se propose pour quantifier l'impact des retours d'eau d'irrigation sur la ressource en eau souterraine de cette région.

Les nombreux travaux réalisés dans la région (Debièche, 2002, Djabri L, 1996, Hani A. 2003, Khérici N. 1993, Zenati N. E., 1999, Belhamra A., 2001, Djorfi S., 2005, Foufou A., 2008...) ont permit de suivre l'hydrochimie des eaux à fin de mettre en évidence l'influence

des rejets industriels et urbains ainsi que l'activité agricole sur l'hydrochimie des eaux des aquifères.

### **Objectif de l'étude**

Dans cette étude, nous allons essayer de mieux comprendre l'impact des retours d'eau d'irrigation sur le chimisme des eaux souterraines du système aquifère Annaba El Tarf et de mettre en relief son évolution spatiotemporelle.

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

- Quel est l'état actuel des eaux souterraines de la nappe?
- Quels sont les mécanismes régissant l'évolution quantitative et qualitative des eaux (influence de l'irrigation)?
- Quels sont les moyens à mettre en œuvre pour assurer la durabilité de cette ressource ?

Afin de répondre aux préoccupations sus citées, Notre investigation est consignée dans un document articulé en sept grands chapitres :

**Le premier chapitre**, nous présentons le site où nous donnons un aperçu physico géographique général sur la région et nous abordons une étude générale des caractéristiques hydrologiques avec la ressource hydrique existante ainsi que les besoins d'eau du périmètre.

**Le deuxième chapitre**, est consacré à l'étude du contexte géologique, géomorphologique et Structural de la région. Nous montrons la géologie du massif de l'Edough et les accidents tectoniques qui l'affectent.

**Troisième chapitre**, nous essayerons de définir les caractéristiques hydro climatologiques et D'évaluer les différents termes du bilan hydrique pour pouvoir donner une estimation de la Réserve en eau de la nappe.

**Quatrième chapitre** : consacré à l'étude hydrogéologique ; la limitation des aquifères ainsi que la détermination des paramètres hydrodynamiques semblent très importants. On se sert des cartes piézométriques pour déceler le sens d'écoulement, les zones d'alimentations et d'accumulation des eaux.

**Cinquième chapitre**, elle est consacré à l'hydrogéochimie, La connaissance des caractéristiques physico-chimiques des eaux, représente une partie importante du coût d'exploitation d'un réseau de surveillance de la qualité des eaux souterraines. L'état hydrochimique devrait permettre une meilleure compréhension des mécanismes d'échange et d'alimentation et de caractériser, entre autres, l'évolution spatiale du chimisme des eaux des aquifères étudiés.

Pour cela nous allons procéder à la présentation des différentes méthodes et outils utilisés pour les travaux de terrain et de laboratoire. Ainsi, un suivi périodique des prélèvements d'eaux de surfaces des eaux de la nappe était réalisé. Des mesures in situ (conductivité, pH, T°C, Oxygène dissous) et des analyses chimiques au laboratoire concerneront les éléments majeurs,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , TDS, métaux lourds, à fin d'arriver aux résultats et leur discussion.

**Sixième chapitre**, partie essentielle de ce document, Cette partie est consacrée à un diagnostic de la pollution agricole causée par les éléments azotés. L'exploitation et le traitement des différents résultats obtenus, fait le point sur le problème de retour d'eau d'irrigation sur la nappe, plusieurs méthodes ont été utilisées pour pouvoir déterminer les différentes origines de la pollution, à savoir ; les méthodes statistiques, représentations graphiques et l'apport des cartes des variations des concentrations.

**Septième chapitre**, cette optique est consacrée à l'évaluation et la cartographie de la pollution métallique, nous allons traiter les méthodes d'évaluation du risque sur la santé humaine « EDR santé », qui tient compte des teneurs en ETM « éléments toxiques métalliques » et des différents scénarios de l'usage des eaux superficielles et souterraines du secteur étudié autrement dit, L'évaluation de l'impact environnemental qui a pour objectifs :

- d'identifier les différentes sources de pollution,
- d'identifier les différents types de risques qui peuvent découler de la pollution,
- de quantifier ces risques, et déterminer les actions qui vont réduire le risque pour le rendre acceptable.

*CHAPITRE I*

---

**CADRE PHYSICO-GEOGRAPHIQUE ET ECONOMIQUE**

## **I.1. Situation de la zone d'étude**

Le périmètre irrigué de Bounamoussa s'étend entre les parallèles 36° 30 et 36° 50 nord et longitudes 7° 50 et 8° Est ; occupe une superficie totale brute de 16200 ha dont 14800 ha représentant la superficie nette irrigable. Il appartient à la série des plaines côtières de l'Est Algérien. Il est rattaché administrativement aux deux wilayas avec pourcentage de 80% pour la wilaya d'El Tarf et 20% pour la wilaya d'Annaba, Il se présente comme une plaine alluviale dont le centre de gravité se trouve à 15 km au Sud-Est de la ville d'Annaba. Il est localisé de part et d'autre de la route nationale 82 reliant Annaba à la daïra de Bouhadjar. Limité au Nord par un cordon dunaire qui le sépare de la mer et gêne l'écoulement des oueds. Au Sud et au Sud-Est par les contreforts des monts de la Chaffia, d'où provient l'Oued Bounamoussa sur lequel a été construit le barrage de la Cheffia ; A l'Ouest par le massif primaire de l'Edough, puis par les bourrelets qui le séparent du lac Fetzara ; A l'Est par les bourrelets qui le séparent des marais de la Mekrada.

### **I.1.1. Historique**

La création du périmètre de Bounamoussa remonte à l'Année 1964, une tranche du première de 1200 hectares a été réalisée entre 1964 et 1969, et une deuxième tranche de 15300 hectares a été réalisée entre 1970 et 1978. La superficie totale brute du périmètre est de 16500 hectares dont 14800 hectares représentent la superficie nette irrigable.

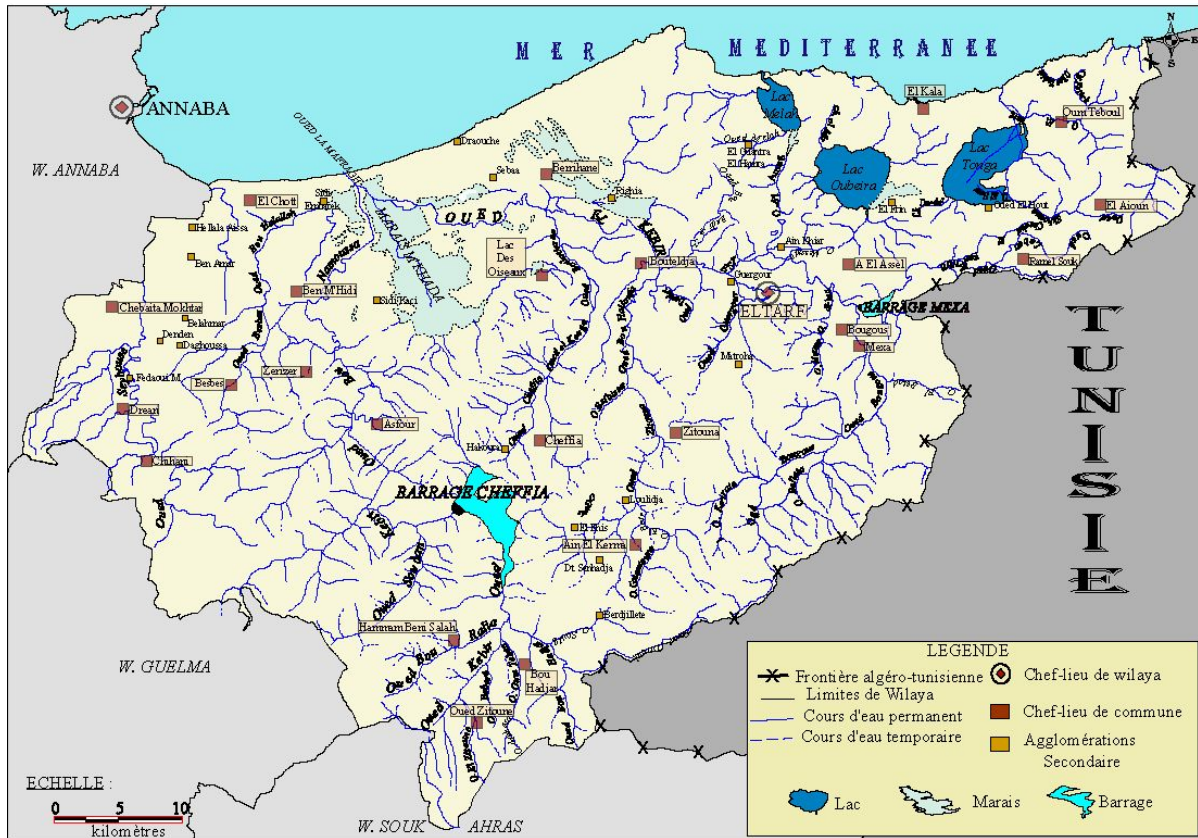


Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude.

## I.1.2. Situation hydrographique

### I.1.2.1. Introduction

L'analyse du comportement hydrologique d'un bassin versant s'effectue par l'observation de la quantité d'eau qui s'écoule dans ce système qu'elle permet d'identifier le volume des ressources d'eau superficielle ainsi que les nappes souterraines.



**Fig.2 : Carte du réseau hydrographique dans la région d'Annaba El Tarf (Bahroun, 2011)**

### I.1.2.2. Le bassin Côtiers Constantinois Est

On localise la grande partie de notre zone d'étude dans le bassin versant côtiers constantinois Est qui a une Superficie de l'ordre de 3203 km<sup>2</sup> soit 27,83% de la superficie totale du bassin. (P.N.E 2000), Il présente un chevelu hydrographique dense, selon le recensement de 1998, on y compte 308.811 habitants, répartis sur 27 communes et 04 wilayas.

Le bassin versant se caractérise par une agriculture traditionnelle et moderne intéressant les cultures maraîchères, les céréales et l'arboriculture. L'irrigation mixte y est souvent pratiquée, L'industrie est concentrée autour des agglomérations principales; (El Kala, Bouteldja, Ben M'Hidi, Zerizer et Besbes) notamment l'ENGP (Menuiserie de bois et aluminium) de Ain Khiar, Limonaderie et transformation de lièges d'El Kala, Unité de tomate et briqueterie de Bouteldja.

- **Pluviométrie**

Sur le bassin, les précipitations varient en moyenne de 750 mm à 1000 mm, pour l'ensemble du bassin il existe 7 stations pluviométriques et 02 stations hydrométriques suivies par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (A.N.R.H).

- **Hydrographie :**

Le bassin versant se caractérise par un chevelu hydrographique dense.

La zone d'étude est localisée entre le bassin versant de la Mafragh dans la partie Est qui représente presque la totalité de la zone et une petite portion du bassin de la Seybouse à l'ouest.

Deux cours d'eaux principaux drainent le bassin versant de la Mafragh. Ils convergent vers le marais et rejoignent la mer par un exutoire unique : l'Oued Mafragh. Ce sont à l'Ouest Oued Bounamoussa et à l'Est Oued Bougous qui prend le nom de Kebir-Est à la sortie de la montagne.

### **L'Oued Bougous**

Draine le versant Algérien à partir des sommets qui constituent la frontière Algéro-Tunisienne. Il présente un tracé avec de multiples coudes qui le font passer de petits bassins par des secteurs de vallées étroites avec parfois de courtes gorges.

### **L'Oued Bounamoussa**

Draine la partie Ouest du bassin versant de la Mafragh. Il descend depuis Djebel M'Sid. Le réseau hydrographique, nous permet de distinguer trois secteurs s'individualisent de fort belle manière :

**A** L'ouest, Oued Bounamoussa recoupe les structures et s'adapte localement aux accidents tectoniques, ce qui lui donne un tracé en baïonnette (Marre. A, 1987).

Au milieu (partie centrale), les oueds se sont surimposés à partir de la surface fin tertiaire (Marre.A, 1987). Ainsi Oued Zitoun, qui prend naissance dans la fenêtre de direction SW-NE d'Ain Karma qu'il quitte au niveau de Zitouna sous le nom d'Oued Bouhaloufa, pour traverser en gorge les grès numidiens vers Boutheldja. Il est en fait surimposé et suit la pente de la topographie de la forêt d'Ouerda. Oued Cheffia, de son côté, qui prend naissance dans Djebel Nador à l'Est et Kef Bni Fradj à l'Ouest, coule vers le Nord-Est en traversant les grès numidiens, avant de prendre le nom de Oued Boulathane.

A l'Est, il y a l'Oued Bougous suit un tracé très varié avec de nombreux coudes à 90°, Oued Bouhaloufa, qui suit aussi la topographie de la forêt de Ouerda, et qui est guidé localement par des accidents tectoniques d'âge Plio-Quaternaire, et enfin la subsidence de la plaine de Annaba. (Marre. A, 1987).

### L'Oued Seybouse

C'est le second oued d'Algérie après l'oued Chéelif, il se situe au Nord-Est de l'Algérie, il s'étend vers le Sud jusqu'à la fin de l'Atlas Saharien d'où il prend naissance dans les hautes Pleines de Heracta, et des Sellaoua sur une hauteur de 800 à 1000 mètres, se dirigeant vers le Nord pour se terminer dans la plaine littorale de Annaba et se jette finalement dans la mer Méditerranée.

Il s'étend sur une distance de 240 Km passant par les territoires de la wilaya de Souk Ahras, Guelma, Annaba et El-taraf. L'Oued Seybouse se déverse dans la mer avec un débit d'environ de 400 à hm<sup>3</sup>/an. Il Présente l'axe de drainage d'un bassin versant de 6471 km<sup>2</sup>.

## I.2. Aperçu Socio- économique

### I.2.1. La Population

La population de la région d'étude au même titre que le reste du territoire algérien se situe au Nord du pays, on marque une population relativement dense de l'ordre de 609 499 habitants(2008) concernant la wilaya d'Annaba et de l'ordre de 408 414 habitants pour la wilaya d'El Tarf, concentrée surtout dans les agglomérations d'Annaba ville, El Hadjar, Sidi Amar, et El Bouni,et El-Tarf, Besbes, Dréan....etc. pour la wilaya d'El Tarf.

**Tableau.1. Répartition de la population de la région d'Annaba El Tarf (Source ONS 2008).**

Commune	Cités	Population 2008	Superficie Km <sup>2</sup>
<b>Annaba</b>	<u>Annaba</u> , <u>Seraïdi</u>	264 985	187
<b>Aïn Berda</b>	<u>Aïn Berda</u> , <u>Cheurfa</u> , <u>Eulma</u>	40 802	397
<b>El-Hadjar</b>	<u>El Hadjar</u> , <u>Sidi Amar</u>	120 618	105
<b>Berrahal</b>	<u>Berrahal</u> , <u>Oued El Aneb</u> , <u>Treat</u>	49 795	496
<b>El Bouni</b>	El Bouni	125 265	93
<b>Chetaïbi</b>	<u>Chetaïbi</u>	8 035	134
<b>El Tarf</b>	<u>El Tarf</u> , <u>Aïn El Assel</u> , <u>Bougous</u> , <u>Zitouna</u>	51 787	581,60
<b>El Kala</b>	<u>El Kala</u> , <u>Souarekh</u> , <u>Raml Souk</u> , <u>El Aioun</u>	40 556	475,20

<b><u>Ben Mehidi</u></b>	<u>Ben Mehidi</u> , <u>Echatt</u> , <u>Berrihane</u>	63 483	415,30
<b><u>Besbes</u></b>	<u>Besbes</u> , <u>Asfour</u> , <u>Zerizer</u>	68 852	255,37
<b><u>Dréan</u></b>	<u>Dréan</u> , <u>Chebaita Mokhtar</u> , <u>Chihani</u>	70 915	290,80
<b><u>Bouhadjar</u></b>	Bouhadjar , Aïn Kerma , Oued Zitoun , Hammam Beni Salah	45 708	481,44
<b><u>Bouteldja</u></b>	<u>Bouteldja</u> , <u>Lac des Oiseaux</u> , <u>Chefia</u>	36 557	391,88

La croissance industrielle dans la wilaya d'Annaba pendant les années 70, a conduit à un exode rural massif des populations vers celle-ci. Cet accroissement de la population dans les grandes communes a provoqué l'extension des zones urbanisées, Les problèmes des terrains fonciers limités dans ces communes, aggravent celui du logement.

Une politique des nouvelles cités lancées a pour objectif de contribuer à l'amélioration des conditions de vie pour la population, C'est pour ces raisons qu'on trouve le long du piémont des nouvelles cites implantées de part et d'autres, qui sont en extension continue. Parmi elles, on cite Oued Zied, Berka Zerga, Hadjar Eddiss et Bergougua.

Les derniers recensements ont permis d'apprécier la répartition de la population, qui présente une grande intégralité, elle se concentre le plus souvent autour des zones industrielles, terres agricoles et des points d'eau, On distingue trois zones :

➤ ***Zone faiblement peuplée***

Elle se localise aux alentours du Lac Fetzara, et plus précisément au sud. Elle comprend les Cites de: El Eulma, Cheurfa, El Hashassia, Aziz Ahmed, Sidi Hamed, Bouteldja , Lac des Oiseaux et El Gantra. Ce sont des zones dépourvues d'axes de communication où les terres cultivables sont rares.

➤ ***Zone moyennement peuplée***

Ce sont les Cites d'El Kerma, Houraïcha, Griche, Hadjar Eddiss, Oued Zied, Berka Zerga et Derradji Redjem. Ce sont des zones agricoles avoisinantes des zones industrielles.

➤ **Zone fortement peuplée**

Elle correspond aux chefs lieux des communes de sidi Amar, El Bouni ,Dréan, Chebaita Mokhtar et El Hadjar. Ce sont des zones à vocation agricole et industrielle, où, les moyens de communication sont développés.

La répartition de la population est due à la présence des différents pôles dans la région d'étude qui sont :

### **I.2.2. L'industrie**

L'activité industrielle dans la région est très développée dominée par un pôle très important à l'échelle nationale et internationale, surtout le complexe de Sider situé dans la région d'El Hadjar, la zone industrielle entre El-Hadjar et El-Bouni et la zone industrielle le long du port d'Annaba ville (Asmidal, Naftal,...), vers la wilaya d'El Tarf, l'activité est Concentrée autour des grandes agglomérations (El Kala, Bouteldja, Ben M'Hidi, Zerizer et Besbes) notamment l'ENGP (Menuiserie de bois et aluminium) de Ain Khiair; Limonaderie et transformation de lièges d'El Kala ; Unité de tomate et briqueterie de Bouteldja.

### **I.2.3. L'Agriculture**

La région d'étude est marquée par une vocation agricole de longue date et ses conditions pédoclimatiques conserve aujourd'hui encore un réseau d'exploitation très riche dans l'Est algérien avec une dominance des cultures herbacées. Les superficies non encore mises en valeur méritent des investissements à l'effet de les développer.

Les cultures qui y sont pratiquées sont principalement des cultures d'hiver pendant la période principale de précipitation, des cultures d'été pendant la période sèche ou l'on pratique l'irrigation, et d'autres produits qu'on peut cultiver toute l'année ; Dans ce sens les principales cultures rencontrées dans le périmètre ont été étudiées et analysées :

#### **I.2.3.1 Céréaliculture**

Les céréales sont cultivées en tête d'assolement, elles sont semées dès les premières pluies des mois de septembre et octobre, avec une dose variant de 1 à 1,2 qx/ha, selon le mode de semis. Le semis à la volée est encore pratiqué chez les agriculteurs par manque de moyens matériels et financiers et à cause de la taille des exploitations qui constitue une contrainte à la mécanisation. La pluviométrie abondante rend la fertilisation peu efficace en raison des problèmes liés au Lessivage Pour y remédier le fractionnement de l'apport des engrais, surtout

azotés est nécessaire, cette pratique fait défaut actuellement au niveau du périmètre.

Les agriculteurs utilisent les engrais d'une manière anarchique, avec des doses qui ne répondent pas aux besoins de la plante. Les quantités pratiquées sont de l'ordre de 100 qx/ha pour le super 46% (2 fois), l'amonitrate 33% et les 0-20-25. Les principales maladies rencontrées par cette spéculation sont la rouille et le charbon. La campagne moisson battage démarre le mois de juin. Les fréquences de panne, perturbent le bon déroulement de la campagne. Il est à signaler que pendant cette période, les véhicules et la main d'œuvre sont mobilisés autour de la campagne tomate industrielle. Les rendements varient de 10 à 18 q x /ha.

### **I.2.3.2. Cultures maraîchères**

Deux catégories sont rencontrées, les maraîchages d'hiver et les maraîchages de saison (été). Dans la première catégorie sont pratiquées seulement les cultures résistantes aux excès d'humidité et qui ne nécessitent pas beaucoup d'intervention, pour les traitements et les soins culturaux mécaniques exemple : Artichaut, Fenouil, Chou, Chou-fleur oignon et autres.

Les cultures maraîchères de saison sont pratiquées selon la disponibilité de l'eau d'irrigation. Les plus pratiquées sont : Melon, Pastèque, Poivron, Tomate et autres. Les rendements moyens par hectare sont : 30 pour le melon, 40 pour les pastèques, 30 à 35 pour les piments poivron.

Ces rendements restent très faibles à cause du : Manque d'irrigation au moment voulu Equipement en matériel, surtout spécialisé trop insuffisant. Insuffisance dans la maintenance et la réparation du matériel. Faible niveau technique des agriculteurs.

### **I.2.3.3. Cultures industrielles**

Les cultures industrielles comprennent :

#### **I.2.3.3.1. Tomate industrielle**

Cette culture occupe la principale place. C'est une culture pratiquée par tous les agriculteurs (privé et public). Toute la production est transformée par cinq (05) unités dont deux (02) appartiennent au secteur privé. La tomate suit généralement la culture des céréales.

La Récolte qui coïncide le plus souvent avec la campagne de moisson battage ce qui complique la tâche des agriculteurs, qui n'arrivent pas à livrer Leurs productions à l'unité de transformation à temps.

Les rendements annuels obtenus varient de 80 à 120 qx/ha de tomate fraîche qui restent en dessous des rendements obtenus chez les pays voisins (Tunisie 800 à 900 qx/Ha) (MINISTERE DE L'AGRICULTURE).

**I.2.3.4. L'arboriculture**

Elle est moins présente dans cette région. Elle est représentée essentiellement par des agrumes, les noyaux et les pépins, les oliviers et la viticulture. On note que les oliviers sont des plantations oléicoles à l'état sauvage ou travaillé. Ce type d'arbre parfois associé à des cultures annuelles, a souvent été planté sur des terrains en pente ou en plat.

**I.2.3.5. Les terrains incultes**

Ils occupent une grande superficie surtout dans la région des Lacs. La plupart de ces terrains incultes sont des terrains inondés pendant la pluie. Au niveau de la plaine, la région dans son ensemble est vouée aux céréales et à la tomate industrielle. Après les mois humides, en juin, le paysage prend un aspect désertique.

**I.2.3.6. Les terrains nus**

Ce sont des terrains non occupés par une quelconque végétation. Ces terrains sont généralement situés au nord de la région et au niveau de la lunette sableuse qui sépare le Lac Fetzara et la plaine Ouest d'El Hadjar.

Sur la base des résultats des études Agro-pédologiques réalisées en 1966 par la société de recherche économique et sociologique en agriculture (SARES) et actualisées par l'ANRH en 1982, le périmètre a été décomposé en trois zones principales :

**ZONE I**

La superficie totale de cette zone est de 6250 hectares. Elle comprend les meilleures terres du périmètre. La texture est grossière, convient à toutes les cultures et notamment à l'agrumiculture. Les sols de cette zone sont concentrés sur les bourrelets le long des rives des oueds Seybouse et Bounamoussa et sont bien drainés. Actuellement sur ces terres dominent l'agrumiculture et les systèmes fourrages-élevages.

**ZONE II**

La superficie totale de cette zone avoisine les 3650 hectares. Elle comprend des sols à texture fine ou dominent les cultures maraîchères, fourragères et céréalières dépendant du fonctionnement du réseau d'assainissement. Ces sols sont localisés au centre du périmètre, dans les communes de Besbes et Zerizer.

**ZONE III**

La superficie totale de cette troisième zone est de 6400 hectares. Elle est située sur la partie basse du périmètre, sa texture est fine et argileuse et nécessite par conséquent un assainissement superficiel efficace pour rabattre le toit de la nappe superficielle d'une part, et éviter la stagnation des eaux de pluies d'une autre part. Dans ces zones mal drainées, l'irrigation provoque une augmentation de la concentration en sels par l'effet de l'évaporation (ONS 2008). Actuellement ces terres sont occupées par les pastèques, les melons, l'artichaut. La jachère occupe environ 4000 hectares pendant cette année(2005).

**I.2.3.7. Elevage bovin intensif**

Dans cette catégorie, le cheptel est constitué de frisonne, pie noire, race mixte à lait et viande. Une évolution de l'effectif est à signaler en comparaison avec les années précédentes. Ceci est dû essentiellement à l'application des différents programmes de développement de la filière lait.

**I.2.4. Tourisme**

Il y a dans la wilaya d'El Taref et Annaba, un potentiel très riche en termes de biodiversité et également en matière de sites naturels, historiques et archéologiques classés, L'activité du tourisme est bien distinguée dans la région grâce à ses zones humides telles que le lac Mellah, Oubaira, Tonga, lac des oiseaux, le marais de la Mekhada, le parc national d'El-Kala, les vestiges romains de Bougous, les sources thermales de Hammam Sidi Trad , un écosystème forestier et une très riche faune et flore.

Dans la wilaya d'Annaba le secteur touristique est bien développé car la wilaya est caractérisée par des montagnes affleurant la mer et les vestiges romains d'Hippone...etc. On peut également citer la présence dans les deux wilayas, d'un certains nombre de complexes touristiques, des campings, centres de vacances...).

**I.2.5. La Pêche :**

L'activité de pêche sportive et touristique à la fois, est très prisée dans la région (littoral Marin, espaces lacustres, oueds, barrages...etc.).

### I.3. Ressource en eau

La ville d'Annaba et El tarf est alimentée par la combinaison de ressources superficielles à partir des barrages de Cheffia et de Mexa et de ressources souterraines provenant des champs de captage de Bouteldja, Salines et Pont Bouchet.

Le barrage Cheffia, d'un volume régularisable de 95 hm<sup>3</sup>/an, assure l'alimentation en eau d'Annaba et l'irrigation du périmètre Bounamoussa (16500ha). En période normale, en dehors des cycles de sécheresse, cet ouvrage permet la mobilisation de 35Hm<sup>3</sup>/an pour Annaba.

Le barrage Mexa, d'un volume régularisable de 44Hm<sup>3</sup>/an, assure l'alimentation de la wilaya d'El Tarf et de la willaya d'Annaba .cet ouvrage permet la mobilisation de 16 Hm<sup>3</sup>/an pour Annaba.

Les champs de captage sont composés de 32 forages à Bouteldja produisant 28000m<sup>3</sup>/j ,9 forages aux Salines dont 7 forages fonctionnant 24h/24h assurent 10000m<sup>3</sup>/j et 5 forages à Pont Bouchet pouvant assurer 3000m<sup>3</sup>/j (actuellement 1 seul forage en exploitation). Ces Derniers forages produisent une eau de mauvaise qualité (RS =1.9 à 2.2 g/l), ils ont été réalisés en 1990 dans le cadre d'un programme d'urgence pour faire face à une période de sécheresse.

Le Tableau (4) montre bien la quantité d'eau mobilisable à travers les ressources disponibles et son affectation d'après SEATA (Société de l'Eau et l'Assainissement de Tarf et Annaba).

**Tableau.2. Bilan de la production d'eau (m<sup>3</sup>/j). D'après SEATA**

Ressources	Soutirages	Affectation		
		Annaba	El Tarf	Ispat
Barrage Cheffia	130 000	90 000	10 000	30 000
Barrage Mexa	55 000	28 000	27 000	
Nappe Bouteldja	36 000	20 100	15 900	
Nappe Salines	7 000	7 000		
Nappe Pont Bouchet	1 000	1 000		
<b>Total (m<sup>3</sup>/j)</b>	229 000	146 100	52 900	30000

#### I.3.1. Besoins en eau du périmètre

Les besoins en eau d'irrigation adoptés lors des études de création du périmètre de la Bounamoussa à la fin des années 60 ont été basés sur les données de l'évapotranspiration, de la pluviométrie et du schéma cultural projeté; le débit fictif retenu été par conséquent de 0,7

l/s/ha. Les besoins définitifs en eau retenus pour l'irrigation des dix secteurs totalisent 10300 l/s.

La satisfaction des besoins en eau du périmètre est assurée par le barrage de la Cheffia, d'une capacité de  $165 \text{ hm}^3$  avec un volume de régularisation annuel moyen de  $95 \text{ hm}^3$ . La répartition initiale des eaux du barrage arrêté lors de la conception des études était de  $60 \text{ hm}^3/\text{an}$  pour l'irrigation du périmètre et  $35 \text{ hm}^3/\text{an}$  destinés à l'alimentation en eau potable de la ville d'Annaba.

Au fil des années, le volume alloué au périmètre n'a jamais atteint les  $60 \text{ hm}^3$  et il a subi des variations très importantes qui ont été engendrées par le régime des pluies et par la priorité accordée à la satisfaction des besoins en eau de la ville de Annaba.

Il est à signaler que l'affectation de l'eau d'irrigation à l'OPI d'EL Tarf à partir du barrage Cheffia se décide par une commission interministérielle qui met en priorité les besoins en AEP de la ville de Annaba et en fonction du volume disponible, le reliquat est généralement réservé à l'OPI. Cette affectation est révisée à plusieurs reprises dans l'année et ce en fonction des apports d'eau de pluies au barrage durant une année normale, le volume alloué à l'OPI varie de  $30$  à  $40 \text{ hm}^3$ .

#### **I.3.1.1. Evolution des ressources en eau du périmètre**

Comme cité précédemment, la seule ressource en eau du périmètre de Bounamoussa est le barrage de Cheffia, l'eau affectée annuellement au périmètre est acheminée soit par le biais de la conduite principale et des deux piquages d'El Asfour et de Zerizer soit par les hachures d'eau qui se font directement dans l'oued de Bounamoussa pour l'alimentation de La station de pompage à l'aval. Le volume total d'eau alloué chaque année au périmètre a été défini au démarrage du périmètre sur la base des besoins en eau d'irrigation de la superficie équipée du périmètre et en fonction du plan cultural adopté lors de la réalisation du projet.

Ce volume théorique qui est fixé à  $60 \text{ Hm}^3 /\text{an}$  est révisé chaque année en fonction de La disponibilité en eau au barrage et de la demande de l'OPI pour satisfaire les superficies souscrites durant chaque campagne.

Le diagnostic des ressources en eau et l'évolution des volumes d'eau affectés au périmètre (montrent nettement que les services d'exploitation de l'OPI n'ont jamais consommé la totalité du volume alloué et le volume théorique ( $60 \text{ hm}^3 /\text{an}$ ) n'a jamais été atteint, ce qui prouve que la disponibilité de l'eau n'est pas une contrainte à l'exploitation optimale de la totalité de superficie équipée du périmètre.

**I.3.1.2. Problème du l'inondation du périmètre**

Le problème de stagnation des eaux de pluies pendant quelques jours se pose avec acuité influant négativement sur les rendements des cultures (VAN SCHILFGAARDE,1974), Cette situation est due d'une part au mauvais fonctionnement des fossés, des drains et des collecteurs d'assainissement qui sont non entretenus et souvent utilisés par les agriculteurs comme des canaux de transport de l'eau vers leurs parcelles et d'autre part par la pluviométrie importante qui s'abat sur la région en période hivernale.

Par la longueur de son parcours, l'oued Seybouse est l'un des plus importants oueds de l'Algérie, il draine une superficie totale de 6960 Km<sup>2</sup> à la mer. Ses affluents principaux sont oued Bouhamdane et oued Meboudja à proximité de l'embouchure. Ces oueds sont caractérisés par des apports très importants inondant ainsi toute la plaine avale et sont aussi caractérisés par une faible pente qui ne facilite guère l'évacuation des importants débits de crues.

A quinze (15) Km de l'embouchure dans la plaine du périmètre de Bounamoussa, le lit de la Seybouse n'est qu'à 16 mètres d'altitude, ce qui provoque à chaque phénomène pluviométrique l'inondation de toute la vallée de part et d'autre de l'oued.

Depuis le village de Chihani à environ 35 Km de l'embouchure, la Seybouse compte tenu de sa pente qui est faible, ne décharge pas les gros débits dans la mer et par conséquent provoque des inondations des plaines de Dréan, Chbaita, Besbes et El Hadjar (périmètre de Bounamoussa).

Il est à noter également que depuis Chihani, la multiplication des méandres du lit de la Seybouse constitue une contrainte pour l'évacuation libre et rapide des grands débits ; il faut aussi ajouter à cela la multitude des arbres dans le lit de l'oued qui freinent les écoulements.

L'extraction anarchique de tout venant de l'oued modifie les écoulements des eaux et aggrave encore la situation.

**I.4. Conclusion**

Le périmètre irrigué de Bounamoussa occupe une superficie totale brute de 16200 ha dont 14800 ha représentant la superficie nette irrigable. Il appartient à la série des plaines côtières de l'Est Algérien. Il est rattaché administrativement aux deux wilayas avec pourcentage de 80% pour la wilaya d'El tarf et 20% pour la wilaya d'Annaba.

La zone d'étude est incluse dans le bassin versant côtiers constantinois Est qui a une Superficie de 3203 km<sup>2</sup> soit 27,83% de la superficie totale du bassin et totalise Trois cent huit mille huit cent onze (308.811) habitants, répartis en vingt sept (27) communes et quatre (04) wilayas. Dix huit (18) communes sont entièrement incluses dans le bassin et neuf (09) partiellement. L'agglomération d'El Kala de part sa population (21.294 habitants) est la principale ville du bassin des Côtiers Constantinois Est.

L'Agriculture est caractérisée par l'irrigation mixte, traditionnelle (gravitaire), et moderne (aspersion) selon le type de culture. Céréales, cultures maraîchères, cultures industrielles, et arachides sont les principales spéculations des secteurs irrigués.

L'Industrie est Concentrée autour des grandes agglomérations (El Kala, Bouteldja, Ben M'Hidi, Zerizer et Besbes) notamment l'ENGP (Menuiserie de bois et aluminium) de Ain Khia; Limonaderie et transformation de lièges d'El Kala ; Unité de tomate et briqueterie de Bouteldja, l'usine sédérurgique à El hadjar.

*CHAPITRE II*

---

**CADRE GEOLOGIQUE ET GEOMORPHOLOGIQUE**

## **II. Contexte géologique**

### **II. 1. Géologie régionale**

#### **II. 1. 1. Complexe cristallophyllien**

En Algérie, le massif de l'Edough est le plus oriental des massifs cristallophylliens du littoral (Fig.4) (Gleizes G., et al 1988). C'est un massif cristallin externe de la chaîne Alpine périméditerranéenne, considéré souvent comme étant la continuité des massifs internes kabyle de la chaîne des maghrébines.

Il se présente en un brachyanticlinal à prédominance de gneiss entourés de micaschistes à intercalations de marbres, d'amphibolites et de schistes satinées (Vila J.M., 1980), il s'étend de 50 km de long sur 20 km de large et d'orientation axiale N60 (Fig.4).

#### **II. 1. 2. Subdivision du complexe**

D'après les travaux de G. Gleizes et al (1988) le massif de l'Edough pourrait être subdivisé en trois unités (Fig.5) :

- L'unité supérieure
- L'unité intermédiaire
- L'unité de base

##### **II. 1. 2. 1. L'unité supérieure**

Elle affleure essentiellement au Cap de Garde, elle est composée de micaschistes à grenats, de sericitoschistes, de chloritoschistes et de quartzites. Elle contient des niveaux caractéristiques de tourmaline qui forment parfois des amas ou des lentilles souvent très continue. La découverte d'Acritarches dans les intercalations de quartzites et de lydiennes précise l'âge paléozoïque de cette série (Ilavsky et Snopkova, 1987). Les schistes contiennent une grande quantité de grenats et de baguettes d'andalousite et de staurotide. Vers sa base s'intercale une dalle de gneiss oillés dont la puissance varie de 10 à 100 m issue de la déformation d'un leucogranite : il s'agit en effet de roches claires pratiquement dépourvus de biotites, toujours riche en tourmaline à grains grossiers et à texture porphyroïde, il existe aussi des faciès à grain fin d'aspect léptynitique. Les horizons de tourmaline dans les micaschistes sont plus nombreux à l'approche de la lame de gneiss. Le contact entre cette unité et l'unité intermédiaire est anormal, matérialisé par une faille majeur (le cas du Cap de Garde).

**II. 1. 2. 2. L'unité intermédiaire**

Elle est caractérisée par une alternance de micaschistes à grenats et parfois même à disthène et de calcaires métamorphiques.

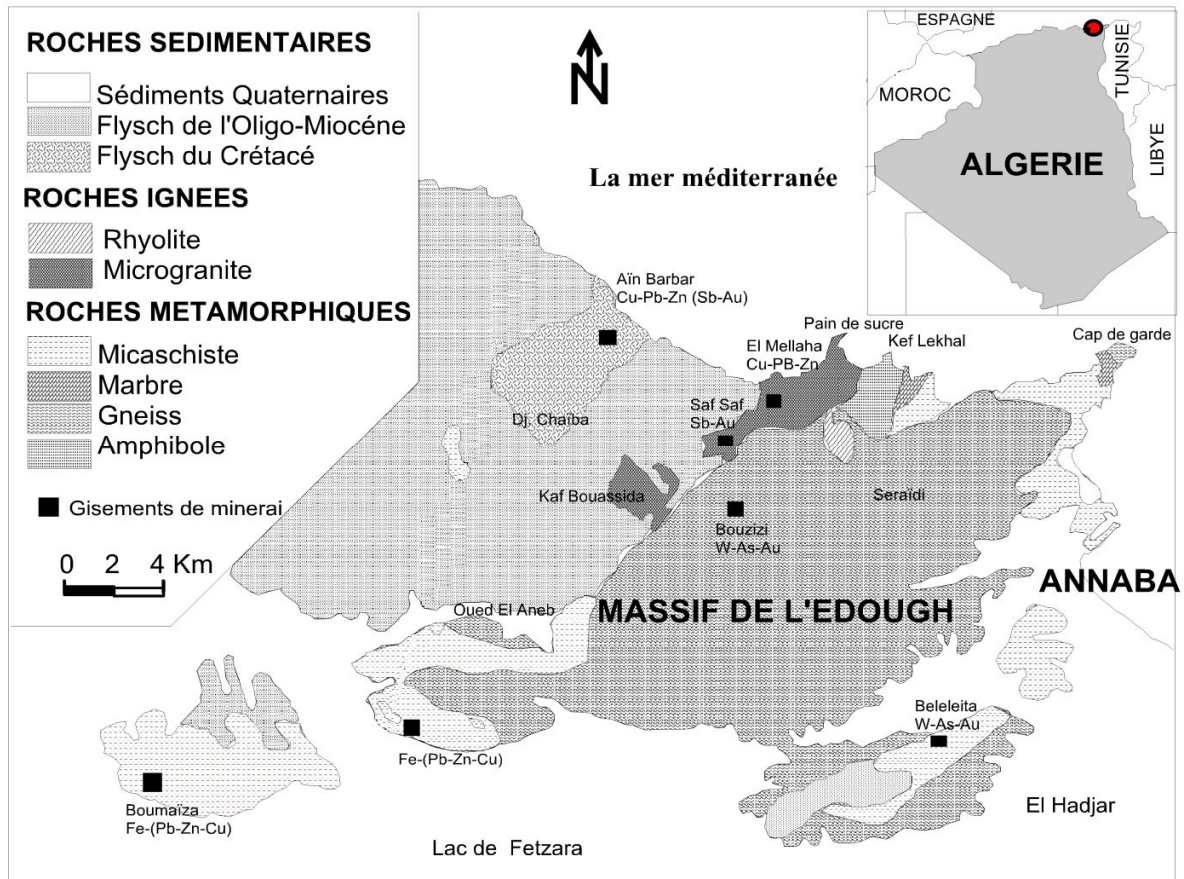
Les micaschistes ne forment que des lames d'épaisseur réduite (quelques mètres à une centaine de mètres) sauf dans le secteur périphérique de Cap de Garde où ils réapparaissent en position verticale avec une épaisseur cumulée de plus de 1000 m.

Ces micaschistes riches en feldspaths sont jalonnés par un ou plusieurs horizons de marbres constitués presque uniquement de calcite bien cristallisée et d'autres minéraux accessoires comme la muscovite, phlogopite, pyrite, diopside, trémolite, grenat.

Outre les marbres on rencontre aussi des amphibolites et des pyroxénites souvent réduits à des amas plus ou moins continus à lenticulaires.

Au Cap de garde le contact entre les marbres et les micaschistes est souligné par des skarns.

Le contact entre cette série et la série gneissique de base est parallèle à la foliation régionale (Hammor D, 1992).



**Figure 3 : Carte géologique du massif de l'Edough.** (Laouar R., et al., 2002)

### II. 1. 2. 3. L'unité de base

On y distingue des gneiss clairs, des gneiss sombres et des leptynites. L'ensemble constitue le cœur de l'anticlinal et sont observés à la périphérie grâce aux accidents tectoniques.

Cette unité gneissique est riche en matériel quartzo-feldspathiques, en micas, sillimanite et parfois tourmaline.

Les gneiss clairs sont pauvres en biotite et sont caractérisés par de gros yeux de feldspath de 3 à 5 cm.

Quant aux gneiss sombres, on les trouve à la périphérie du massif tel que le Cap de Garde, au Nord du massif de Beléléita et au Sud-Ouest de Berrahal. Ce sont des gneiss finement lités, très riches en biotite, renfermant des grenats et de la tourmaline.

Les leptynites sont des niveaux holo-leucocratiques riches en quartz, feldspath, muscovite et renfermant parfois des grenats et de la tourmaline qui forment souvent des linéations parallèles à la foliation.

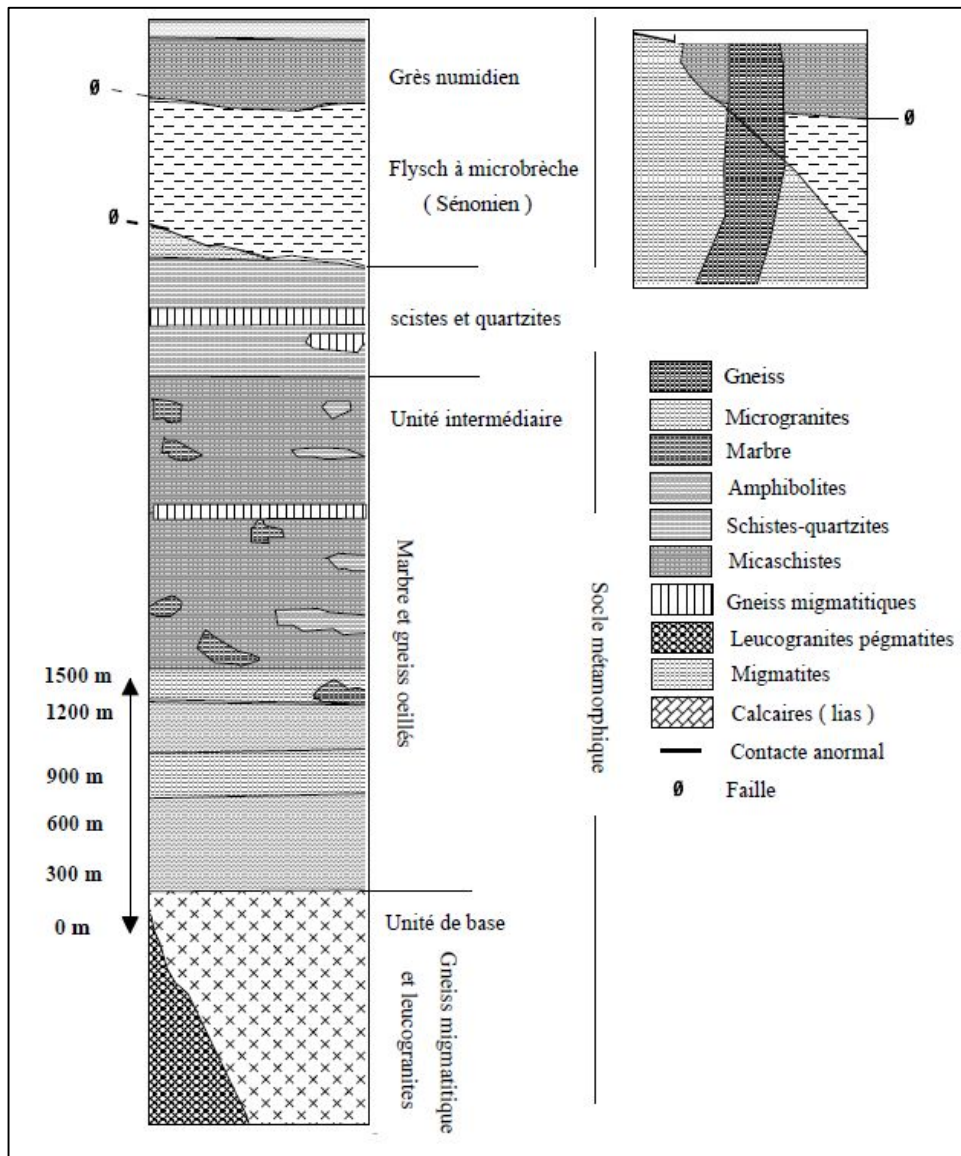
#### **II. 1. 2. 4. Les roches ignées**

Selon J. Hilly (1962) les roches ignées du massif de l'Edough font partie d'une même série calco-alcaline et peuvent être divisées en quatre groupes :

- Groupe microgranodioritique
- Groupe rhyolitique
- Groupe dioritique
- Groupe andésitique

##### **II. 1. 2. 4. 1. Groupe microgranodioritique**

C'est le groupe le plus important dans le massif de l'Edough. Il se présente selon le cas, en dykes, en petits pointements, en bosses ou laccolites plus ou moins étendues.



**Fig.4.** Colonne lithologique du massif de L'Edough (D'après Aissa D.E. (1985))

La profondeur de mise en place diminue de l'Est à l'Ouest. Il affleure à Oued El Afris (ou pain de sucre) et dans la région de Saf-Saf au Nord de l'Edough. Il recoupe les gneiss et les micaschistes. Le quartz est rarement visible à l'œil nu (Djerrab et Gherbi, 1991).

**II. 1. 2. 4. 2. Groupe rhyolitique**

On le rencontre au Nord-Ouest de l'Edough, il se présente soit en filon soit en massif. Les rhyolites massives présentent des phénocristaux millimétriques de quartz, feldspath, biotite et tourmaline.

Il est à noter la présence d'enclaves de gneiss, de micaschistes, de grès numidien, flysch Sénonien et microgranite au sein de rhyolites. Par contre les filons rhyolitiques sont des roches blanchâtres constituées d'une matrice microlitique, de biotite et quartz. Quand aux groupes dioritique et andésitique, ils ne se situent pas exactement dans le massif de l'Edough, mais plutôt du côté du Cap de Fer et de Chetaïbi.

**II. 1. 2. 5. Les roches sédimentaires**

On distingue plusieurs types de roches :

- Les calcaires marno gréseux (flysch).
- Les argiles numidiennes (argile de base).
- Le grès numidien (sommets).
- Les alluvions (des oueds, la plaine).

**II. 1. 2. 5.1. Les calcaires marno gréseux (Flysch)**

C'est un faciès de type flysch constitué par une alternance de calcaire gréseux de couleur verdâtre avec des niveaux marneux à matériel détritique.

Cette formation se trouve en discordance sur le calcaire cristallin, leur épaisseur est variable, elle peut atteindre jusqu'à 150 mètres. Parfois la présence des éboulis de grès sur les versants rend difficile l'observation de la continuité.

**II. 1. 2. 5.2. Les argiles et grès numidiennes**

Les dépôts de numidien, très répandus dans la partie occidentale du massif de Béllielita, comprennent essentiellement des argilites schisteuses et des grès; les argilites dominent à la base, admettant des bancs peu épais de quartzite et de grès, tandis que dans la partie supérieure de la formation on observe surtout de grosses barres de grès quartzeux séparées par des lits argileux.

**II. 1. 2. 6. Les roches métamorphiques**

On distingue trois variantes de roches :

- Les gneiss résultent du métamorphisme des roches granitiques.
- Les micaschistes.
- Les calcaires cristallins.

### **II. 1. 2. 6.1. Les Gneiss**

Ils constituent le cœur de l'anticlinal du massif de l'Edough. Cette série est riche en Biotite et sillimanite d'une épaisseur moyenne de 70 m, du point de vue hydrogéologique, les Gneiss altérés peuvent être, par endroit, le siège d'une nappe aquifère.

### **II. 1. 2. 6.2. La série des micaschistes**

C'est une série de roches métamorphiques à grains généralement moyens ayant une Schistosité et une foliation marquées, riche en feuillés de micas, visible à l'œil nu, d'où elle se débite facilement en plaquettes (quelques mm ou cm).

C'est une série d'alternance de schiste, micaschiste à grenat et des niveaux de calcaires Cristallins, l'épaisseur de cette association varie de 5 à 20 mètres.

### **II. 1. 2. 6.3. Les calcaires cristallins**

Ces calcaires sont exploités par plusieurs carrières de la région. Ce sont des calcaires de couleur bleutée, durs à la cassure et généralement massifs. L'épaisseur des calcaires est estimée à environ une cinquantaine de mètres mais il existe des niveaux très réduits de calcaires associés à la série des alternances des micaschistes.

### **II. 1. 3. Paléographie**

La structure actuelle est le résultat d'une succession de mouvements, dont les plus marquants ont joué sensiblement dans le même sens et la même direction, d'où la difficulté de séparer les phases tectoniques les unes des autres.

L'histoire tectonique de la région du bassin versant de la Mafragh peut se schématiser

Comme suit :

1) Mise en place Post-Eocène supérieur de l'unité Ultra-Tellienne qui s'est déplacée tangentiellement du NW vers le SE ou du Nord vers le Sud sur l'ensemble Tellien incliné selon la même direction.

- 2) Mise en place des nappes Telliennes charriées synchrones à un déplacement du matériel Numidien.
- 3) Mouvements de réajustement isostatique au Miocène supérieur, déterminant des accidents SW-NE. C'est probablement à cette époque que s'est effondrée la plaine au Sud de Annaba, comblée rapidement de sédiments en partie continentaux.
- 4) Phase de distension Plio-Quaternaire orientée SW-NE accentuant les mouvements chevauchants et favorisant le rejeu des failles directionnelles.

#### **II. 1. 4. contexte structural**

La Plaine de Annaba El-tarf, aux reliefs très peu marqués est constituée par des dépôts récents qui forment le comblement de deux bassins sédimentaires principaux, identifiés par la géophysique (Sonatrach, 1966 ; Strojexport, 1975) avec un graben NS, la fosse Ben-Ahmed, sous la plaine de la Seybouse, et un graben SSW-NNE à WSW-ENE, la fosse Ben-M'hidi, sous celle de l'oued Kébir et le massif dunaire oriental (Fig. 5). Ces deux fosses sont limitées par des failles à très forts pendages (60 à 80°) et séparées par un horst, subméridien, représenté par l'élévation de Daroussa à laquelle appartient, dans la partie méridionale, la Butte de Daroussa.

#### **II. 1. 4.1. Tectonique**

Au moyen de photographie aériennes et de levés géophysiques (EREM) à travers le massif de l'Edough, Aissa ; 1985 a classé les accidents tectoniques en :

##### **II. 1. 4.1. 1. Accidents tectoniques importants**

Une première famille dont l'orientation varie de NW-SE à WNW-ESE avec la direction la plus fréquente de N120° à N150° et que l'orientation N140° à N150° d'un bon nombre de dykes permet de conclure que cette famille correspondrait à un système de failles décrochantes dextres (mont Eddikra, Kef Guelâa).

Une deuxième qui semble être conjuguée à la première, dirigée NNE-SSW (direction fréquente N28° en moyenne), cette famille correspondrait à un système de failles décrochantes sénestres. Il y a aussi les mêmes accidents au NW du massif dans les petits massifs microgranitiques.

Des rares accidents tectoniques profonds d'orientation Est-Ouest (au Sud de la Voile Noire et au Sud de Koudiet Tenfous) et d'autres au Sud de Karezas (A. Sattor, 1968) de pendage 55° à 70° vers le sud, affectées par une silicification et d'une tourmalinisation.

#### **II. 1. 4.1. 2. Petites fractures**

Dans les roches métamorphiques, ce sont des petites failles normales et inverses d'étendue relativement faible (horizontale et verticale) et de pendage variant entre 45° et 90°. Près des filons métallifères elles sont remplies par du quartz et de rares sulfures.

#### **II. 1. 4.2. La minéralisation**

La métallogénie du massif de l'Edough se distingue particulièrement par les gîtes polymétalliques d'Aïn Barbar et des gisements ferrifères et arseno-wolframifères du versant Sud. Les autres minéralisations essentiellement filoniennes recourent le socle et sa couverture, sont d'une importance moindre. Elles se sont probablement développées lors de la circulation des fluides hydrothermaux le long du réseau de fractures liées probablement à la mise en place des roches microgranodioritique et rhyolitiques.

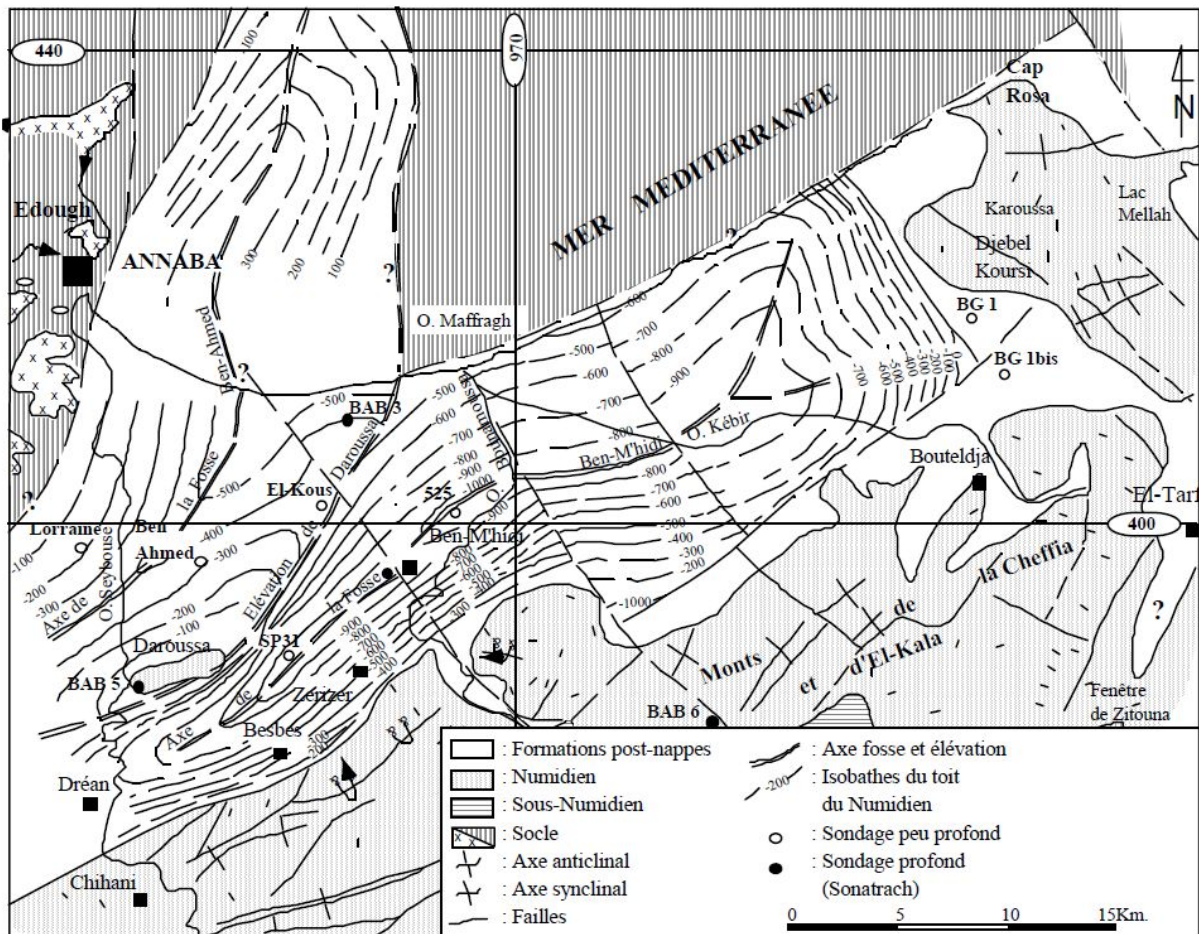


Fig. 5. Esquisse structurale des plaines d'Annaba-Bouteldja (Sonatrach, 1969 in Hani, 2003).

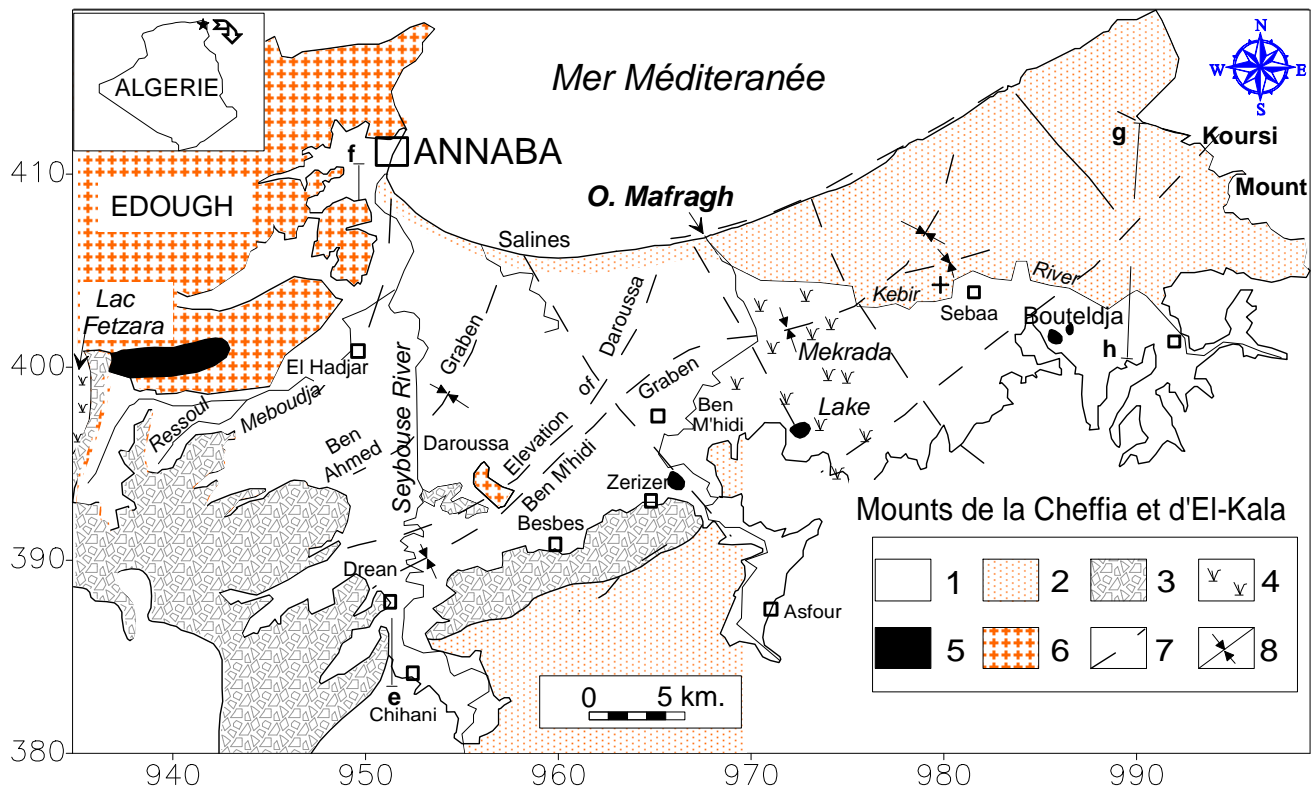
L'ensemble de ce dispositif est affecté par deux familles de failles à forts pendages, de directions respectives NE-SW et NW-SE qui apparaissent tardives vis-à-vis des sous-bassins constitués et de leurs remplissages.

A l'ouest du massif de Béllielita, le lac Fetzara constitue une cuvette qui s'est formée suite à une grande tectonique active pendant le cénozoïque et le quaternaire, ainsi la série de Fetzara s'est développée en bordure et plus largement autour des Djebels Debar, Grar et Taya (Vila, 1980), et elle présente deux bordures dissymétriques orientées, l'une vers le Nord et l'autre vers le Sud. Il s'agit donc, d'une région où l'érosion a beaucoup fonctionné durant le quaternaire.

**II. 2. Géologie locale**

Pour l'étude géologique, nous nous sommes appuyés sur des études antérieures, notamment celles de J. M. Villa en 1980 et A. Marre en 1987, qui décrivent notre terrain d'étude de la manière qui suit:

Des formations antérieures à la mise en place des nappes (le Numidien, Le Tellien) et des formations post-nappes (les formations récentes). (Marre. A, 1987) Toutes ces unités constituent des alternances de terrains d'origine diverses du fait du charriage de ces masses de terrain, parfois sur de très grandes distances. Les formations qui les constituent sont complètement disloquées, d'où la complexité des traits tectoniques. Ces formations sont principalement d'âge tertiaire et quaternaire.



**Figure 6 : Situation géologique et structurale des plaines de la région d'Annaba-Bouteldja.**

(D'après Strojexport, 1975, modifié par A. HANI 2002).

**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.

## II. 2.1. Les Formations Post-Nappes

### II. 2.1.1. La Plaine d'Annaba/Boutheldja

Depuis la fin du Tertiaire, la plaine d'Annaba correspond à un bassin d'effondrement (Graben) dans lequel subsistent quelques petits Horsts qui forment aujourd'hui les massifs gréseux du centre de la plaine (Denden et Daghoussa).

La plaine d'Annaba est constituée essentiellement par des formations d'âge Mio-Pliocène et quaternaire, représentées par les faciès suivant :

**a- Faciès marin** : plus ancien, caractérisé par des marnes bleues avec des intercalations calcaires.

**b- Faciès fluvial** : bien développé, formé de galets, de sable, d'argile le long des oueds.

**c- Faciès continental** : il est lié aux dépôts des fosses d'effondrement. Ces derniers sont déterminés par la prospection sismique, et sont au nombre de deux (Sonatrach. BEICIP, 1969 et Saaidia. B, 1992):

- L'une, orienté S-N ou Fosse de Ben Ahmed.
- l'autre, orienté SW-NE ou Fosse de Ben M'hidi.

Ces deux fosses sont séparées par l'élévation de Daghoussa. Cet effondrement s'est produit au cours du Mio-Pliocène.

L'histoire de la Plaine d'Annaba remonte probablement au début du Miocène Supérieur qui coïncide avec la régression de la Mer Miocène vers le Nord. Ce changement de niveau de base locale a accentué la torrentialité, favorisant un charriage important des matériaux vers le paléorivage et le remplissage des fosses de la plaine. La géométrie des fosses a largement conditionné le remplissage par les apports de conglomérats. A mesure que le remplissage s'accroît, la vitesse de la subsidence augmente, donc épaissement de la partie médiane, et amincissement sur les bords.

En effet, cette subsidence est confirmée à la surface par l'absence totale de niveau de terrasse dans la plaine. Cependant, des terrasses témoins sont restées perchées aux pieds des massifs gréseux dominant la plaine.

### **II. 2.1.1.1. Remplissage Plio-Quaternaire**

#### **a) Pliocène**

Au pliocène débute le retrait de la mer et le soulèvement probable de l'arrière-pays Annabi. Ceci s'est traduit par un abaissement des niveaux de base locaux qui a certainement accentué la torrencialité des oueds, tributaire de la Méditerranée. (Joleaud. L, 1936).

#### **b) Fin du Pliocène**

A la fin du Pliocène, il semble que la morphogénèse est restée très active sur le continent. La plaine voyait s'accumuler des masses de matériaux très importants. Cette sédimentation, beaucoup plus irrégulière, discontinue en épaisseur, donne des variations latérales et verticales de faciès extrêmement rapide. Il est probable que la subsidence accélérée de la plaine a contribué aux changements brutaux des matériaux charriés. En effet, il est vraisemblable que la Seybouse coulait autrefois vers le Nord-Est suivant l'axe de la dépression de Ben M'hidi et participait à son remplissage par les conglomérats. La subsidence beaucoup plus accélérée de la fosse de Ben Ahmed d'orientation Nord-Sud a abouti à sa capture.

L'observation de la carte topographique montre que le tronçon de la Seybouse situé dans le prolongement de la dépression de Ben M'hidi est constitué d'une série de méandres. En quittant cette zone de perturbation l'oued montre un tracé rectiligne malgré la proximité de l'embouchure.

### **II. 2.1.1.2. Remplissage Quaternaire**

La subsidence de la plaine, toujours active, a empêché les oueds de s'encaisser et de dégager des terrasses qui nous permettent de suivre l'évolution morphologique de la plaine pendant le quaternaire.

Il est cependant clair que cette plaine a connue une alternance de périodes humides caractérisées essentiellement par la multiplication des lacs où se décantent des sédiments argilo-limoneux de couleur rouge-grisâtre et des périodes sèches caractérisées par une déflation importante qui a comblé ces dépressions asséchées. Il en résulte des lentilles alimentées par le vent et réparties selon la topographie héritée de la période humide.

C'est cette alternance des épisodes pluvieux et des inter-pluvieux, qui a déterminé la variation du niveau de la mer, et qui est certainement à l'origine de l'avancée de la mer sous

forme de rias et de lagunes, d'où des épaisseurs assez importantes de sable, qui apparaissent dans certains forages et qui renferme la nappe phréatique de la plaine.

### **II. 2.1.2. La formation des dunes**

Cependant, les dépôts du massif dunaire résultent de l'érosion des paléo-reliefs argilo-gréseux et gneissique, qui ont été ravinés par les cours d'eaux, conduisant une grande quantité de matériels détritiques vers la mer. Le sable, roche détritique, provient de la délapidification des grés numidiens. Il est blanc ou jaune clair, fin, meuble, et renfermant une proportion d'argile qui augmente en profondeur.

La formation de ces dunes de sable a été effectuée en deux cycles de régression et transgression marines. (Nouacer. R, 1993).

- Le premier cycle (régression) a donné des dunes anciennes qui ont été lithifiées en bordure de la mer. C'est dans cette formation que les paléotalwegs se creusaient en conservant jusqu'aujourd'hui l'allure qu'ils avaient, avant la mise en place des sables.
- Le second cycle (transgression), moins remarquable, a aboutit à la formation des dunes récentes et actuelles suivi par une phase d'érosion aboutissant aux éboulis récents provenant des massifs numidiens. Par la suite, ces dunes ont été fixées par une végétation jusqu'à ce qu'elles deviennent inactivés.

### **II. 2.1.3. Les Eboulis de Pente**

Tout les versants des vallées des Monts de la Cheffia portent des coulées qui sont souvent le résultat d'un important déséquilibre (MARRE. A, 1987). La tendance au déséquilibre a existé pendant tout le quaternaire où les versants furent toujours favorables aux glissements et aux coulées, d'autant plus que les conditions climatiques étaient particulièrement froides et humides. Après l'important creusement que les cours d'eau ont réalisé en sapant la base des versants, la pente s'accélère alors et la force de la pesanteur est plus forte que les forces de cohésion des roches. Des dépôts d'éboulis tapissent leurs cicatrices de départ permettent de les situer dans le temps au début de la dernière période froide du Quaternaire. (Marre. A ,1987).

C'est cette humidité qui est responsable des altérations, du colluvionnement, et aussi des coulées des versants.

Les versants dominés par les abrupts sont recouverts d'éboulis de pente et de colluvions ; ces derniers proviennent de la dégradation des escarpements gréseux et du remaniement des formations d'argiles sous-numidiennes.

## **II. 2.2. Les formations Anté-nappes**

C'est un Ensemble des unités allochtones (flyschs et Nappes) ,son orientation est NE – SW représente le trait structural dominant des formations anté-nappes. Ce sont des formations géologiques sédimentaires dont on note :

### **II. 2.2.1. Nappe numidienne (Argiles sous-numidiennes)**

Le terme numidien est actuellement conservé en tant qu'appellation de faciès. Il désigne la série gréso-argileuse principalement Oligocène. Cette formation est largement représentée dans notre région d'étude. Elles affleurent à la base de la majeure partie des Monts de la Cheffia, au Sud-Est de Boutheldja (Djebel Hdjar Siah, Bourdim).

Ces formations limitent les alluvions de l'Oued Bougous à l'Est et l'Oued Guergour à l'Ouest. Ces faciès affleurent généralement dans la zone d'Ain Assel. Ils ne sont pas visibles sur le terrain à part quelques petits affleurements, car la végétation les recouvre.

#### **a- Les Grès Numidiens**

Ce sont des grès quartzeux plus au moins consolidés de couleur rouge à jaunâtre due à la présence de grains de sables et de fer. Souvent, ces bancs de grès sont lenticulaires passant latéralement aux argiles d'âges Aquitaniens.

L'Aquitaniens présente une intense fracturation, ce qui favorise la circulation des eaux souterraines. Cette formation affleure dans toute la région constituant les bordures des plaines et le substratum des formations alluvionnaires sur les deux rives de l'Oued Kébir. On les rencontre également au Sud des Monts de la Cheffia.

#### **b- Les Argiles Supra-Numidiennes**

Elles représentent la partie supérieure de la série numidienne d'âge Burdigalien qui se trouve souvent en alternance avec les grés sous-jacents. On peut les rencontrer souvent dans les Monts de la Cheffia.

### **II. 2.2.2. Les Flyschs Massyliens :**

Ce terme a été proposé par Raoult (RAOULT J.F, 1974) au Nord du Kef Sidi Driss (Constantine) pour une série allant du Néocomien au Lutétien. Découvert en 1946 dans les Monts de la Cheffia par P. MARIE et A. LAMBERT (Sonatrach, BEICIP, 1969). On les rencontre à plusieurs endroits dans les Monts de la Cheffia en série monotone. Ils sont constitués essentiellement par les marnes feuilletées avec de minces bancs de calcaires ou en épaisses séries d'argiles gris, comportant des intercalations de plaquettes gréseuses.

L'âge du flysch est essentiellement Sénonien, mais le terme plus général de flysch à micro brèches est retenu puisque cette formation pourrait ne pas se limiter au Sénonien. En effet, certains niveaux sont datés du Lutétien et appartiennent à cette formation.

#### **a) Les Flysch à Micro-Brèches**

Les flysch à micro-brèches affleurent de part et d'autre de l'oued Cheffia en série monotone de marnes feuilletées et de minces bancs de calcaires brun-roux. Aussi, dans les études géologiques de l'emplacement du barrage de Cheffia et qui ont été effectuées par Moussu (MOUSSU. H, 1954), ils sont décrits comme une série continue comprenant le Campanien-Maestrichtien, le Paléocène, l'Eocène Inférieur et Supérieur et l'Oligocène.

### **II. 2.2.3. Le Tellien**

Définis par Durand-Delga (DURAND-DELGA. M, 1969), Il se caractérise par une puissante série marneuse s'étendant du Crétacé inférieur au Lutétien inférieur, au milieu de laquelle s'intercale l'unité caractéristique des calcaires noirs fétides dates (Yprésien-Lutétien Inférieur). Ces calcaires noirs fétides ont un faciès classique et sont largement répandus en Algérie du Nord. Il s'agit d'un calcaire en bancs réguliers de 0,5 à 1m, compacts argileux, comportant de minces lits marneux. L'épaisseur de cette unité est difficile à estimer et peut être de l'ordre de 100m. Cette formation est très spectaculaire à Sidi Trad (Sud-Est de Zitouna). On la rencontre aussi à Bouhadjar et Ain Karma.

### **II.3. Aperçu Géomorphologique**

La géomorphologie de la région d'étude présente trois formes morphologiques variées, dues essentiellement à la grande tectonique du cénozoïque et du quaternaire. Elles constituent deux bassins versants principaux :

#### **II.3.1. La Mafragh**

Elle occupe la partie Ouest avec une superficie de l'ordre de 2915 km<sup>2</sup> et une altitude de 319 m, caractérisé par une série de terrasses à faciès hétérogènes (sables, graviers, limons et surtout argiles).

#### **II.3.2. La Seybouse**

Elle se trouve à l'extrémité Est et s'étend sur une superficie de 6471 km<sup>2</sup>, elle Renferme divers milieux naturels ce qui conduit à la diversification et la multitude des chemins de nutrition et de ruissellement.

Les différentes unités géomorphologiques qui constituent la région d'étude sont:

#### **II.3.3. Les marécages et les lacs**

Leur présence est liée aux différentes phases d'assèchement des zones lacustres de l'Algérie orientale durant le Quaternaire. Ils sont dus principalement à la réduction progressive des surfaces lacustres avec un remplissage alluvionnaire intensif des zones avales, de nombreux oueds tributaires du bassin, comblés surtout au niveau des dépressions internes par les transports solides.

Les marécages de Mekada Mohacène et le lac des oiseaux (Fig.2), développés dans la basse Vallée du Kébir Est, forment un delta pratiquement commun.

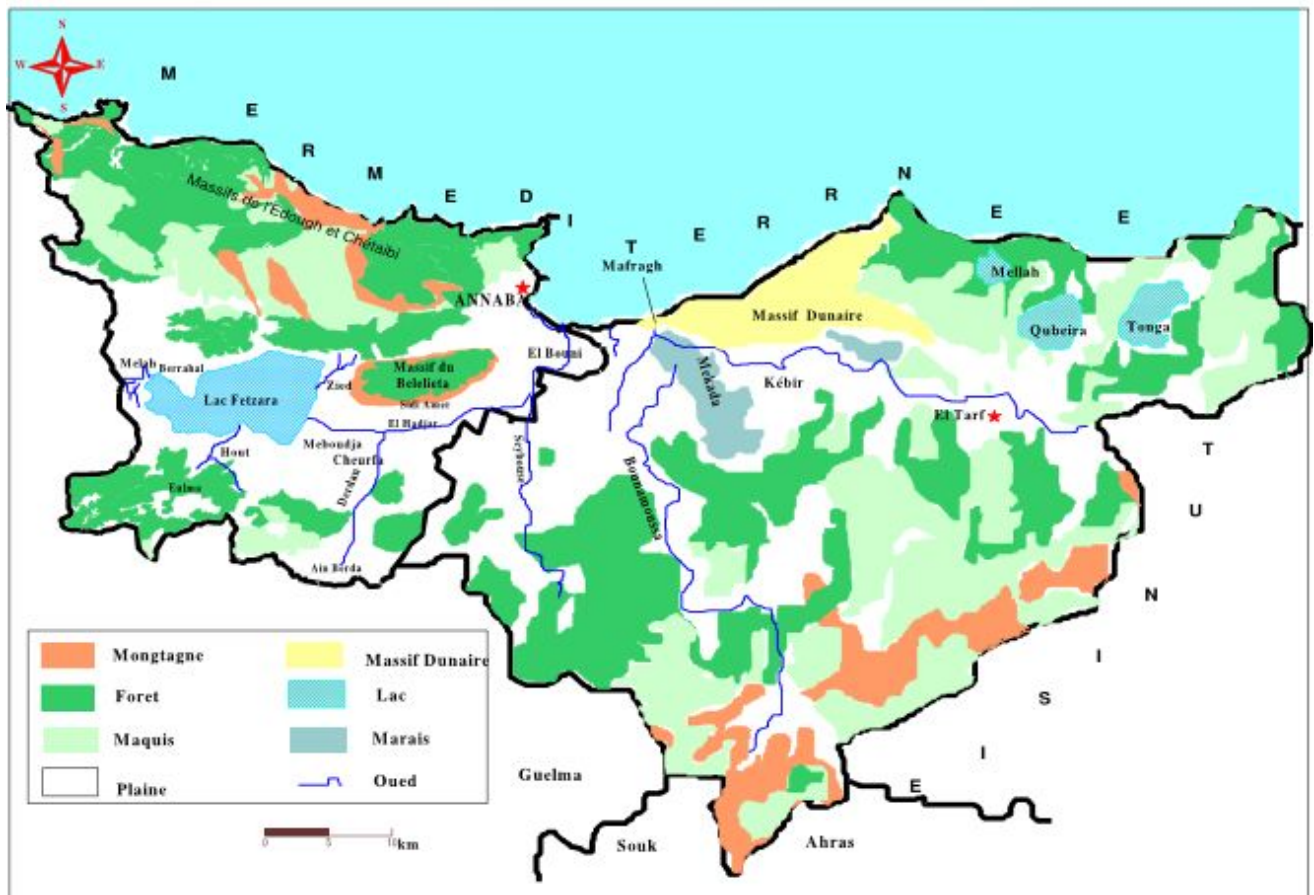
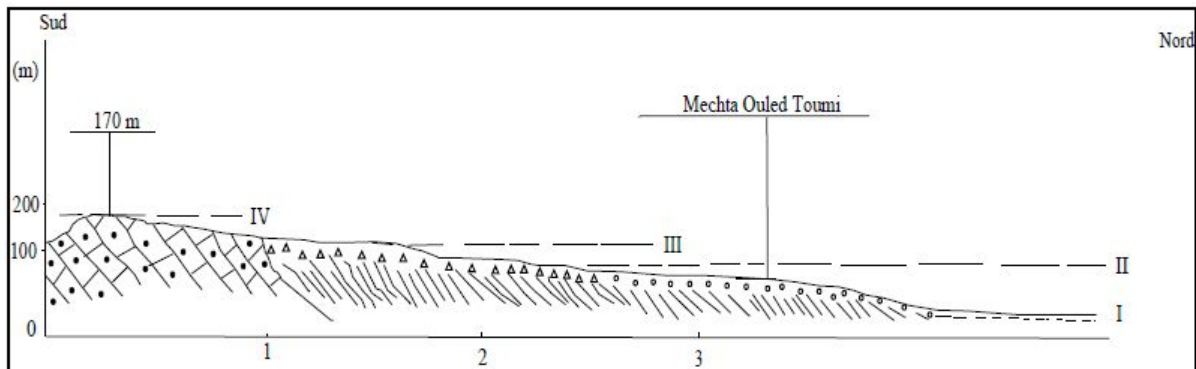


Fig.7. Les unités morphologiques dans la région de Annaba El-Tarf (Direction des Forêts d'Annaba) Saadali B., 2007(modifié)

### II.3.4. Le lac Fetzara

La cuvette du Lac Fetzara présente des bordures Nord et Sud nettement dissymétriques, Elle est due à une tectonique active pendant le quaternaire ; elle est représentée par une large Dépression dont les dimensions sont approximativement de 17 km d'Ouest en Est et 13km du Nord au Sud.

Au Sud, un véritable piémont avec six niveaux de glacis, s'est construit en aval du tell Nord Guelmien. La coupe (Fig.8) montre bien qu'il existe sur ce piémont quatre niveaux de glacis. Au-dessus du niveau IV, la coupe montre Bien des replats de petites tailles qui tronquent les grés pseudo numidiens de ces massifs.



Légende :

IV – III – II – I : niveaux de glacis

**Fig.8. Coupe par le piémont de la bordure Sud du lac Fetzara Source (A. Marre, 1992)**

Au Nord, le massif de l'Edough pénètre brutalement dans la cuvette du lac Fetzara, et peu de formes quaternaires assurent le passage de la montagne au fond de la dépression. Sur le piémont de la bordure Nord du Lac, la tectonique semble avoir été plus active que sur la bordure Sud (Marre, 1992). Le fond de la cuvette du lac est occupé, à l'Ouest par le lac proprement dit, et à l'Est par la plaine d'El Hadjar qui se prolonge par celle d'Annaba. Ces deux ensembles morphologiques sont séparés par un cordon dunaire, celui-ci sert de ligne de partage des eaux, entre le lac Fetzara et l'Oued Méboudja.

Le canal de dessèchement, de longueur de 14 km, assure le drainage des eaux du lac en période pluvieuse, il traverse la cuvette de Fetzara selon une direction Ouest-Est et rejoint le cours d'eau de la Méboudja où il assure la vidange du lac.

Le long du canal on observe, des sables argileux jaunâtres avec, à la base des traces D'hydromorphie, des niveaux noirs argileux qui se terminent en biseaux vers l'aval. Ils sont Riches en matières organiques. On a donc là, une alternance de phases rhéxistatiques pendant Les quelles le lac recevait des formations sableuses venues soit des versants grâce au transport Des Oueds, soit du littoral par transport éolien, et des phases biostatiques pendant les quelles le lac devenait marécageux avec une faune lagunaire à marine (Haou. 2001). En effet, les Arrivées sont des espèces (faunes) qu'on retrouve à l'heure actuelle dans les estuaires où les

Eaux sont peu salées. La présence de cette faune au fond du lac Fetzara indique donc, la relation ancienne entre cette dépression et la mer.

La liaison entre le Lac et la plaine d'El Hadjar s'effectue à partir de l'Oued Méboudja qui sinuait autrefois entre Beléléita et Bouhamra avant de se relier dans l'Oued Seybouse.

La plaine d'El Hadjar se termine brutalement au Nord, contre le Djebel Beléléita, dernier mont du massif de l'Edough. Le versant de ce djebel est rectiligne et abrupt. Il s'agit certainement d'un contact par faille.

Deux niveaux de petits glacis peuvent être observés au dessus de la plaine d'El Hadjar, ils sont nettement déformés et plongent vers le fond de la plaine et disparaissent sous la basse Plaine sableuse.

La plaine d'El Hadjar a donc joué en subsidence jusqu'à une date récente. Cette subsidence semble avoir été très importante au droit du cordon dunaire du lac Fetzara quia permis de montrer a la fin le rôle de la tectonique et du climat dans la formation du lac. La tectonique est responsable d'un jeu en subsidence de la dépression. En effet, les failles qui limitent cette cuvette sont restées actives pendant tout le quaternaire.

### **II.3.5. Les montagnes**

Les montagnes de la Chaffia surplombent la partie avale du bassin, formant une barrière Est-Ouest. Leurs altitudes avoisinent les 450 m, avec la présence de massifs de 700 à 900 m d'altitude (djebel Bled Gherfie 996 m à l'Ouest). Les monts de la Cheffia sont caractérisés par les grés de la nappe Numidienne constituant le principal affleurement (Fig.2), et au Nordle massif de l'Edough est le principal massif qui caractérise la région d'Annaba. De plus de 1008 m, il s'élève brusquement au dessus des autres reliefs qui l'entourent. Sa masse principale de direction N55°-E, présente une ligne de crête longue de 26 km qui débute depuis le lac de Fetzara au sud et s'élève progressivement jusqu'au point culminant (1008 m) à Kef Sebaa pour redescendre ensuite depuis Seraidi vers Cap de Garde au Nord. Au sud, ce massif est flanqué par le Djbel Boukantas (511 m) et Belilieta (287 m) et se prolonge vers Annaba par le petit massif de Boukhadra (156 m).

### **II.3.6. Les plaines**

#### **II.3.6.1. La plaine d'Annaba**

C'est la plaine drainée par les deux oueds, le Seybouse au Sud et le Bounamoussa au Nord, elle se situe au centre d'un synclinaurium limité par le massif de l'Edough au Nord et la chaîne numidienne au Sud. On y distingue trois secteurs:

- La basse plaine dans laquelle s'encaisse l'oued Seybouse, dans les bordures on peut observer les glacis et le littoral où quelques formations quaternaires sont visibles.
- Dans la partie inclinée et légèrement bombée où la Seybouse entaille son lit, on constate deux terrasses, la basse terrasse sablo-limoneuse qui constitue le niveau général de la plaine d'Annaba et la très basse terrasse qui existe seulement dans la région de Dréan.
- La basse terrasse sableuse de l'oued Seybouse, dont l'altitude est de 5 à 6 m vient butter contre un cordon dunaire de sables blancs et haut d'environ 10 m qui naît derrière le port. A l'Est et à l'Ouest cette basse terrasse disparaît pour laisser place à des dépressions de 2 m d'altitude et aux formations argileuses noires et hydro morphes (marais de Boukhmira près De l'aéroport Annaba, les salines).

#### **II.3.6.2. La plaine d'El Hadjar**

Présente une forme inclinée vers la mer et occupe la partie-est du fond de la cuvette du lac Fetzara et se prolonge par la plaine d'Annaba. La liaison entre le lac et la plaine d'El Hadjar se fait par l'oued Meboudja.

#### **II.3.6.2. La plaine d'El Tarf**

Son extension est de l'ordre de 70 km<sup>2</sup>, elle est limitée par :

- Au Nord par la mer méditerranée, le plongement du massif de Bouteldja et L'affleurement des grès numidiens.
- Au Sud par le mont de la Chaffia.
- A l'Ouest par la plaine alluviale de Bouteldja.
- A l'Est par le plongement des grès numidiens et du lac Oubaira.

Elle est caractérisée par les figures caractéristiques suivantes :

- Hautes, Moyennes et Basses terrasses constituées de cailloux, sables, galets et argiles.
- Les lacs Oubeira, Mellah, Tonga.
- Vallée d'Oued Kébir-Est qui siège dans la plaine d'El-Tarf.

**II.3.6.3. La plaine alluviale de Bouteldja**

Sa superficie est de l'ordre de 110 km<sup>2</sup> limitée :

- Au Nord par le massif dunaire de Bouteldja.
- Au Sud par les monts de la Chaffia.
- A l'Ouest par la plaine d'El-Tarf, caractérisée par la forme géomorphologique de la vallée d'Oued Kébir Est et du lac des oiseaux.

**II.3.6.4. La plaine d'El Asfour**

Elle forme une cuvette d'une superficie égale 50 km<sup>2</sup>, elle est limitée :

- Au Nord par la plaine d'Annaba
- Au Sud, à l'Ouest et à l'Est par le Mont de chaffia.

On peut cité Oued Bounamoussa qui traverse la plaine du Sud vers le Nord et les terrasses qui forme le lit de cet oued.

**II.3.6.2. Les collines**

Elles sont développées à la limite des plaines, au niveau des terrasses déprimées. Au Nord-Est de Bouteldja ; elles 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), dans la wilaya d'Annaba les collines et les piémonts, occupent 25,82 % de la superficie totale de la wilaya, soit 365 km<sup>2</sup>.

**II.3.7. le Sols et Le couvert végétal**

La zone d'étude est formée par un ensemble d'unités bien distinctes. L'interaction du relief, de l'altitude et des pentes, de la roche mère et de la tectonique, peut ainsi déterminer le façonnement du paysage naturel de la cuvette lacustre de Fetzara. Ce qui explique la diversité de l'occupation du sol.

A ce propos, on peut distinguer, en dehors des zones urbanisées, des zones occupées par la végétation naturelle ou par les reboisements et des zones de mise en valeur culturale.

**II.3.7.1. Sols des versants**

Les versants Nord et Sud disposent d'une remarquable couverture végétale donnant

l'aspect d'une succession visible à l'œil nu, le maquis sur les niveaux plus ou moins hauts et la forêt sur les niveaux de haute altitude.

Le Djebel Menchoura, au Sud-Est très dégradé et ne se reconstitue que très lentement, bien qu'il ne fasse l'objet d'aucune exploitation, il s'agit uniquement de chêne-liège, de pin maritime et surtout d'eucalyptus au bord des routes. Enfin, des aménagements agricoles en versants ont été mis en œuvre par le développement d'arboriculture en montagne, comme l'olivier, le pêchier,...etc.

Ailleurs, principalement sur les grès, c'est le domaine du maquis méditerranéen typique à cistes et calycotomes associés à des plantes annuelles, le plus souvent tubéreuse et à des touffes de brachypodes rameux. Le Diss n'apparaît en abondance qu'au-dessus de 600 m d'altitude.

Au nord, la forêt occupe les sommets du massif de Berrahal et la région du Douar Toubèïga à l'Ouest. Le chêne-liège est l'essence principale couvrant environ 1/3 de la superficie forestière, cette forêt est exploitée en matière de bois et de liège. Elle fournissait ce dernier à l'unité SNLB localisée à l'Oued El Aneb.

Un peu plus bas, la présence du maquis révèle la dégradation d'une ancienne forêt ; elle est due aux actions anthropiques continues (les incendies, parcours du bétail), il serait donc nécessaire de préserver ces zones contre le pâturage pour rétablir l'équilibre naturel et lutter contre le phénomène de dégradation

Les reboisements sont constitués de deux essences : l'une feuillue (Eucalyptus) et l'autre résineuse (Pin maritime), ce qui a contribué à une régénération de la forêt et une stabilisation des versants.

Enfin, l'agriculture de piémont est axée sur une arboriculture rustique (olivier, figuier et figuier de barbarie), ainsi qu'un maraîchage légumier varié, léger et limité.

### **II.3.7.2. Sols alluvionnaires**

La végétation pastorale (prairie naturelle) occupe les zones basses de la région et principalement les alentours du lac Fetzara.

La présence de cette couverture végétale, constitue une véritable réserve de fourrage pour le cheptel qui est important dans la région. Le surpâturage pose le problème de régénération des

herbes.

L'agriculture de plaine est surtout axée sur le maraîchage, la tomate industrielle, la céréaliculture et la culture fourragère, ainsi que l'arboriculture fruitière en irriguée pour les agrumes et fruits à noyaux.

La couverture végétale (Fig.3) est représentée par une dominance des peuplements forestiers qui occupent une superficie de l'ordre de 167777 ha représentant 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, où 63 % de ce patrimoine est représenté par divers peuplements, et 37% seulement sont constitués de maquis couvrant les bas fond inter dunaire et à la surface des dunes au Nord - Ouest de la région (Sedrati, 2006).

D'après le tableau (N°-1-), les peuplements naturels, à savoir le chêne liège et le chêne zen occupent 40% de la superficie forestière, recouvrant les reliefs gréseux et une partie des dunes quaternaires, par contre les espèces introduites par divers reboisements (Eucalyptus, Pin maritime et les Oléastres) occupent une part de 20%.

En plus des diverses dégradations par les incendies et les pâturages illicites, ce patrimoine subit des impacts de négligence dus à l'introduction des espèces exogènes.

**Tableau.3. Peuplements et formations forestières (Plan d'aménagement de la wilaya D'El Taref 2001).**

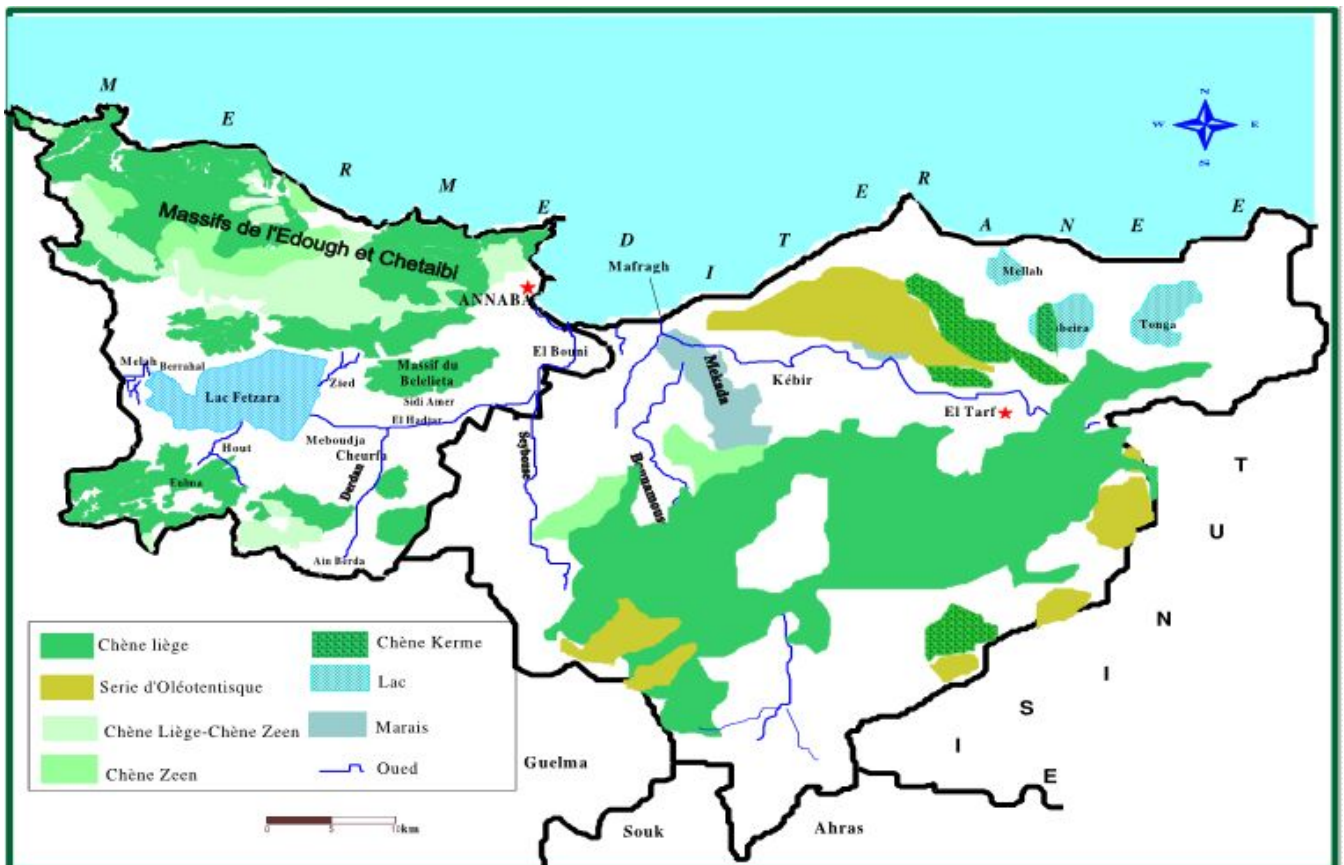
Espèce	Superficie en ( ha)	Participation en (%)
- Chêne liège	59563	35.5
- Chêne zeen	6492	3.86
- Eucalyptus	13047	7.78
- Peuplier	1278	0.76
- Pin maritime	18542	11.05
- Oléastres	1024	0.61
- Aulune	730	0.43
-Maquis	62173	37.06
- Autre espèces	850	0.51
- Clairière	40780	2.44
total	167777	100%

-Sur la rive occidentale de l'Oued Bourdim la destruction (pour utilisation du bois) des Espèces autochtones, puis les incendies d'une partie de l'aulnaie, installe ce dernier en situation de faiblesse face à l'Eucalyptus (mis en place dans les années 70).

- Le Pinus pinastre a ses incidences dans les dunes : absence de sous bois, acidification des sols, et la difficile percolation des eaux dans un sol sans véritable humus).

**Tab.4. Les différentes formations forestières dans la wilaya d'Annaba (d'après la Direction des forêts De wilaya d'Annaba 2007).**

Espèce	Superficie en (Ha)	Participation en (%)
Chêne Liège	39447.9	53%
Chêne Zeen	5954.4	8%
Pin maritime	3721.5	5%
ChêneLiège-Chêne Zeen	5210.1	7%
Eucalyptus	13397.4	18%
Eucalyptus-Acacia		
<b>Total</b>	<b>74430</b>	<b>100%</b>



**Fig.9. Carte du couvert végétal d'Annaba-El Tarf (Direction des forêts d'Annaba et Saadali .B.2007 (modifiée))**

Du point de vue des essences forestières les formations de Chêne sont largement dominantes, occupant plus de la moitié des superficies cartographiées, Le Chêne Zeen n'occupe que 8% et le Pin maritime 5%, les autres essences forestières (Eucalyptus, Acacias) sont des essences de reboisements.

#### **II.4.Conclusion**

Le terrain en question représente plusieurs formations géologiques d'origine métamorphique, sédimentaire, et éruptive attribuées au primaire, tertiaire et quaternaire.

Le massif cristallophyllien, l'Edough, constitue la terminaison Est de la ligne des crêtes du massif kabyle. Il forme aujourd'hui un dôme anticlinal sous l'aspect d'une amygdale elliptique dont l'axe orienté SW – NE se prolonge au dessus de la plaine. Au relief principal s'ajoutent à l'Est le Djebel Bougantas, le Kef N'sour et le Bouhamra les coteaux de Annaba et enfin le promontoire du Cap de Garde qui est tranché brusquement par l'affaissement méditerranéen.

Cet ensemble montagneux de structure complexe (faillé et plissé) affecté par toutes les phases tectoniques depuis le paléozoïque, il apparaît comme tout à fait indépendant du reste de la région d'Annaba dont l'orogénie se lie à la terminaison orientale de la chaîne Numidique.

La nappe Numidienne avec son flysch habituel argilo gréseux mise en place à la suite des poussées tectoniques d'origine alpine.

Les roches éruptives intrusives mises en place au Mio-pliocène ne sont représentées que par trois petits affleurements au sein du périmètre d'étude (un affleurement de pyroxénites et deux affleurements de Magnétite).

Les plaines, les vallées et les dépressions marécageuses correspondent à un bassin de remplissage alluvionnaire qui a débuté à la fin de l'ère tertiaire (pliocène) et se poursuit tout au long du Quaternaire suite aux phénomènes de néotectonique responsable de l'orographie actuelle.

Les principales unités géomorphologiques caractérisant la région d'étude sont : les terrasses de la Seybouse, les massifs de bordure et les marécages. Ces unités sont largement dominées par des formations quaternaires qui sont le siège des nappes aquifères.

*CHAPITRE III*

---

**HYDRO-CLIMATOLOGIE**

### **III. Cadre hydroclimatologique**

#### **III. 1. Introduction**

L'étude des caractéristiques hydroclimatologiques joue un rôle primordial dans la connaissance des comportements des cours d'eaux, les variations des réserves, la compréhension des mécanismes d'alimentation et de circulation des eaux naturelles. Pour cela, l'élaboration du bilan hydrique est indispensable pour mieux comprendre le fonctionnement et les influences d'un système hydraulique de surface d'une région donnée.

Les facteurs qui déterminent le climat sont la précipitation, l'humidité, la température et le vent. La distribution de ces facteurs, dans le temps et dans l'espace, influence l'évaporation et la transpiration. En effet, ils permettent d'évaluer quantitativement les variations du régime hydrologique.

L'analyse du comportement hydrologique d'un bassin versant s'effectue par l'observation de la quantité d'eau qui s'écoule dans ce système qu'elle permet d'identifier le volume des ressources d'eau superficielle ainsi que les nappes souterraines. Ceci implique la connaissance des paramètres suivants : les précipitations, l'évapotranspiration, l'infiltration et le ruissellement qui conditionnent le bilan.

#### **III. 2. Climatologie de la zone d'étude**

##### **III. 2. 1. Stations de mesures**

Comptant parmi les régions les plus arrosées de l'Algérie, la zone d'étude est soumise à un climat méditerranéen caractérisé par un hiver doux et humide et un été chaud et sec, dont le régime dépend principalement de la précipitation et de la température.

Les données recueillies concernent des stations météorologiques des Salines, Ben M'hidi et Bouteldja (Tab.5), du fait de leur répartition dans la zone d'étude, Elles sont sous forme de moyennes mensuelles et annuelles des hauteurs de pluie pour une période de 26 ans (1990/2016), et des moyennes mensuelles et annuelles des températures pour la même période. Ces données permettent d'estimer la répartition dans le temps et dans l'espace, ainsi que la quantité d'eau infiltrée et évaporée.

**Tableau. 5. Coordonnées géographiques des stations météorologiques.**

Station	X	Y	Alt. (m)	Période d'observation
Salines	955.2	403.8	3	1990-2016
Ben M'hidi	961.62	397.30	07	1990-2016
Bouteldja	991.10	401.55	20	1990-2016

### III. 2. 2. Les précipitations

Toutes les eaux météoriques qui arrivent au sol sous quelques formes que ce soit ; de la pluie, de la neige, de la grêle, de la rosée, sont regroupés sous le terme de précipitations.

#### III. 2. 2. 1. Les précipitations moyennes mensuelles

Dans l'établissement du bilan hydrique, les précipitations sont l'élément le plus important parce qu'elles reflètent la circulation des eaux superficielles et souterraines. De plus, toute étude climatologique nécessite une analyse bien détaillée des précipitations, car la pluie est un facteur qui conditionne l'écoulement saisonnier et par conséquent, le régime des cours d'eaux ainsi que celui des nappes.

Les variations mensuelles et pluriannuelles des précipitations sont présentées dans le tableau N° 6 :

**Tableau. 6. Précipitations moyennes mensuelles (1990 – 2016).**

Stations	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Juillet	Août	Total
Les Salines	41.44	61.415	82.44	120.34	99.925	73.18	62.48	61.525	43.965	13.495	3.035	11.125	674.36
Ben M'hidi	43.16	55.68	83.72	99.51	92.89	85.32	65.21	58.34	38.29	8.51	1.97	9.29	641.89
Bouteldja	51.23	55.90	120.00	126.55	132.44	73.53	67.07	67.73	39.74	13.54	0.75	7.40	755.86

L'histogramme des précipitations moyennes mensuelles (Fig.10) au niveau des trois stations Les Salines, Ben M'hidi et Bouteldja, montre une hétérogénéité remarquable des précipitations d'un mois à l'autre avec un maximum de l'ordre de : 132.44 mm à Bouteldja, 100 mm aux Salines et 99.51 mm à Ben M'hidi au mois de janvier, et un minimum de 0.75 mm, 3.03 mm et 1.97 mm aux trois stations respectivement pendant le mois de juillet.

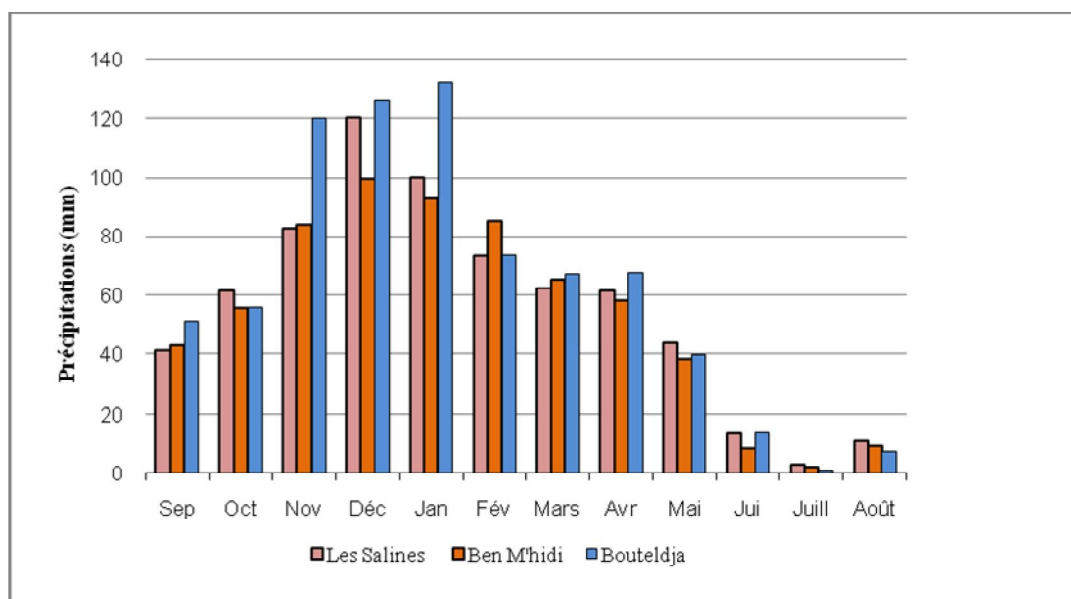


Figure .10 . Précipitations moyennes mensuelles pour les trois stations (1990–2016).

### III. 2. 2. Répartition saisonnière des précipitations

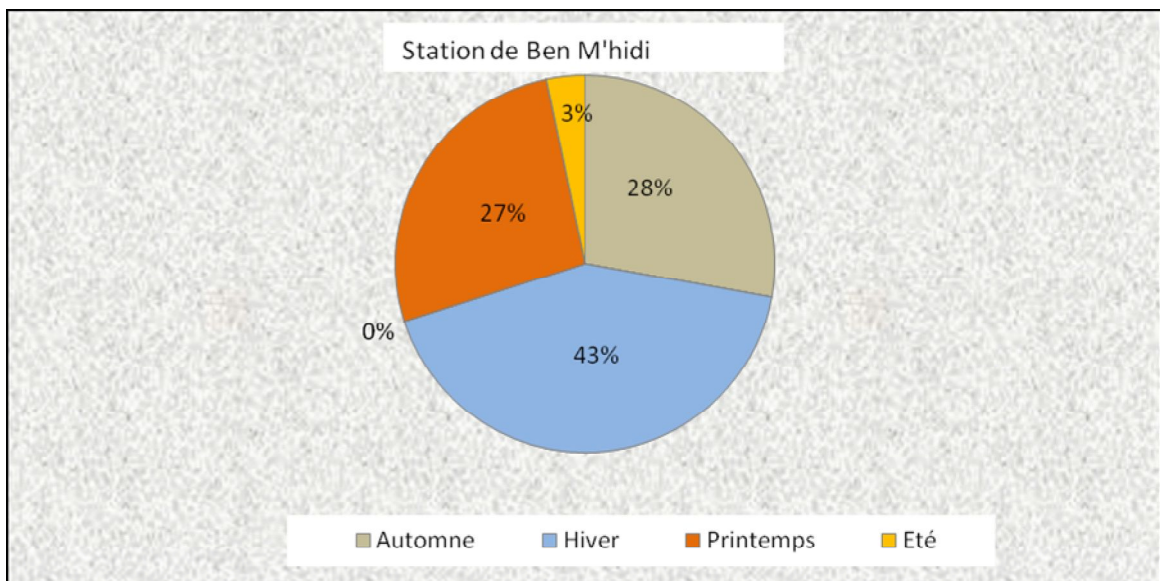
Il est connu que le taux des précipitations diffère d'une saison à l'autre. Dans l'objectif de déterminer ces quantités nous sommes intéressés aux précipitations saisonnières (**Automne** : Septembre, Octobre, Novembre, **Hiver** : Décembre, Janvier, Février, **Printemps** : Mars, Avril, Mai, **Été** : Juin, Juillet et Août), cette répartition est présentée dans le tableau N° 7 :

Tableau .7. Répartition saisonnière des précipitations (1990-2016).

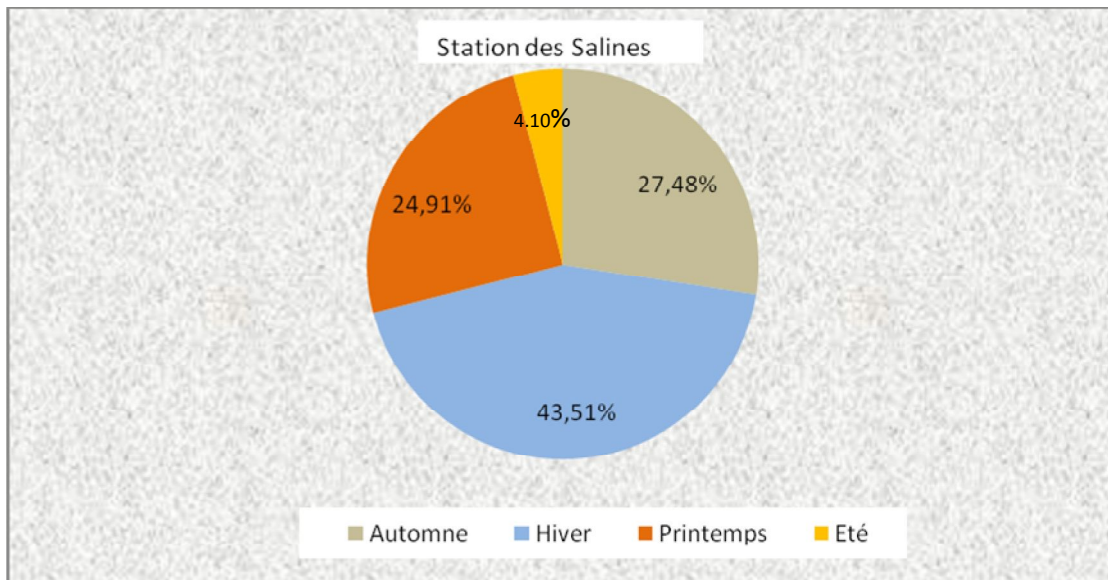
Stations	Automne		Hiver		Printemps		Été	
	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
Les Salines	185.29	27.48	293.44	43.51	167.97	24.91	27.65	4.10
Ben M'hidi	182.56	28.44	277.72	43.27	161.84	27.19	19.77	3.38
Bouteldja	227.13	34.39	332.51	41.26	174.54	21.66	21.69	2.69

Selon le tableau précédent (Tab.7) nous observons une saison hivernale de forte pluviosité avec 332.51 mm, 293.44 mm et 277.72 mm, soit 43.51 %, 43.27 % et 41.26 % du total annuel respectivement pour les trois stations. En Automne les précipitations sont de l'ordre de 227.13 mm soit 34.39 % à la station Bouteldja, 185.29 mm soit 27.48 % à la station des Salines et

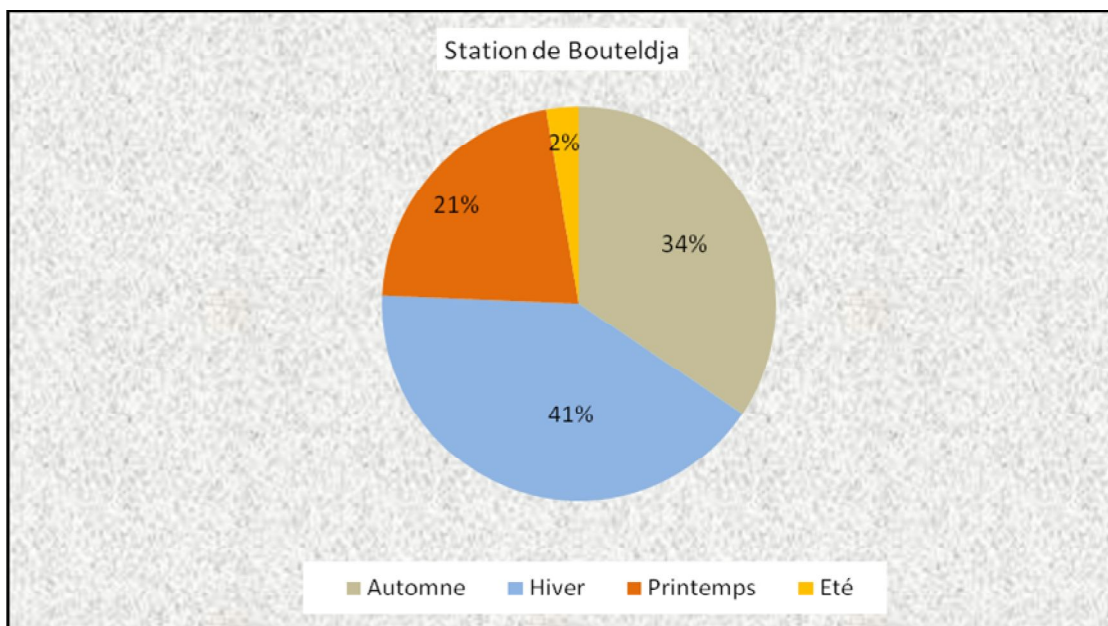
182.56 mm soit 28.44 % à la station de Ben M'hidi du total annuel, ainsi que les précipitations en Printemps sont de l'ordre de 174.54 mm soit 21.66%, 167.97 mm soit 24.91% et 161.84mm soit 27.19 % du total annuel respectivement pour les trois stations. La pluviométrie enregistrée dans la saison sèche est la plus faible par rapport aux autres saisons, Elle est respectivement de l'ordre de 27.65 mm soit 4.10 %, 21.69 mm soit 2.69% et 19.77mm soit 3.38% de la pluviosité annuelle. La Répartition saisonnière des précipitations à travers les trois stations est illustrée dans (Fig.11, 12 et 13).



**Figure .11. Répartition saisonnière des précipitations à la station Ben M'hidi (1990-2016).**



**Figure .12. Répartition saisonnière des précipitations à la station des Salines (1990-2016).**



**Figure .13. Répartition saisonnière des précipitations à la station de Bouteldja (1990-2016).**

### III. 2. 2. 3. Précipitations moyennes annuelles

Les variations des précipitations de chaque année durant la période de 26 ans (1990-2016) sont présentées dans le tableau N° 8. Nous pouvons exprimer cette variation à partir du

coefficient pluviométrique CP (Fig.14) pour déterminer les années excédentaires et déficitaires. Il est obtenu par le rapport de la pluviométrie d'une année à la pluviométrie moyenne d'une série d'années à une station donnée.

Nous avons deux cas :

$$CP = \frac{P}{\bar{P}}$$

Si  $CP > 1$  : année excédentaire.

Si  $CP < 1$  : année déficitaire.

Avec :

**CP** : coefficient pluviométrique.

**P** : Pluviométrie annuelle de l'année en (mm).

**Pmoy** : Pluviométrie moyenne annuelle en (mm).

**Tableau .8 . Les précipitations annuelles et les coefficients pluviométriques des trois stations (1990–2016).**

an	Les précipitations annuelles (mm)			Le coefficient pluviométrique (CP)		
	Les Salines	Ben M'hidi	Bouteldja	Les Salines	Ben M'hidi	Bouteldja
1990/91	638.6	689.30	760.90	0.96	1.07	1.00
1991/92	623.7	684.60	643.70	0.93	1.07	0.84
1992/93	680.6	718.70	781.90	1.02	1.12	1.03
1993/94	500	550.90	583.70	0.75	0.86	0.77
1994/95	585.5	594.70	609.00	0.88	0.93	0.80
1995/96	734.6	656.70	419.30	1.10	1.02	0.55
1996/97	391.8	322.20	559.70	0.59	0.50	0.73
1997/98	863	809.60	962.00	1.29	1.26	1.26
1998/99	735	751.80	736.20	1.10	1.17	0.97
1999/00	562.1	435.20	767.70	0.84	0.68	1.01
2000/01	547.1	514.00	572.70	0.82	0.80	0.75
2001/02	368.2	408.10	889.90	0.55	0.64	1.17
2002/03	973	783.00	881.10	1.46	1.22	1.16
2003/04	858.9	531.80	1001.30	1.29	0.83	1.31
2004/05	842.9	875.46	1060.90	1.26	1.36	1.39
2005/06	574.2	573.80	724.90	0.86	0.89	0.95
2006/07	592.1	618.00	540.20	0.89	0.96	0.71

2007/08	528.4	586.50	1090.10	0.79	0.91	1.43
2008/09	888.5	854.60	836.10	1.33	1.33	1.10
2009/10	680.5	599.47	695.90	1.02	0.93	0.91
2010/11	775.6	750.40	744.24	1.16	1.17	0.98
2011/12	742.7	711.70	873.60	1.11	1.11	1.15
2012/13	699.5	663.50	688.50	1.05	1.03	0.90
2013/14	610.10	532.90	700.10	0.91	0.83	0.92
2014/15	811.10	873.90	1054.30	1.21	1.36	1.38
2015/16	551.24	599.85	637.40	0.83	0.93	0.84

Remarque:

Année excédentaire

Année déficitaire

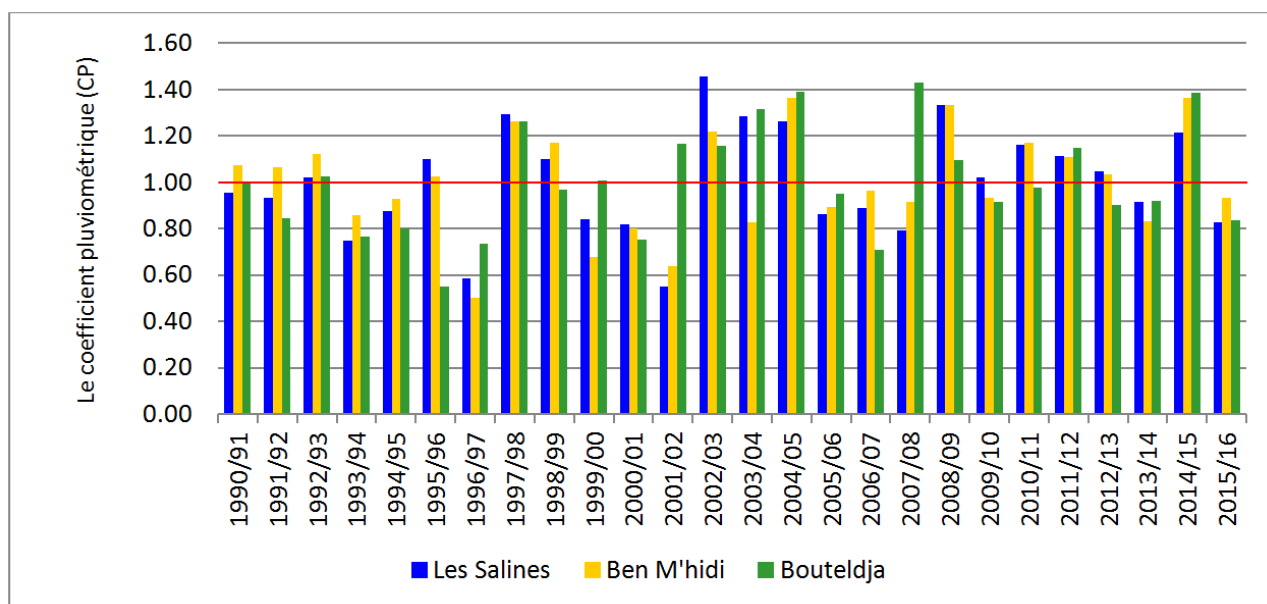
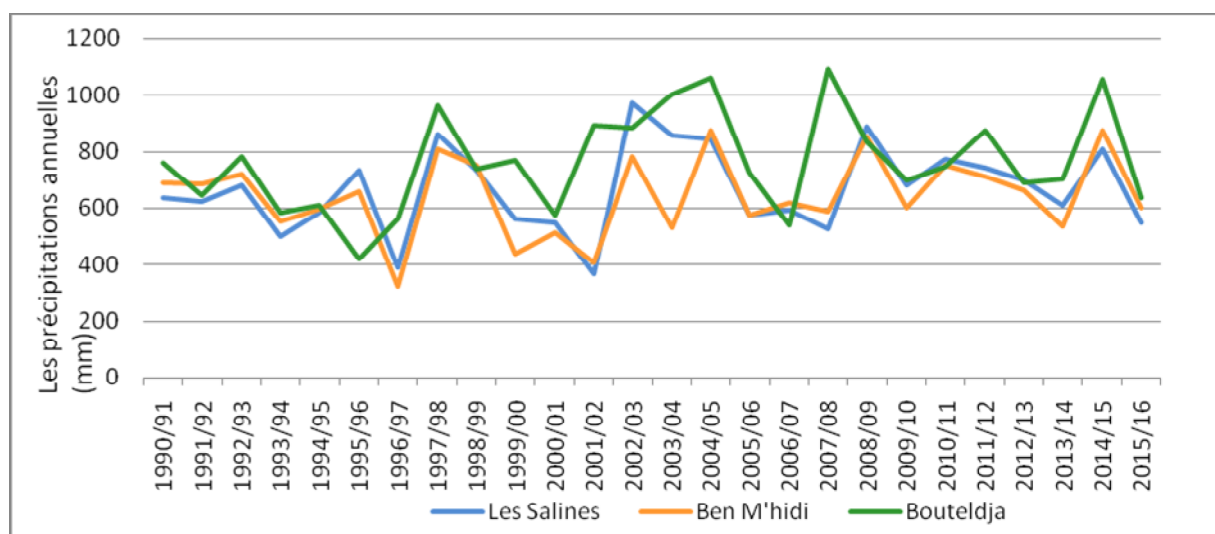


Figure .14 . Les variations du coefficient pluviométrique pour les trois stations (1990–2016).

A partir de ces données (Tab.8) on constate, en générale qu'il y a une alternance entre les années excédentaires et celles déficitaires et ils sont égaux dans les trois stations.

### III. 2. 2. 4. Variations des précipitations annuelles



**Figure .15 . Variations des précipitations annuelles des stations de Ben M'hidi, de Bouteldja et des Salines (1990–2016).**

Durant les années 1990/1991, 1996/1997 et 2001/2002 les stations Ben M'hidi, les Salines et Bouteldja respectivement ont enregistré la plus faible pluviométrie par rapport aux autres années avec des précipitations de l'ordre de 322.20 mm pour la station de Ben M'hidi, 368.2 mm pour la station des Salines et 419.30 mm pour la station de Bouteldja. De plus la pluviométrie maximale a été enregistrée en 2007/2008 avec un total de précipitation de 1090.1 mm pour la stations de Bouteldja et durant l'année 2002/2003 pour la station des Salines (973.0 mm) , cependant pour la station de Ben M'hidi la valeur maximale est enregistré durant l'année 2004/2005 (875.46 mm), (Fig.15).

### III. 2. 3. La température

Si les précipitations constituent l'apport en eau, les températures jouent un rôle important dans les pertes en eau par le phénomène de l'évapotranspiration. Elles constituent l'autre élément majeur conditionnant le climat d'une région. Elles permettent d'étudier l'évapotranspiration et le déficit d'écoulement, comme elles interviennent dans le développement du rythme biologique des végétaux et facilitent l'établissement du bilan hydrique.

La température dépend de plusieurs facteurs telle que l'altitude, où il est admis en Algérie selon SELTZER (1946) une diminution du gradient thermique de (-0.5 °c) chaque fois que l'altitude s'élève de plus de 100m.

La température de l'air de la région a été analysée à partir des données recueillies des trois stations, (les Salines, Ben M'hidi et Bouteldja).

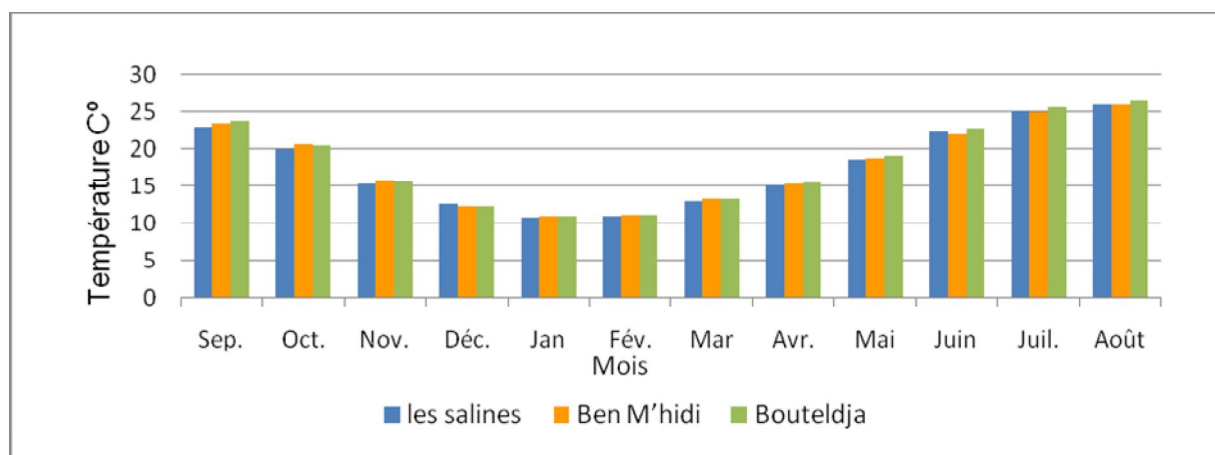
### III. 2. 3.1. La température moyenne mensuelle

L'évolution des valeurs mensuelles de la température durant la période (1990-2016) est illustrée dans le tableau N° 9.

**Tableau. 9. La température moyenne mensuelle (1990-2016).**

Station	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mar	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août
les salines	22.95	19.98	15.48	12.82	10.83	11.04	13.10	15.31	18.61	22.51	25.13	25.93
Ben M'hidi	23.49	20.55	15.88	12.47	11.07	11.24	13.39	15.44	18.70	22.17	25.00	26.05
Bouteldja	23.74	20.46	15.74	12.38	11.14	11.25	13.43	15.63	19.05	22.73	25.57	26.43

Selon l'histogramme (Fig.16) des variations interannuelles de la température moyenne mensuelle, on constate que la température de l'air connaît une régularité entre les trois stations, elles varient entre 25.93 (Août) et 10.83 °C (Janvier) pour la station des salines. Quant à celles de la station de Ben M'hidi et Bouteldja elles varient respectivement entre 26.05 C°, 26.43 °C (Août) et 11.07°C, 11.14C° au mois de Janvier. Les moyennes mensuelles maximales s'observent en général pendant le mois d'Août pour les trois stations.



**Figure .16. Histogramme de la température moyenne mensuelle aux stations des Salines, Ben M'hidi et Bouteldja (1990-2016).**

### III. 2. 3.2. Température moyenne annuelle

Le tableau N° 10 montre les moyennes annuelles de la température sur une période de 26 ans pour les trois stations de mesure, ces valeurs sont 17.95 °C pour Ben M'hidi, 18.13 °C à Bouteldja et 17.81 °C aux Salines.

**Tableau. 10. La température moyenne annuelle (1990–2016).**

Année	Les Salines	Ben M'hidi	Bouteldja	Année	Les Salines	Ben M'hidi	Bouteldja
1990-1991	17.70	17.34	17.25	2003-2004	17.68	17.71	17.62
1991-1992	17.17	17.28	17.19	2004-2005	17.39	18.22	18.13
1992-1993	17.83	17.94	17.85	2005-2006	17.75	18.35	18.26
1993-1994	16.94	17.83	17.74	2006-2007	18.09	18.39	18.3
1994-1995	18.30	18.02	17.93	2007-2008	17.60	17.88	17.79
1995-1996	18.59	17.68	17.59	2008-2009	17.63	17.58	17.49
1996-1997	18.15	17.45	17.36	2009-2010	17.72	17.59	17.5
1997-1998	18.02	17.34	17.25	2010-2011	17.61	18.25	18.45
1998-1999	17.94	17.66	17.57	2011-2012	17.94	18.12	19.78
2000-2001	18.28	17.76	17.67	2012-2013	17.06	18.03	19.24
2001-2002	17.96	18.15	18.06	2013-2014	17.92	18.59	19.6
2002-2003	17.71	17.57	17.48	2014-2015	17.59	18.88	20.15

### III. 2. 3.3. Diagramme Ombrothermique

En se basant sur les données des précipitations et des températures mensuelles sur la même période d'observation, on peut établir le diagramme Ombrothermique dont le but est de déterminer la saison sèche et celle humide.

Un mois sec est celui où le total des précipitations (mm) est inférieur ou égal à la température moyenne (°C) du même mois. Cette relation permet d'établir un diagramme Ombrothermique sur lequel les températures sont portées à une échelle double des précipitations, ( $P=2T$ ). IL a été développé par H. Gaussen et F. Bagnouls et met en évidence les périodes sèches et humides.

Lorsque les températures passent au-dessus de la courbe des précipitations, la saison correspondante est sèche ou déficitaire en eau; et lorsque la courbe des précipitations passe au-dessus de celle des températures, la saison correspondante est humide.

D'après les enregistrements de nos stations, on déduit deux périodes (Fig.17, 18 et 19) :

- Une saison humide qui s'étend de la fin du mois de Septembre jusqu'au mois de Mai pour les trois stations étudiées.
- Une saison sèche et chaude qui débute du mois de Mai (18.61 °C, 18.70 °C et 19.05 °C) jusqu'au mois de Septembre (22.95 °C, 23.49 °C et 23.47 °C) respectivement pour les trois stations étudiées.

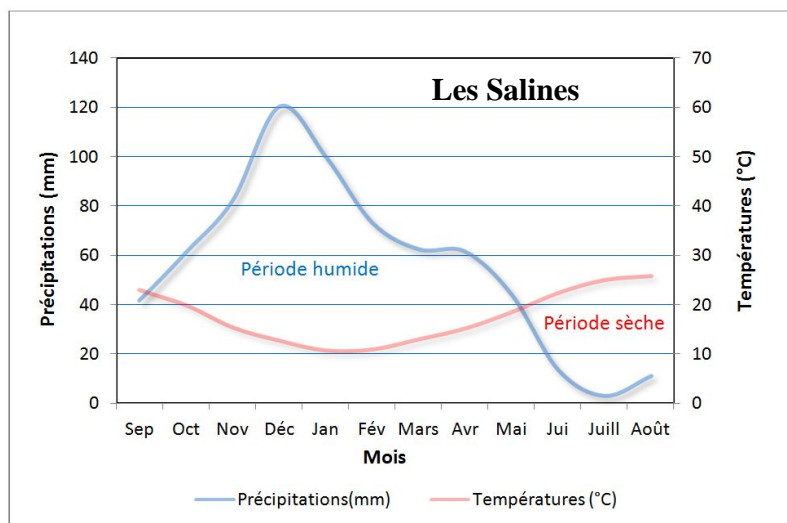


Figure .17. Diagramme Ombrothermique de la station des Salines (1990–2016).

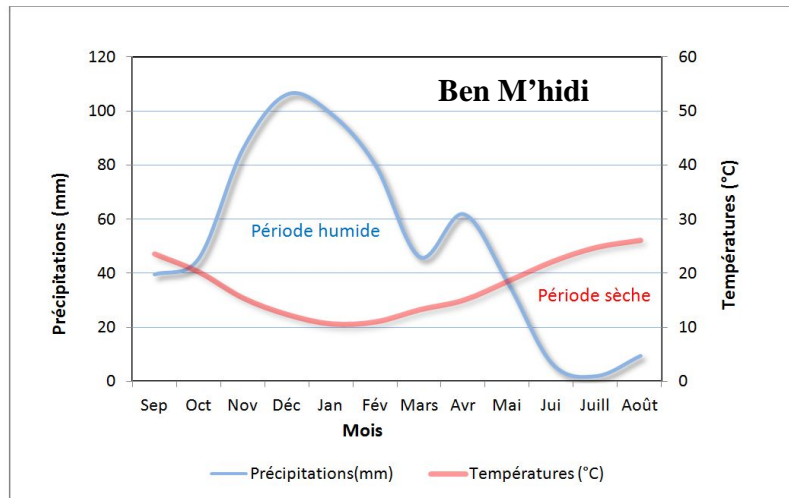


Figure .18. Diagramme Ombrothermique de la station de Ben M'hidi (1990–2016).

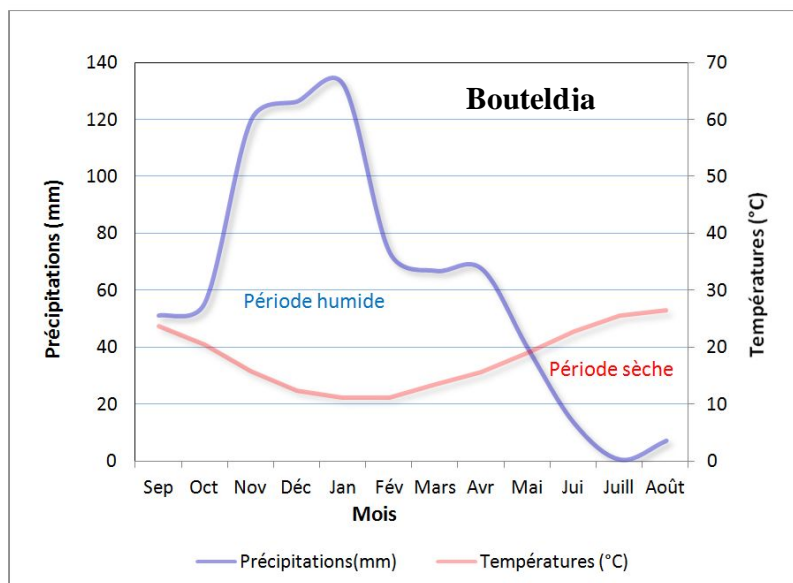


Figure .19. Diagramme Ombrothermique de la station de Bouteldja (1990–2016).

D'après les diagrammes Ombrothermiques des stations des Salines, de Ben M'hidi et de Bouteldja, nous pouvons conclure que notre région d'étude est soumise à un climat méditerranéen subhumide, caractérisé par deux saisons ; un hiver doux et humide et par un été chaud et sec.

### III. 2. 4. Le vent

La plaine d'Annaba El-Tarf est dominée par des vents Nord à Nord-est, Sud-ouest à Nord. Les vents les plus violents se manifestent en hiver et les plus faibles en été avec quelques épisodes de SIROCCO qui augmentent la température.

Le tableau suivant donne une idée sur la vitesse des vents à la station des Salines (1990-2014).

**Tableau.11. Vitesse du vent en (m/s) à la station des Salines (1990-2014).**

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mar	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août
Moy(m/s)	3.72	3.61	3.97	4.04	3.86	3.85	3.72	3.78	3.60	3.84	3.61	3.97

### III. 2. 5. L'humidité

L'humidité relative est le rapport exprimé en pourcentage de la tension de vapeur à la tension maximale correspondant à la température mesurée au thermomètre sec. Elle est déduite des lectures faites au psychromètre à trois moments de la journée (7h, 13h et 18h).

Le tableau (N° 12) indique les valeurs de l'humidité moyenne mensuelle à la station des Salines (1990-2014) :

**Tableau.12. Variations des humidités relatives moyennes mensuelles (en %) de La station des Salines (1990/2014).**

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mar	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août
Humidité moyennes mensuelle (%)	72.62	74.81	75.39	77.84	80.01	73.92	74.51	75.93	75.82	73.64	71.52	71.78

L'humidité maximale à la station des Salines est de 80.01 % en Janvier et l'humidité minimale est de 71.52 % en Juillet.

### III. 2. 3. Notion du bilan hydrique

Le bilan d'eau global correspond à une équation entre les apports et les pertes qui influent directement sur la variation des réserves. Ainsi pour déterminer le bilan du bassin étudié, il est indispensable d'évaluer ses composantes (infiltration, ruissellement et évapotranspiration).

Il est calculé par la formule suivante :

$$P = ETR + R + I$$

Avec :

**P**: Précipitation moyenne annuelle en (mm).

**ETR**: Evapotranspiration réelle moyenne annuelle en (mm).

**R**: Ruissellement moyen annuel en (mm).

#### III. 2. 3.1. Estimation des paramètres du bilan

##### III. 2. 3.1.1. L'évaporation /l'évapotranspiration

L'évaporation se définit comme étant le passage de la phase liquide à la phase vapeur, il s'agit de l'évaporation physique. Les plans d'eau et la couverture végétale sont les principales sources de vapeur d'eau. On parle de sublimation lors du passage direct de l'eau sous forme solide (glace) en vapeur. Le principal facteur régissant l'évaporation est la radiation solaire.

Le terme évapotranspiration englobe l'évaporation et la transpiration des plantes. On distingue :

##### III. 2. 3.1.1. 1. Evapotranspiration potentielle (ETP)

C'est la quantité maximale d'eau susceptible d'être perdue en phase vapeur, sous un climat donné, par un couvert végétal continu spécifié (gazon) bien alimenté en eau et pour un végétal sain en pleine croissance. Elle comprend donc l'évaporation de l'eau du sol et la transpiration du couvert végétal pendant le temps considéré pour un terrain donné.

L'ETP est calculée par la formule de C.W. Thornthwaite (1954), qui utilise la température de l'air et la latitude de la station, et qui est donnée par l'expression suivante :

$$ETP = 16 (10 t/I)^a \cdot k$$

Avec:  $a = 0,016 I + 0,5$ ;  $I = \sum i$ ;  $i = (t/5)^{1,514}$ .

**ETP**: Evapotranspiration potentielle mensuelle en (mm).

**t**: Température moyenne mensuelle en (°C).

**I**: Indice thermique mensuel.

**I**: La somme des indices mensuels de l'année.

**K**: Facteur correctif intégrant la durée d'insolation et la température

**Tableau.13. Résultats de l'ETP obtenus par la formule de « THORNTHWAITE » à la Station des Salines (1990-2016)**

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mar	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Total
<b>i</b>	10.1	8.2	5.5	4.2	3.22	3.31	4.3	5.44	7.31	9.75	11.5	12.1	84.8
<b>ETP (mm)</b>	105.1	76.3	42.2	27.8	21.8	22	37	52.6	83.2	119.5	148.8	147.6	885

$I = 84.89$ ,  $a = 1.85$

### III. 2. 3.1.1. 2. Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR)

L'évapotranspiration réelle s'identifie au déficit d'écoulement et peut se calculer à partir de nombreuses formules qui induisent l'utilisation de deux paramètres climatiques à savoir : la pluviométrie et la température.

L'évapotranspiration réelle dépend de plusieurs facteurs selon la formule utilisée, mais les plus importants sont la quantité de pluie tombée dans le bassin mais également la réserve maximale en eau dans le sol, le couvert végétale et la température de l'air.

Il est à rappeler que dans le cas où l'évapotranspiration potentielle est égale aux précipitations ceci implique que l'évapotranspiration potentielle représente l'évapotranspiration réelle.

L'excédent des précipitations sur l'évapotranspiration potentielle est emmagasiné dans le sol. Ce qu'il augmente les réserves (RU) jusqu'à ce que ce dernier soit saturé.

Pour le calcul de L'ETR trois formules sont utilisées :

- Formule de Turc ; Formule de Coutagne ; Formule de Thornthwaite.

#### A/ Formule de Turc

$$ETR = P / (0,9 + P^2 / L^2)^{1/2}$$

Avec :

**ETR** : Evapotranspiration réelle en (mm).

**P** : Précipitation moyenne annuelle en (mm)

**L** : Pouvoir évaporant, est une limite vers laquelle tend l'ETR lorsque devient grande :

$L = 300 + 25t + 0.05 t^3$ , où t est la température moyenne annuelle en C°.

Les valeurs de l'évapotranspiration réelle ETR, calculées par cette formule (de TURC) sont Inscrites dans le tableau (14).

**Tableau .14 . Résultats de l'ETR obtenus par la formule de « TURC » (1990-2016)**

Station	P (mm)	T (C°)	L	ETR (mm/an)
Salines	665.90	17.81	1027.71	579.64
Ben M'hidi	641.95	17.95	1037.92	566.84
Boutheldja	762.13	18.13	1051.21	638.30

#### B/ Formule de Coutagne

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

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

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

Avec :

**ETR** : L'évapotranspiration réelle en mm.

**P** : Précipitation moyenne annuelle en mm.

**T** : Température moyenne annuelle en °C.

Les résultats sont portés dans le tableau N°15:

**Tableau 15 : ETR annuelle selon la méthode de Coutagne.**

Station	P (mm)	T (C°)	$\lambda$	ETR (mm/an)
Salines	0.66590	17.81	0.30	532.87
Ben M'hidi	0.64195	17.95	0.30	518.32
Boutheldja	0.76213	18.13	0.30	587.87

### III. 2. 3.1.2. Estimation de la lame d'eau écoulée

#### III. 2. 3.1.2.1. Ruissellement (R)

Il est calculé par la formule de « TIXERONT BERKALOFF » modifiée par « ROMANTCHOUK » et utilisée dans le cas où les précipitations dépassent le seuil de 600 mm :

$$R = \frac{P^3}{3} \quad ; \text{ Si } P \geq 600\text{mm}$$

$$R = \frac{P^3}{3(ETP)^2} \quad ; \text{ Si } P < 600\text{mm}$$

Sachant que :

**P** : Précipitation moyenne en m.

**R** : Ruissellement en m.

**ETP** : Evapotranspiration potentiel en m.

Les résultats obtenus par cette formule sont enregistrés dans le tableau suivant:

**Tableau.16. Résultats du ruissellement obtenus par la formule de «TIXERONT BERKALOFF ROMANTCHOUK » pour les trois stations (1990-2016) :**

Station	P (mm)	ETP (m)	R (mm)
Salines	0.6659	0.8850	0.125
Ben M'hidi	0.6420	0.8910	0.111
Boutheldja	0.7621	0.9069	0.179

### III. 2. 3.1.2.2. Infiltration Efficace (I)

Est la quantité d'eau franchissant la surface du sol. Elle renouvelle les réserves d'eaux souterraines et entretient le débit de l'écoulement souterrain des sorties après circulation dans les formations hydrogéologiques perméables du sous sol (Castany 1982). Elle est déduite de l'équation fondamentale du bilan hydrique:

$$\boxed{P = ETR + R + I} \quad \longrightarrow \quad \boxed{I = P - (R + ETR)}$$

Avec :

**I:** L'infiltration en (mm).

**P:** Précipitation moyenne annuelle en (mm).

**R:** Ruissellement en (mm).

**ETR:** Evapotranspiration annuelle en (mm).

**Tableau.17. Estimation de l'infiltration par l'équation fondamentale du bilan hydrique**

	P (mm)	ETR		R		Ie	
		(mm)	%	(mm)	%	(mm)	%
<b>Saline</b>	665.90	475.55	71.41	128.56	19.31	66.90	10.05
<b>Ben M'hidi</b>	641.95	470.38	73.27	109.95	17.13	59.46	9.26
<b>Bouteldja</b>	762.13	494.90	64.94	208.16	27.31	97.78	12.83

A partir du tableau N° 17, on remarque que l'infiltration efficace (Ie) varie d'une région à l'autre, elle est importante dans la région de Bouteldja 97.78 mm et faible au niveau de Ben M'hidi 59.46 mm qui est la région la plus proche géographiquement de notre zone d'étude.

### III. 2. 3.2. La méthode du bilan d'eau selon C.W. Thornthwaite

Elle est basée sur la notion de la réserve en eau facilement utilisable (RFU). On admet que le sol est capable de stocker une certaine quantité d'eau (RFU), cette eau peut être reprise par l'évaporation par l'intermédiaire des plantes. Pour notre cas on prend RFU = 100 mm.

La satisfaction de l'ETP est prioritaire sur l'écoulement, c'est-à-dire avant qu'il y ait écoulement il faut avoir satisfait ce qu'on appelle le pouvoir évaporant ( $ETP = ETR$ ), par ailleurs le remplissage de la RFU est également prioritaire sur l'écoulement. On établit ainsi un bilan à l'échelle mensuelle à partir de la pluie du mois, de l'ETP et de RFU.

Les résultats sont montrés dans les tableaux (18,19 et 20) et les figures (20, 21, 22, 23,24 et 25) suivants:

**Tableau .18. Bilan hydrique à la station des Salines pour la période (1990-2016).**

	<b>Tp</b>	<b>IT</b>	<b>CL</b>	<b>ETPC</b>	<b>Pr</b>	<b>BH</b>	<b>CH</b>	<b>VR</b>	<b>RU</b>	<b>ETPR</b>	<b>Def</b>	<b>Exc</b>
<b>S</b>	23	10.1	1.0	105.1	39.9	-65.2	-0.6	0.0	0.0	39.9	65.2	0.0
<b>O</b>	20	8.2	1.0	76.3	64.4	-11.9	-0.2	0.0	0.0	64.4	11.9	0.0
<b>N</b>	15.5	5.5	0.9	42.2	86	43.8	1.0	43.8	43.8	42.2	0.0	0.0
<b>D</b>	12.8	4.2	0.8	27.8	110.4	82.6	3.0	56.2	100.0	27.8	0.0	26.4
<b>J</b>	10.8	3.2	0.9	21.8	96.3	74.5	3.4	0.0	100.0	21.8	0.0	74.5
<b>F</b>	11	3.3	0.9	22.0	82.5	60.5	2.7	0.0	100.0	22.0	0.0	60.5
<b>M</b>	13.1	4.3	1.0	37.0	68.6	31.6	0.9	0.0	100.0	37.0	0.0	31.6
<b>A</b>	15.3	5.4	1.1	52.6	55.4	2.8	0.1	0.0	100.0	52.6	0.0	2.8
<b>M</b>	18.6	7.3	1.2	83.2	39.1	-44.1	-0.5	-44.1	55.9	83.2	0.0	0.0
<b>J</b>	22.5	9.7	1.2	119.5	11.1	-108.4	-0.9	-55.9	0.0	67.0	52.5	0.0
<b>J</b>	25.1	11.5	1.2	148.8	2.6	-146.2	-1.0	0.0	0.0	2.6	146.2	0.0
<b>A</b>	25.9	12.1	1.2	147.6	9.8	-137.8	-0.9	0.0	0.0	9.8	137.8	0.0
<b>Annuel</b>	<b>17.8</b>	<b>84.8</b>		<b>884.0</b>	<b>666.1</b>	<b>-217.9</b>				<b>470.4</b>	<b>413.6</b>	<b>195.7</b>

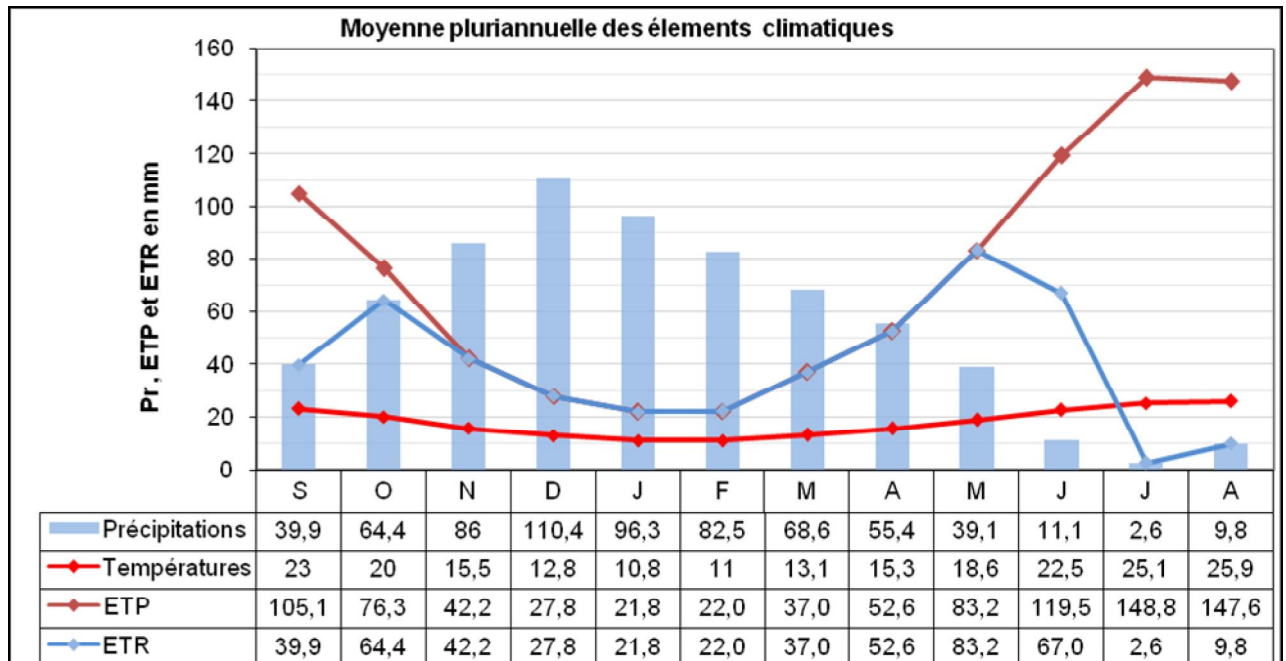


Figure .20. Moyenne pluriannuelle des éléments climatiques à la station des Salines pour la période (1990-2016).

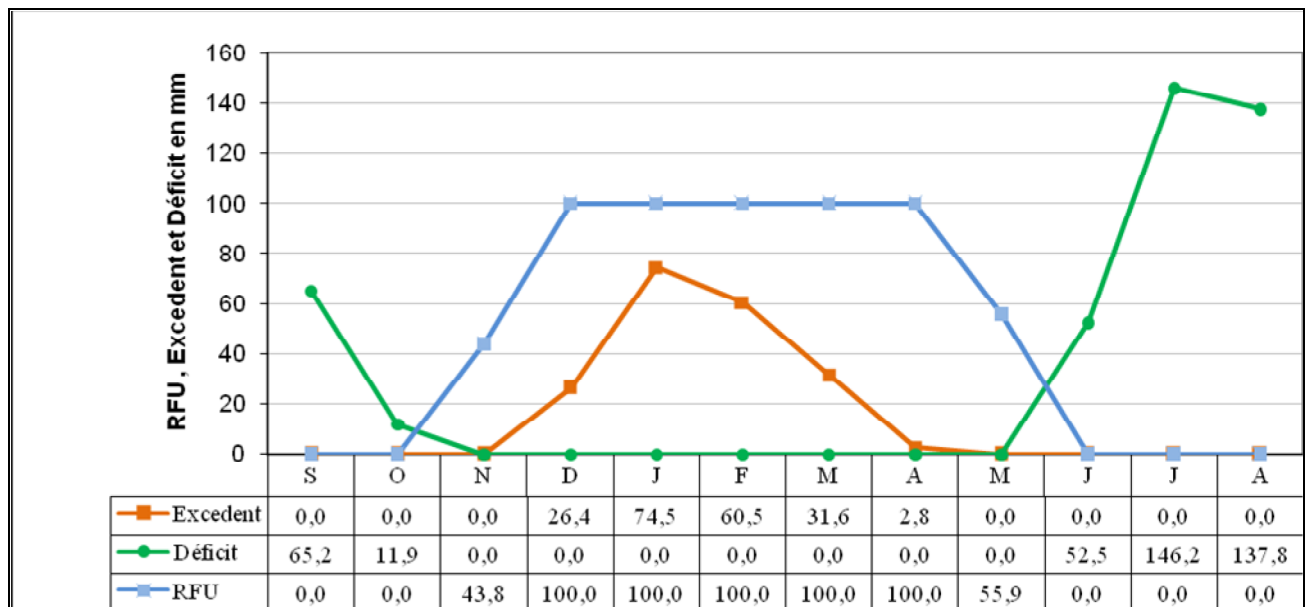
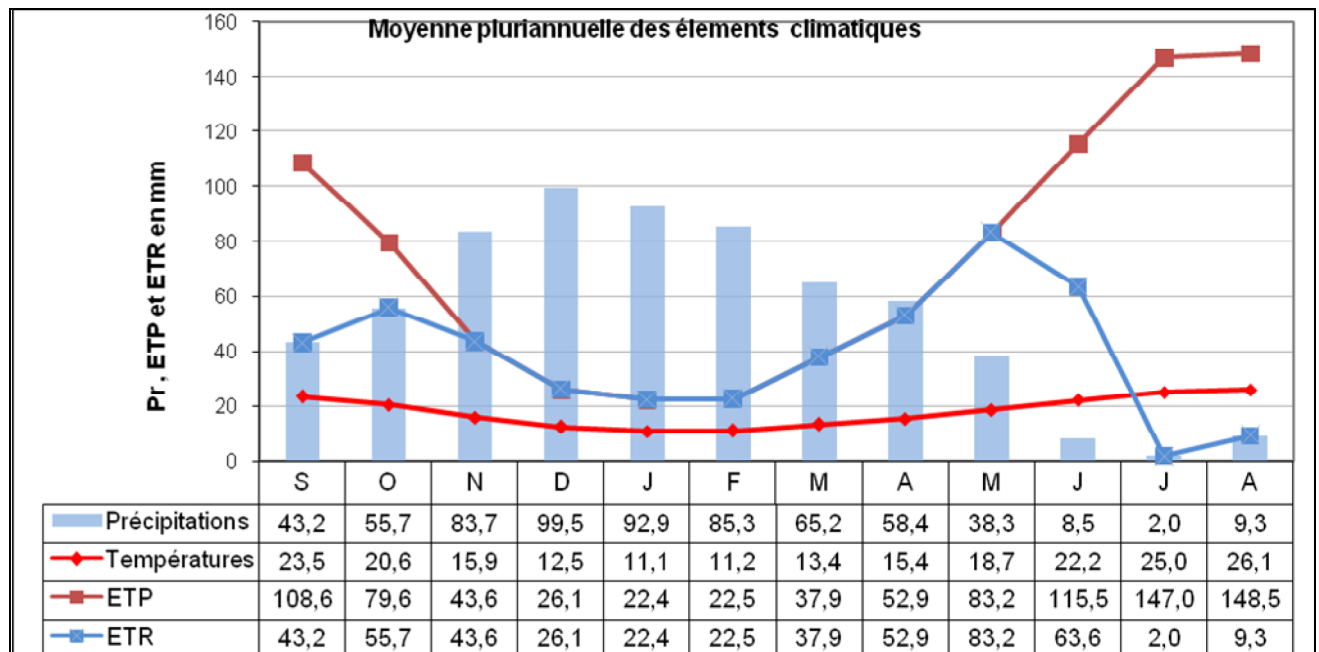


Figure .21. Diagramme de la variation de la RFU, du Déficit Agricole et de l'Excédent à la station des Salines pour la période (1990-2016).

**Tableau .19. Bilan hydrique à la station de Ben M’hidi pour la période (1990-2016).**

	Tp	IT	CL	ETPC	Pr	BH	CH	VR	RU	ETPR	Def	Exc
S	23.5	10.4	1.0	108.6	43.2	-65.5	-0.6	0.0	0.0	43.2	65.5	0.0
O	20.6	8.5	1.0	79.6	55.7	-23.9	-0.3	0.0	0.0	55.7	23.9	0.0
N	15.9	5.8	0.9	43.6	83.7	40.2	0.9	40.2	40.2	43.6	0.0	0.0
D	12.5	4.0	0.8	26.1	99.5	73.4	2.8	59.8	100.0	26.1	0.0	13.6
J	11.1	3.3	0.9	22.4	92.9	70.5	3.1	0.0	100.0	22.4	0.0	70.5
F	11.2	3.4	0.9	22.5	85.3	62.8	2.8	0.0	100.0	22.5	0.0	62.8
M	13.4	4.4	1.0	37.9	65.2	27.3	0.7	0.0	100.0	37.9	0.0	27.3
A	15.4	5.5	1.1	52.9	58.4	5.5	0.1	0.0	100.0	52.9	0.0	5.5
M	18.7	7.4	1.2	83.2	38.3	-44.9	-0.5	-44.9	55.1	83.2	0.0	0.0
J	22.2	9.5	1.2	115.5	8.5	-107.0	-0.9	-55.1	0.0	63.6	51.9	0.0
J	25.0	11.4	1.2	147.0	2.0	-145.0	-1.0	0.0	0.0	2.0	145.0	0.0
A	26.1	12.2	1.2	148.5	9.3	-139.2	-0.9	0.0	0.0	9.3	139.2	0.0
Annuel	18.0	85.8		887.8	642.0	-245.9				462.3	425.6	179.7



**Figure .22. Moyenne pluriannuelle des éléments climatiques à la station de Ben M’hidi pour la période (1990-2016).**

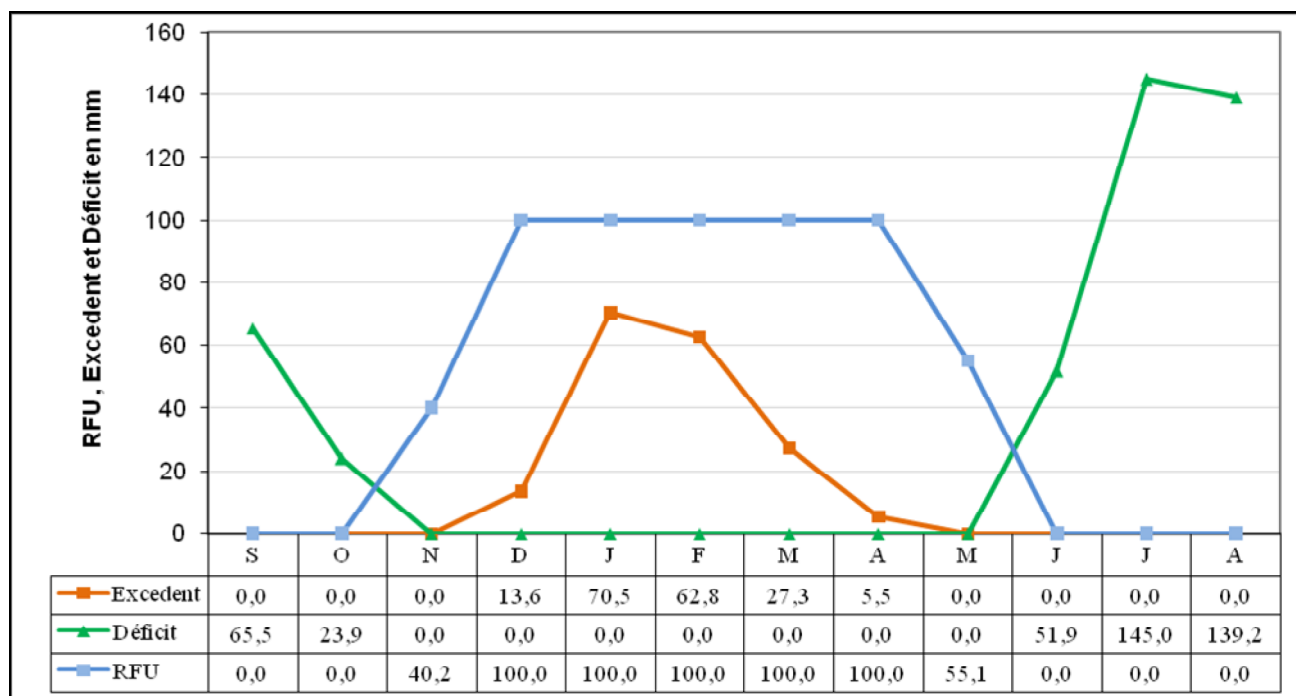


Figure .23. Diagramme de la variation de la RFU, du Déficit Agricole et de l'Excédent à la station de Ben M'hidi pour la période (1990-2016).

Tableau .20. Bilan hydrique à la station de Boutheldja pour la période (1990-2016).

	Tp	IT	CL	ETPC	Pr	BH	CH	VR	RU	ETPR	Def	Exc
S	23.7	10.6	1.0	110.3	48.5	-61.8	-0.6	0.0	0.0	48.5	61.8	0.0
O	20.5	8.4	1.0	78.4	61.3	-17.2	-0.2	0.0	0.0	61.3	17.2	0.0
N	14.7	5.1	0.9	37.5	115.9	78.5	2.1	78.5	78.5	37.5	0.0	0.0
D	12.4	3.9	0.8	25.4	120.7	95.3	3.8	21.5	100.0	25.4	0.0	73.7
J	11.1	3.4	0.9	22.3	125.5	103.2	4.6	0.0	100.0	22.3	0.0	103.2
F	11.3	3.4	0.9	22.2	87.0	64.7	2.9	0.0	100.0	22.2	0.0	64.7
M	13.4	4.5	1.0	37.6	75.0	37.3	1.0	0.0	100.0	37.6	0.0	37.3
A	15.6	5.6	1.1	53.5	64.2	10.7	0.2	0.0	100.0	53.5	0.0	10.7
M	19.1	7.6	1.2	85.5	38.7	-46.8	-0.5	-46.8	53.2	85.5	0.0	0.0
J	22.7	9.9	1.2	120.3	13.7	-106.7	-0.9	-53.2	0.0	66.9	53.5	0.0
J	25.6	11.8	1.2	152.7	1.5	-151.2	-1.0	0.0	0.0	1.5	151.2	0.0
A	26.4	12.4	1.2	152.1	10.2	-141.9	-0.9	0.0	0.0	10.2	141.9	0.0
Annuel	18.0	86.7		898.0	762.1	-135.9				472.4	425.6	289.7

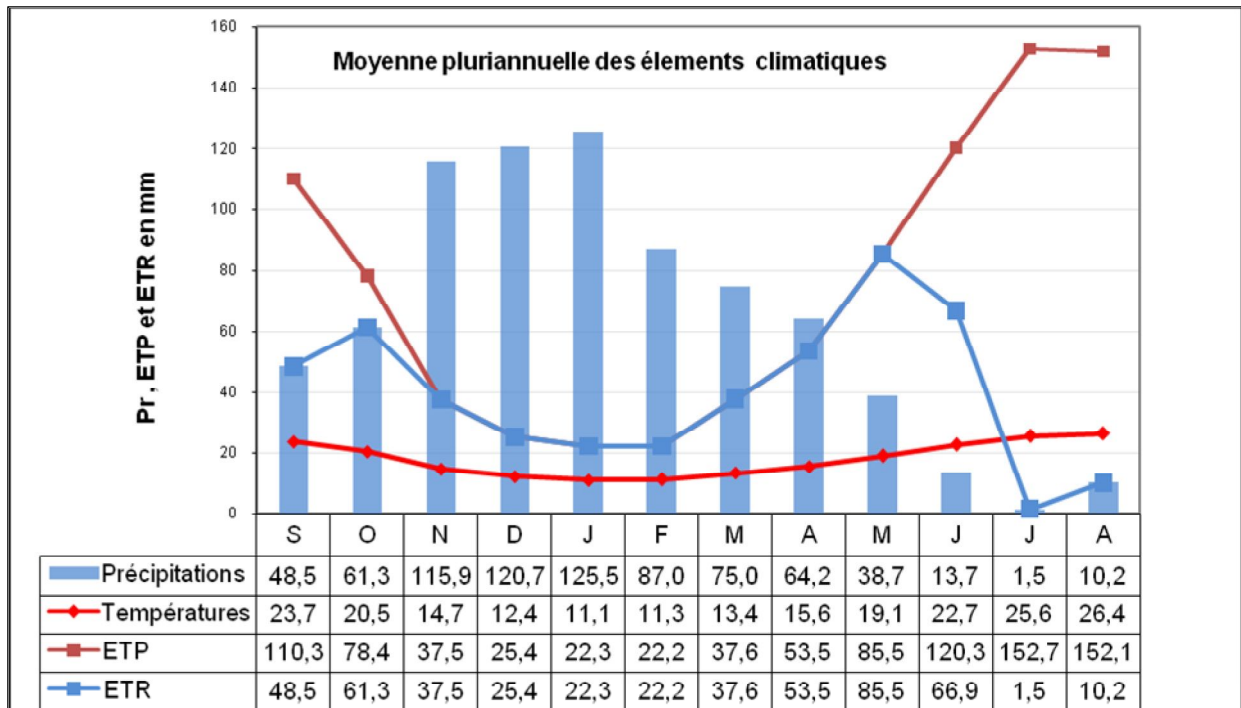


Figure.24. Moyenne pluriannuelle des éléments climatiques à la station de Boutheldja pour la période (1990-2016).

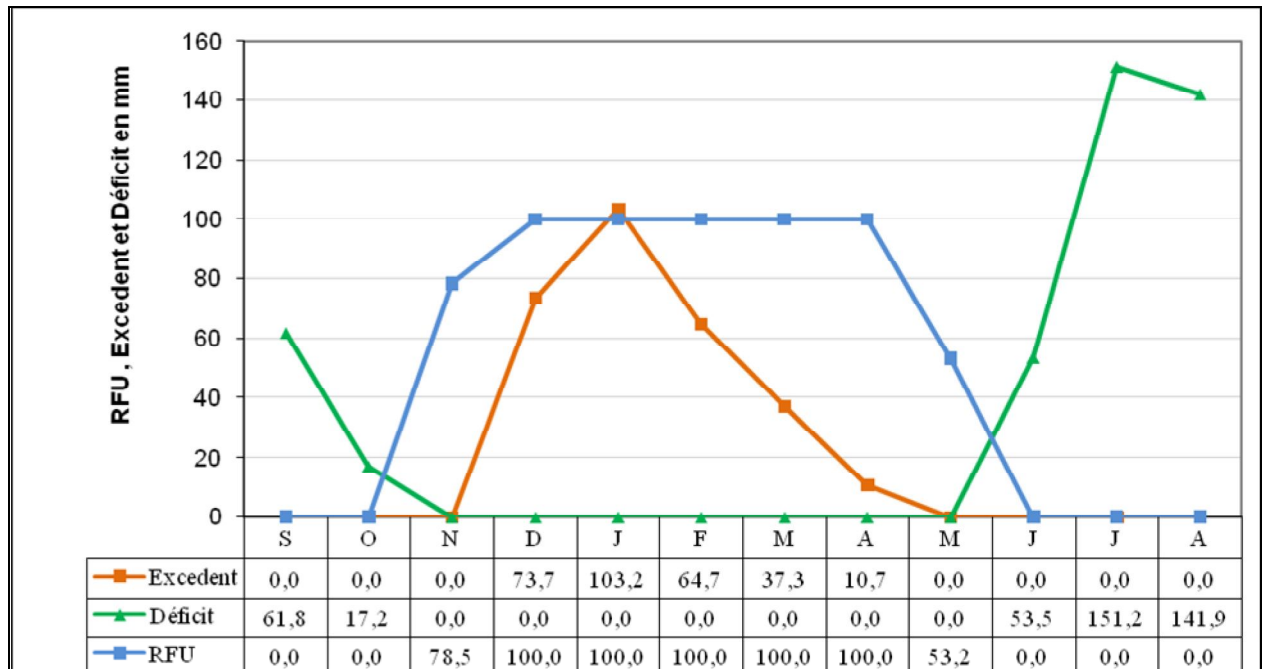


Figure .25. Diagramme de la variation de la RFU, du Déficit Agricole et de l'Excédent à la station Bouteldja pour la période (1990-2016).

**Tableau .21. Comparaison des résultats d'ETR des trois méthodes**

Station	Méthode	Turc	Coutagne	Thornthwaite
les Salines		595.99	532.87	465.88
Ben M'hidi		563.72	518.32	469.98
Boutheldja		586.84	587.87	479.75

Selon les résultats des trois méthodes de Turc, Coutagne et Thornthwaite (présentés dans le tableau N° 21), on distingue que les valeurs de l'ETR de ces trois méthodes sont assez proches.

**Tableau .22. Résultats des valeurs de l'ETR par les trois méthodes.**

Station	Méthode	Turc	Coutagne	Thornthwaite
Les Salines		579.64	532.87	470.4
Ben M'hidi		566.84	518.32	462.3
Boutheldja		638.30	587.87	472.4

L'utilité de la comparaison réside dans les écarts décelés lors de l'application des trois méthodes pour aboutir à une meilleure approche à l'estimation de l'E.T.R. Ce qui par la suite fera ressortir la formule qui est mieux appropriée dans le périmètre irrigué de Bounamoussa.

La formule de Thornthwaite convient aux régions humides de la zone tempérée, contrairement à celle de Turc qui présente un caractère universel.

L'ETR est surestimée pour tous les mois de l'année par ailleurs, la méthode de Thornthwaite s'avère plus adaptée, puisqu'il y a similitude des conditions dans lesquelles a été émise avec celles qui règnent dans notre région d'étude.

### III. 2. 3.2.1. Interprétation du bilan hydrique

Les résultats obtenus du bilan hydrique des trois stations (les Salines, Ben M'hidi et Boutheldja) respectivement illustrés dans les tableaux et les graphismes précédents, nous ont permis de tirer les observations suivantes :

La région d'étude reçoit des précipitations moyennes annuelles de l'ordre de 666.1 mm (les Salines), 642 mm (Ben M'hidi) et 762.1 mm (Boutheldja) et une température moyenne annuelle de 17.8°C, qui se rapporte à la station des Salines.

L'évapotranspiration potentielle (ETP) dans les trois stations atteint son maximum entre Juillet et Aout (152.7 mm) et son minimum aux mois de Janvier et Février (22.2 mm). L'ETP total est de l'ordre de 884 mm, 887.8 mm et 898 mm pour les Salines, Ben M'hidi et Boutheldja respectivement.

L'évapotranspiration réelle (ETR) totale est de 470.3 mm ; 462.4 mm et 472.4 mm respectivement pour les trois stations.

Lorsque la réserve facilement utilisable (RFU) est pleine, il y a un surplus d'eau accompagné par un ruissellement et quand elle a tendance à diminuer et au point qu'il sera carrément vide, il y aura un épuisement du stock et par conséquent un déficit agricole s'étalant du mois de Mai jusqu'au mois de Novembre pour l'ensemble des stations, avec une moyenne annuelle de 413.6 mm; 425.3 mm et 425.6 mm successivement apportée aux trois stations précédemment citées.

La reconstitution de la RFU s'effectue au mois d'Octobre et atteint son maximum (saturation : 100mm) au mois de Décembre et reste ainsi jusqu'au mois d'Avril puis elle commence à s'épuiser pour se vider complètement au mois de Juin.

L'écoulement débute après le remplissage de la RFU (100mm), c'est-à-dire au mois de Décembre et se termine à la fin du mois d'Avril avec un maximum au mois de Janvier 74.5 mm (les Salines), 70.5 mm (Ben M'hidi) et 103.2 mm (Boutheldja ) et un minimum au mois d'Avril de l'ordre de 2.8 mm à la station des Salines, 5.5 mm à la station de Ben M'hidi cependant il est de l'ordre de 10.7 mm à celle de Boutheldja.

L'excédent annuel est égal à 195.7 mm à la station des Salines, 179.7 mm à la station De Ben M'hidi et 289.7 mm à la station de Boutheldja.

### III. 3. Conclusion

La zone d'étude est soumise à un climat méditerranéen caractérisé par une pluviosité moyenne annuelle de 665.90 mm (les Salines), 641.95mm (Ben M'hidi) et 762.13 mm (Boutheldja) et par une température moyenne modérée de 18.0°C. Ces deux paramètres climatiques ont permis de distinguer deux saisons hydriques du climat méditerranéen, l'une sèche et l'autre humide.

Le bilan hydrique nous a permis d'évaluer les quantités d'eau entrées et sorties de la surface étudiée. L'évapotranspiration potentielle annuelle est de l'ordre de 884 mm, 887.8 mm et 898 mm pour les Salines, Ben M'hidi et Boutheldja respectivement. La reconstitution de la recharge commence au mois d'Octobre et s'achève au mois de Décembre. L'épuisement du stock du sol s'observe au moi de Mai et la nécessité d'irriguer s'impose surtout pour la période allant de Juin à Octobre où l'on constate un déficit agricole pouvant atteindre 413.6 mm (les Salines), 425.6 mm (Ben M'hidi et Boutheldja).

Les résultats obtenus de l'infiltration efficace sont de 66.90 mm (les Salines), 59.46mm (Ben M'hidi) et 97.78 mm (Boutheldja) et du ruissellement sont de 125mm (les Salines), 111mm (Ben M'hidi) et 179mm (Boutheldja).

*CHAPITRE IV*

---

**HYDROGEOLOGIE**

### **IV.1. Introduction**

La connaissance de l'hydrogéologie de la région est très intéressante car elle permet d'envisager les échanges souterrains (écoulement, transfert de polluant,...) qui peuvent se produire dans les aquifères, ainsi que les processus qui conditionnent l'alimentation des nappes et les relations existantes entre les différents systèmes (Nappes-Oueds-Lac).

Les formations du système aquifère sont constituées de sédiments Mio-pliocènes et quaternaires des deux fosses (Ben Ahmed, Ben M'hidi). Le remplissage de ces fosses s'est effectué de manière hétérogène, formant une alternance d'argiles sableuses, de sables, de graviers et de travertins, où l'on distingue 8 réservoirs d'importance inégale (Gaud, 1976 ,in Hani 2003) (Fig.26).

### **IV.2. Aquifère superficiel**

Selon la variation horizontale des faciès lithologiques, l'aquifère superficiel englobe 5 nappes : la nappe des gneiss altérés, la nappe du massif dunaire, la nappe du cordon dunaire, la nappe des cailloutis de terrasse et la nappe des alluvions récentes et actuelles (N.Khérici.1993).

#### **IV.2.1. La nappe des gneiss altérés**

Elle se localise dans la région Nord-Est du lac Fetzara, sur le flanc Est des massifs métamorphiques de Bouhamra et Beleleita. La nappe est alimentée par les eaux de pluie, son épaisseur moyenne est de 15 m. Elle est exploitée par des puits et des forages pour divers usages (industrie, élevage, alimentation humaine), avec un débit moyen des captages d'ordre de 2 l/s et elle est caractérisée par une perméabilité qui oscille entre  $10^{-6}$  et  $10^{-5}$  m/s (Derradji F., et al., 2005).

#### **IV.2.2. La nappe du cordon dunaire**

Elle est située entre Annaba et la Mafragh. C'est une nappe limitée sur une bande littorale de 0.5 à 2 km de largeur, constituée de sables fins à moyens et alimentée directement par les eaux de pluie. Elle joue le rôle d'une barrière qui protège la nappe phréatique de la plaine d'Annaba de l'invasion des eaux salées marines (GAUD, 1976). La porosité efficace est de



### **IV.2.3. 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 aux anciens fonds de marais. La nappe libre du massif repose sur un substratum argilo-gréseux imperméable à semi perméable (Fig.26). Elle est alimentée par les précipitations atmosphériques, le ruissellement à partir des pentes favorables des formations numidiennes et en fin les affluents de l'oued El Kébir Est (Khérici, 1993).

### **IV.2.4. La nappe des terrasses**

Elle est localisée sur la bordure Sud Sud-Ouest de la plaine de Annaba, entre Ain Breda à l'Ouest et Zérizer à l'Est et contenue dans les cailloutis et les galets. D'après GAUD (1976), la transmissivité de cette nappe est faible variant de  $10^{-5}$  à  $10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s. Etant donné que ses faibles potentialités hydrauliques, cette nappe est exploitée par des puits pour l'agriculture.

### **IV.2.5. La nappe des alluvions récentes et actuelles**

Cette nappe couvre la majorité de la plaine d'Annaba et la plaine d'El-Tarf, elle est contenue par des alluvions récentes et actuelles à texture argilo-sableuse, argilo-limoneuse ou sablo-argileuse avec quelques lentilles de sables de porosité efficace de l'ordre de 2% (B.Gaud 1976) et l'épaisseur moyenne de 10m, tandis que la transmissivité varie de  $10^{-6}$  à  $10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s selon la texture des alluvions comme indiqué dans le tableau 23.

## **IV.3. Aquifère profond**

Généralement, on note deux nappes d'importances inégales : nappe des cipolins et nappe des graviers.

### **IV.3.1. La nappe des cipolins**

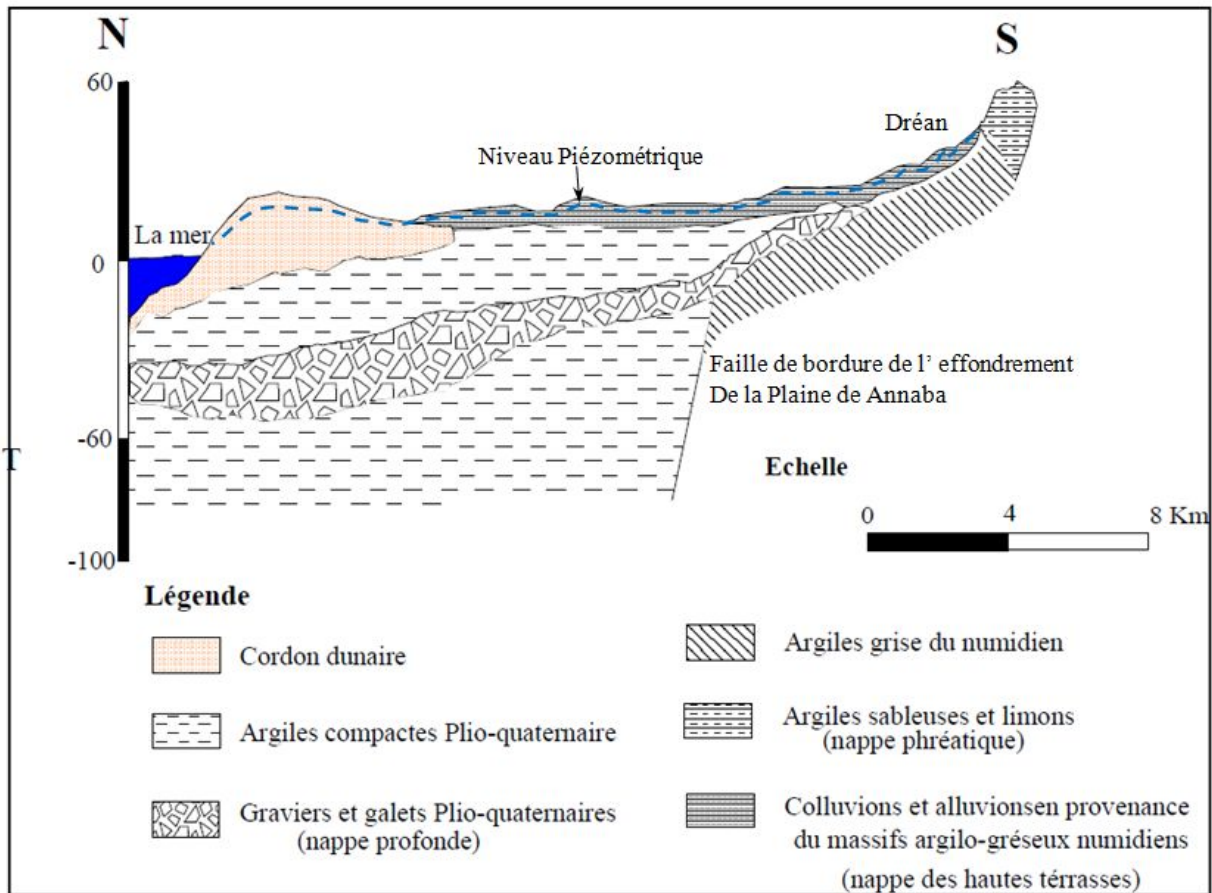
Elle est localisée au Nord-Ouest dans les massifs métamorphiques de Bouhamra et de Béllielita et contenue dans les cipolins fissurés. Sa profondeur varie de 12 à 80 mètres. Ses forages ont des débits d'exploitation d'ordre de 15 l/s avec une transmissivité comprise entre  $5.10^{-5}$  et  $10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s.

### **IV.3.2. La nappe des graviers**

Elle se trouve au dessous de l'aquifère superficiel s'étendant sur toute la superficie de la plaine ; captive dans sa presque totalité et devient libre en bordure Sud Sud-Ouest quand les graviers affleurent en surface. Elle est contenue au sein des graviers, des sables et des galets Plio-quadernaires. Son épaisseur ne dépasse pas les 70 mètres. La transmissivité est de  $3,5.10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s et le coefficient d'emmagasinement (S) est parfois très faible de l'ordre de  $10^{-4}$  où la nappe est captive et atteint  $10^{-2}$  dans les zones où elle est libre.

### **IV.4. La nappe captive d'El-Tarf**

Cette nappe a été mise en évidence par l'établissement des coupes hydrogéologiques dans les différentes directions en se basant sur les données fournies par les fiches de forages (fiches des forages effectuées entre 1988 et 1990 par la DHW El Tarf ); ce qui a permis la détermination d'une nappe captive, de plus en plus étendue d'Est à l'Ouest en direction de l'écoulement des eaux d'oued Kébir Est, avec un substratum marneux, et un toit argileux d'épaisseur importante de 15 à 20 m en moyenne, cette nappe s'incline progressivement vers l'Est avec une pente qui devient plus accentuée vers la nappe dunaire de Bouteldja vers le Nord-est (Hamzaoui,2011).



**Fig.27 .Coupe géologique montrant les différentes nappes de la plaine d'Annaba (D'après D.G.R.H.A 1967) modifiée**

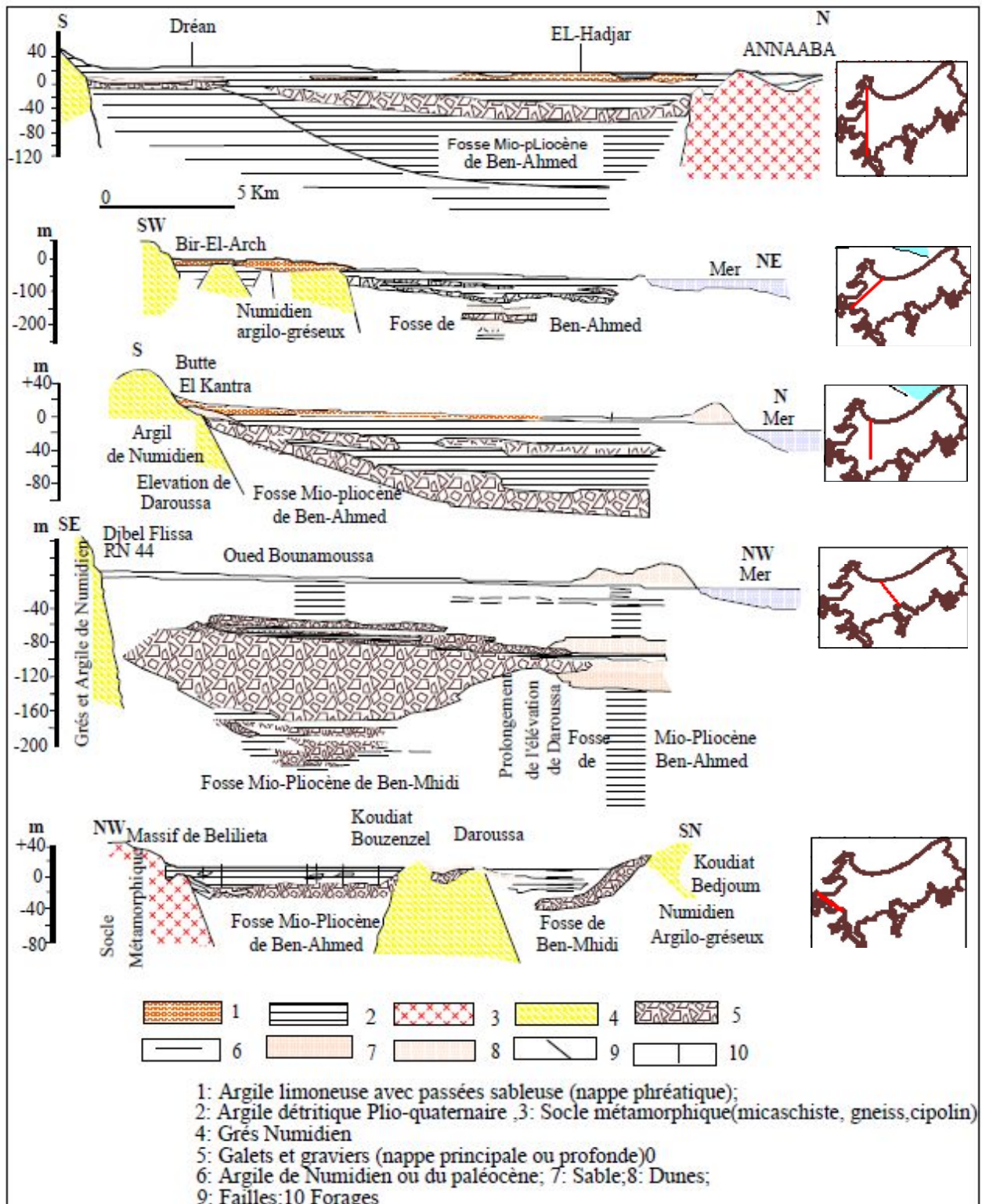


Fig. 28. Coupes Hydrogéologiques au travers la plaine d'Annaba El Tarf (ANRH, 1976, in Hani 2003,modifiées).

Le tableau ci-après récapitule les caractéristiques hydrogéologiques des différentes nappes

**Tableau.23. caractéristiques hydrogéologiques des aquifères de la plaine d'Annaba, El Tarf (AGIRE, 2007).**

	<b>Structure de la nappe</b>	<b>Alimentation</b>	<b>Exutoires</b>	<b>Paramètres hydrodynamiques</b>	<b>Ressources exploitables</b>
<b>La nappe phréatique</b>	Formations sabloargileuses renfermant des lentilles de sable. Des argiles grises compactes en constituant le substratum	Par l'infiltration des eaux de pluies, par infiltration dans les lits d'oueds par les apports de la nappe des hautes terrasses, ainsi que les apports des nappes dunaires et de l'eau d'infiltration.	Le drainage se fait dans plusieurs sens: écoulement au niveau de base du sud vers le nord, drainage par les oueds, alimentation de la nappe profonde par drainance et évaporation dans les zones basses et les marécages.	Transmissivité des formations à dominante sableuse ( $5 \times 10^{-5}$ et $10^{-4}$ m <sup>2</sup> /s). Transmissivité des formations argilosableuse ( $10^{-6}$ à $10^{-5}$ m <sup>2</sup> /s)	Le volume qui transite à travers la nappe phréatique est compris entre 61,2 Hm <sup>3</sup> /an et 78,8 Hm <sup>3</sup> /an.
<b>La nappe captive des graviers</b>	Niveaux discontinus de graviers et de sables avec parfois de faibles lentilles d'argile qui forment le remplissage des fosses de Ben M'hidi. La nappe s'étend sur toute la plaine sauf sous le massif dunaire.	L'alimentation de la nappe captive se fait: - à partir de la nappe des hautes terrasses à l'Ouest de la Seybouse, - par les massifs dunaires de Bouteldja, - par les grès Numidiens - par la nappe phréatique (drainance), - par le Lac Fetzara.	L'exutoire est constitué par les pertes vers les oueds (oued Seybouse entre Drean et Chihani, et l'oued Bou Namoussa dans la plaine d'Asfour), les fuites vers la mer et par drainance vers la nappe phréatique	Les transmissivités : $1,1 \times 10^{-4}$ à $3,1 \times 10^{-2}$ m <sup>2</sup> /s. Les zones les plus perméables sont situées le long de Oued Seybouse. Le coefficient d'emmagasinement : $4,8 \times 10^{-5}$ à $4,5 \times 10^{-2}$ .	la recharge de la nappe des graviers évalué à 35,9 Hm <sup>3</sup> /an,
<b>La nappe des sables du massif dunaire</b>	Sables côtiers reposant sur un substratum Numidien dans la partie est, et sur la nappe des graviers au sud. Les sables renferment des lentilles d'argile. Leur épaisseur variable mais ne dépasse pas 180 m.	L'alimentation se fait principalement par les précipitations, et par ruissellements sur les reliefs Numidien.	Les sorties sont assurées par les fuites vers la mer ( $5 \text{ Hm}^3$ /an), les fuites vers la nappe profonde et la nappe phréatique ( $9,1 \text{ m}^3$ /an). Le drainage par les oueds.	Transmissivités : $5 \times 10^{-4}$ à $6 \times 10^{-3}$ m <sup>2</sup> /s ; coefficients d'emmagasinement : 0,2 à 18%. Sables très perméables, par endroits, renfermant des lentilles d'argiles..	
<b>La nappe du cordon dunaire</b>	Sables s'étendant sous forme d'un cordon dunaire entre Annaba et Mafragh. Le substratum est constitué par des argiles. Cette nappe constitue une barrière contre l'invasion des eaux marines.	Elle s'effectue essentiellement par les pluies.	Les sorties sont constituées par les fuites vers la mer et vers la nappe phréatique		l'infiltration dans les sables du cordon dunaire évaluée à $3,1 \text{ Hm}^3$ /an
<b>La nappe des alluvions de haut niveau</b>	Située au sud-ouest de la plaine d'Annaba, elle s'étend le long du massif Numidien depuis l'oued Ressoul à l'Ouest jusqu'à l'oued Besbes à l'Est.	Par les eaux de pluies, les eaux de ruissellement sur les versants, par les crues d'oueds, et les grès Numidiens dans la région de Drean. (Entre Drean et Zerizer).	Par les oueds et alimentation des nappes phréatiques et profond pompée par des puits. Entre Drean et Zerizer, la nappe profonde n'existe que vers l'ouest. L'exutoire est constitué par la nappe phréatique.		B. Gaud donne pour la nappe des alluvions une recharge comprise entre 6,4 et $12,6 \text{ Hm}^3$ /an.

## IV.5. La piézométrie

### IV.5.1. Etablissement de la carte piézométrique

L'étude de la circulation des eaux souterraines est basée sur l'analyse de la surface Piézométrique. La carte piézométrique permet de déterminer la profondeur de la nappe, le sens et la vitesse d'écoulement, le gradient hydraulique, les conditions aux limites d'une nappe. Ainsi que les zones d'alimentation et d'accumulation des eaux souterraines.

À cause de la grande extension géographique de la zone, On se limite seulement de représenter notre site d'étude qui est le périmètre irrigué dans la plaine d'Annaba El Tarf (Fig.29), permettant de bien visualiser une piézométrie assez adéquate de l'ensemble du secteur étudié.

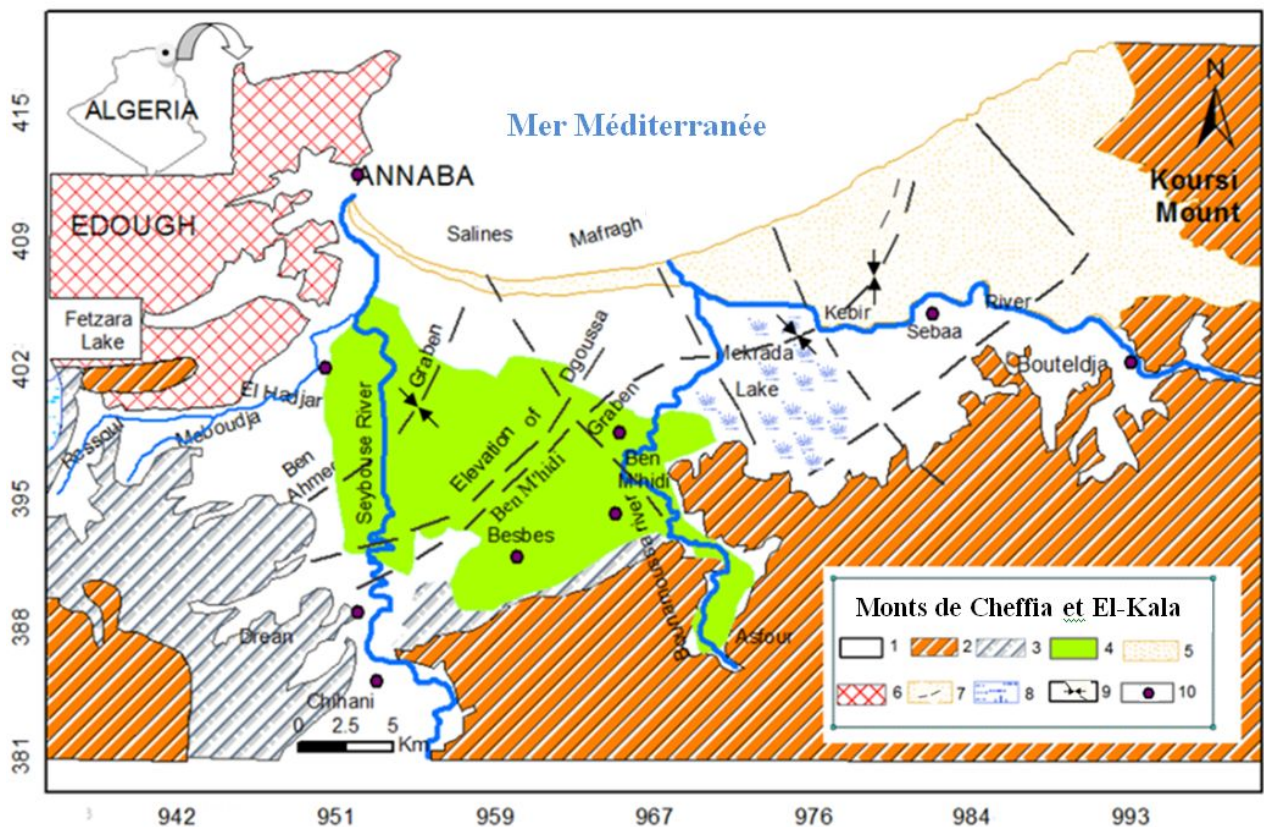


Figure .29. Représentation Géographique du périmètre irrigué dans des plaines de la région d'Annaba-El-Tarf.

**Légende :** 1 : Alluvions récentes et actuelles ; 2 : Grés et argile numidiens ; 3 : Alluvions anciennes ; 4 : périmètre irrigué ; 5 : Dunes ; 6 : Formations métamorphiques ; 7 : Axe des fosses ; 8 : Marécage ou lac 9 : Faille ; 10 : Agglomération.

IV.5.1.1. La piézométrie dans le périmètre irrigué de Bounamousa

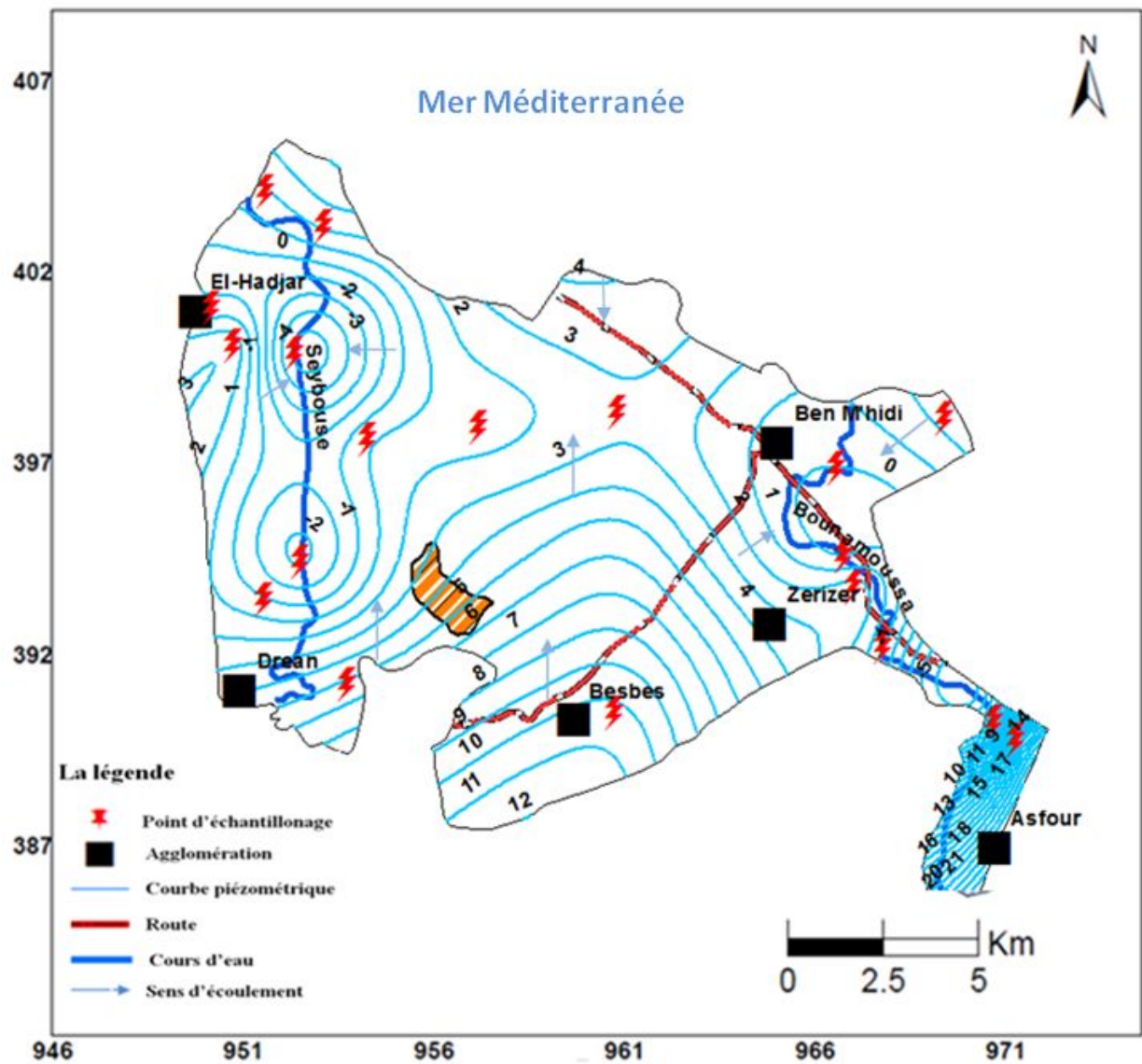


Figure .30 . Carte piézométrique de la nappe superficielle du périmètre irrigué, Avril 2017.

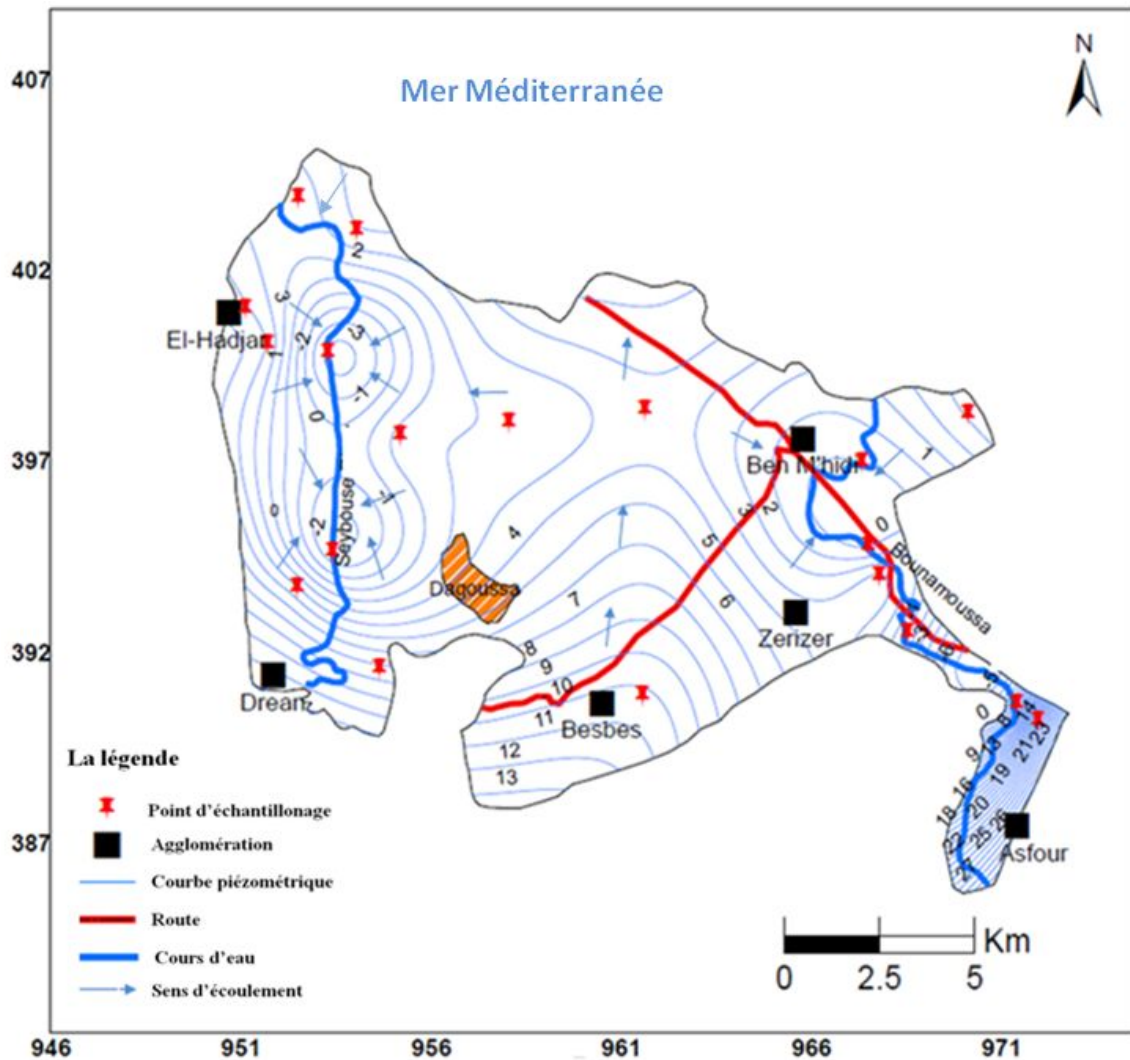


Figure .31. Carte piézométrique de la nappe superficielle du périmètre irrigué, Octobre 2017.

#### IV.5.2. Interprétation de la carte piézométrique

La piézométrie des hautes eaux (avril 2017) et basses eaux (octobre 2017) montre une grande similarité, L'allure générale des courbes isopièzes montre que la nappe suit le modèle topographique, Le sens d'écoulement se fait de l'amont vers l'aval (Sud Nord) constitue donc l'aire d'accumulation de l'ensemble des eaux souterraines, Cependant, au niveau de la partie avale (nord), nous constatons un changement de direction du flux, qui va de la mer vers le continent (Zenati,2010).

Au sud, nous remarquons un apport en eau issu de la région de Guelma par le biais de l'Oued Seybouse. Ce dernier charrie des eaux polluées, ceci se répercutera sur les eaux de la plaine d'Annaba (in Boumaraf and Goucem, 2017). Cette prédisposition située dans la partie nord de la carte indique un éventuel approvisionnement de l'aquifère par la mer. De plus, la présence de dépression met en évidence l'influence du pompage qui peut contribuer à la progression du biseau salé. Cela entraîne un déséquilibre de l'interface eau-sel. Cet état a détérioré la qualité de l'eau (augmentation de la salinité).

#### IV.5.2. 1. Gradient hydraulique

Il est calculé d'après la formule suivante

$$i = \frac{h_1 - h_2}{L}$$

Tel que :

$i$  : gradient hydraulique.

$h_1$  : la charge en amont (m).

$h_2$  : la charge en aval (m).

$L$  : distance entre  $h_1$  et  $h_2$  (m).

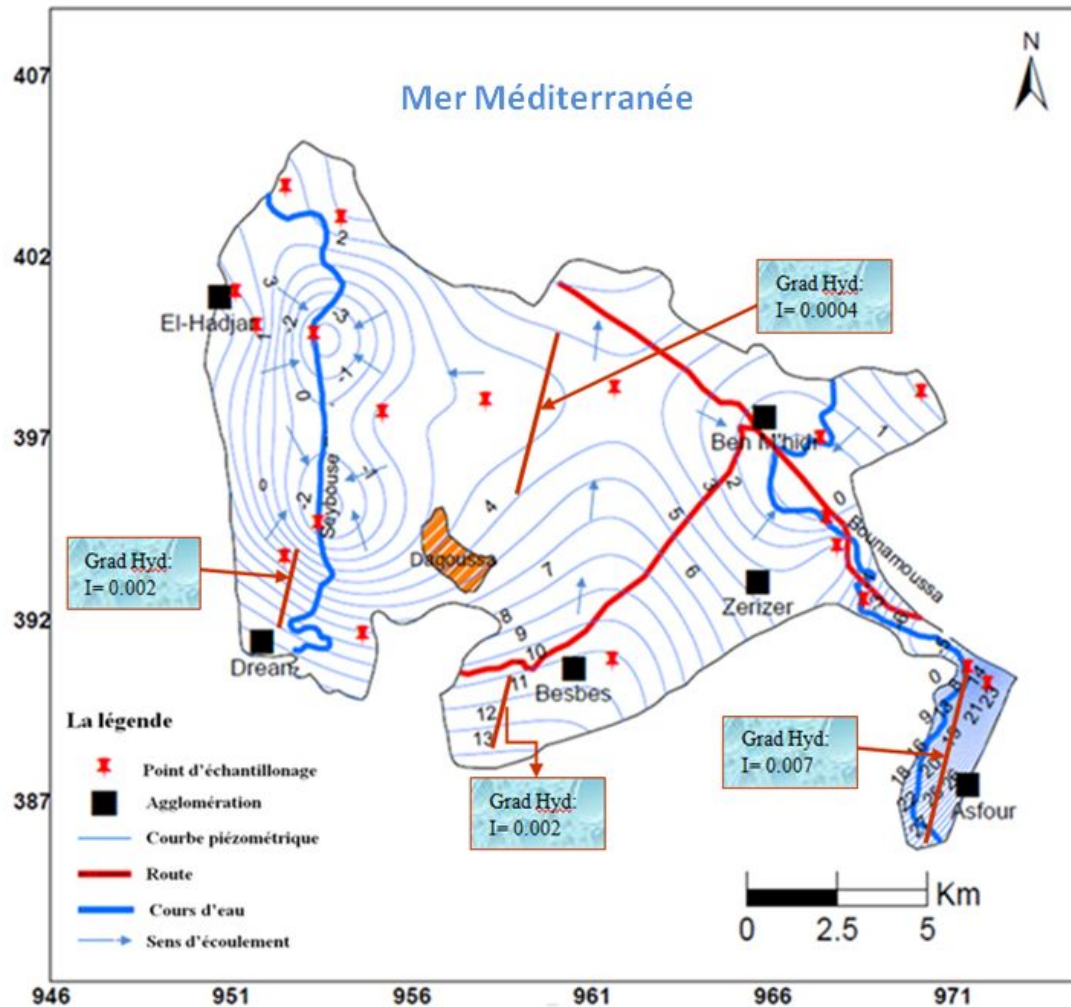


Figure .32. Mesures du gradient hydraulique (moi d'Octobre 2017).

La figure (Fig.32), représente le gradient hydraulique dans quatre (04) secteurs différents on remarque que :

- La region d'EL Asfour, les courbes isopièzes sont très serrées vers le Nord (les monts du cheffia et El kala) où la pente est forte traduisant des fortes valeurs du gradient hydraulique qui sont de l'ordre de  $7 \cdot 10^{-3}$ , au niveau de la vallée de la plaine (au centre), les courbes isopièzes se divergent, la perméabilité est grande tandis que l'écoulement des eaux devient faible, le gradient hydraulique est minimum (de l'ordre de  $4 \cdot 10^{-4}$ ).

- Le secteur Sud où se concentrent les agglomérations urbaines de Besbes et Dréan, les courbes isopièzes sont moyennement espacées, la zone est caractérisée par des valeurs moyennes du gradient hydraulique de l'ordre de  $2 \cdot 10^{-3}$  à cause des pentes moyennes à faibles.

La carte montre également un lien entre la mer, les rivières et l'aquifère. On remarque la présence de deux cônes de dépression le long de l'oued Seybouse les courbes se convergent indiquant une alimentation de l'oued par la nappe, une autre dépression à proximité de Ben M'hidi, Ces cônes sont dues à l'effet du pompage intensif qui abaisse le niveau piézométrique de la nappe affectant certainement la chimie de l'eau (Larbi Djabri et al., 2013).

#### **IV.6. Conclusion :**

Les plaines d'Annaba-El-Tarf sont constituées par des sédiments Mio-Plio-Quaternaires qui comportent plusieurs horizons aquifères. Ces formations sont très variées tant par la dimension des grains que par la géométrie des couches conférant aux matériaux des propriétés hydrauliques différentes dans l'espace. Dans ce remplissage hétérogène on distingue deux nappes aquifères principales d'importance quantitative et qualitative inégales vis-à-vis de l'étendue :

L'une superficielle (libre) ; formée de sable fin et gravier d'une épaisseur de l'ordre de 10 m, sa transmissivité est très faible ( $10^{-6}$  à  $10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s), sa perméabilité moyenne est comprise entre  $10^{-6}$  et  $10^{-5}$  m/s et le coefficient d'emmagasinement est de l'ordre de 2 %.

L'autre profonde ; semi-captive qui devient captive à l'Ouest de la zone d'étude localisée à une profondeur de 12 à 80 mètres ; la transmissivité est comprise entre  $5 \cdot 10^{-5}$  et  $10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s.

L'infiltration représente la principale source d'alimentation de ces aquifères.

Ces deux nappes aquifères sont largement exploitées par de nombreux ouvrages de captage destinés à l'alimentation des populations et pour répondre aux besoins de l'industrie et de l'agriculture.

L'allure générale des courbes isopièzes montre que la nappe suit le modèle topographique, le sens d'écoulement se fait de l'amont vers l'aval (Sud Nord) constituant donc

l'aire d'accumulation de l'ensemble des eaux souterraines, Cependant, au niveau de la partie avale (nord), nous constatons un changement de direction du flux, qui va de la mer vers le continent.

On note aussi, que la région est caractérisée par des gradients hydrauliques faibles dans la partie centrale ce qui représente une forte perméabilité indiquant, ainsi une probable exposition de la nappe à toute forme de pollution.

En général, les différentes nappes identifiées dans la plaine d'Annaba-El-Tarf constituent un même système aquifère avec des transferts hydrauliques par drainance mettant en communication la nappe superficielle et la nappe profonde.

*CHAPITRE V*

---

**HYDROGEOCHIMIE**

### **V. 1. Introduction**

La chimie des eaux est un élément important pour la région d'étude, eu égard au contexte particulièrement difficile où interfèrent l'agriculture, grosse consommatrice d'eau et un climat caractérisé par une évaporation intense (l'évaporation des eaux du lac Fetzara), les effluents industriels, la dissolution des formations géologiques, présentent des conditions favorables pour l'infiltration des eaux et leur circulation au sein de l'aquifère essentiellement pour le niveau Plioquaternaire le plus superficiel.

Ces paramètres, conditionnent fortement la minéralisation et la vulnérabilité de la nappe.

En raison de l'utilisation multiple de ces eaux, cette étude a été menée afin de caractériser et d'évaluer l'état actuel de la chimie des eaux, son évolution dans l'espace en fonction de l'influences des facteurs naturels et des actions anthropiques.

### **V. 2. Echantillonnage des eaux du périmètre irrigué de Bounamoussa**

Ce travail apporte caractérisation hydrogéochimique globale des eaux superficielles et souterraines dans le périmètre irrigué de Bounamoussa pendant le mois d'octobre 2017, des campagnes de prélèvement ont été effectuées au niveau de 19 échantillons d'eau (04 échantillons le long de l'oued Bounamoussa, 02 échantillons le long de l'oued Seybouse, et 13 échantillons à travers des puits et des forages.

Les échantillons sont prélevés selon une répartition qui couvre toute la zone d'étude (Fig.33).

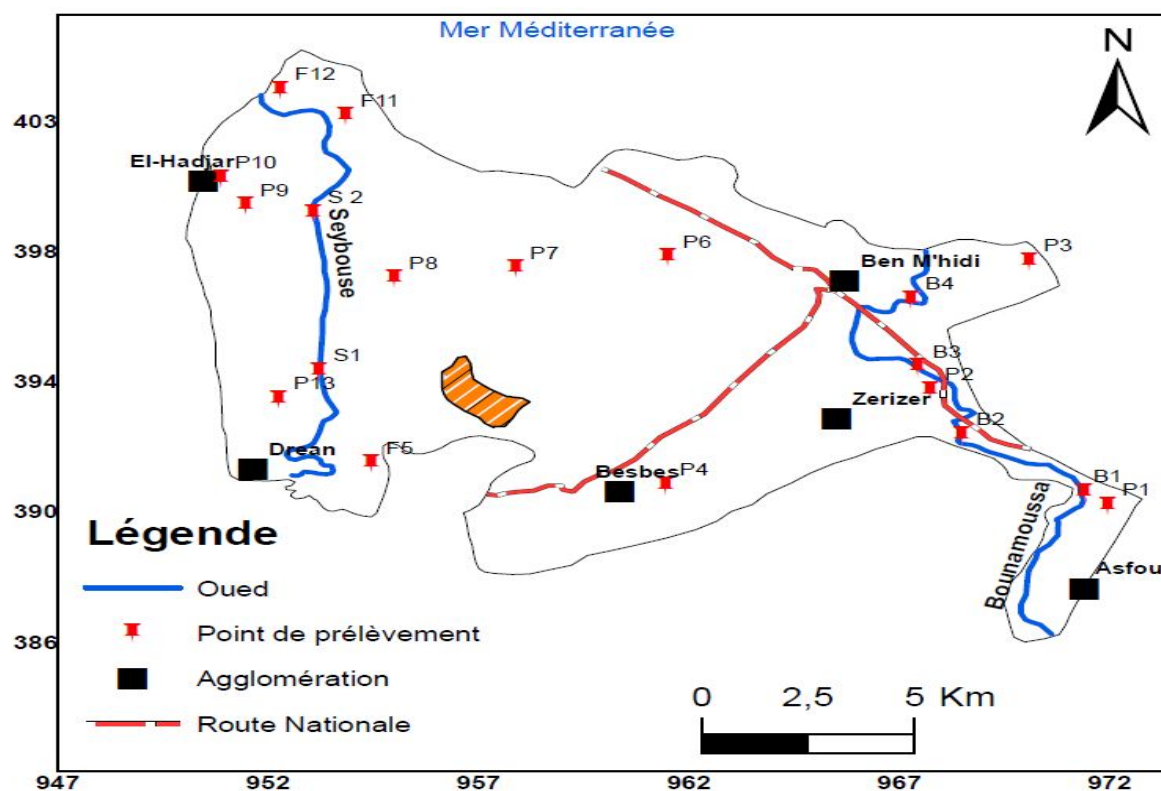


Figure.33. Carte d'inventaire des points d'échantillonnage (Octobre 2017).

### V. 3. Matériels et méthodes d'analyse

Les paramètres physico-chimiques ont fait l'objet de mesures sur le terrain, il s'agit de la température, le pH, la conductivité électrique et le potentiel d'oxydoréduction, qui sont mesurés in situ directement après le prélèvement des échantillons à l'aide d'un appareil multi paramètres de marque WTW. Pour la piézométrie, on a utilisé une sonde électrique pour la mesure de la côte piézométrique.

Les éléments majeurs sont dosés, au niveau de la raffinerie (SONATRACH SKIKDA), Par la méthode volumétrique et spectrophotométrique pour les cations. L'absorption atomique à flamme et la titrimétrie sont utilisées pour les anions. La concentration en nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ), en nitrite ( $\text{NO}_2^-$ ), en ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) et en phosphate ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) a été mesurée à l'aide de la méthode de filtrage spectrophotométrique UV.

#### V. 3.1. Précision des analyses

Le calcul de la balance ionique (Bi) permet généralement d'estimer la fiabilité des résultats des Analyses chimiques, pour ceci, partant des teneurs exprimées en mg/l, on les convertit en méq/l sous la nomenclature des quantités en réaction.

La formule de la balance ionique est donnée comme suit:

$$BI = (\Sigma C - \Sigma A) / (\Sigma C + \Sigma A) \text{ en } \%$$

D'après G. Castany (1968), l'analyse est déclarée, a priori, acceptable si -  $BI = |6|$  .

Avec :

$\Sigma A$  = la somme des anions en milliéquivalents par litre

$\Sigma C$  = la somme des cations en milliéquivalents par litre.

Les valeurs de la balance ionique caractérisant les échantillons prélevés dans le cadre de la présente étude sont toutes inférieures ou égales à 6% reflétant la bonne qualité des analyses effectuées.

**Tableau.24. Statistiques descriptives des analyses des eaux du périmètre irrigué de Bounamoussa (Octobre 2017).**

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Std déviation	Lignes directrices fixées par l'OMS (mg/l)
T C°	18.3	23.4	21.12	1.57	<25
PH	6.51	8.4	7.46	0.53	6.5-8.5
CE $\mu\text{s/cm}$	448	970	2849.21	2707.84	400
O <sub>2</sub>	0.700	8.10	2.69	2.19	10
Ca <sup>2+</sup>	53.410	521	193.23	127.61	100
Mg <sup>2+</sup>	17.000	403	84.22	90.85	50
Na <sup>+</sup>	41.000	322	160.94	75.32	150
K <sup>+</sup>	2.000	21	10.63	5.49	12
Cl <sup>-</sup>	28.200	513	226.57	138.63	200
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	31.000	613	202.29	129.45	250
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	151.240	541	358.74	130.86	250
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0.200	3.30	0.84	0.73	5
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.200	87	10.89	23.16	50
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.000	5.11	0.47	1.14	4
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0.000	0.73	0.28	0.24	0.1

**Tableau.25. Balances ioniques des analyses des eaux du périmètre irrigué de Bounamoussa (Octobre 2017).**

<b>Point</b>	<b>P6</b>	<b>P7</b>	<b>P8</b>	<b>F11</b>	<b>P9</b>	<b>P10</b>	<b>B4</b>	<b>B3</b>	<b>B2</b>	<b>B1</b>
<b>BI</b>	6%	5%	5%	4%	6%	5%	5%	6%	5%	6%
<b>Point</b>	<b>P4</b>	<b>P2</b>	<b>F5</b>	<b>F12</b>	<b>P1</b>	<b>P3</b>	<b>P13</b>	<b>S1</b>	<b>S2</b>	
<b>BI</b>	5%	3%	4%	5%	-5%	1%	-5%	-6 %	5%	

Pour identifier la contamination des eaux, on compare les valeurs obtenues par rapport aux normes de potabilité fixées par l’OMS, la comparaison des valeurs obtenues avec les normes décrites dans le tableau n°24.

## V. 4. Interprétation des résultats

### V. 4.1. Les caractéristiques physiques

#### V. 4.1.1. La température

La température des eaux de surface varie entre 18,3 et 23,4°C alors que celle des eaux souterraines varient entre 19.1°C au point P2 et 22.8 °C au point F5 avec une moyenne de l’ordre de 20.89°C. Elle est relativement homogène sur l’ensemble des eaux. Aucune évolution particulière n’est décelable d’amont en aval. La température de l’eau des eaux de la nappe est presque identique à celle de l’air. Cela confirme l’influence du climat sur les ressources en eaux souterraines de faible profondeur de la région.

#### V. 4.1.2. Conductivité électrique (CE)

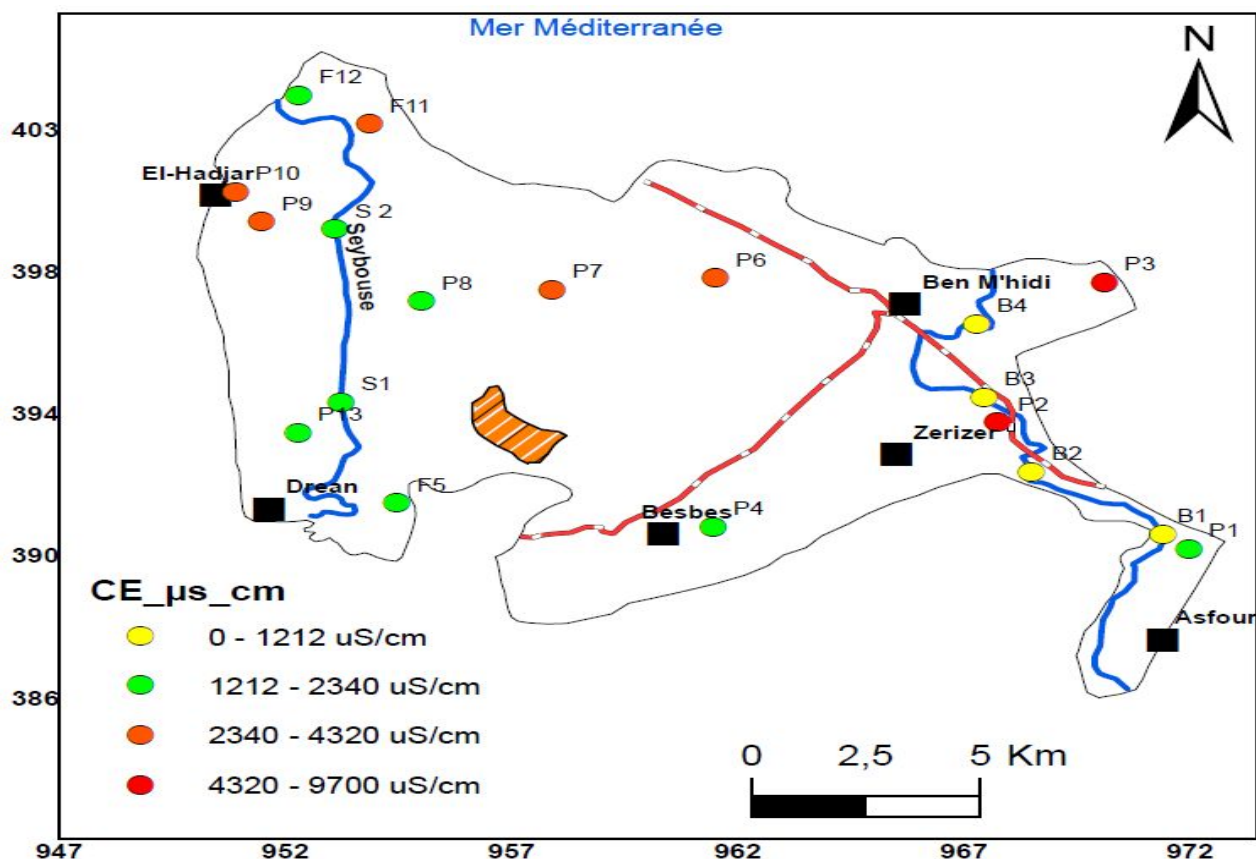


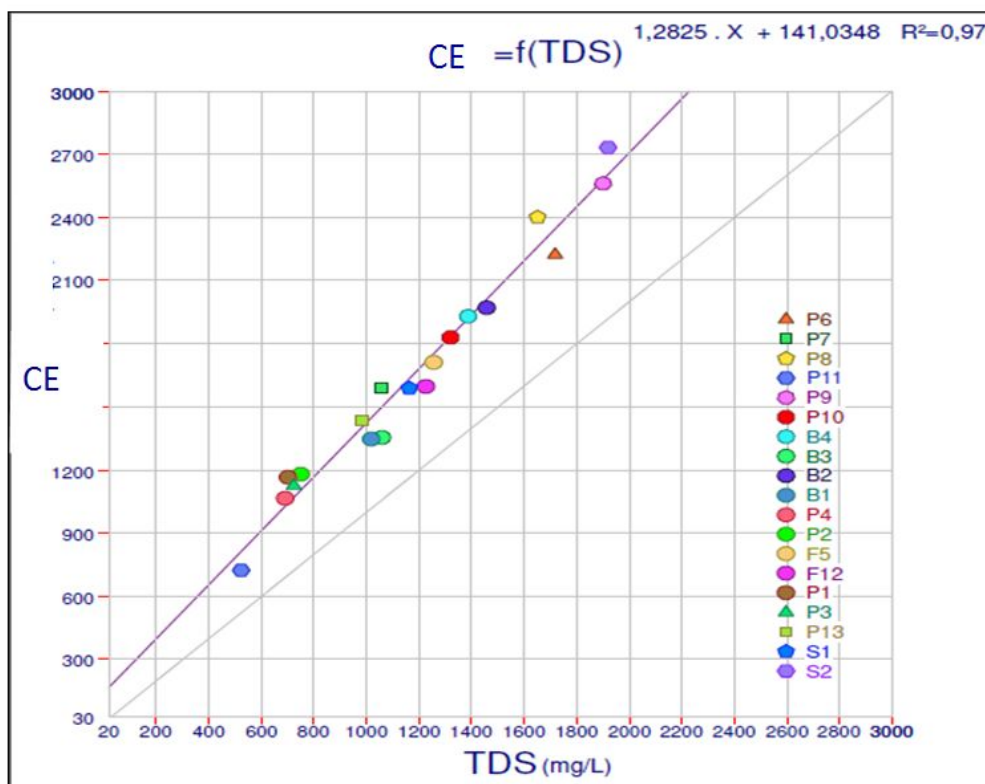
Figure.34. Carte des conductivités ( $\mu\text{S/cm}$ ), Campagne d’Octobre 2017.

La conductivité électrique (Fig.34) permet d'avoir une idée sur la salinité de l'eau. Une conductivité élevée traduit soit des pH anormaux, soit une salinité élevée. Pour l'eau d'alimentation la valeur guide est de 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

- 50 à 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$  : qualité excellente.
- 400 à 750  $\mu\text{S}/\text{cm}$  : bonne qualité.
- 750 à 1500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  : qualité médiocre mais eau utilisable.
- 1500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  : minéralisation excessive.

Les plus faibles valeurs de la conductivité sont observées dans les eaux de surface le long de Bounamoussa avec une moyenne de 556  $\mu\text{S}/\text{cm}$  cela est dû aux apports pluvieux qui diluent les concentrations. Pour les eaux de la nappe, les concentrations augmentent de l'amont au niveau Drean, Besbes (1200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) vers le centre de la plaine et l'aval où elles se chargent au cours de leur transit au sein de la roche réservoir et deviennent très élevées (9700  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) au niveau du point P3. Cette augmentation est interprétée par l'existence de lentilles gypsifères et aussi la charge accumulative dans la partie aval.

D'une façon générale, toutes les conductivités mesurées sont élevées et dépassent la norme (<400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).



**Figure.35. Variation de la conductivité électrique en fonction de la minéralisation totale**

La relation conductivité vs minéralisation (Fig.35) montre une bonne linéarité, suggérant une relative homogénéité de la composition chimique de ces eaux.

#### V. 4.1.3. pH

Il est en fonction de  $\text{HCO}_3$  ou  $\text{H}^+$  ; autant dit, est un paramètre qui détermine l'acidité Ou l'alcalinité d'une eau d'une eau sur une échelle de 0 à 14.

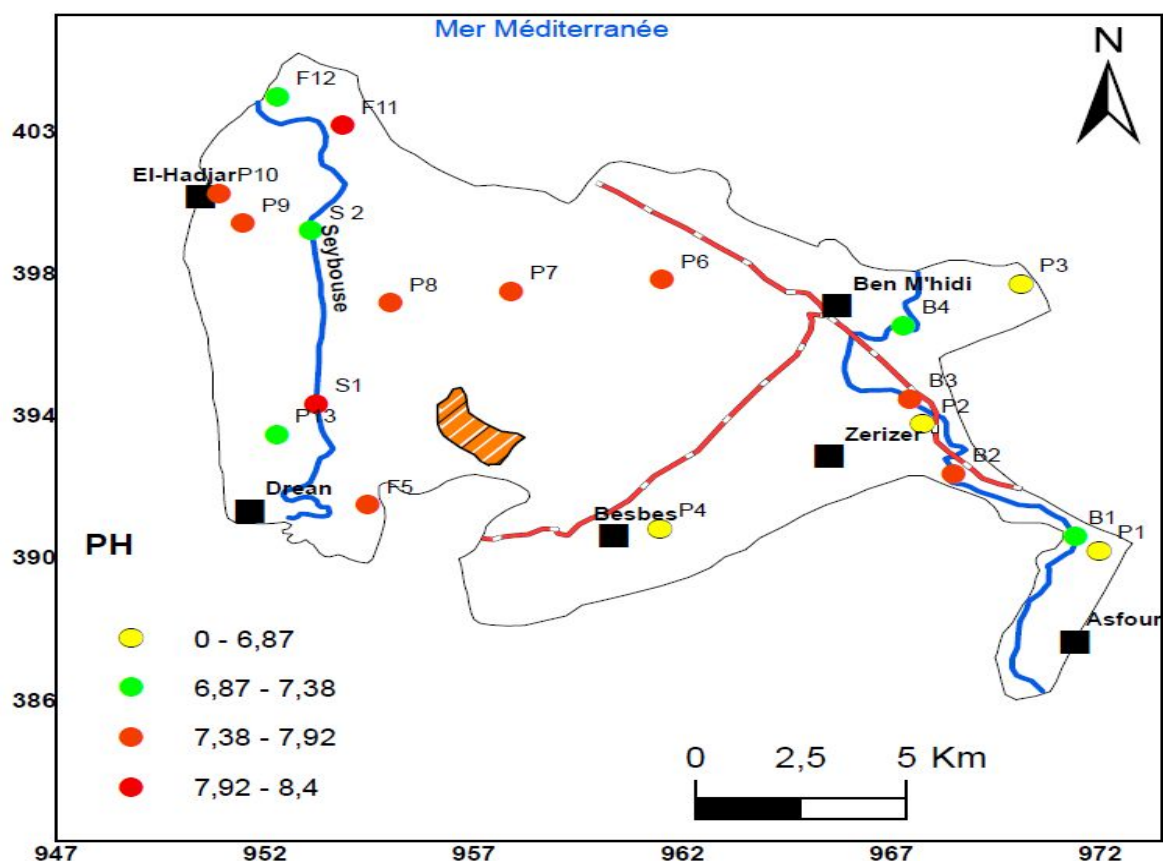


Figure.36. Carte du pH, Campagne d'Octobre 2017.

Les valeurs du pH des eaux souterraines étudiées varient entre 6,5 et 8,4 ; elles se trouvent dans la fourchette des normes fixées par l'OMS. Le pH relativement basique est mesuré au point F11 avant l'intersection de l'effluent Meboudja avec la Seybouse (influence de rejets industriels) alors que le pH le plus acide est mesuré au point P3 (contact de l'eau avec l'air), (Fig.36).

V. 4.1.4. Oxygène dissous (O2)

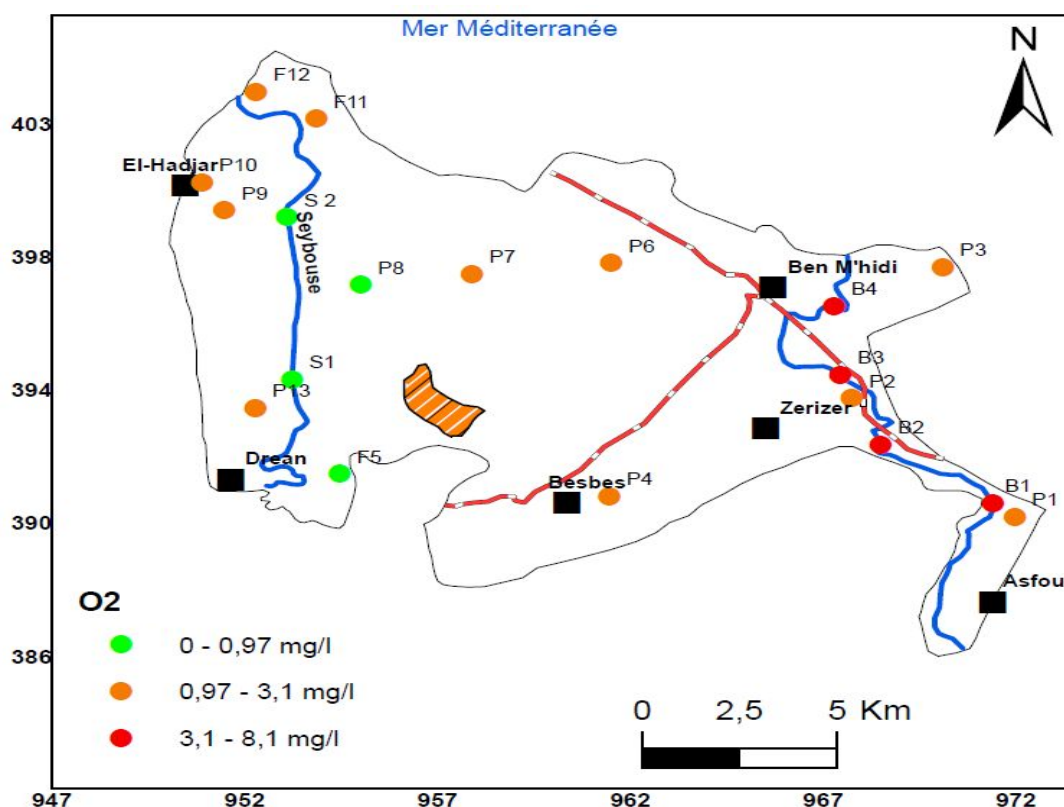


Figure.37. Carte de l’Oxygène dissous, Campagne d’Octobre 2017.

La quantité d’oxygène en solution dans une eau régit les réactions d’oxydoréduction et présente une évolution identique à celle du Eh. Les différentes concentrations observées sont présentées dans le tableau 26.

Tableau.26. Variations de l’oxygène dissous des eaux du périmètre irrigué de Bounamoussa (Octobre 2017).

	Oxygène dissous		
	Min	Max	Moy
Eaux de Surface	0.7	8.1	5.13
Eaux de la Nappe	0.9	3.1	1.8

Les teneurs les plus élevées sont observées au niveau des eaux de surface de l’oued Bounamoussa avec une moyenne de 8.10 mg/l, indiquant un état naturel des eaux. Les valeurs les plus basses sont présentées au niveau de l’embouchure de la Seybouse avec une

moyenne de 0.9 mg/l, cela est dû à l'effet de la charge accumulative des rejets industriels qui font diminuer les teneurs en O<sub>2</sub>. Par contre, dans les eaux souterraines, les teneurs sont variables par endroit. Les faibles valeurs au centre et au nord du périmètre (1.5 mg/l) indiquent que ces points se situent dans une partie réduite du réservoir (formation imperméable). Les valeurs deviennent approximativement importantes (de l'ordre de 3 mg/l) dans les eaux de la nappe d'El-Hadjar et Drean, cela signifie que ces endroits renferment des formations perméables donc une partie oxygénée du réservoir.

## V. 4.2. Classification des eaux du périmètre irrigué de Bounamoussa

### V. 4.2.1. Eléments chimiques majeurs dans les eaux du périmètre

#### V. 4.2.1.1. Calcium (Ca<sup>2+</sup>)

La présence des ions Ca<sup>2+</sup> dans l'eau est liée principalement à deux origines naturelles : Soit la dissolution des formations carbonatées, soit la dissolution des formations gypseuses (Fig.38).

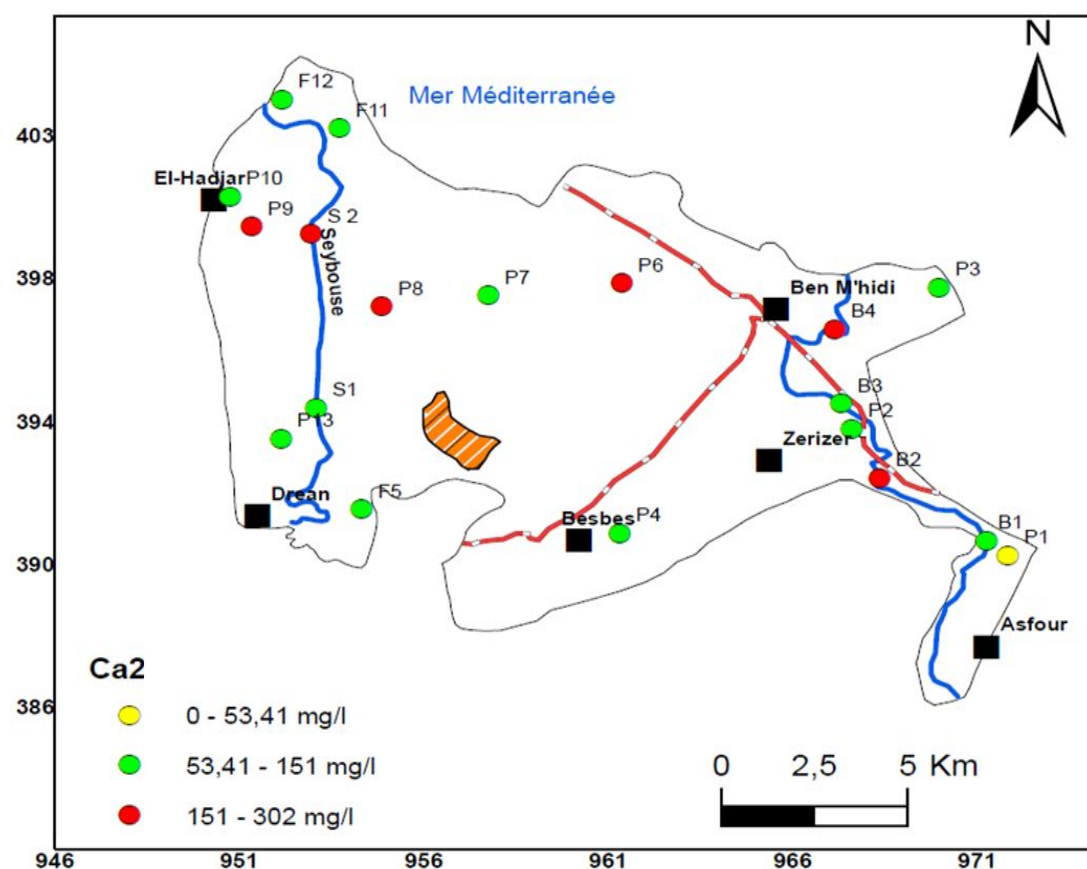
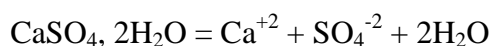


Figure.38. Carte de répartition des teneurs en Ca<sup>2+</sup> (mg/l), Campagne d'Octobre 2017.

La carte (Fig.38.) montre que la plupart des points d'eau du périmètre présentent des concentrations supérieures à la norme de potabilité des eaux. Les moyennes dépassent les normes et les valeurs naturelles estimées, Les valeurs les plus élevées sont observées au niveau de la nappe superficielle au centre de la plaine ( $P_6=302$  mg/l), à cause des lentilles gypseuses existant dans le réservoir aquifère et de la dissolution des cipolins (socle métamorphique), ce qui donne une grande variation des concentrations Par contre, au niveau des eaux de surface, les teneurs en  $Ca^{2+}$  sont moyennes à faibles à cause de la forte dilution des ions par les apports des oueds à l'exception du point  $S_2$  en aval de l'oued Seybouse (209 mg/l). Les concentrations dans la partie sud sont minimum, de l'ordre de (50 mg/l) dans la nappe superficielle d'el Asfour, ce qui indique que ces eaux sont moins influencées par la dissolution des formations carbonatées et gypseuses.

#### V. 4.2.1.2. Magnésium ( $Mg^{2+}$ )

L'origine du Magnésium est pareil au calcium (Fig.39), il provient de la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en magnésium tel que la magnésite, la dolomite, aussi les évaporites ( $MgSO_4$ ,  $Cl_2Mg$ ).

Magnésite :  $MgCO_3 = Mg^{2+} + CO_3^{2-}$

Dolomite:  $CaMg(CO_3)_2 = Ca^{2+} + Mg^{2+} + 2CO_3^{2-}$

Quand la dolomie est attaquée, il n'y a pas de solubilité sélective, il y a autant de  $Ca^{2+}$  que de  $Mg^{2+}$  ( $[Ca^{2+}] = [Mg^{2+}]$ ). Si toutes fois la quantité du calcium dépasse celle du magnésium, l'eau a obtenu sa minéralisation de calcaire ou du gypse. Par contre une teneur élevée en magnésium peut faire penser à une contamination de l'eau de mer, ou bien à des minéraux ferromagnésien ; la concentration en magnésium des eaux de mer  $[Mg^{2+}] \approx 1270$  mg/l ; Pour les eaux Karstiques  $\leq 3$ mg/l ; et pour les eaux en contact avec les évaporites  $\approx 66$  mg/l. (<https://en.wikipedia.org/wiki/Magnesium>).

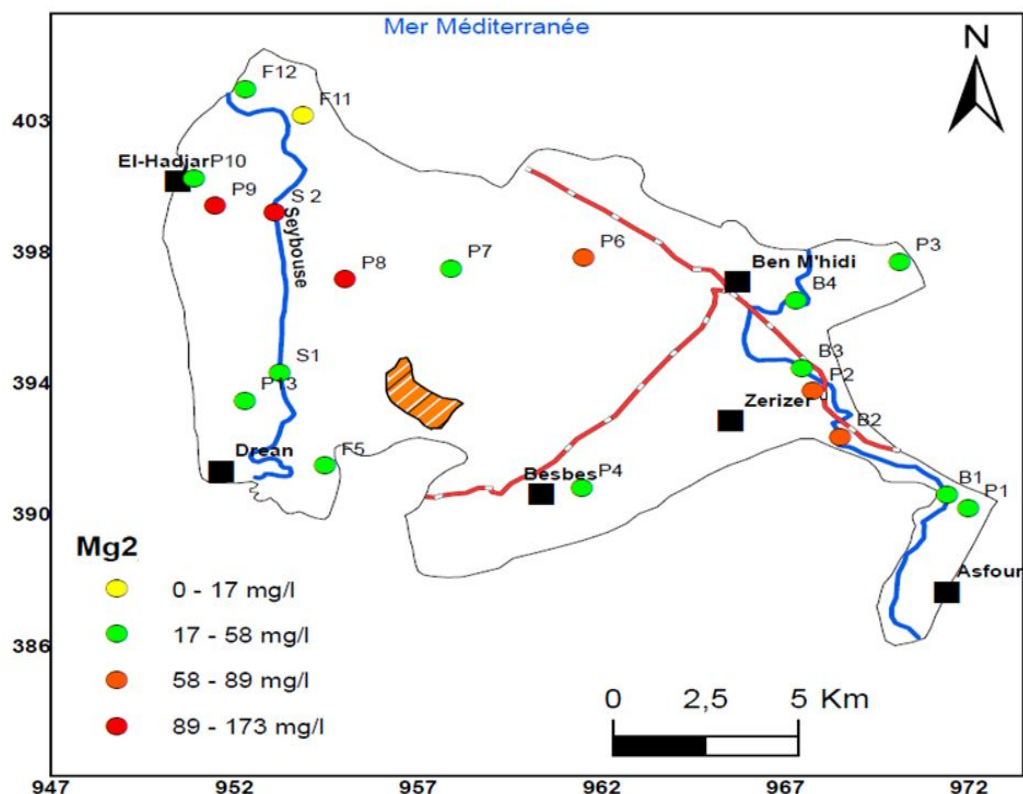
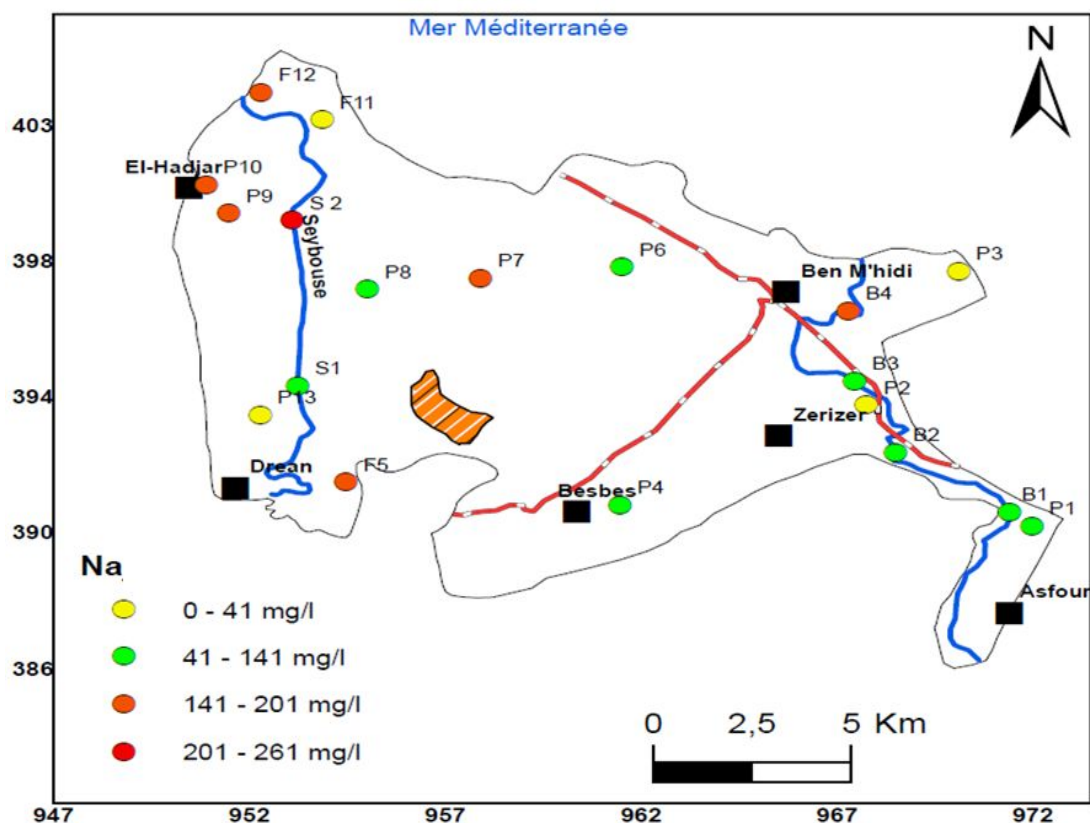


Figure.39. Carte de répartition des teneurs en  $Mg^{2+}$  (mg/l), Campagne d'Octobre 2017.

La répartition des teneurs du magnésium est identique à celle du calcium, les teneurs les plus élevées sont observées au niveau de la nappe superficielle au centre du périmètre (El-Hadjar 173 mg/l) et les plus faibles au niveau des eaux de surface. La comparaison des concentrations avec les normes de potabilité montre qu'une grande partie des points d'eau possède des teneurs inférieures à la limite de potabilité spécialement dans la partie sud, Les valeurs naturelles sont proches de la moyenne pour les eaux de surface et différentes pour les eaux souterraines surtout pour la nappe superficielle où les apports de  $Mg^{2+}$  à partir des formations évaporitiques sont importants.

#### V. 4.2.1.3. Sodium ( $Na^+$ )

La plus importante source du sodium se trouve dans les évaporites, NaCl Halite,  $Na_2SO_4(10H_2O)$  Mirabilite et à l'effet de la salinité marine; La concentration du Sodium ( $Na^+$ ) dans l'eau de mer  $\approx 10560$  mg/l.



**Figure.40. Carte de répartition des teneurs en  $\text{Na}^+$  (mg/l), Campagne d'Octobre 2017.**

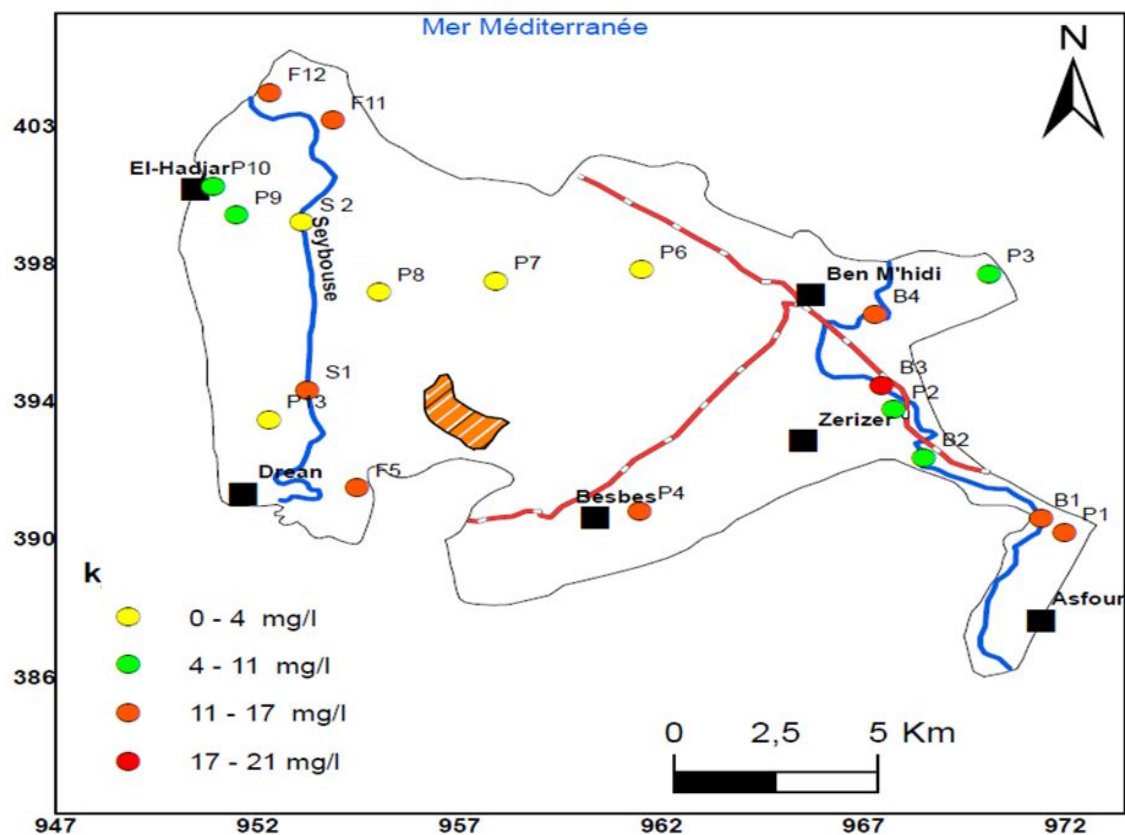
La carte de distribution spatiale des teneurs en  $\text{Na}^+$  (Fig.40.) montre que les eaux de surface (oued Bounamoussa) présentent des valeurs qui ne dépassent pas la limite directrice de l'OMS pour les eaux potables à l'exception du point  $S_2$  en aval de la Seybouse où la concentration est maximale (261mg/l), cela est liée à la dissolution des formations évaporitiques existant à l'amont de l'oued qui s'accroissent au fur et à mesure vers l'aval où la charge accumulative devient importante .

Les fortes teneurs sont réparties dans la basse plaine de la Seybouse (les eaux souterraines) près de la mer où la moyenne est de l'ordre de 221mg/l. Cela est dû probablement à l'effet de la salinité marine.

#### **V. 4.2.1.4. Potassium ( $\text{K}^+$ )**

Sa présence est liée à l'altération des formations silicatées (gneiss, schiste), des argiles potassiques et de la dissolution des engrais chimiques (NPK). dans les roches sédimentaires le potassium se trouve dans les minéraux argileux, dans les grès, les sables, schiste et dans les évaporites, généralement sous forme de KCl (sylvite).

La teneur en Potassium [ $K^+$ ] ne dépasse pas 10 à 15 mg/l dans les eaux souterraines et elle est de l'ordre de 380 mg/l dans les eaux de mer.



**Figure.41. Carte de répartition des teneurs en  $K^+$  (mg/l), Campagne d'Octobre 2017.**

Les valeurs les plus élevées sont observées au niveau de l'oued Bounamoussa avec un maximum de 21 mg/l. La présence de cet élément dans les eaux de surface est liée aux rejets urbains et industriels dans l'oued.

Dans les eaux souterraines, les teneurs sont moins élevées. Elles sont de l'ordre de 5 mg/l dans la nappe superficielle au centre du périmètre et elles deviennent plus ou moins importantes de l'ordre de 14 mg/l dans les eaux des forages (F<sub>11</sub> et F<sub>12</sub>) dans la nappe profonde.

Ces fortes concentrations qui dépassent la norme admissible sont dues soit à l'utilisation des engrais chimiques, soit aux formations argileuses riches en potassium.

#### V. 4.2.1.5. Chlorures (Cl)

Son origine est identique à celle du sodium, Le chlore est le plus abondant dans la nature. La quantité de Cl dans l'eau de mer est 18,98 g/l ; L'eau de pluie  $\approx$  4mg/l. La teneur des chlorures dans les eaux continentales peut être maximum sur les zones côtières et

minimum en s'éloignant de la mer ; Ceci est dû à l'eau de pluie qui s'appauvrit en chlore en fonction de la distance de la mer. Les roches sédimentaires représentent la source la plus importante des chlorures, il provient des évaporites (KCl) (Sylvite) ; NaCl (Halite).

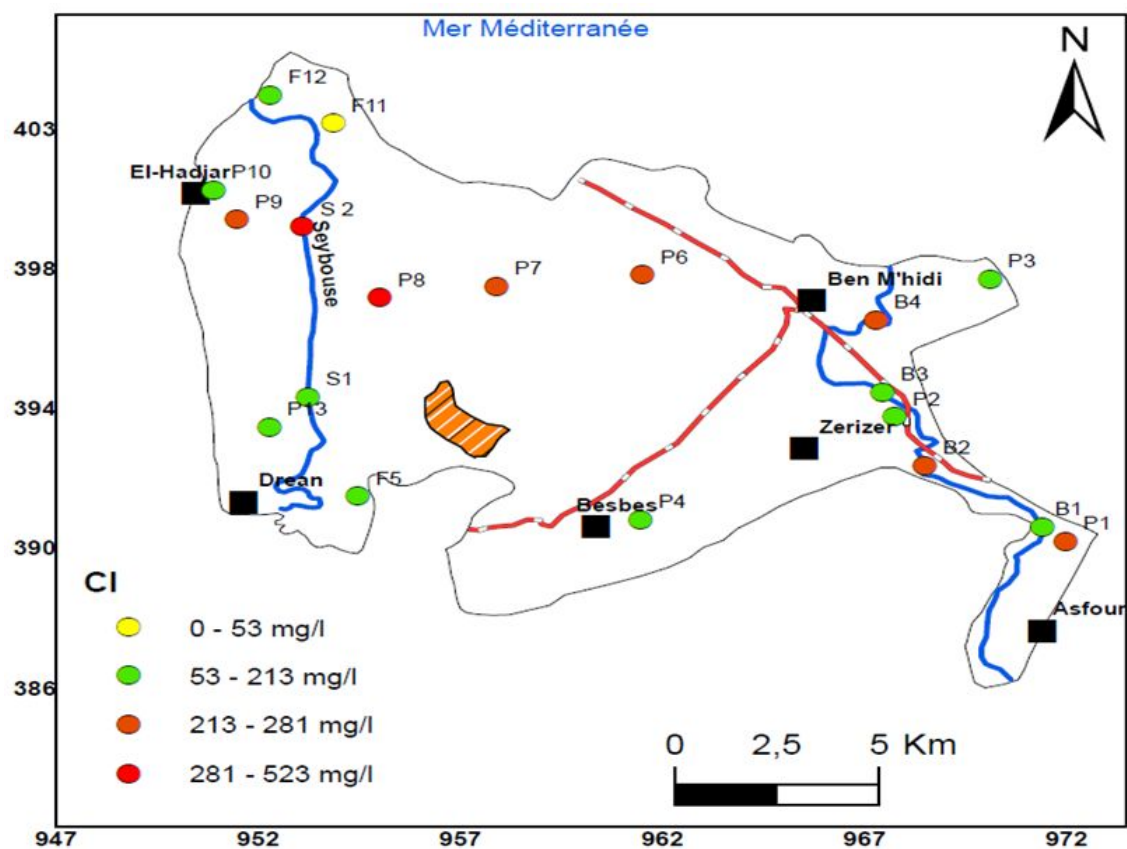


Figure.42. Carte de répartition des teneurs en Cl<sup>-</sup> (mg/l), Campagne d'Octobre 2017.

Les résultats d'analyse montrent des valeurs des chlorures acceptables et n'affranchissant pas la norme pour les eaux du surface et les eaux de la nappe profonde. Tandis que pour les eaux de la nappe superficielle au niveau du centre du périmètre les teneurs sont plus accentuées dépassant largement la norme admissible, le maximum est enregistré au point P8 (523 mg/l).

Il est noté que La répartition spatiale des chlorures est identique à celle du Sodium, ce qui confirme que l'apport de ces deux éléments provient de la même source salifère.

#### V. 4.2.1.6. Les sulfates (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)

Les sulfates proviennent de la dissolution des formations gypseuses tel que (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O gypse, CaSO<sub>4</sub> anhydrite), Célestine SrSO<sub>4</sub>, barytine BaSO<sub>4</sub>, algésite PbSO<sub>4</sub>, glauberite Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Les autres origines des sulfates sont les rejets industrielles (fertilisants) et aussi dans les poussières des sols ; la teneur des sulfates dans les eaux de pluie [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] ≈ 1mg/l.

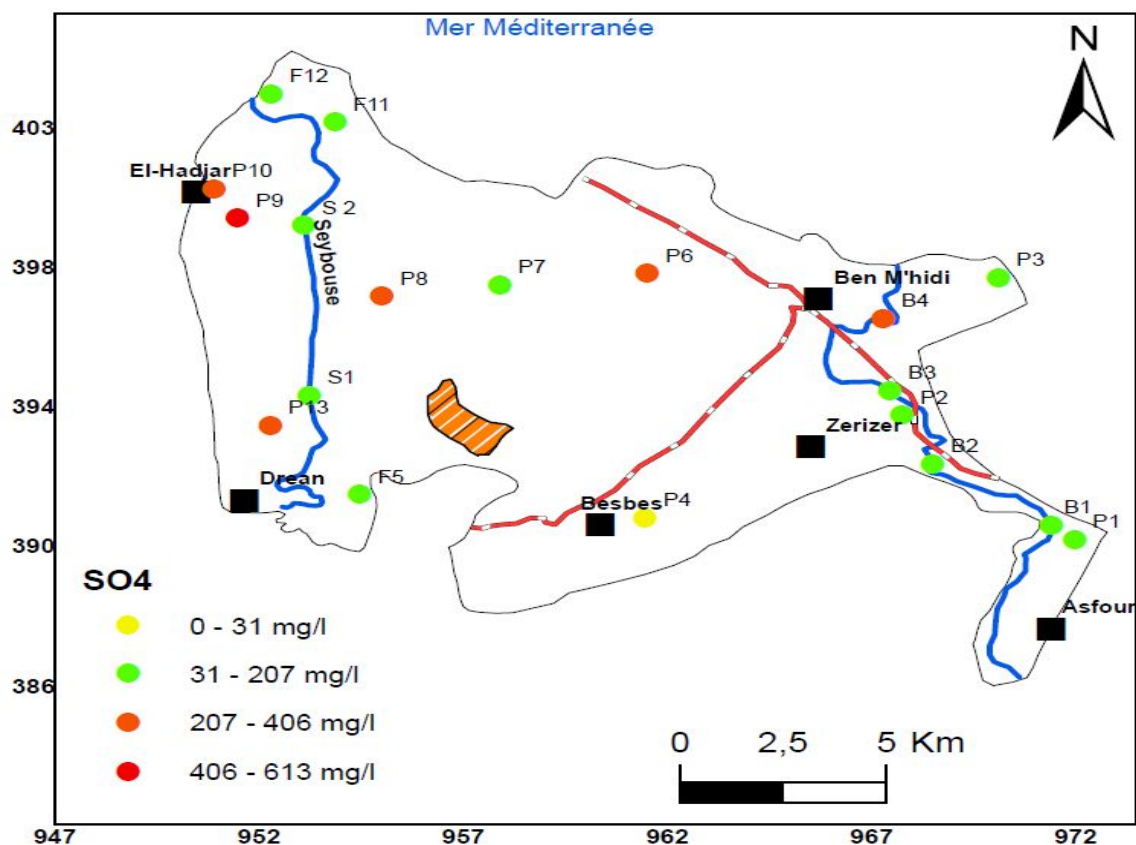
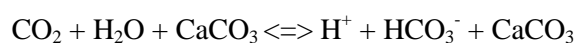


Figure.43. Carte de répartition des teneurs en  $\text{SO}_4^{2-}$  (mg/l), Campagne d'Octobre 2017.

Les fortes concentrations de cet élément sont enregistrées dans la nappe superficielle sur tout l'axe central du périmètre et à proximité d'El-Hadjar où on a enregistré un maximum de (613 mg/l) au point P<sub>9</sub>, cela est lié à la dissolution des lentilles gypseuses. Les teneurs de la nappe des graviers sont moins élevées, indiquant la faible présence de formations gypseuses à ce niveau. Les concentrations des eaux de surface ne dépassent plus la norme admissible, la provenance de ces ions est liée à la dissolution des formations triasiques existant à l'amont des oueds.

#### V. 4.2.1.7. Bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ )

La présence des ions bicarbonates dans les eaux est liée à la dissolution des formations carbonatées (cipolin, calcaire) par des eaux chargées en gaz carbonique, la précipitation (ou la dissolution) des carbonates dépend de la réaction suivante :



La présence des carbonates est donc contrôlée par le pH du milieu ( $-\log_{10} [H^+]$ ), lui-même contrôlé par la pression partielle de  $CO_2$  ( $pCO_2$ ). Une baisse de la  $pCO_2$  augmente l'alcalinité. Dans les eaux naturelles l'alcalinité, exprimée en  $HCO_3^-$ , varie de 10 à 350 mg/l (Rodier J., et al. 2005).

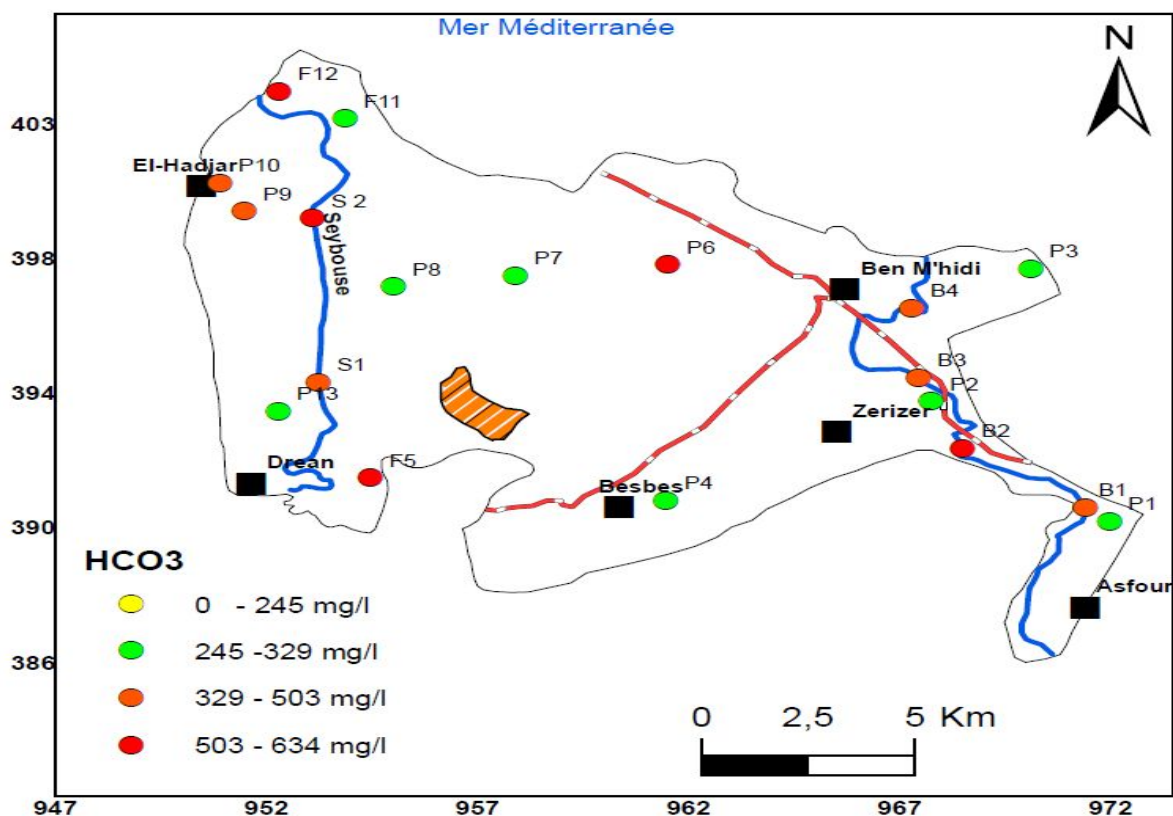


Figure.44. Carte de répartition des teneurs en  $HCO_3^-$  (mg/l), Campagne d'Octobre 2017.

La quasi-totalité des points de prélèvement montrent des teneurs qui dépassent la norme, Les eaux superficielles de la région d'étude présentent les teneurs les plus élevées qui oscillent entre (503-634 mg/l), cette minéralisation par les ions bicarbonates est liée à la dissolution des formations calcaires existantes à l'amont de l'oued (Djabri, 1996).

Pour les eaux souterraines on remarque des variations importantes autour des valeurs moyennes enregistrées, ce qui nous laisse penser de l'hétérogénéité des origines, dont la plus raisonnable est présumée aux apports souterrains sortant du socle métamorphique (Dibieche, 2002).

### V. 4.3. Faciès chimiques et classification des eaux

#### V. 4.3.1. Diagramme de Piper

Le diagramme de Piper est une composante graphique tri linéaire qui permet de visualiser, de manière relative les concentrations en éléments majeurs. Leur distribution dans le diagramme de Piper (Piper, 1944) permet de distinguer et de comparer les principaux faciès chimiques et leur évolution, dans les eaux souterraines des différents niveaux aquifères du périmètre irrigué de Bounamoussa.

D'après le diagramme (Fig.45.), On distingue deux faciès d'eau, Le premier faciès d'eau est chloruré et sulfaté calcique et magnésien représenté par des eaux salifères (charge minérale élevée), qui caractérise tous les puits captant les eaux de la nappe superficielle et deux points des eaux de surface le long de Bounamoussa, Tandis que le deuxième est carbonaté représenté par un faciès bicarbonaté calcique et magnésien, caractérisant les eaux superficielles des oueds et les eaux de la nappe profonde.

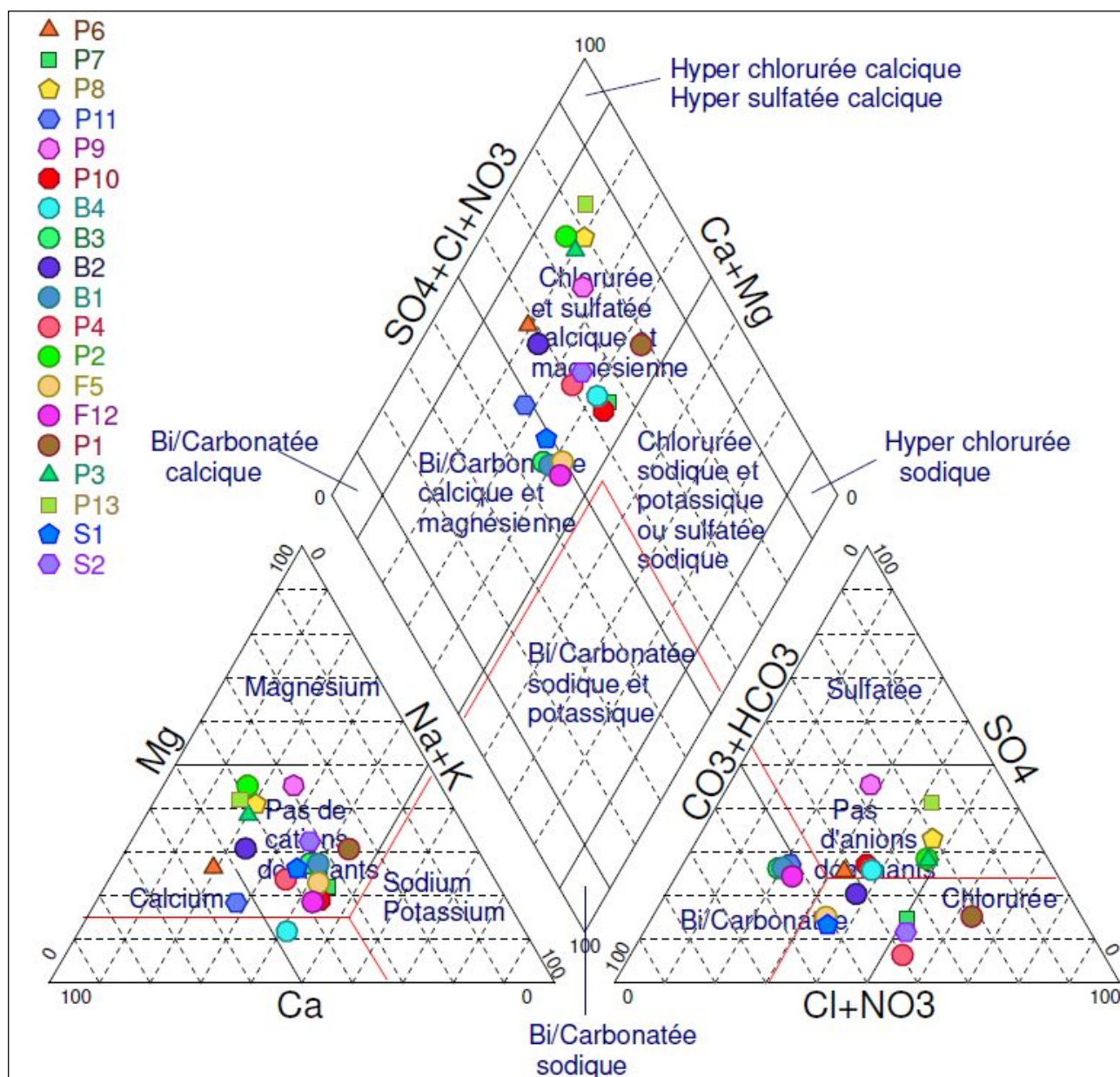


Figure.45. Diagramme de Piper des eaux du périmètre irrigué de Bounamoussa (Octobre 2017).

#### V. 4.3.2. Diagrammes de Stiff et Stabler

Pour bien comparer les analyses entre elles, des représentations graphiques de Stiff et Stabler ont été établies à fin de mieux visualiser la variation spatiale du faciès dominant pour chaque point d'eau.

Cette classification vient de confirmer celle du Piper, Deux types d'eau ont été distingués (Fig.46, 47); le premier est chloruré et sulfaté calcique et magnésien représenté par des eaux salifères (charge minérale élevée), qui caractérise tous les puits captant les eaux de la nappe superficielle, Tandis que le deuxième est carbonaté représenté par un faciès

bicarbonate calcique et magnésien, caractérisant les eaux superficielles des oueds et les eaux de la nappe profonde.

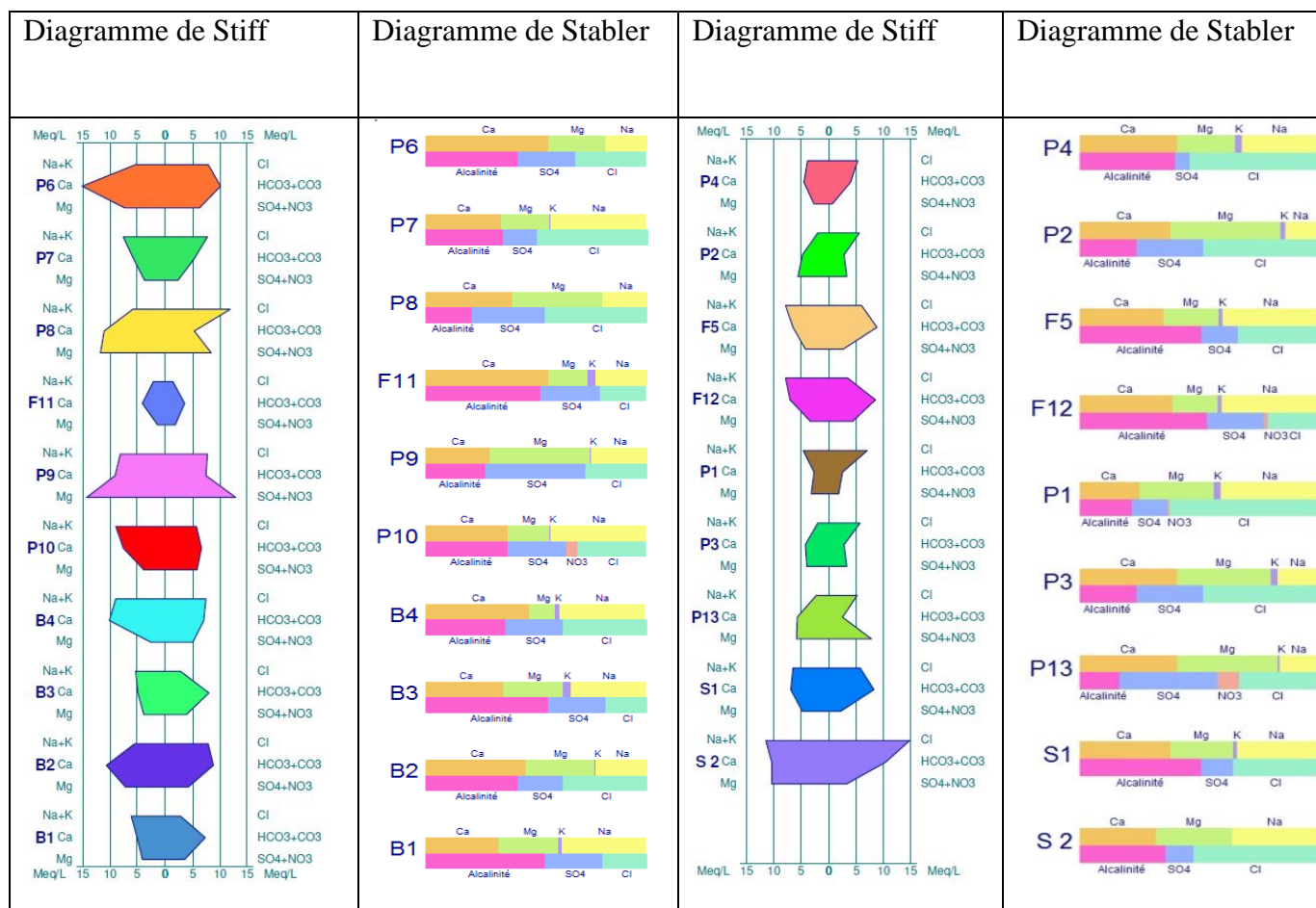


Figure.46. Diagrammes de Stabler et Stiff des eaux du périmètre (Octobre 2017).

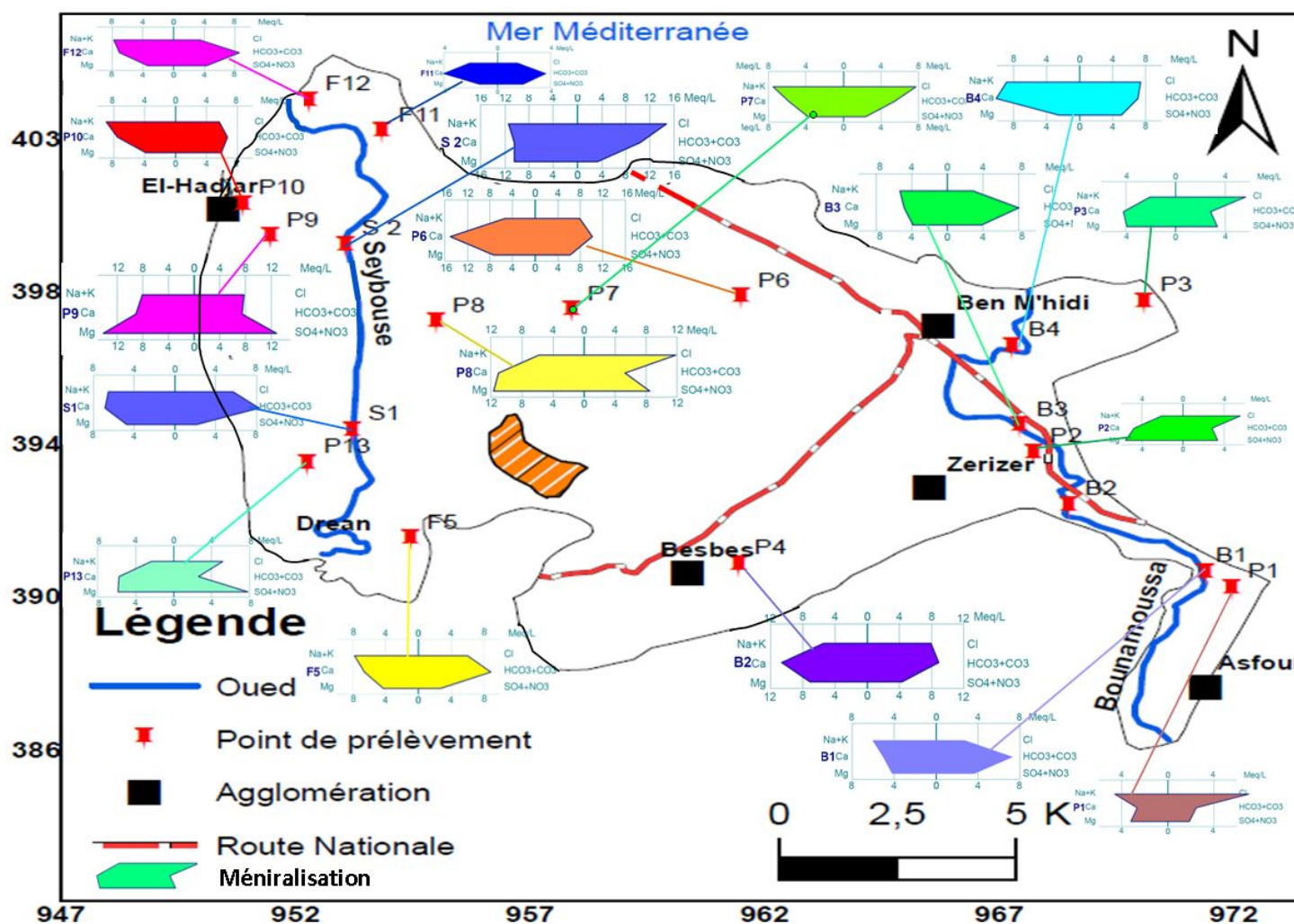
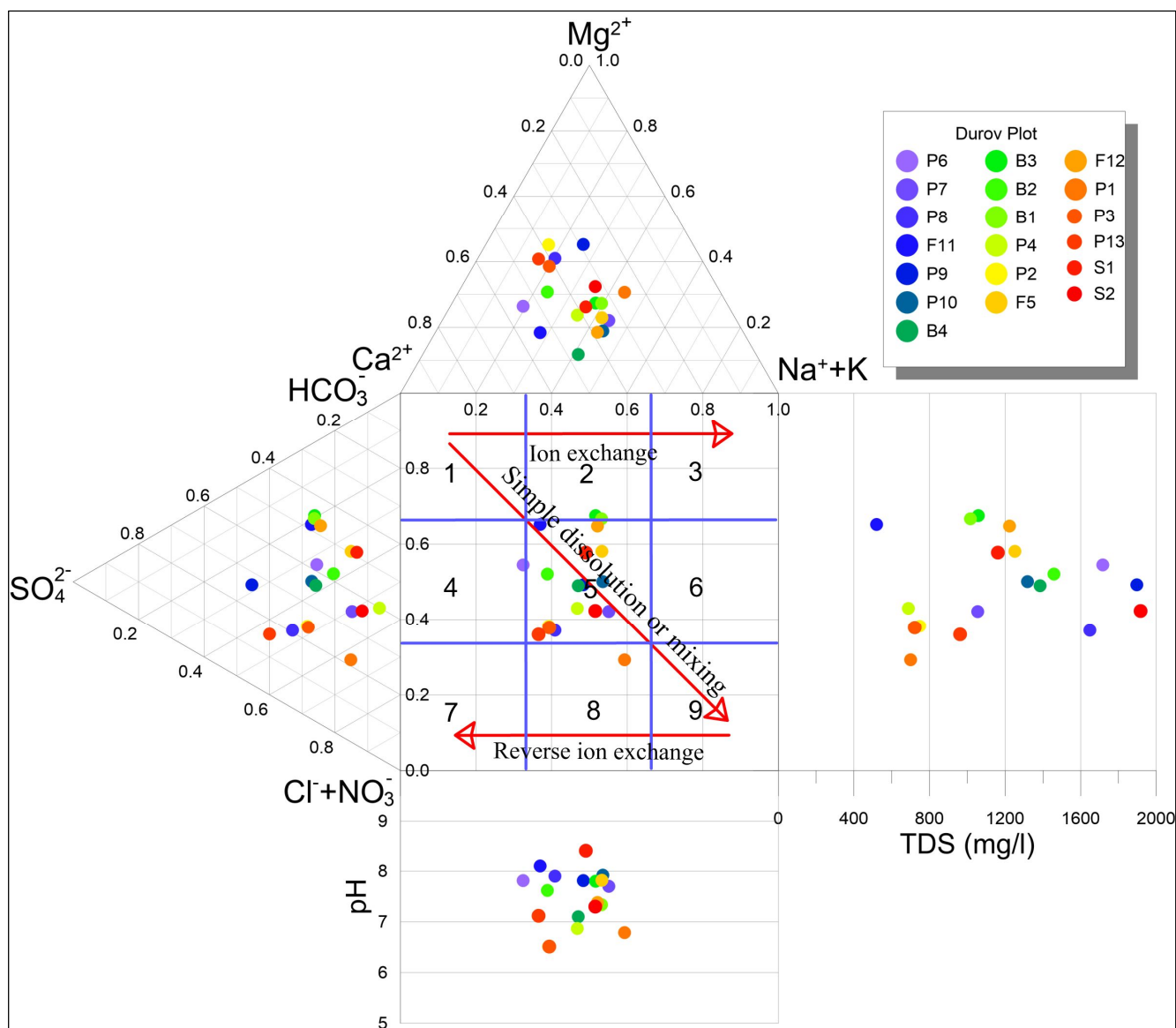


Figure.47 .Répartition des eaux du périmètre selon le diagramme de Stiff (Octobre 2017).

### V. 4.3.3. Diagramme de Durov

Le diagramme de Durov (in Lloyd et Heathcoat 1985) construit sur la base des teneurs relatives (en méq/l) des ions majeurs en solution est avantageux par rapport au diagramme de Piper en révélant certains processus géochimiques qui pourraient affecter la genèse des eaux souterraines. Le diagramme de Durov illustre bien qu'il y a une dominance des eaux du champ cinq et dans une moindre mesure champ deux, quatre et huit (Fig.48). Les eaux du cinquième champ caractérisent l'eau issue de la dissolution minérale 78.94 % représenté par quinze échantillons et qui ne présente aucun cation ou anions dominant, en se basant sur la classification de Lloyd et Heathcoat (1985) (Tab.27), cette eau peut être attribuée à une recharge récente et fraîche. Deux échantillons attribués aux eaux du deuxième champ 10.52 % caractérisant l'eau de dominance des cations et anions  $Ca^{++}$  et  $HCO_3^-$ , qui indiquent une eau de surface influencée par les formations carbonatées avec un échange de base de  $Na^+$ . Un seul échantillon représentant 5.26 % de l'ensemble des eaux analysées se localisent dans le

huitième champ qui indique une eau saturée en  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  dû à un échange de base inverse. Un autre échantillon restante qui représente un pourcentage de 5.26 % se localise dans le quatrième champ qui caractérise l'eau riche en  $\text{SO}_4^{2-}$  et  $\text{Ca}^{++}$ , ce ci indique fréquemment que l'eau est contenue dans des formations gypsifères.



**Figure .48. Diagramme de Durov illustrant les processus hydrogéochemiques impliqués dans les eaux du périmètre de Bounamoussa. (Lloyd et Heathcoat1985)**

**Tableau.27. Classification de l'eau du périmètre de Bounamoussa basée sur le diagramme de Durov. (Lloyd et Heathcoat, 1985)**

Sl. No	Types de l'eau	No. d'échantillons (GW=13 ; SW=6)	%
1	HCO <sub>3</sub> et Ca dominant, ce ci indique fréquemment que les eaux sont contenues dans des formations aquifères calcaires, sableuses, et d'autres types de formations aquifères.	----	---
2	Cette eau est à dominance des ions Ca et HCO <sub>3</sub> . Une association avec la dolomite est présumée si le Mg est significatif. Cependant, ces échantillons dans lesquels Na est significatif, un échange important des ions est présumé.	02 (0 GW; 2 SW)	10.52
3	HCO <sub>3</sub> et Na sont dominants, généralement ce ci indique un échange de base de l'eau, bien que la production du CO <sub>2</sub> en profondeur puisse générer HCO <sub>3</sub> où Na est dominant sous certaines conditions.	----	---
4	SO <sub>4</sub> domine, ou anion secondaire et Ca est dominant, Ca et SO <sub>4</sub> dominant, ce ci indique fréquemment que l'eau est contenue dans des dépôts de laves ou gypsifères, sinon des eaux de mélange ou indiquant une simple dissolution.	01 (1 GW; 0 SW)	5.26
5	Pas d'anion ou cation dominant, ce ci indique que la minéralisation de l'eau est due à une simple dissolution ou à un mélange.	15 (11GW;4 SW)	78.94
6	SO <sub>4</sub> domine, ou anion secondaire et Na est dominant, c'est un type d'eau qui n'est pas fréquemment rencontré et indique un mélange probable ou une influence rare de dissolution.	----	---
7	Cl et Na dominant, minéralisation fréquemment rencontrée sauf s'il y'a une pollution de couche aquifère. Sinon l'eau peut résulter d'un échange de base inverse du Na-Cl.	----	---
8	Cl l'anion dominant et Na le cation dominant, ce ci indique que les eaux souterraines sont liées à un échange de base inverse du Na-Cl.	01 (1 GW; 0 SW)	5.26
9	Cl et Na dominant, ce ci indique fréquemment qu'ils sont issus d'une dissolution.	----	---

## V. 5. Mécanismes de la minéralisation des eaux

Le chimisme des eaux souterraines est caractérisé par la présence de certains ions plus abondants (ou plus facilement mis en solution) que d'autres. L'abondance de ces éléments résulte d'une origine qui peut être soit naturelle soit anthropique. Elle est ensuite contrôlée par des processus physiques ou chimiques. Parmi ces processus on peut citer ceux liés à l'interaction avec l'encaissant, dépendant de la nature de cet encaissant, du temps du transit des eaux au sein de la formation aquifère et des processus chimiques contrôlant la mise en solution ou la précipitation. Les influences anthropiques comme le retour des eaux d'irrigation dans notre périmètre caractérisé par une forte activité agricole peuvent également contribuer significativement à la minéralisation des eaux souterraines.

La détermination des mécanismes de la minéralisation des eaux souterraines nécessite de déterminer l'origine de chaque élément chimique, d'examiner son évolution spatiotemporelle et son comportement par rapport aux autres éléments. La salinité des eaux souterraines est régie par la composition initiale de ces eaux, les processus qui interviennent à l'entrée du système hydrologique et la mise en solution des sels au cours du transit de la solution au contact des roches dans l'aquifère. La composition issue de ces mécanismes peut être modifiée par des mélanges d'eaux d'origines différentes (phénomène de drainance entre deux aquifères, retour d'eau d'irrigation depuis la surface, par l'évaporation ...).

Le constituant fondamental initial présent dans l'eau de pluie est l'acide carbonique ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), Celui-ci provient de la mise en solution du gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ) de l'atmosphère. L'acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) et l'acide nitrique ( $\text{HNO}_3$ ) peuvent aussi être dissous dans l'eau de pluie, notamment dans les régions industrielles. Ces acides sont les principaux agents de l'altération des carbonates et des silicates.

L'acidité des eaux augmente généralement dans le sol par la mise en solution du  $\text{CO}_2$  issu de la dégradation de la matière organique. Avant de s'infiltrer dans le sol, l'eau de pluie peut aussi dissoudre des aérosols tels que les chlorures de sodium ( $\text{NaCl}$ ). Enfin, si l'aquifère renferme des roches évaporitiques (gypse, halite,...), celles-ci, de par leur solubilité élevée, peuvent fournir des quantités appréciables des sels dissous.

L'analyse des données chimiques à l'aide des diagrammes de Piper, stabler et stiff a permis de donner une première idée sur les mécanismes d'acquisition de la minéralisation des eaux superficielles et souterraines du périmètre irrigué de Bounamoussa. Pour les confirmer, il est maintenant nécessaire d'examiner de manière plus détaillée l'évolution des paramètres de l'analyse chimique les uns par rapport aux autres, en relation avec le fonctionnement du

système hydrogéologique. Les états de saturation vis-à-vis des principaux minéraux constituent un élément de contrôle majeur de la concentration des ions en solutions.

Nous avons donc préalablement déterminé, à l'aide du logiciel Diagramme, les indices de saturation vis-à-vis des principaux minéraux carbonatés et évaporitiques.

### **V. 5. 1. Calcul des indices de saturation vis-à-vis des phases minérales**

#### **V. 5. 1. 1. Notion d'indice de saturation**

En géochimie, il est souvent utile de déterminer le degré de solubilité d'un minéral dans l'eau, commandé par les états de saturation. L'état de saturation d'une solution donnée par rapport à un minéral est exprimé par l'indice de saturation  $I_s$ .

$$IS = \log (PAI.Ks^{-1})$$

Avec

PAI : le produit d'activité ionique des ions concernés.

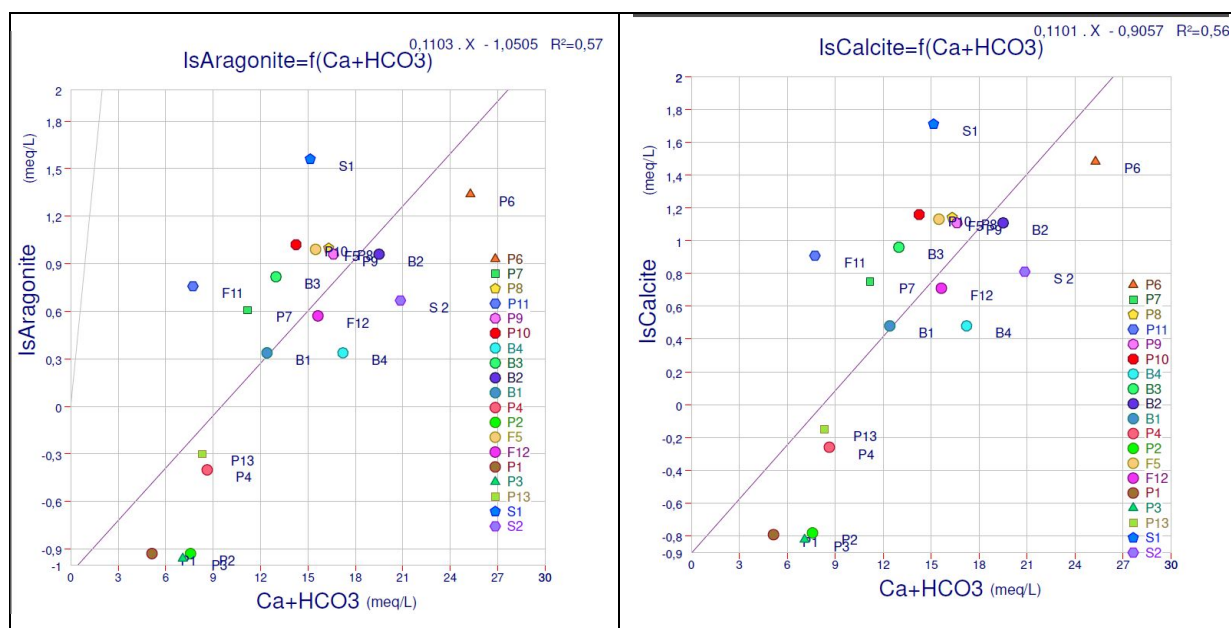
Dans une solution aqueuse, lorsque  $PAI = K_s$ , autrement dit,  $IS = \log (PAI/K_s) = 0$ , on considère que l'eau est en équilibre avec le minéral considéré et que la solution est saturée.

- si  $IS < 0,5$ , l'eau est sous-saturée par rapport au minéral, cela signifie que l'eau pourra le dissoudre s'il est présent dans le réservoir.
- si  $IS > 0,5$  l'eau est sursaturée, cela signifie que l'eau va précipiter le minéral.

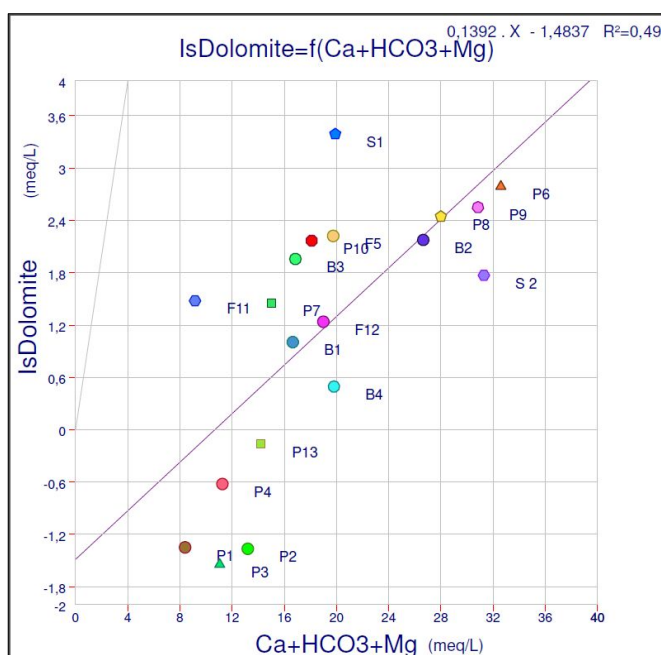
Le calcul de cet indice, est fait à l'aide du logiciel Phreeqc.

#### **V. 5. 1. 2. Saturation vis-à-vis des minéraux carbonatés**

Le calcul des indices de saturation a concerné uniquement les minéraux carbonatés les plus abondants dans les environnements sédimentaires à savoir, la calcite, l'aragonite ( $CaCO_3$ ) et la dolomite ( $Ca Mg (CO_3)_2$ ).



**Figure.49. Saturation des eaux du périmètre irrigué vis-à-vis des minéraux carbonatés. (Aragonite, Calcite)**



**Figure.50. Saturation des eaux du périmètre irrigué vis-à-vis (Dolomite).**

La saturation vis-à-vis de la calcite, Aragonite et Dolomite est généralisée dans le périmètre étudié; presque la plus part des échantillons sont saturés ou sursaturés (indice de saturation supérieur à 0.5). La dissolution de la calcite est une réaction rapide et l'eau peut atteindre la saturation en traversant la zone non saturée.

Les eaux souterraines de la zone d'étude montrent des valeurs positives des indices de saturation ( $IS > 0.5$ ) vis-à-vis de ces minéraux carbonatés (Fig.49 et 50). Ces indices, dans l'ensemble, varient entre 0.3 et 3.5 reflétant un état de sursaturation vis-à-vis de ces minéraux.

L'allure des droites de régression dans les trois graphiques montre un état de saturation des eaux souterraines élevée par rapport à celle des eaux superficielles.

La différence entre le degré de déséquilibre entre la calcite et la dolomite est liée à la cinétique de dissolution de ces minéraux. La dissolution de la dolomite est une réaction plus lente (de l'ordre de quelques mois) que celle de la calcite.

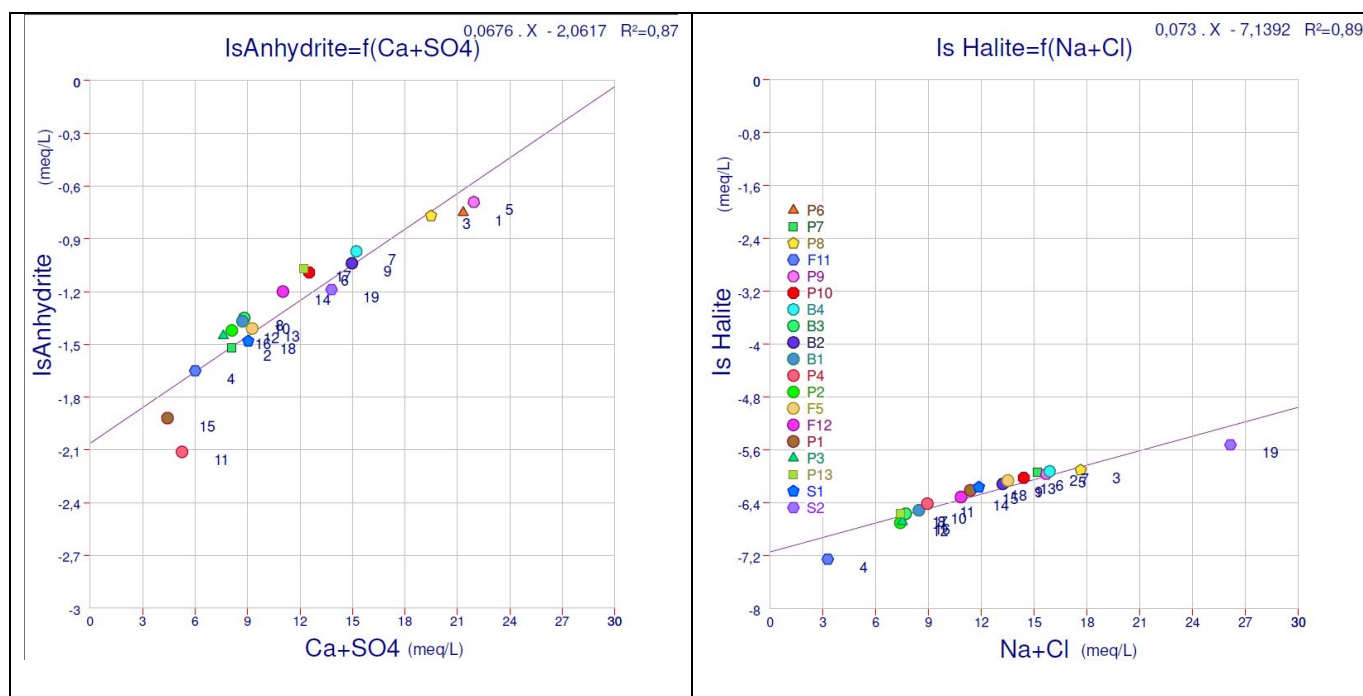
On remarque que l'indice de saturation est négatif (dissolution dans l'eau), dans les eaux de la nappe dans les points (P1,P2,P3,P4 et P13), caractérisés par des concentrations en  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  très importantes, cela traduit par la présence du faciès bicarbonaté calcique et magnésien, ces eaux localisées dans la partie sud ouest et sud est (El Asfour, Besbes et Drean) témoignant ainsi d'un état de sous-saturation des eaux souterraines par rapport à ces minéraux.

### V. 5. 1. 3. Saturation vis-à-vis des minéraux évaporitiques

Pour les minéraux évaporitiques, on a calculé les indices de saturation vis-à-vis de l'halite ( $\text{NaCl}$ ), du gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) et de l'anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ).

Tous les échantillons du périmètre étudié montrent des indices de saturation négatifs ( $IS < 0.5$ ) vis-à-vis de l'halite et l'anhydrite (Fig. 51) témoignant d'un état de sous-saturation des eaux par rapport à ces minéraux. Les concentrations en  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  et  $\text{Ca}^{2+}$  sont très importantes dans l'eau car le faciès prédominant est chloruré et sulfaté calcique et magnésien, à cause de la nature géologique et la forte évaporation, ce qui indique une continuité dans la dissolution du gypse et l'halite.

La figure (Fig.51), montre une excellente corrélation entre  $\text{Na}+\text{Cl}$  avec l'indice de saturation de l'halite et  $\text{Ca}+\text{SO}_4$  avec l'indice de saturation de l'anhydrite (0.89 et 0.87 respectivement), cela peut confirmer que ces éléments sont dues sans doute à la dissolution des formations évaporitiques et plus précisément de l'halite ( $\text{NaCl}$ ) et l'anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ).



**Figure.51.Saturation des eaux du périmètre vis-à-vis (Anhydrite, Halite)**

### V. 5. 2. Corrélations entre les éléments majeurs

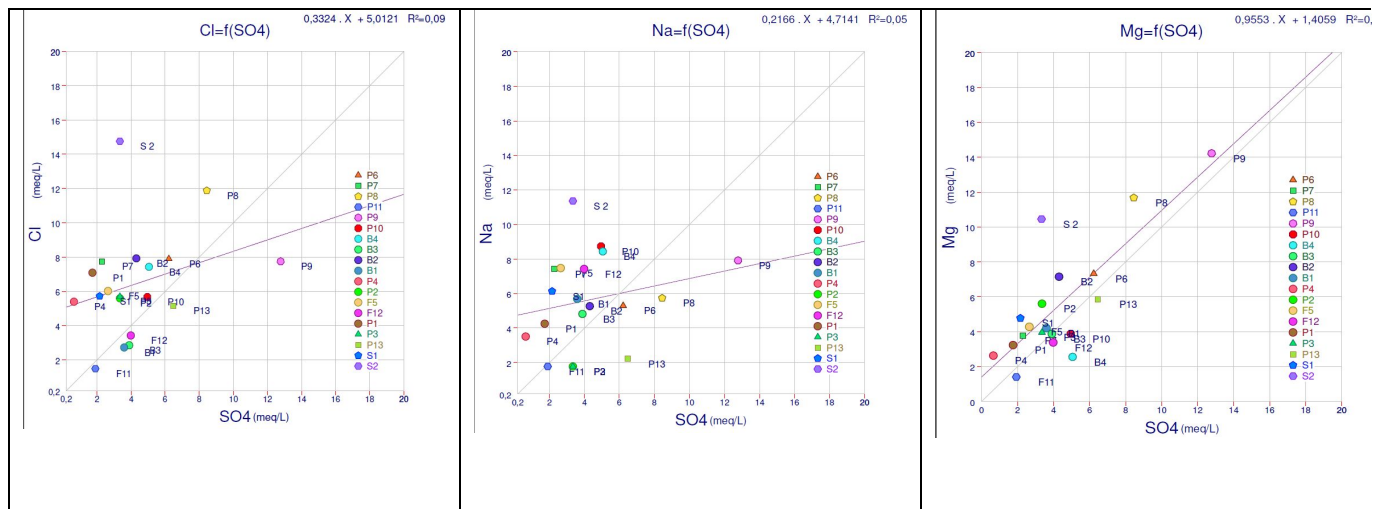
Les principaux processus chimiques qui contrôlent la minéralisation des eaux souterraines sont les interactions eaux/roche (mise en solution congruente ou incongruente et précipitations des minéraux, échanges ioniques, réactions d'oxydo-réduction), la concentration par évaporation, les mélanges et apports d'origine anthropiques s'accompagnant de pollutions éventuelles. Les eaux qui s'infiltrent dans les calcaires et les grès de bordures, seront chargées de Ca et  $\text{HCO}_3$ , par la dissolution. Les puits qui se trouvent à proximité des bordures attestent de cette minéralisation et se caractérisent par l'abondance de ces deux éléments. Dans le système aquifère et localement sur les bordures des terrains riches en gypses et en sels permettent d'acquérir des concentrations importantes en Na, Cl, Ca et  $\text{SO}_4$ .

Les activités anthropiques peuvent provoquer la concentration des ions par l'utilisation des engrais chimiques dans l'agriculture, et se traduisent par l'apport d'éléments tels que  $\text{NO}_3$ , K,  $\text{PO}_4$  et parfois Na,  $\text{SO}_4$  et Cl. Une irrigation mal gérée, utilisant des eaux relativement salée, susceptibles de se concentrer par évaporation, peut provoquer la salinisation des sols et augmenter la minéralisation des eaux souterraines.

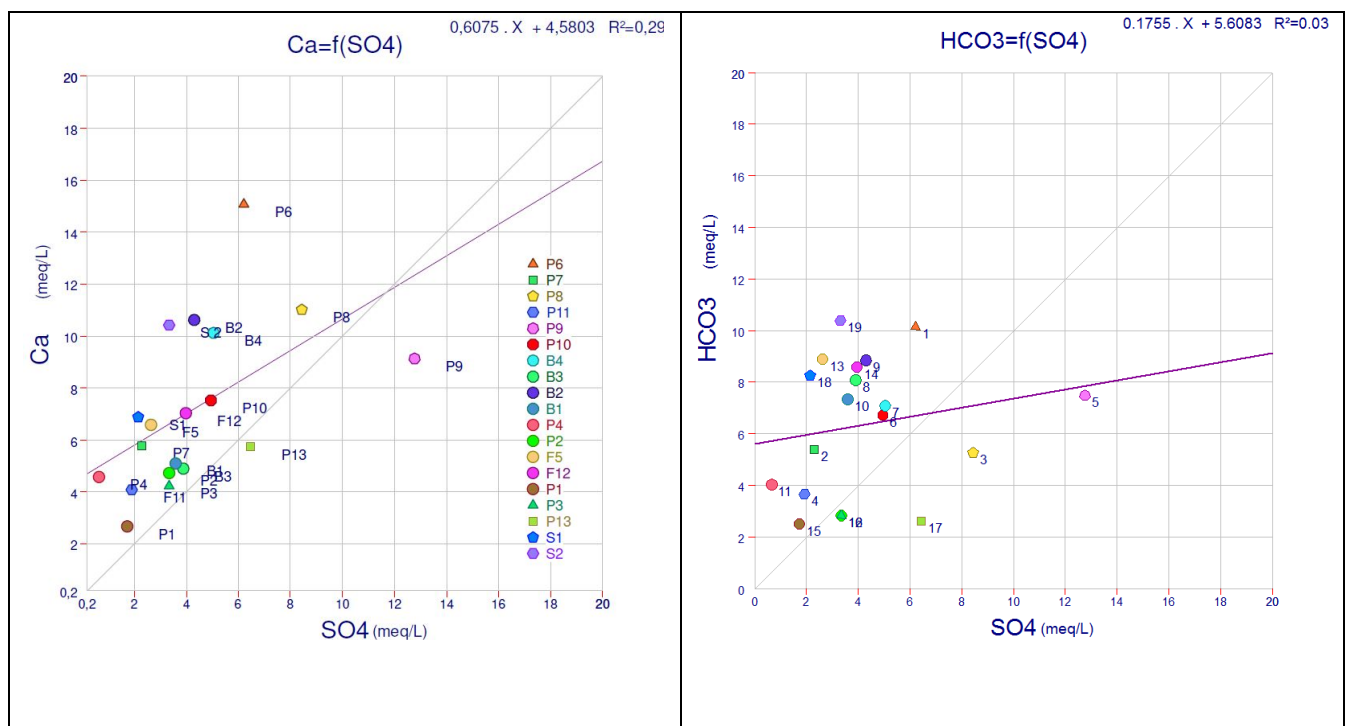
Pour préciser les principaux processus responsables de la minéralisation des eaux superficielles et souterraines du périmètre irrigué de Bounamoussa, et tenter de déterminer l'origine de chaque élément chimique il est nécessaire de réaliser des corrélations entre les

différents ions. Il est également nécessaire d'examiner le comportement des éléments dérivant d'une même origine et leurs évolutions spatiales dans le système hydrogéologique étudié.

**V. 5. 2.1. Corrélations ions majeurs/sulfates**



**Figure .52.Corrélations entre Na, Cl, Mg et SO<sub>4</sub>**



**Figure.53. Corrélation entre Ca, HCO<sub>3</sub> et SO<sub>4</sub>**

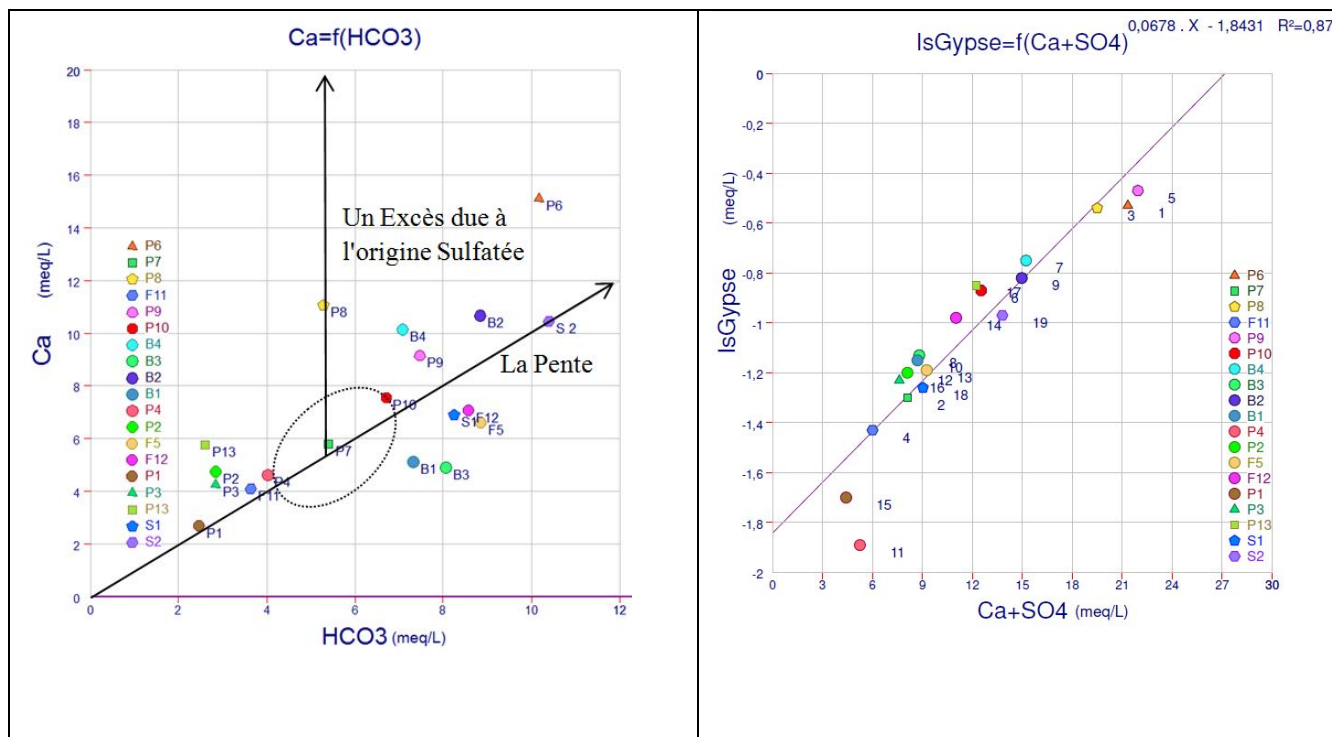


Figure 54. Corrélation Ca vs HCO<sub>3</sub>, et indice de saturation du Gypse.

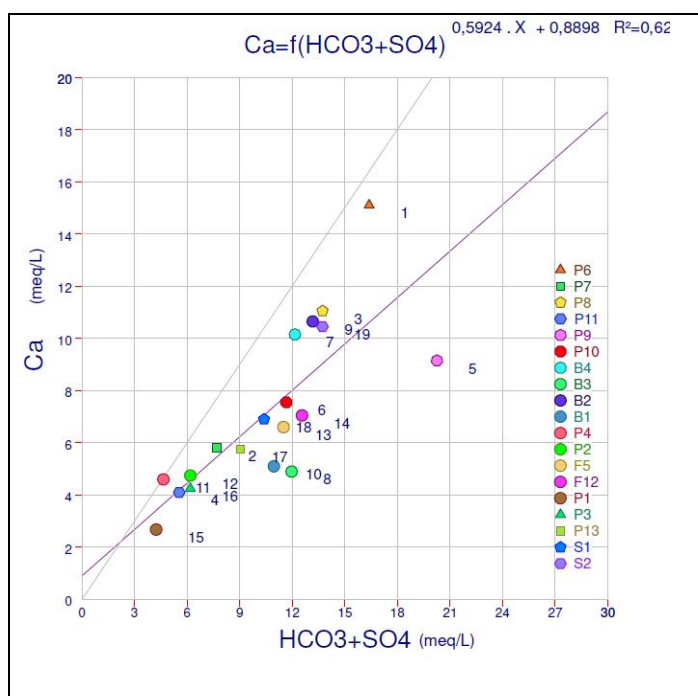


Figure 55. Corrélation HCO<sub>3</sub>+SO<sub>4</sub> vs Ca

Les éléments tels que les chlorures, le sodium et les bicarbonates ne montrent pas de bonnes corrélations avec les sulfates. par contre il existe une bonne corrélation des concentrations en SO<sub>4</sub> avec les concentrations en magnésium ainsi qu'avec l'indice de saturation du gypse (Fig. 52 et 54), Les valeurs de ce dernier sont dans leur grande majorité,

inférieures à zéro et dénotent une sous saturation vis-à-vis du gypse, ce qui indique une continuité dans la dissolution du gypse.

On examine ici l'origine du calcium en fonction de deux éléments chimiques (bicarbonates et les sulfates) (Fig. 55), en relation avec ses deux sources principales (carbonates et gypse). La représentation graphique de l'évolution du calcium en fonction des bicarbonates (Fig. 54) a montré que l'ensemble des points se positionnent au-dessus de la droite de la pente (1) montrant un excès des teneurs en Ca, interprété comme le résultat de la mise en solution du gypse. La représentation de la (Fig.55) laisse apparaître une bonne corrélation avec un léger excès des anions, ce qui est logique puisqu'ils peuvent également être associés à d'autres cations tels que Mg par exemple. L'écart tend à augmenter avec les fortes concentrations en liaison avec un accroissement de la dissolution du gypse.

Ces deux représentations nous montrent que la dissolution des ions calcium à partir des évaporites est plus importante que celle des carbonates et que les fortes concentrations en Ca sont plus liées à la dissolution des évaporites (gypse).

### V. 5. 3. Le couple $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$

Ces deux éléments chimiques dans les eaux naturelles sont souvent liés à la dissolution de l'halite ( $\text{NaCl}$ ). L'évolution de Na est étudiée en fonction des teneurs en chlorure, car ce dernier est considéré comme un traceur stable et conservatif des évaporites, très soluble, entrant rarement dans les précipitations salines, n'intervenant pas dans les phénomènes d'oxydoréduction et peu influencé par l'intervention des bactéries. La représentation graphique de l'évolution des teneurs en sodium en fonction des concentrations en chlorures (Fig. 56).

L'origine de ces éléments est chlorurée sodique commune de ces deux éléments chimiques (Halite). La représentation graphique de l'évolution des teneurs en sodium en fonction des concentrations en chlorures (Fig. 56), montre que la plupart des échantillons se trouvent au-dessus de la droite de la pente (1), impliquant un excès de Na, cela peut être expliqué par l'existence d'une autre origine pour les ions sodiques qui a fait accroître la concentration du sodium par rapport à celle des chlorures. Cet apport supplémentaire pourrait provenir de l'altération des silicates sodiques (feldspaths) autrement dit, l'altération du socle métamorphique.

Encore plus, L'excès en Na peut avoir ensuite plusieurs origines naturelles. On pense en particulier aux échanges de base (Ca vs Na), ou l'hydrolyse des silicates dans les grès et les argiles.

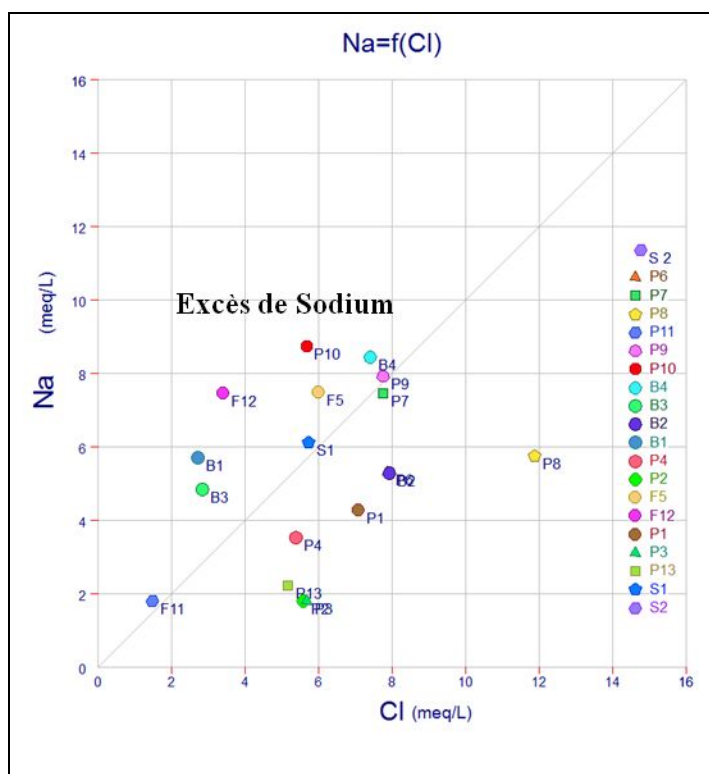


Figure.56. Variation du rapport Na/Cl des eaux du périmètre

#### V. 5. 4. Corrélation Ca/Cl

On note aussi que presque la totalité des échantillons montrent des teneurs excédentaires en calcium par rapport au sulfate (Fig.53.) La saturation en calcite et donc la précipitation de ce minéral avec la libération de calcium, lors de la dissolution du gypse est, a priori, l'une des principales explications de cette évolution.

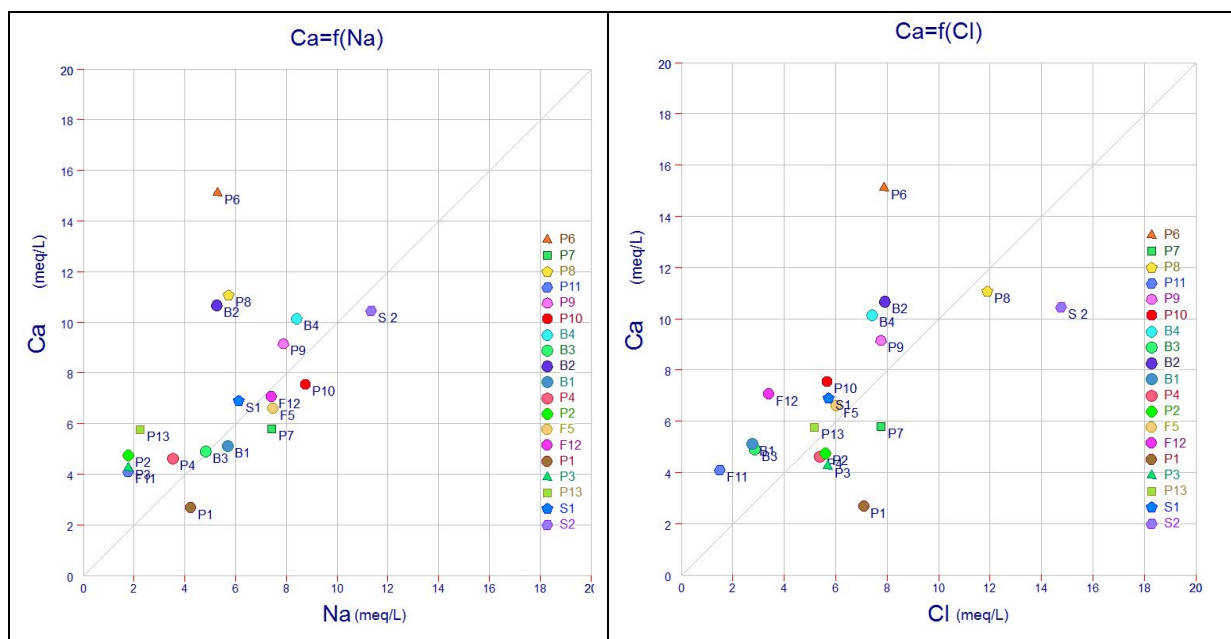


Figure.57. Variation du rapport Ca/Na et Ca/Cl des eaux du périmètre irrigué de Bounamoussa

La corrélation entre les cations Ca et Na montre d'une façon générale un excès en  $\text{Ca}^{2+}$ . Cet excès s'accroît avec la minéralisation des eaux (Fig.57.). Cela est expliqué par la présence des réactions d'échanges cationiques qui fixent des ions Ca sur les minéraux argileux et libèrent les ions Na.

Sur la relation Ca/Cl (Fig.57), les deux éléments sont très peu corrélés mais la majorité des échantillons montrent que le Ca est toujours en quantité supérieure à Cl. Aucune relation nette n'apparaît, ce qui est normal puisque ces deux éléments sont rarement liés directement dans les réactions hydrochimiques des eaux. Probablement ils sont présents en liaison avec la dissolution des évaporites.

### V. 5. 5. Corrélation $\text{Mg}^{2+}/\text{Cl}^-$ et $\text{Mg}^{2+} / \text{Ca}^{2+}$

La relation entre Mg et Cl (Fig.58.) montre une dispersion des points très similaire à celle observée pour la relation Ca/Cl mais cette fois-ci avec un excès en Cl.

La représentation graphique montre que presque la totalité des échantillons se situent au-dessous de la droite de la pente mettant en évidence un excès en Cl qui semble s'accroître avec l'augmentation de la minéralisation. Globalement, cette évolution peut s'expliquer par un apport prédominant de Cl issu de la dissolution de l'halite et la forte évaporation.

La corrélation  $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$  (Fig.58.) montre aussi que la majorité des points d'eau se situent au-dessous de la pente indiquant un excès des ions  $\text{Ca}^{2+}$  par rapport aux ions  $\text{Mg}^{2+}$ .

Les eaux de la nappe au niveau du centre sont hautement minéralisées et présentent des rapports élevés en Mg/Ca. On peut y voir des eaux minéralisées par l'effet de la dissolution des niveaux carbonatés et la précipitation de calcite associée à la concentration par évaporation. Par contre, les eaux de surface montrent les rapports Mg/Ca faibles. Ces eaux correspondent au faciès lié à une forte participation d'eaux de pluie peu évoluées, au piedmont des reliefs et à l'alimentation du périmètre par le massif du numidien et celui métamorphique dans les bordures Sud Est et Nord Ouest respectivement.



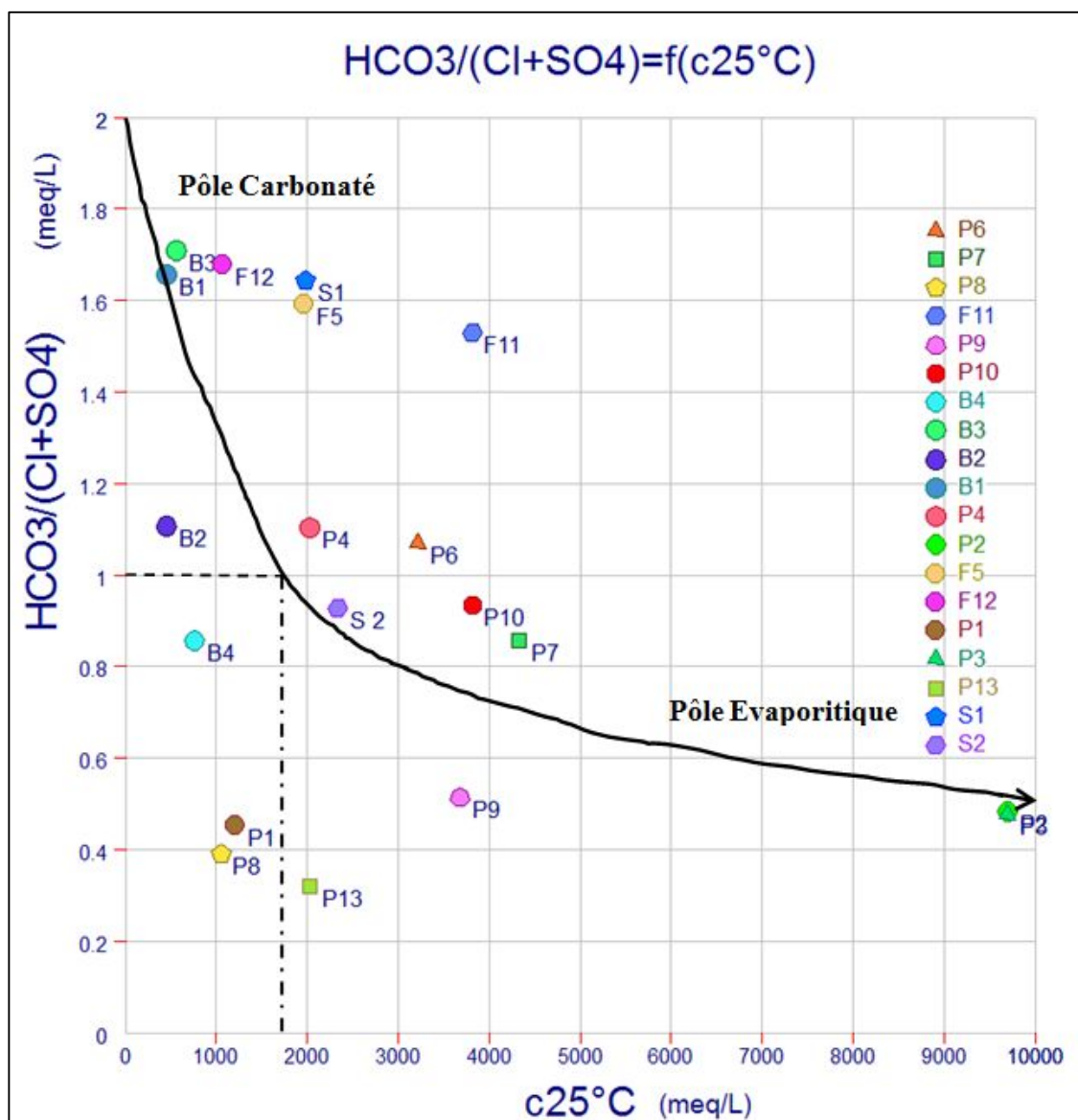


Figure.59. Variation du rapport  $\text{HCO}_3/(\text{Cl} + \text{SO}_4^{2-})$  – Conductivité électrique

### V. 5. 7. Echanges de bases

Au cours de leurs trajets souterrains, les eaux entrent en contact avec différentes formations géologiques qui ont la propriété d'échanger leurs ions contre ceux contenus dans les eaux. Il y a un échange permanent entre les ions adsorbés dans les argiles et les ions en solution dans l'eau. L'indice d'échange de base est calculé selon la formule suivante :

$$\text{IEB} = \frac{\text{Cl} - (\text{Na} + \text{K})}{\text{Cl}}$$

Les concentrations sont en méq/l

Pour bien expliquer ce phénomène, nous avons essayé d'interpréter le diagramme  $\text{Ca}^{2+}/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$  Vs  $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$  avec un report de tous les points d'eau du périmètre irrigué.

**Tableau.28. Indices d'échanges de Bases des analyses des eaux du périmètre irrigué de Bounamoussa, (Octobre 2017).**

<b>Point</b>	<b>P6</b>	<b>P7</b>	<b>P8</b>	<b>F11</b>	<b>P9</b>	<b>P10</b>	<b>B4</b>	<b>B3</b>	<b>B2</b>	<b>B1</b>
<b>IEB</b>	0.32	0.03	0.51	-0.41	-0.05	-0.58	-0.19	-0.88	0.31	-1.22
<b>Point</b>	<b>P4</b>	<b>P2</b>	<b>F5</b>	<b>F12</b>	<b>P1</b>	<b>P3</b>	<b>P13</b>	<b>S1</b>	<b>S2</b>	
<b>IEB</b>	0.28	0.63	-0.30	-1.29	0.35	0.64	0.55	-0.14	0.23	

La figure (60) met en évidence les échanges de base avec les minéraux argileux qui affectent les eaux du périmètre pendant l'infiltration des eaux de pluie et durant leurs séjours au sein de l'aquifère.

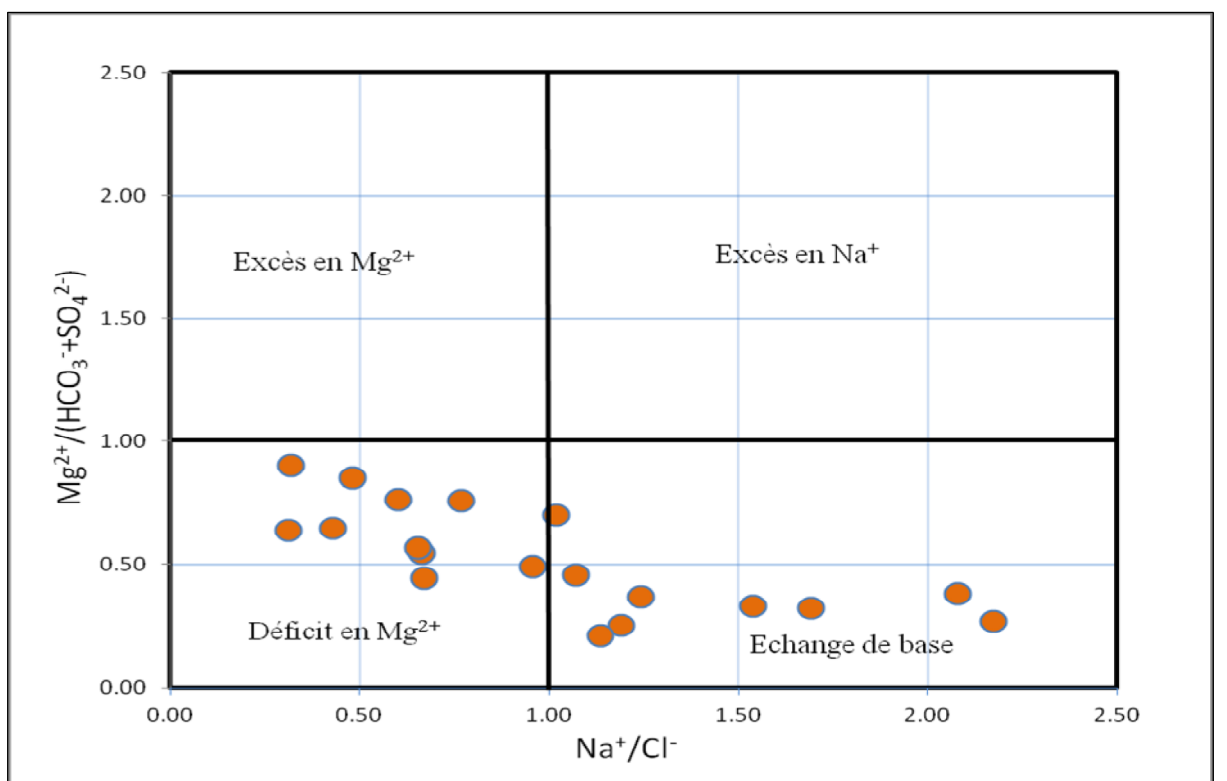
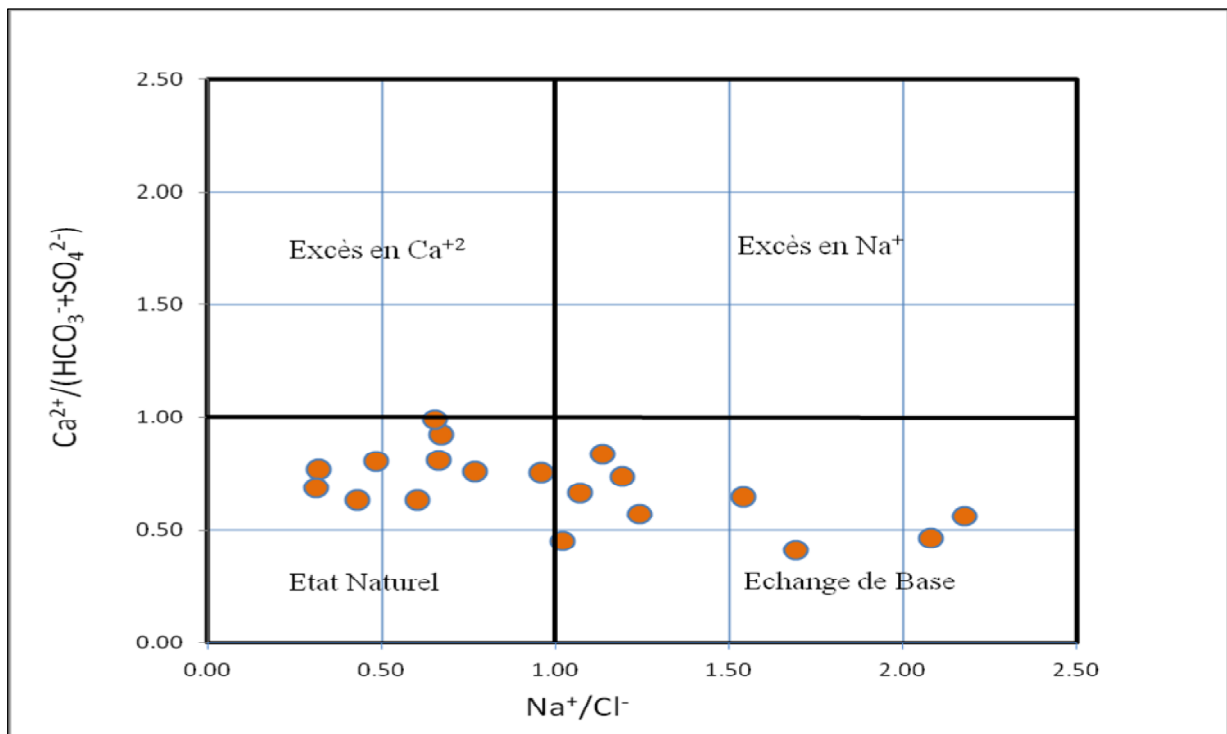


Figure.60. Echanges de bases dans les eaux du périmètre irrigué de Bounamoussa (Octobre 2017).

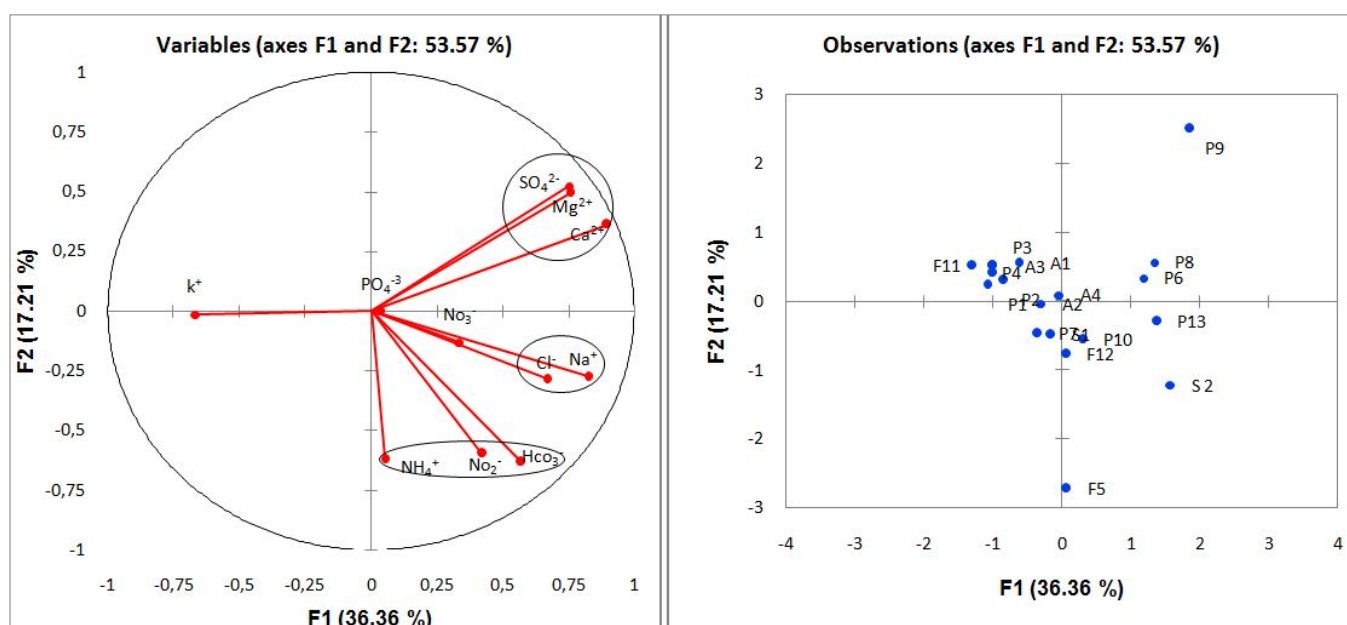
Deux regroupements peuvent être se présenter dans le diagramme (Fig.60):

Le premier groupe, englobe les dix (10) points d'eaux (52 %) présentant un état naturel, Il est caractérisé par un déficit en  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  par rapport aux  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  et un excès en  $\text{Cl}^-$  par rapport au  $\text{Na}^+$  ; ce groupe explique la présence de deux faciès chimiques, l'un chloruré-calcique et l'autre chloruré-magnésien.

Le deuxième groupe, se caractérise par un excès des teneurs en sodium par rapport aux chlorures, qui totalise neuf (09) points (48 % des points d'eau analysés), nous pouvons expliquer ce résultat par l'existence d'une autre origine pour les ions sodiques qui a fait accroître la concentration de ces derniers. Cet excès en sodium s'accompagne par un déficit en  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  par rapport aux  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  (Fig.60), en effet dans un échange de bases lié aux minéraux argileux, il y a fixation d'un  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  après libération de deux  $\text{Na}^+$ .

## V. 6. L'analyse en composante principale

Cette analyse a pris en compte l'ensemble des points d'eau. La projection des variables et des individus a été effectuée sur 4 axes, qui représentent 53.57% de la variance totale (Fig. 61).



**Fig.61. Projection des variables selon le plan F1.F2**

Le premier se développe sur l'axe I (36% de la variance), il présente le pôle de la salinité ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ) indiquant une origine marine (P13, S2), négativement corrélé avec les

éléments potassiques ( $K^+$ ) projetés sur le forage F11 due à l'altération des formations silicatées (gneiss, schiste), des argiles potassiques d'une part et de la dissolution des engrais chimiques.

L'axe II (17% de la variance), On note deux regroupements inversement proportionnels ont une origine différentes sur l'axe positif les éléments carbonatés évaporitiques (P9, P8, P6), sur l'axe négatif les éléments azotés et bicarbonatés (F5).

### V. 7. Ascendant Hiérarchique Classification (AHC)

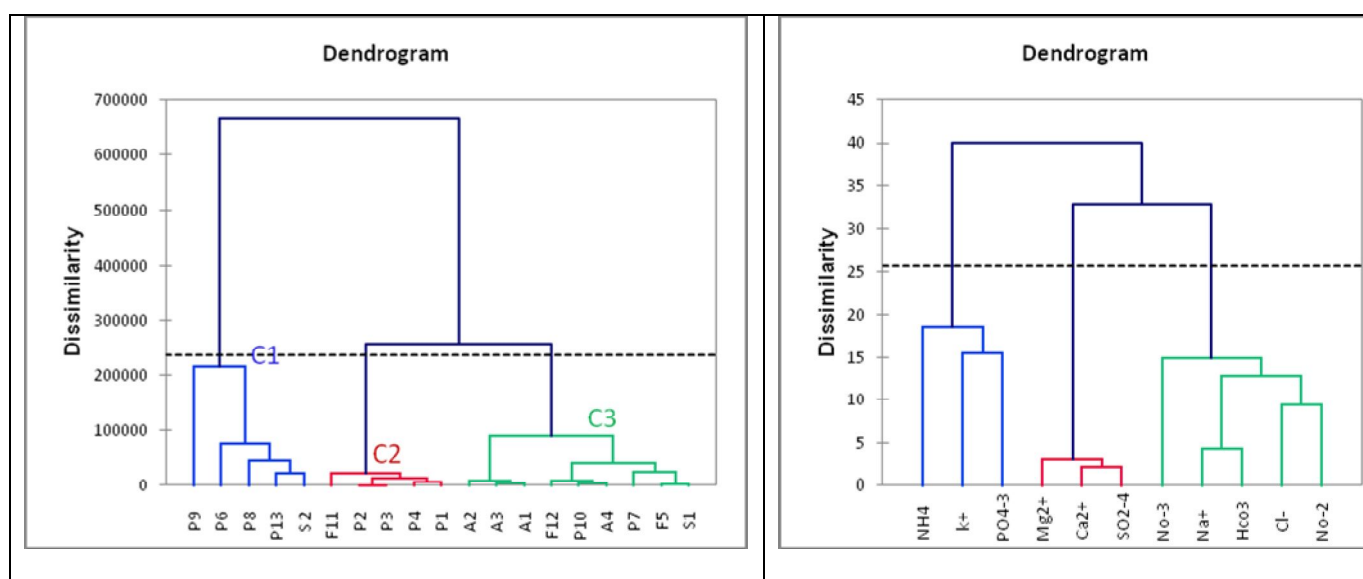


Figure.62. Valeurs propres et pourcentage de variabilité exprimée.

Le dendrogramme de la classification des eaux du périmètre irrigué de Bounamoussa (Fig.62.) fait ressortir trois catégories, La première représente les éléments phosphatés potassiques avec l'élément polluants (Ammonium) dans les points P9, P6, P8, P13 et S2 se localisant le long de la Seybouse qui est le récepteur de tous les rejets urbains. La deuxième représente les éléments carbonatés et sulfatés (F11, P2, P3, P4, P1) qui sont d'origine géologique (la dissolution des formations carbonatés et gypseuses). La troisième figure l'origine marine ( $Na^+$ ,  $Cl^-$ ) qui affecte la nappe dans la partie avale auprès de la mer, associant avec les éléments azotés ( $NO_2^-$ ,  $NO_3^-$ ) le long des oueds qui sont le résultat de l'utilisation intensive des engrais et fertilisant agricole.

## V. 8. Conclusion

La représentation graphique et la cartographie du chimisme des eaux analysées, montre que les concentrations des ions majeurs reflètent l'environnement géologique. Les eaux salifères présentant un faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien, caractérisent la quasi-totalité des point d'eau, issue des eaux salifères (charge minérale élevée), qui caractérise tous les puits captants les eaux de la nappe superficielle, ceci est du probablement à l'effet de l'évaporation dans les zones où le niveau statique de la nappe aquifère est peu profond.

Les eaux carbonatées, représentées par un faciès bicarbonaté calcique et magnésien, caractérisent les eaux superficielles des oueds et les eaux de la nappe profonde, ce qui confirme que les apports de ces deux éléments sont liés à la dissolution des évaporites et les formations dolomitiques gréseuses qui affleurent dans la bordure Sud et Sud Ouest de la nappe (le grès et l'argile du numidien dans les monts de la Chaffia).

La configuration hydrogéochimique des systèmes aquifères est compliquée par les origines hétérogènes ainsi que les mélanges des eaux, Les résultats ont montré que la minéralisation totale des eaux souterraines de la zone d'étude augmente généralement de l'amont vers l'aval et du Sud Ouest vers le Nord Est. Cette évolution permet de confirmer le rôle important du temps de séjour des eaux au sein du réservoir favorisant la mise en solution de certains minéraux et par conséquent l'accroissement de la salinité.

En outre, plusieurs phénomènes secondaires ont été mis en évidence comme le processus d'échanges de base, présent en particulier dans les niveaux profonds, et joue dans les deux sens (Na/Ca ou Ca/Na), le remplacement du sodium par le calcium, sur les surfaces chargées des argiles, est sans doute favorisé par les fortes concentrations en Ca liées à la dissolution du gypse. Localement, en particulier dans les niveaux de la nappe superficielle un apport de cations est également possible du fait de l'hydrolyse des argiles.

Les autres processus de dissolution/précipitation des minéraux carbonatés (calcite et dolomite) sont généralement à l'origine de la variation des concentrations des cations des eaux.

En plus de ces processus naturels de la minéralisation, la pollution d'origine anthropique liée aux pratiques agricoles mal contrôlées, se traduisent par des concentrations en nitrate, parfois très élevées. Elle peut également jouer, localement, un rôle significatif dans l'apport d'autres éléments tels que les sulfates dans les eaux souterraines du périmètre.

L'apport de la salinité marine et la dissolution de l'halite contribuerait à la salinisation des eaux souterraines. Ceci est en accord avec l'état de sous-saturation des eaux vis-à-vis ce minéral.

L'étude statistique (ACP et AHC) confirme les résultats obtenus par l'approche hydrochimique.

*CHAP. VI*

---

**RETOUR DES EAUX D'IRRIGATION A LA NAPPE**

#### IV. 1.Introduction

Les activités anthropiques et particulièrement agricoles ont tendance à se développer de préférence à proximité des cours d'eau et mieux encore là où le plan d'eau est facile à atteindre. La plaine d'Annaba El Tarf, constitue un secteur privilégié en activité agricole, caractérisée par des niveaux piézométriques très proches de ceux d'un sol généralement très fertile. Sur l'ensemble de la plaine, plusieurs modes d'irrigation sont pratiqués dont le plus utilisé est le gravitaire, Cette utilisation engendre des pertes appréciables d'eau pompée et une pollution des eaux souterraines par les retours d'eau d'irrigation concentrée par évaporation et lessivage (Rouabhia, 2006). L'irrigation par goutte à goutte est rarement utilisée pour les cultures arboricoles. Ces eaux de retour vers la nappe transitent à travers des sols agricoles et une zone non saturée riches en sels. Ces derniers proviennent de sources différentes :

- Fertilisants agricoles.
- Eau d'irrigation qui est une eau souterraine à salinité parfois importante.
- Des éléments chimiques (chlorures, nitrates,...) sont apportés par l'eau dans le sol à chaque irrigation et leur concentration augmente après chaque cycle culturel et après chaque année.
- Quantité des sels non utilisée par les plantes et qui augmente chaque année.
- Concentration des solutions de la zone non saturée par évaporation lors des périodes

Où le sol est nu.

Ces sels d'origines diverses sont lessivés par les eaux d'irrigation qui sont déjà chargées en éléments chimiques et entraînées vers la nappe, La ré-infiltration des eaux d'irrigation constitue une source potentielle de dégradation de la qualité des eaux souterraines, principalement dans les secteurs où la nappe circule à de faibles profondeurs de la surface du sol.

L'intensité des pratiques agricoles et la mise en place de nombreux systèmes d'irrigation ont provoqué un impact sur la qualité des eaux souterraines, notamment celles de retour vers la nappe après irrigation. Il est connu que les sels minéraux contenus dans l'eau ont des effets sur le sol et les plantes. Les sels peuvent perturber le développement physique des plantes. Du fait de l'absorption de l'eau, on peut observer des effets sur les processus osmotiques, ou du point de vue chimique par des réactions métaboliques, telles que celles causées par les constituants toxiques.

En plus, les sels causent des changements dans la structure du sol (sur sa perméabilité et son aération), affectant directement le développement de la plante (Person, 1978).

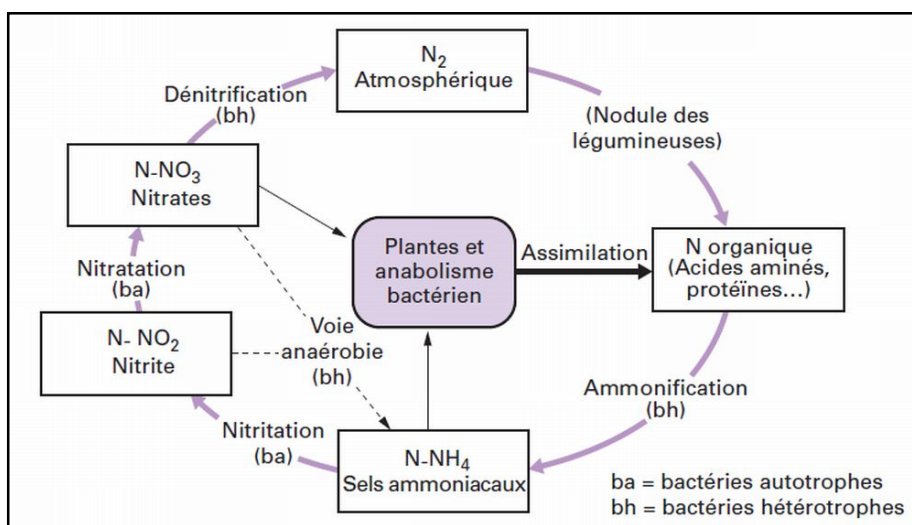
#### IV. 2. Le cycle de l'azote

Le cycle de l'azote est un cycle biogéochimique qui correspond à l'ensemble des échanges d'azote sur la planète. Le diazote est le plus abondant des gaz atmosphériques (l'air contient 78% de ce gaz). L'azote est essentiel au fonctionnement des êtres vivants. Il sert notamment à fabriquer des protéines et à produire les bases azotées présentes dans l'ADN. Il ne peut toutefois pas être assimilé directement sous cette forme par la majorité des vivants. Ce sont des bactéries qui transforment l'azote de l'atmosphère en une forme assimilable par les autres organismes vivants. C'est grâce à son cycle biogéochimique que l'azote peut passer d'une forme à une autre.

Il est à noter que les processus du cycle de l'azote se déroulent autant dans la lithosphère que dans l'hydrosphère.

Les principaux processus qui se déroulent lors du cycle de l'azote sont les suivants:

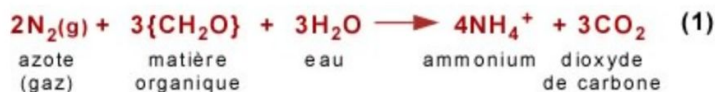
- La fixation de l'azote
- La nitrification
- L'absorption d'azote par les végétaux et les animaux
- La décomposition des déchets
- La dénitrification



**Fig.63. Le cycle de l'azote** (<https://www.suezwaterhandbook.fr/eau-et-generalites/quelles-eaux-a-traiter-pourquoi/les-eaux-naturelles/cycle-de-l-azote>).

### IV. 2.1. La fixation de l'azote

Certaines bactéries, vivant dans le sol ou dans l'eau, captent l'azote atmosphérique et le transforment en azote utilisable par les plantes et les animaux, soit en ammoniac ( $\text{NH}_3$ ). Une portion de l'ammoniac est utilisée par les végétaux et les animaux, alors qu'une autre portion réagit avec de l'hydrogène pour former de l'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) Réaction(1). Parmi les bactéries capables de réaliser la fixation de l'azote, on retrouve des cyanobactéries et certaines bactéries, comme celles du genre Rhizobium, vivant en symbiose avec des plantes (entre autres des légumineuses).



Dans les sols où le pH est élevé, l'ammonium se transforme en ammoniac gazeux (2):



### IV. 2.2. La nitrification

Des bactéries oxydent l'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) pour former des nitrites ( $\text{NO}_2^-$ ) et d'autres bactéries oxydent les nitrites ( $\text{NO}_2^-$ ) pour former des nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ). Ce sont deux réactions d'oxydation (3,4et 5).



La vitesse de formation des nitrates dépend de nombreux paramètres dont les plus importants sont la température, la disponibilité de carbone et d'oxygène, et l'humidité. On notera que la présence d'agents réducteurs peut inhiber la nitrification. Avec des niveaux élevés d'azote et d'oxygène, la formation des nitrates atteindrait des valeurs caractéristiques comprises en 40 et 120 kg d'azote par hectare et par an.

### IV. 2.3. L'absorption d'azote par les végétaux et les animaux

Les végétaux sont capables, grâce à leurs racines, d'absorber le nitrate et l'ammonium présent dans le sol ou dans l'eau. Les végétaux représentent la seule source primaire d'azote disponible pour les animaux herbivores. C'est en mangeant les végétaux que les animaux herbivores ingèrent leur azote. L'azote suit ensuite la chaîne alimentaire. Les carnivores ingèrent leur azote en se nourrissant des animaux herbivores ou d'autres animaux.

### IV. 2.4. La décomposition des déchets

On retrouve de l'azote dans les déchets végétaux et animaux (urine, selles, organismes morts, etc.). Certains champignons et bactéries décomposent ces substances et produisent alors de l'ammoniac. Cet ammoniac va pouvoir se dissoudre pour former de l'ammonium.

### IV. 2.5. La dénitrification

Les bactéries dites dénitrifiantes transforment les nitrates en diazote. Le diazote retourne alors dans l'atmosphère. Cette réaction chimique produit aussi du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et de l'oxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) (6).



## IV. 3. Les facteurs qui peuvent modifier le cycle de l'azote

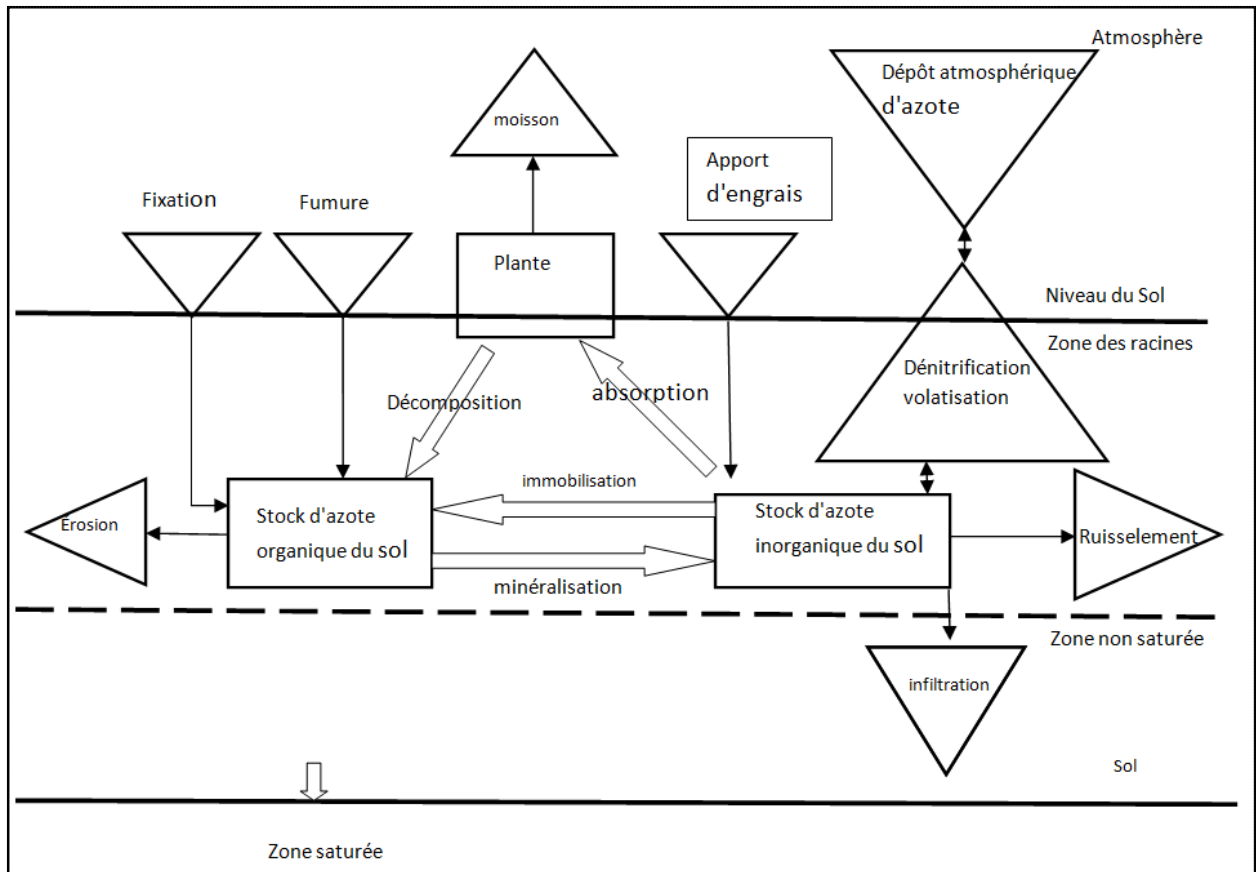
Parmi les facteurs naturels qui peuvent modifier le cycle de l'azote, on retrouve, entre autres, la température, le taux d'humidité et le pH. Cependant, avec les explications données ci-dessus, on comprendra que l'activité humaine est malheureusement le facteur qui a le plus d'impact sur la modification du cycle de l'azote. Les engrais que l'on étend sont riches en ammoniac (NH<sub>3</sub>), en ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) et en nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Par le lessivage, ce surplus de composés azotés se retrouve dans les cours d'eau.

L'utilisation des combustibles fossiles dans les moteurs et les centrales thermiques transforment l'azote en oxyde d'azote. La dénitrification est alors augmentée. Or, la dénitrification émet aussi dans l'atmosphère une faible quantité d'oxyde d'azote (N<sub>2</sub>O). L'oxyde d'azote est un gaz à effet de serre qui contribue à détruire la couche d'ozone dans la stratosphère. Il faut savoir qu'une molécule de N<sub>2</sub>O est 200 fois plus efficace qu'une molécule de CO<sub>2</sub> pour créer un effet de serre.

#### IV. 4. Lessivage et retours des eaux d'irrigation à la nappe

Le lessivage correspond à la perte des nitrates qui s'infiltrent dans les profils de sols emportés par l'eau d'irrigation et des pluies. L'azote voyage en majeure partie sous forme dissoute dans l'eau jusqu'aux nappes souterraines puis vers le cours d'eau (Billen et al. 2013). Les propriétés intrinsèques de l'azote font que le lessivage a un impact plus important que le ruissellement (Berrouard et al. 2001; Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ), 2010). La charge de nitrate lessivé ainsi que la concentration en  $\text{NO}_3^-$  des eaux de drainage dépend principalement de deux facteurs : la quantité de nitrate dans les sols et la quantité d'eau drainée. La quantité totale d'eau d'irrigation et l'intensité des événements pluvieux sont des facteurs importants modulant les pertes de nitrate, car l'eau de retour d'irrigation avec la précipitation sont les principaux moyens de transport des nitrates. Le lessivage des nitrates est aussi influencé par la structure et la texture du sol. En effet, le lessivage est plus important dans les sables peu structurés que dans les argiles, principalement à cause de la diminution du mouvement d'eau et du plus grand potentiel de dénitrification dans les sols argileux.

Le processus de transport et de transformation de l'azote dans le système eau-sol-plante (Fig 64.) est donc dépendant de conditions locales et saisonnières qui vont varier selon les années. Il est donc très difficile d'appliquer une fertilisation azotée de précision. Pour le faire, il faudrait être capable de prédire tous les processus du cycle de l'azote, tout au long de la saison de croissance, afin d'appliquer les bonnes doses de fertilisants en pré-semis ou en post-levé.



**Fig.64.Schéma des processus de transport et de transformation de l'azote dans le système eau-sol-plante (Géza JALANSKAI .1990)**

#### IV. 4.1.Méthodologie du travail

Le développement de l'agriculture, par la fertilisation et la protection des cultures, a introduit depuis ces dernières années divers éléments dissous dans les eaux souterraines dépassant parfois largement les normes actuelles de potabilité. L'azote est un élément essentiel aux cultures, il est même souvent appelé le «pivot de la fertilisation» du fait qu'il est l'élément nutritif le plus important pour le rendement et la croissance des cultures, Selon des estimations, près de la moitié de la population humaine du 21e siècle dépend de la fertilisation azotée pour se nourrir (Erisman et al. 2008). Dans une moindre mesure, nous rencontrons les sulfates, chlorures, sodium et potassium qui font partie du cortège d'éléments pouvant être associés à une pollution diffuse d'origine agricole.

Pour mettre en évidence les retours d'eau d'irrigation à la nappe dans le périmètre irrigué de Bounamoussa nous nous sommes intéressés aux analyses des éléments azotés et

phosphatés qui sont les principaux constituants des fertilisants agricole tel que (nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ), nitrite ( $\text{NO}_2^-$ ), ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) et phosphate ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), en établissant les cartes de distribution spatiale de leurs concentrations donnant ainsi une évaluation sur le degré de contamination des eaux de surface et les eaux de la nappe, toute en comparant les résultats obtenus avec les normes directrices de l'OMS, ensuite comme les nitrates étant le meilleur indicateur de pollution anthropique des eaux souterraines, nous avons cherché à comparer les teneurs en sulfates, chlorures, sodium et potassium en fonction de cet indicateur pour essayer d'en déduire leurs origines (naturelle et/ou anthropiques).

Dans le second contexte nous essayons de faire le point sur l'utilisation à des fins agricoles les eaux de la région en utilisant les méthodes de Richards (1954) et Wilcox (1948), qui déterminent l'aptitude des eaux du périmètre à l'irrigation en fonction de leur composition en sels.

#### IV. 4.2. Variations spatiale des concentrations de nitrate, nitrite et ammonium

##### IV. 4.2.1. Les nitrates $\text{NO}_3^-$

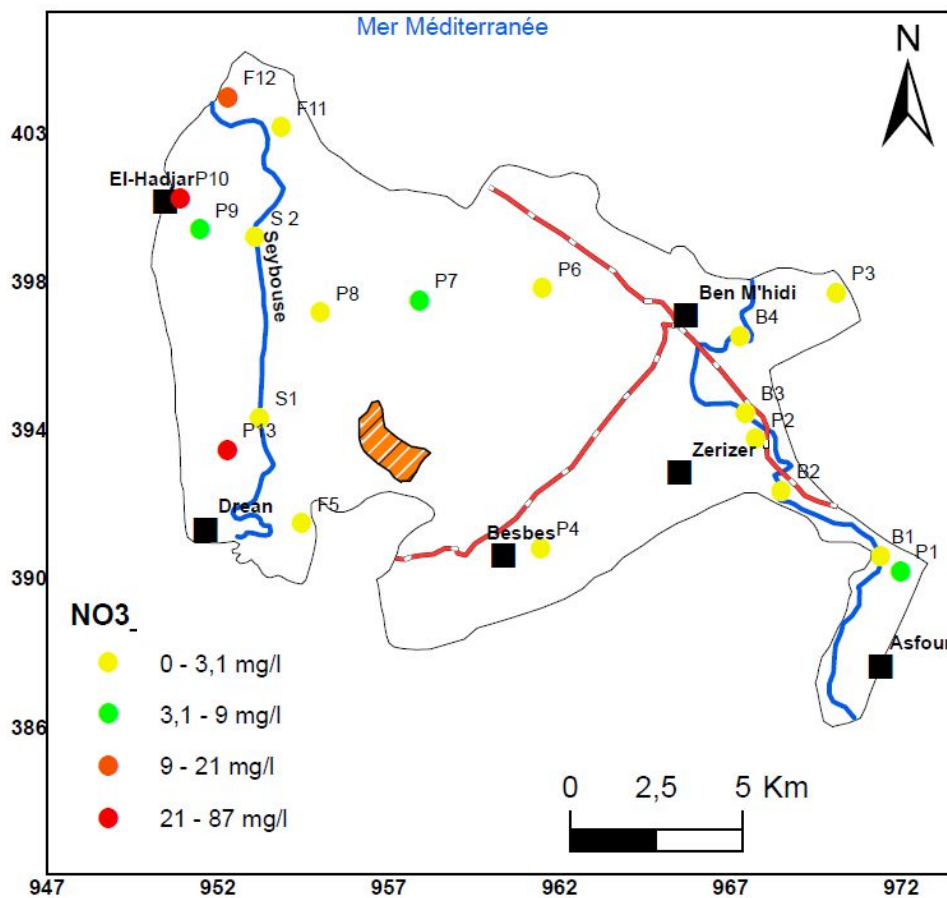


Fig.65. Répartition des teneurs en nitrates ( $\text{NO}_3^-$ )

Avec une grande solubilité, les nitrates représentent la forme de l'azote la plus oxygénée, Les teneurs maximales dépassant la norme sont observées au niveau des puits P13 (La nappe superficielle), F12et F10(les eaux de la nappe profonde) avec 87 mg/l, 61 mg/l et 21mg/l respectivement. Dans le centre du périmètre le Puits P7 contient 9mg/l.

Par contre les concentrations ne dépassent pas 2mg/l dans les eaux superficielles et les autres parties du périmètre.

Notre zone d'étude, du faite de sa vocation agricole, La présence des nitrates infiltrée vers les eaux souterraines est fort probable liée à l'utilisation intensive des engrais et fertilisant agricoles.

#### IV. 4.2.2.L'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) :

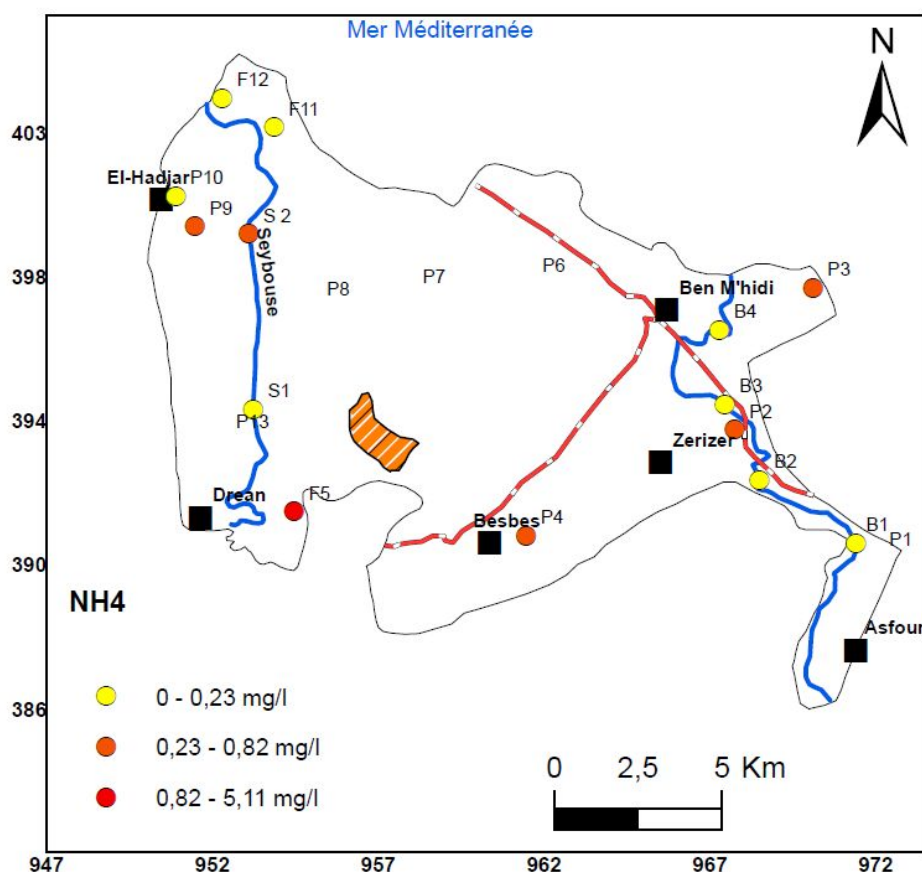
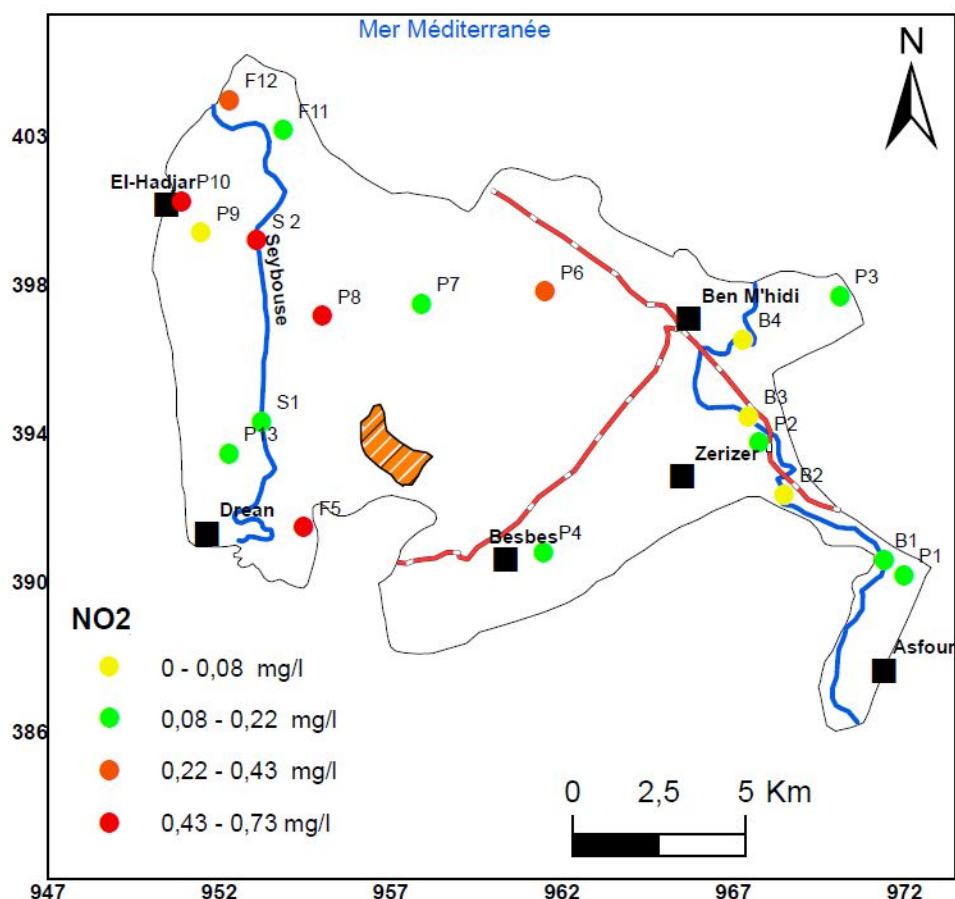


Fig.66. Répartition des teneurs en Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ )

L'ammonium est la forme d'azote la plus toxique, les concentrations élevées sont observées aux prés des agglomérations Dreaan, Besbes, El-Hadjar et aussi dans les eaux de surface des oueds, les concentrations dépassent parfois 2mg/l.

Le maximum est observé dans les eaux de surface d'oued Seybouse dans sa partie aval (5.11mg/l) dépassant ainsi la norme directrice de l'OMS. Ces concentrations excessives dans l'eau sont liées soit aux rejets urbains et industriels (la Seybouse dans sa partie aval représente le milieu récepteur de tous les rejets urbains et industriels), soit à la réduction des formes azotées (nitrates et nitrites) en conditions réduites.

#### IV. 4.2.3. Les nitrites $\text{NO}_2^-$

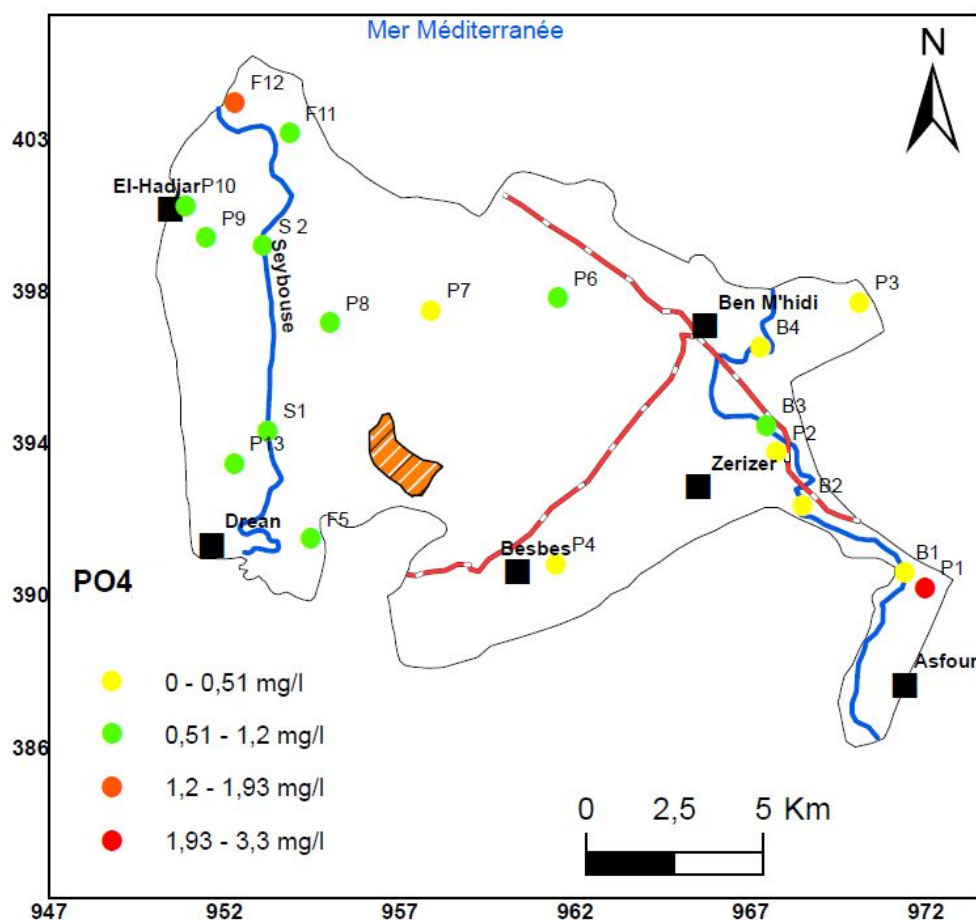


**Fig.67. Répartition des teneurs en nitrites  $\text{NO}_2^-$**

Une forme toxique, elle représente la forme du passage entre les nitrates et l'ammonium, la répartition des teneurs enregistrée est identique à celle de l'ammonium, les valeurs les plus élevées sont observées à l'aval du oued Seybouse et à proximité d'El-Hadjar avec (0,73 mg/l dans l'oued pour les eaux de surface et 0.66 mg/l pour les eaux de la nappe). Ces valeurs dépassent largement la norme, Elles sont dues à l'effet de l'oxydation de la forme ammonium.

Les eaux d'oued Bounamoussa et les eaux de la nappe dans cette partie sud ouest contiennent des valeurs qui ne dépassent plus 0.2mg/l.

#### IV. 4.2.4. Phosphate ( $\text{PO}_4^{3-}$ )



**Fig.68. Répartition des teneurs en Phosphates ( $\text{PO}_4^{3-}$ )**

Dans les eaux souterraines, les concentrations oscillent entre 0.5 et 1.2 mg/l, Tandis que dans les eaux de la nappe et les eaux superficielles les valeurs sont minimums et ne dépassent pas 1.2mg/l à l'exception du P1 dans la plaine d' El -Asfour où la concentration est au maximum 3.3mg/l, en générale tous les points d'eaux ne présentent aucun danger car les teneurs sont inférieures à la norme préconisée, La présence du phosphate est liée à l'effet des rejets urbains et à l'effet des eaux stagnantes dans les oueds.

IV. 4.3. Corrélation sulfates, chlorures et sodium, potassium et phosphate en fonction de l'indicateur (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)

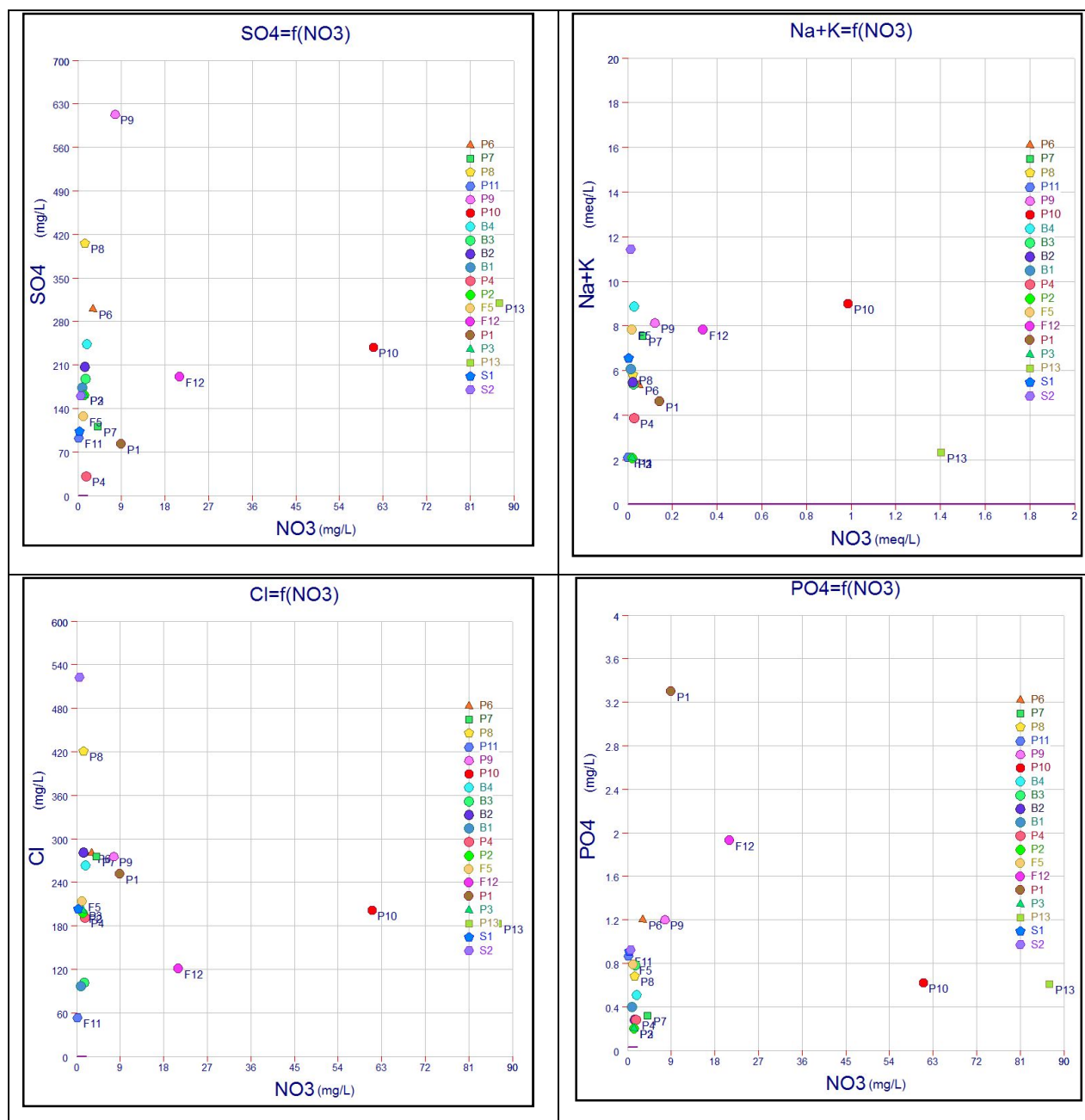


Figure.69. Corrélation sulfates, chlorures et sodium, potassium et phosphate en fonction de l'indicateur (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)

Les sulfates sont les composés les plus fréquemment utilisés sur les cultures fruitières pour la protection (lutte contre l'oïdium) ou avec les engrais (les sulfates d'ammoniaque 21% de N et 60% de SO<sub>4</sub> et sulfates de potassium 50% de K<sub>2</sub>O et 45% de SO<sub>4</sub>, soit une utilisation directe des fumures des animaux). Sur la figure 69, les sulfates et les nitrates ne montrent pas

de corrélation évidente, excepté peut être pour quelques points (P13, P10, F12, P1, P4) entre des concentrations de 60 à 170 mg/l pour les sulfates. Dans la mesure où ces points correspondent à des puits situés à côté des zones irriguées avec des vergers de pommiers, où l'arboriculture domine largement, on peut supposer que localement une partie des sulfates est d'origine anthropique et augmente significativement les teneurs.

Toutefois sur l'ensemble du système cet apport s'avère négligeable par rapport à l'incidence des évaporites comme l'indique un coefficient de corrélation  $NO_3/SO_4$  de 0,21.

Globalement les apports anthropiques en Cl et Na+K paraissent négligeables comparés aux apports naturels à l'exception de quelques points qui sont alignés et corrélés entre eux de la plaine d'El-Hadjar (P10, F11, F12) pour les chlorures et (P4, P1, F12) pour Na+K cela indique que dans ces endroits il y a un apport anthropique (l'effet de l'agriculture) qui contribue à la minéralisation.

Quant aux phosphates, il est toujours pareil qu'il n'y a pas de bonne corrélation.

#### IV. 4.4. Diagramme ammonium-nitrate

L'application de diagramme ammonium nitrate aux eaux du périmètre a permis de voir l'équilibre entre les nitrates et l'ammonium (Fig.70).

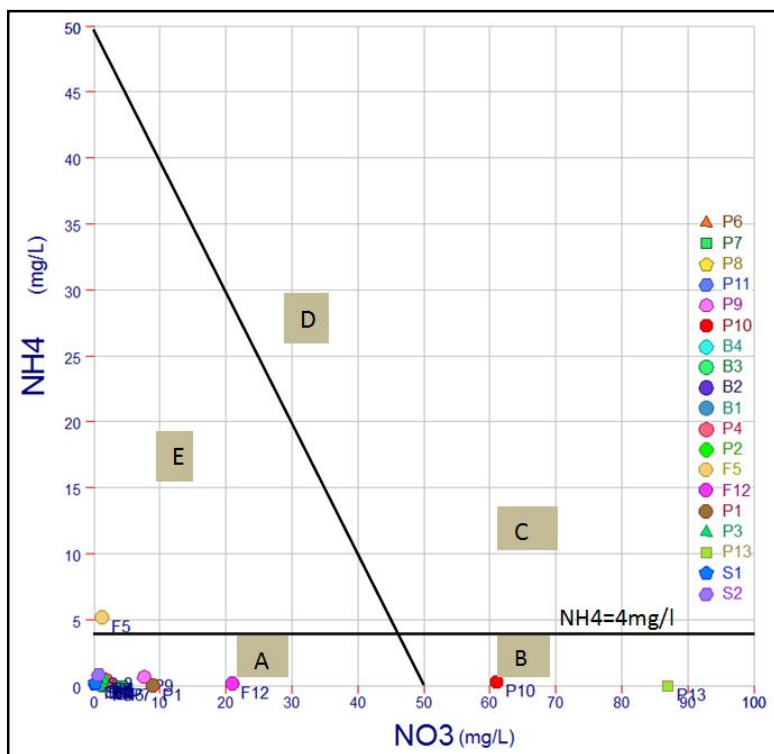


Figure.70. Diagramme d'équilibre nitrate Ammonium : application aux eaux du périmètre irrigué de Bounamoussa

**Légende :**

**A:** Assimilation et disparition d'ammonium, **B:** Nitrification, **C:** Afflux de nitrate  
**D:** Production de  $\text{NH}_4$ , **E:** Dénitrification

Le présent diagramme (Fig.70) contient cinq classes. Le rapport des échantillons analysés montre que ces derniers appartiennent à la classe A, caractérisée par une activité bactérienne conduisant à l'assimilation de l'ammonium.

Deux points P10 et P13 dans la plaine d'El-Hadjar appartiennent à la classe B (Nitrification), cette opération exige l'oxygène, ce dernier est de l'ordre de 2 mg/l et 1.20 mg/l respectivement pour les deux endroits.

Notons que la valeur seuil de 4 mg/l, conduisant au stade de dénitrification qui est atteinte dans les eaux de la nappe dans le forage F5 caractérisées par la présence de la matière organique et des valeurs d'oxygène dissous élevées (3.6mg/l) pour achever ce processus.

**IV. 5. Aptitude des eaux à l'irrigation****IV. 5.1. Risque de sodicité et de salinité**

La salinité peut entraîner des effets nocifs conséquents en raison de la fixation du sodium des sels de chlorures de sodium par les colloïdes du sol. Le sodium exerce alors une action néfaste sur la végétation, de façon indirecte, en dégradant les propriétés physiques du sol. De part cette action, les sols deviennent compacts et asphyxiants pour les plantes (Todd, 1980). Lorsque la concentration des ions  $\text{Na}^+$  à l'état soluble dans le sol est importante, ces ions remplacent fréquemment les cations  $\text{Ca}^{2+}$  dans le complexe absorbant. Une eau chargée en sels peut provoquer cet effet. Le risque est déterminé à partir de la valeur du sodium absorbable, « Sodium Absorption Ratio : SAR ». Pour une même conductivité, le risque est d'autant plus grand que le coefficient est plus élevé.

L'aptitude de l'eau à l'irrigation peut être jugée non seulement à partir de la concentration totale en sels, mais aussi par le type de sels et les ions qui la constituent. Il est donc impératif d'étudier les paramètres qui définissent les caractéristiques des eaux destinées à l'irrigation.

## IV. 5.2. Risque d'alcalinité et dureté

### IV. 5.2.1. Alcalinité

L'alcalinité de l'eau se définit comme sa capacité à absorber des ions  $H^+$  libérés par un acide fort durant un titrage jusqu'à un point déterminé (point d'équivalence). Cette caractéristique est reliée à la dureté de l'eau, cette dernière souvent appelée Le titre hydrotimétrique qui est l'indicateur de la minéralisation de l'eau. Il est dû uniquement aux ions calcium et magnésium, On l'exprime en général en milligrammes d'équivalents de carbonate de calcium par litre.

### IV. 5.2.2. Eau dure : Calcium et magnésium

La dureté d'une eau correspond à la présence de sels de calcium et, dans une moindre mesure, des sels de magnésium (strontium, et baryum). On l'exprime en général en milligrammes d'équivalents de carbonate de calcium par litre.

Ce paramètre ne fait pas l'objet de normes strictes. Il varie le plus souvent entre 10mg/l et 500 mg/l. La valeur de 100 mg/l est couramment atteinte. Avec l'intervention d'autres facteurs (pH, alcalinité), une dureté de plus de 200 mg/l peut entraîner l'entartrage des canalisations et des appareils de chauffage. A l'inverse, une dureté trop faible (inférieure à 100 mg/l) ne permet pas la formation d'une couche carbonatée protégeant les canalisations de certains risques de corrosion. Cependant, on peut considérer qu'une eau ayant une teneur inférieure à 75 mg/l de  $CaCO_3$  ou à 30 mg/l de calcium est une eau douce et qu'au-dessus, il s'agit d'une eau dure (J. Rodier et al. 1996).

**Tableau.29. Degré relatif de dureté de l'eau selon la quantité de carbonate de calcium**

Source : [www.asgq.org/documents/pdf/.../LaQualiteDelEaudIrrigation](http://www.asgq.org/documents/pdf/.../LaQualiteDelEaudIrrigation).

Dureté (ppm $CaCO_3$ )	Degré relatif de dureté
0-50	Très douce
50-100	douce
100-200	Modérément douce
200-300	dure
300 et plus	Très dure

### IV. 5.3. Les normes de qualité des eaux destinées à l'irrigation

Il arrive que, devant la rareté des ressources, les exploitants agricoles sont amenés à se rabattre sur différentes sources d'eaux pour l'irrigation de leurs cultures. Dans notre site d'étude, ils utilisent des eaux de mauvaises qualités, pompées directement des cours d'eau et des puits.

Cinq principaux critères pour évaluer la qualité de l'eau d'irrigation ont été dégagés (Couture, 2006 a).

- **Salinité** : contenu total en sels solubles.
- **PH**: de l'eau d'irrigation
- **Sodium**: proportion relative des cations sodium ( $\text{Na}^+$ ) par rapport aux autres.
- **Alcalinité et dureté** : concentration d'anions carbonate ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) et bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ) en relation avec la concentration en calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) et en magnésium ( $\text{Mg}^{+2}$ ).
- **Concentration en éléments qui peuvent être toxiques.**

Une eau est conforme à l'irrigation est une eau dont les caractéristiques respectent les valeurs limites imposées par des textes de lois et inscrites dans des tableaux de normes.

L'exemple du tableau 30, donne les normes de qualité des eaux destinées à l'irrigation (Maynard et Hochmuth, 1997). Les normes varient selon les pays, mais dans la majorité des pays on fait référence à quelques exceptions aux six critères de qualité suscités.

**Tableau.30. Barème de qualité pour l'eau d'irrigation**

(Source : Maynard et Hochmuth, 1997).

Type de problèmes	Sévérité du problème		
	Aucune	Légère	Élevée
<b>Salinité</b>			
<b>Conductivité (dS/m)</b>	<0.75	0.75-3.0	>3
<b>Matières dissoutes totales (mg/litre)</b>	<700	700-2000	>2000
<b>RAS (Ration d'Absorption du Sodium)</b>	<3	3-9	>9
<b>Alcalinité ou dureté (équivalent en <math>\text{CaCO}_3</math>)</b>	80-120	-	>200
<b>pH (risque de collematage)</b>	<7.0	7-8	>8.0
<b>Fe mg/l (risque de collematage)</b>	<0.2	0.2-1.5	>1.5
<b>Manganèse mg/l (risque de collematage)</b>	<0.1	0.1-1.5	>1.5

#### IV. 5.4. Calcul des paramètres des eaux à usage agricole

Les principaux facteurs qui peuvent dégrader la qualité des eaux destinées à l'irrigation se résument donc à la concentration en sels dissous, exprimés par le résidu sec ou la conductivité électrique, la salinité potentielle (**SP**), la concentration relative en sodium et la quantité des éléments toxiques (Bore et Chlore) présents dans l'eau. Lorsque les sels sont concentrés dans les solutions du sol, chacun des facteurs dégradant la qualité a un effet sur la croissance de la plante et par conséquent sur sa production d'une part, et sur les propriétés physiques et chimiques d'autre part.

L'effet primordial de la salinité totale est de réduire la croissance des cultures et leur production. Elle est généralement exprimée par la minéralisation globale ou par la conductivité électrique (**CE**). Cette dernière est liée au résidu sec (**RS**) et à la pression osmotique  $\Pi$  par les formules suivantes :

$$RS \text{ (mg / l)} = 0,7CE \text{ (}\mu\text{S/cm)}$$

$$\Pi \text{ (atm.)} = 0,00036 CE$$

La salinité du sol est constituée par tous les sels de chlorures de sodium et des sulfates de magnésium, par conséquent la salinité potentielle (**SP**) pourrait être estimée par (Doneen, 1961

$$SP = Cl + 1/2 SO_4^{-2}$$

Où tous les termes sont exprimés en milliéquivalent par litre.

Pour le sodium, il a été reconnu que sa concentration dans les eaux d'irrigation a une influence sur la perméabilité et l'infiltration des sols. La présence de  $Na^+$  a des effets néfastes sur la structure des sols par défloculation de l'argile.

Parmi les échanges ioniques qui existent dans le sol, est celui relatif à l'échange Sodium-Calcium, cet indice est important en raison de son action sur la stabilité des sols argileux en culture irriguée (Maynard et Hochmuth, 1997), (Todd K., 1980).

L'eau destinée pour l'irrigation, riche en sodium et pauvre en calcium, s'appauvrira en sodium par échange ionique au contact d'un sol argileux. La concentration en sodium de l'argile augmentera jusqu'à la saturation. Cette saturation du milieu argileux peut avoir une incidence négative sur la stabilité du sol (Banton O., et al. 1999, Bakalowicz M., 2013).

Le coefficient d'absorption du sodium (**S.A.R**) s'obtient par la formule suivante :

$$SAR = \frac{rNa}{\sqrt{\frac{rNa + rMg}{2}}}$$

Où rNa, rCa et rMg sont des concentrations exprimées en méq/l

Les valeurs du SAR et des conductivités sont placées sur le diagramme de classification des eaux d'irrigation (Fig.71 et 72) qui comporte les subdivisions suivantes :

- SAR < 10 : Eaux utilisées avec peu de danger d'alcalinisation.
- 10 < SAR < 18 : Eaux utilisées avec un danger appréciable d'alcalinisation.
- 18 < SAR < 26 : Eaux utilisées peuvent provoquer un danger d'alcalinisation.
- SAR > 26 : Eaux présentant un danger d'alcalinisation très fort.

Le pourcentage en sodium est donné par :

$$Na (\%) = 100 \times \frac{Na + K}{Ca + Mg + K + Na}$$

Le pourcentage d'échange de sodium (**ESP**) est:

$$ESP = 100 \times \frac{(b SAR - a)}{1 + (b SAR - a)}$$

Où a = 0,0126 et b = 0,01475

Dans les formules ci-dessus, tous les éléments sont exprimés en milliéquivalent par litre. De plus, la perméabilité du sol dépend de plusieurs autres facteurs tels que la concentration totale de l'eau, la quantité de sodium, la concentration en bicarbonates et la nature du sol lui-même. Les trois premiers termes ont été combinés dans une seule formule donnant ce que l'on appelle l'indice de perméabilité (**IP**) défini par (Doneen, 1961):

$$IP(\%) = 100 \times \frac{Na + \sqrt{HCO}}{Ca + Mg + Na}$$

Où tous les termes sont en milliéquivalent par litre.

#### IV. 5.4.1. Interprétation des résultats

Les facteurs les plus importants, intervenant dans la qualité de l'eau pour l'irrigation sont calculés pour mieux définir l'aptitude des eaux de la région d'étude à l'irrigation. Le rapport des différents paramètres (tableau.31), les diagrammes (Fig.71 et 72) de Richards (1954) et Wilcox (1948), permettent une interprétation qui conduira à localiser les types

d'eau et par conséquence déterminer les mesures à prendre pour les diverses utilisations (variétés de cultures et nature du sol).

**Tableau.31.Paramètres de la qualité de l'eau d'irrigation (Octobre 2017)**

<b>Point d'eau</b>	<b>Conductivité</b>	<b>SAR</b>	<b>II (atm.)</b>	<b>Na%</b>	<b>ESP</b>	<b>IP(%)</b>	<b>SP</b>	<b>RS</b>
<b>P6</b>	3210	1.58	1.16	19.28	1.29	30.63	11.02	2247
<b>P7</b>	4320	3.40	1.56	44.02	3.96	57.32	8.91	3024
<b>P8</b>	1050	1.70	0.38	20.37	1.47	28.22	16.12	735
<b>F11</b>	3810	1.08	1.37	27.79	0.54	50.68	2.46	2667
<b>P9</b>	3680	2.31	1.32	25.77	2.37	34.01	14.15	2576
<b>P10</b>	3810	3.66	1.37	44.07	4.35	56.20	8.16	2667
<b>B4</b>	758	3.35	0.27	41.12	3.89	52.50	9.96	530.6
<b>B3</b>	558	2.30	0.20	37.96	2.35	56.39	4.80	390.6
<b>B2</b>	462	1.76	0.17	23.48	1.56	35.70	10.09	323.4
<b>B1</b>	448	2.64	0.16	39.54	2.85	56.04	4.54	313.6
<b>P4</b>	2030	1.85	0.73	34.92	1.69	51.38	5.72	1421
<b>P2</b>	9700	0.78	3.49	16.64	0.11	28.58	7.27	6790
<b>F5</b>	1960	3.21	0.71	41.79	3.68	56.96	7.34	1372
<b>F12</b>	1080	3.26	0.39	42.86	3.76	58.03	5.41	756
<b>P1</b>	1212	2.48	0.44	43.94	2.61	57.44	7.96	848.4
<b>P3</b>	9700	0.88	3.49	20.11	0.25	34.72	7.38	6790
<b>P13</b>	2020	0.92	0.73	16.69	0.32	27.73	8.40	1414
<b>S1</b>	1987	2.54	0.72	35.91	2.70	50.56	6.81	1390.9
<b>S 2</b>	2340	3.51	0.84	35.34	4.13	45.18	16.44	1638

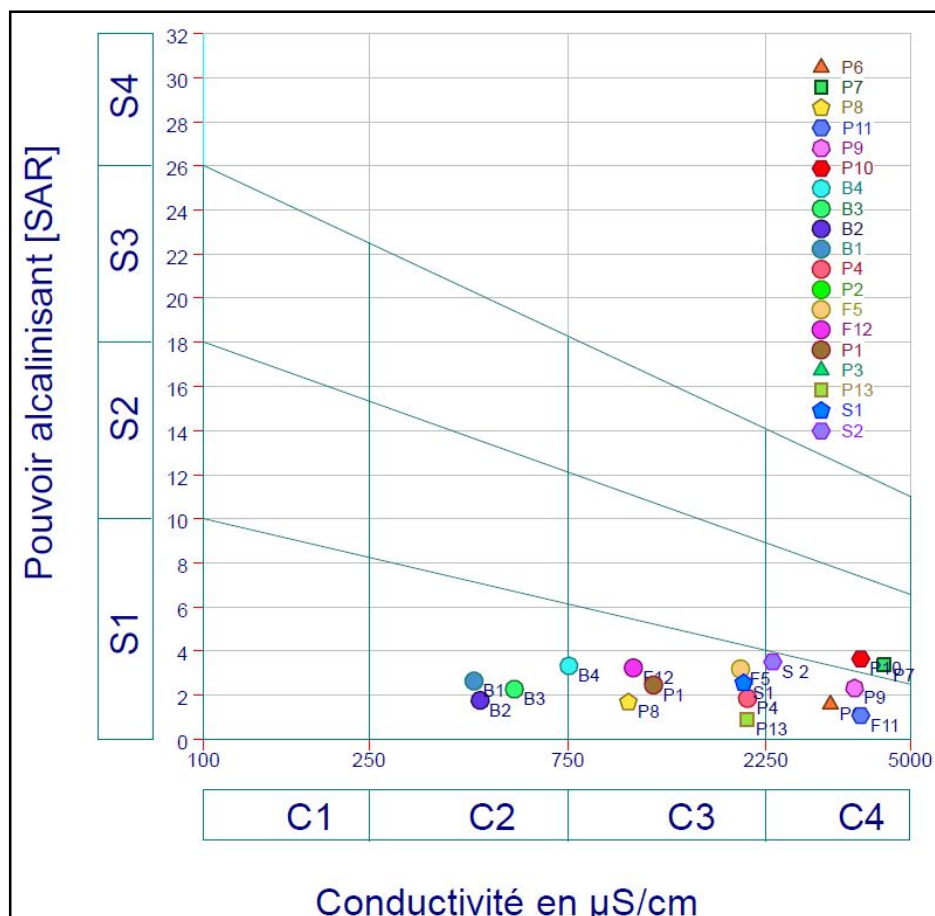


Figure.71. Diagrammes de Richards (1954). pour les eaux du périmètre Octobre, 2017.

Le diagramme de Richards montre que quatre classes apparaissent en fonction de leurs salinités exprimées par la conductivité électrique, chacune de ces classes présente ses propres caractéristiques.

À partir de cette répartition il en résulte que dans notre zone d'étude apparaissent Trois classes :

#### Classe C2S1

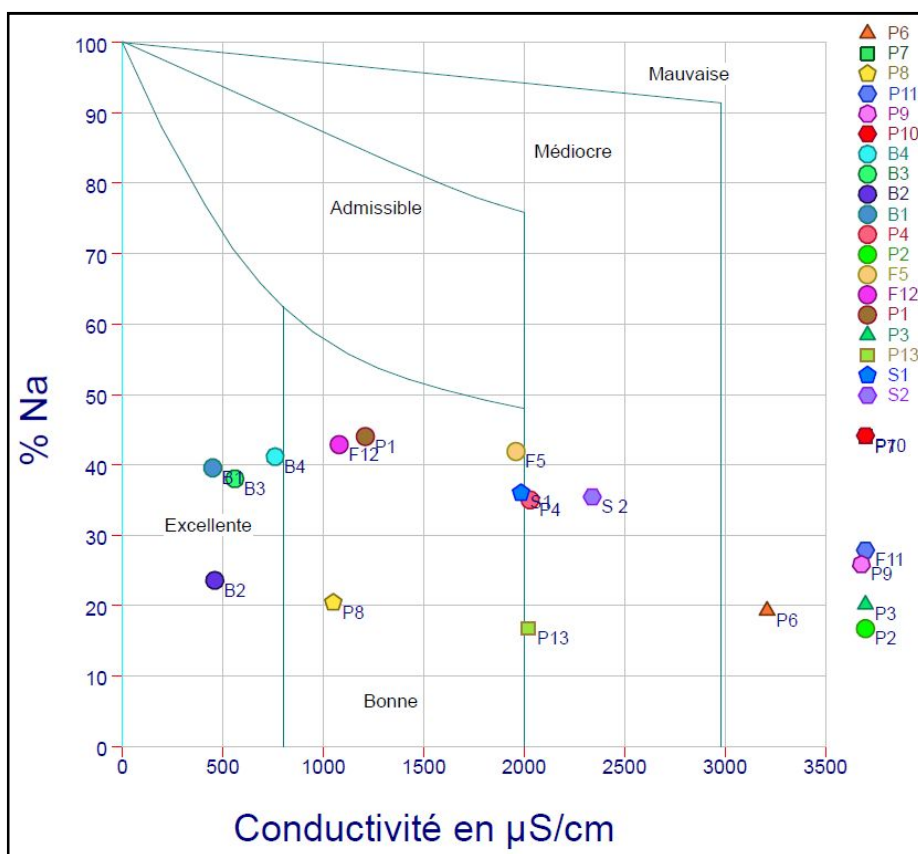
Présente 21.05% des échantillons. Cette classe caractérise les eaux de surface de oued Bounamoussa, caractérisée par une conductivité moyenne et un pouvoir d'alcalinisation faible, l'eau est bonne pour l'irrigation et pouvant être utilisée sans contrôles particuliers pour l'irrigation des plantes moyennement tolérantes aux sels, mais les eaux de cette classe peuvent engendrer des problèmes pour les sols argileux.

**Classe C3 S1**

Présente 36.84% des échantillons, Cette classe est caractérisée par une conductivité élevée et un SAR faible, alors cette eau est admissible pour l'irrigation des cultures tolérantes aux sels sur des sols bien drainées et ou l'évolution de la salinité doit être bien contrôlée. Elle se localise surtout dans les zones où le lessivage est plus au moins important. Cette classe caractérise les points (P1, P8 et F12).

**Classe C4S1 et C4S2**

Présente 42.11% des échantillons, Cette eau inutilisable, fortement minéralisée, elle est présentée par une forte salinité et une conductivité élevée. Ces eaux ne conviennent pas à l'irrigation, mais pouvant être utilisées sous certaines conditions; sols très perméables (bien drainés), bon lessivage, plantes très tolérantes aux sels. Cette classe est présentée par les points (S2, F11, P9, P10, P7, P2 et P3).



**Figure.72.** Diagrammes de Wilcox (1948).pour les eaux du périmètre Octobre, 2017.

Le Diagramme de Wilcox classe les eaux d'irrigation à partir de la variation du pourcentage du sodium en fonction de la conductivité électrique.

Les classifications des eaux d'irrigations suivant les valeurs de la conductivité sont :

- Conductivité en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  inférieure à 700, il n'y aucune restriction pour l'irrigation ;
- Conductivité variant entre 700 et 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , la restriction pour l'irrigation est légère à moyenne ;
- Conductivité supérieure à 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ , la restriction pour l'irrigation est forte.

En l'appliquant aux eaux de la région d'étude, nous remarquons que quatre classes peuvent être distinguées:

- **Excellente:** présente 21.05% des échantillons.
- **Bonne:** présente 26.31% des échantillons.
- **Médiocre:** présente 15.78% des échantillons.
- **Mauvaise:** présente 36.86% des échantillons.

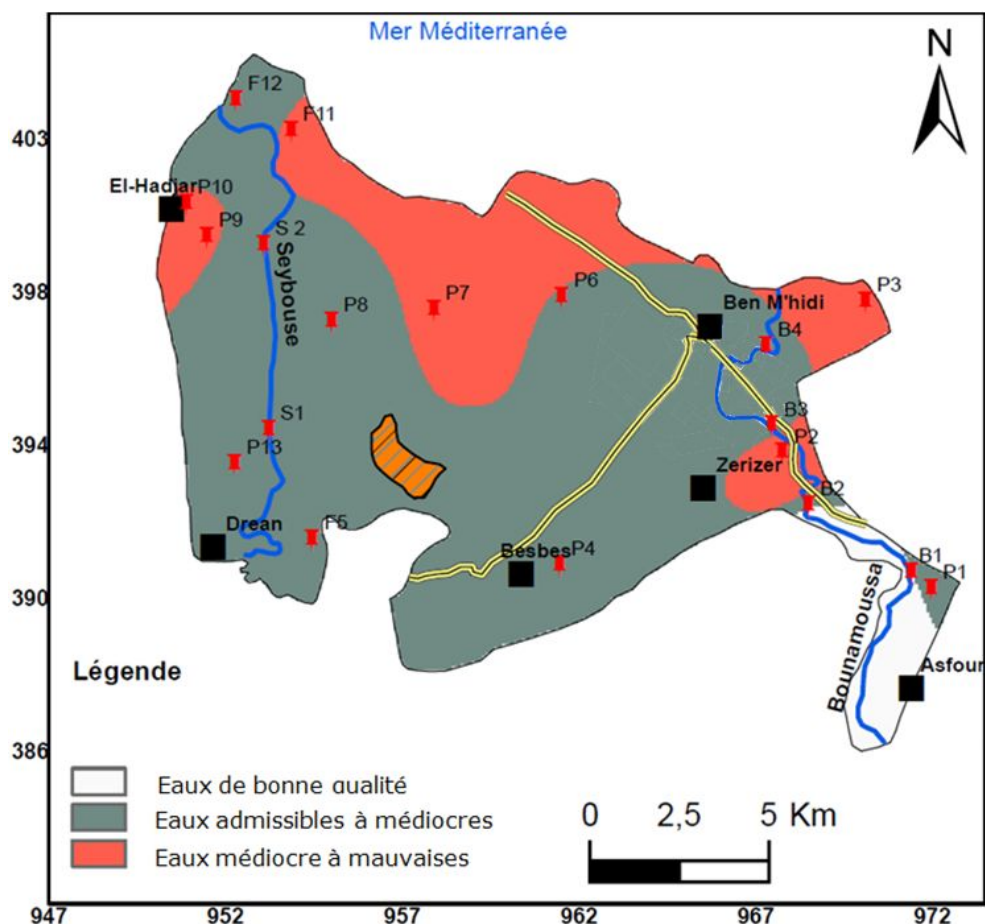
#### IV. 5.5. Cartographie de l'aptitude des eaux à l'irrigation

Pour que l'interprétation ait un sens pratique, nous avons cartographié l'aptitude de ces eaux à l'irrigation, nous présenterons les cartes qui se rapportent aux données des deux diagrammes (Richards et Wilcox).

##### IV. 5.5.1. Carte d'aptitude des eaux à l'irrigation selon le diagramme de Richard

La carte (Fig.73) a été établie selon l'interprétation du diagramme de Richard(1954). Elle confirme les constatations issues de l'interprétation des résultats du diagramme (Fig.71). Les eaux de mauvaise qualité se localisent dans la partie avale des deux oueds dans les localités (Ben m'hidi, Zrizer et El hadjar) ainsi dans le centre après l'élévation de Dagoussa (P6 et P7) et tendent vers le nord pour contaminer les eaux de la nappe (au niveau du point F11, la conductivité est très élevée), puisque les eaux en cet endroit sont salées et chargées. À l'ouest les eaux de la nappe au niveau de la plaine d'El Asfour sont de bonnes qualités.

Les résultats obtenues montrent que Les eaux de surface de Bounamoussa sont de bonnes qualités tandis que sur le reste du terrain les eaux que ce soit superficielles ou souterraines appartiennent à la classe des eaux admissible à médiocre.



**Figure.73. Carte d'aptitude (Octobre 2017) des eaux à l'irrigation pour la nappe superficielle selon le Diagramme de Richard (1948).**

#### IV. 5.5.2. Carte d'aptitude des eaux à l'irrigation selon le diagramme de Wilcox

La carte (Fig.74) fait ressortir quatre catégories d'eaux :

Les eaux de qualité admissible à médiocre occupent le sud du terrain et allant jusqu'à l'embouchure de la Seybouse. Les eaux médiocres se présentent dans la nappe juste après l'élévation de Dagoussa et s'étendent jusqu'à la mer passant par les eaux de la nappe de la plaine d'El hadjar sous l'effet de la grande minéralisation issue de la zone industrielle.

Les eaux de mauvaise qualité se localisent dans les eaux des puits P3 et P2 auprès des agglomérations de Ben M'hidi et Zrizer. Elles s'expliquent par les eaux chargées stagnantes auprès de la zone marécageuse de Mekrada et l'effet des différents rejets, tout en rappellent la contamination par la pratique agricole intense dans ces deux secteurs.

En plus et d'après les résultats obtenues, Les eaux de bonne qualité sont celles de surface issues des monts du numidien de la Chaffia d'où provient l'Oued Bounamoussa au Sud-Ouest du terrain.

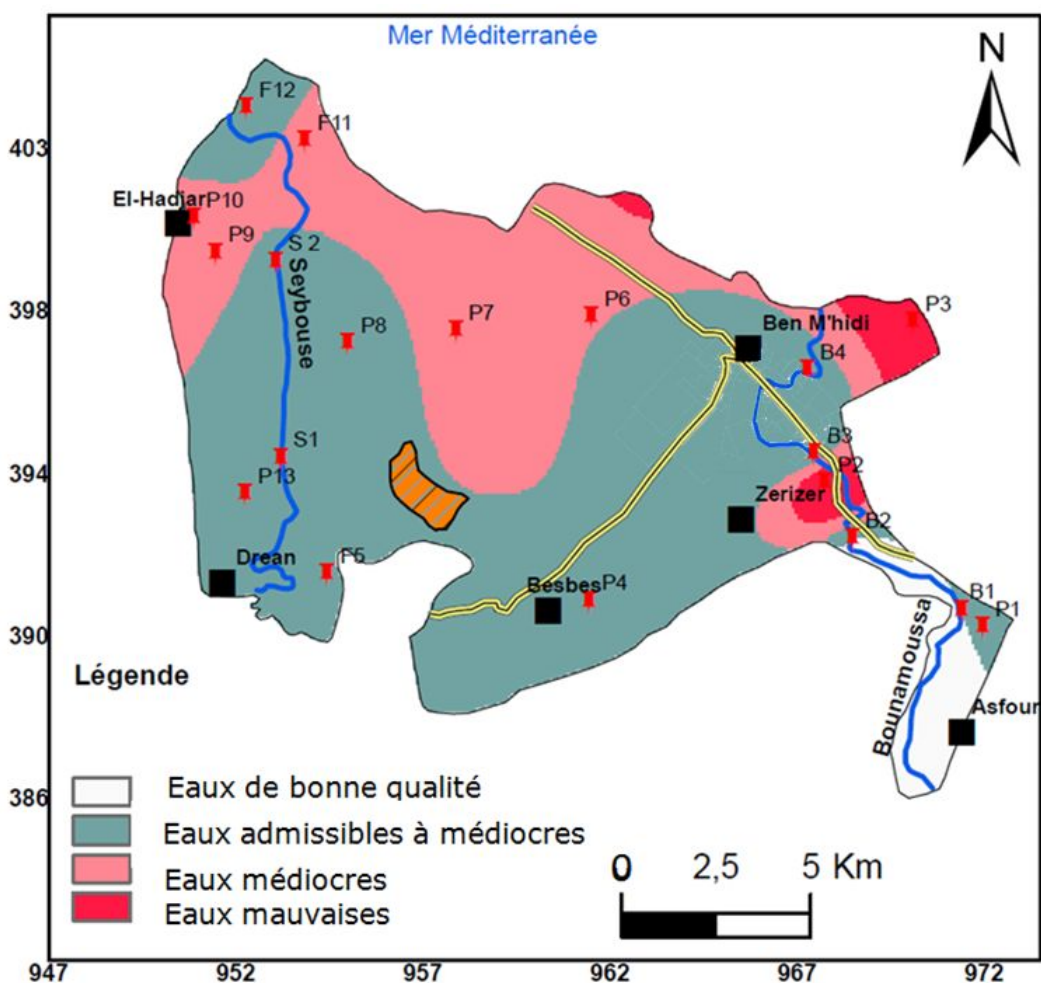


Figure.74. Carte d'aptitude (Octobre 2017) des eaux à l'irrigation pour la nappe superficielle selon le Diagramme de Wilcox (1954).

#### IV. 6. Les choix en matière de contrôle

Avant de résumer les principales stratégies de contrôle, il faut souligner qu'une fois le nitrate introduit dans l'aquifère, il y demeure. Le choix de mesures curatives est donc très restreint et aucune n'est susceptible d'agir rapidement. C'est pourquoi certains prônent "l'abandon" des aquifères déjà contaminés pour se consacrer uniquement au contrôle de qualité de l'eau utilisée, par traitement de l'eau destinée à la boisson, par mélange d'eaux, par la fourniture d'eau potable en bouteilles etc., car dans ce domaine les moyens de contrôle les plus efficaces sont très coûteux, mais nous pensons fermement que tout doit être fait pour promouvoir un environnement agricole sain et équilibré, où le ruissellement et l'infiltration des nitrates soient réduits à un niveau tel qu'ils ne puissent engendrer de nuisances aux eaux superficielles et souterraines. L'objectif ultime de la production agricole va dans le même sens d'économie des substances nutritives pour les récoltes et de non gaspillage d'engrais

coûteux. Les stratégies de contrôle existantes et reconnues peuvent être groupées en trois catégories:

#### **IV.6.1. Les mesures agricoles préventives fondées sur une meilleure utilisation des engrais et des méthodes de culture adaptées:**

##### **IV.6.1.1.L'utilisation rationnelle des engrais:**

Comporte de nombreux aspects

L'épandage de quantités d'engrais adaptées à la demande de la récolte : il existe un optimum au-delà duquel le rendement n'augmente plus en fonction des quantités d'engrais utilisées.

L'épandage fractionné de l'engrais suivant les époques où la végétation peut l'utiliser de façon optimale.

L'utilisation d'engrais à action lente : toutefois l'épandage fractionné dans le temps paraît être plus efficace en matière de réduction des pertes et d'augmentation de l'absorption de l'azote que les engrais à action lente du commerce, dont la vitesse de libération de l'azote peut ne pas correspondre aux besoins des plantes.

L'injection d'engrais sous forme liquide : s'ils pénètrent correctement jusqu'à la zone des racines, ils peuvent favoriser substantiellement l'absorption précoce d'azote par la végétation et réduire d'autant le potentiel disponible pour l'infiltration.

L'utilisation fractionnée dans le temps d'engrais organiques (fumier animal et fumure verte) couplée à celle d'engrais inorganiques augmente la capacité de rétention d'eau du sol et libère lentement les -nitrates, augmentant ainsi l'efficacité d'absorption des plantes et réduisant les pertes par infiltration.

##### **IV.6.1.2. Les méthodes de culture**

visant l'accroissement des récoltes par une utilisation optimale de l'azote disponible, sont basées sur les considérations suivantes:

La rotation des cultures, correctement planifiée, peut accroître globalement les taux d'absorption de nitrate, spécialement si des cultures hivernales permettent de maintenir une

couverture végétale toute l'année. L'alternance de cultures à racines superficielles et profondes peut aussi contribuer à «l'effet de nettoyage» des périodes de repos entre récoltes.

Les caractéristiques et l'époque des labours permettent de modifier les propriétés de la couche arable vis-à-vis de l'eau et de l'oxygène qui affectent à la fois les processus physiques de transport et les transformations biochimiques (minéralisation et absorption).

L'irrigation, pratiquée fréquemment et à petites doses permet de maintenir une humidité convenable du sol en évitant l'excès d'eau. C'est pourquoi l'irrigation en goutte à goutte -quand elle est praticable- sera la meilleure solution. L'irrigation conduite à partir de forages puisant dans un aquifère riche en nitrates peut aussi réduire à la fois les niveaux de nitrate dans la nappe et économiser des engrais.

Les techniques de culture «minimum», comme le non labourage où semences et engrais sont disposés dans des trous forés dans le sol, peuvent réduire le taux de minéralisation de l'azote, et, par-là, l'infiltration des nitrates. Elles constituent une mesure préventive particulièrement efficace quand on les substitue à l'enfouissement de la couverture verte par labourage.

Les problèmes posés ici sont relatifs à l'insuffisance des connaissances et à l'inadéquation des données pour définir avec certitude, dans un cas concret, le système le plus efficace parmi les stratégies de contrôle évoquées. Les résultats attendus (rendement accru des récoltes et réduction de l'infiltration des nitrates) peuvent ne pas être suffisamment démontrables à l'échelle de l'exploitation agricole.

#### **IV. 6.2. Les stratégies de gestion de l'eau**

Venant en complément aux stratégies adaptées à l'irrigation et au drainage, la gestion de l'eau en relation avec la contamination par les nitrates se réduit à des actions s'attaquant aux «symptômes», plutôt qu'à l'élimination des «racines» du mal, par des mesures très diversifiées telles que : la protection localisée des aires d'alimentation des aquifères utilisés pour la fourniture d'eau de boisson, le mélange d'eaux provenant de différentes sources. dont l'exploitation est réglée en fonction du cycle saisonnier des nitrates, le recours plus important aux aquifères profonds non pollués, la constitution de réserves d'approvisionnement d'eau, l'élimination des nitrates des fournitures d'eau par dénitrification biologique, échange d'ions

et osmose inverse avec toutefois le risque d'introduction d'autres polluants au cours du processus, la mise en place de systèmes séparés de distribution d'eau de différentes qualités, etc..

En tout état de cause, les stratégies à mettre en œuvre sont très coûteuses et le maintien de la qualité dans les systèmes de distribution d'eau potable sera de plus en plus dispendieux puisqu'il faut s'attendre dans le futur à de nouvelles contaminations des ressources d'eau de boisson, ne serait-ce qu'en raison de la progression des fronts de nitrates qui n'ont pas encore atteint les aquifères.

#### **IV. 6.3. Les moyens de contrôle administratifs et juridiques**

Venant à l'appui des deux stratégies précédentes, ils sont de façon générale inadéquats pour résoudre les problèmes de maîtrise des sources de pollution non ponctuelles (ou pour stimuler leur solution).

Le problème de fond réside en ce que la charge polluante diffuse ne peut être directement réglementée car il est difficile, sinon impossible, de la mesurer. Dans ces conditions, les règlements juridiques et administratifs, les incitations financières, les taxes et subventions, doivent d'abord viser les pratiques et l'infrastructure agricoles. Ceci ramène au problème, déjà évoqué, de savoir s'il est ou non possible de définir «la meilleure pratique» pour un système de culture donné. Les incertitudes qui grèvent cette définition de la meilleure pratique feront obstacle pendant longtemps encore à la mise en place de politiques de contrôle significatives.

Néanmoins beaucoup de facteurs connus peuvent servir de base à des ébauches de telles politiques. Le principe fondamental «le pollueur paie» doit être reconnu valable en toutes situations par la mise en place de systèmes de taxes suffisamment incitatifs au plan économique. L'élimination progressive des allègements fiscaux et des subventions accordés à la production et au marché des engrais peut être le point de départ raisonnable d'une politique de contrôle de la pollution par les nitrates. Mais il faut souligner immédiatement que l'autre principe fondamental du maintien et de l'accroissement des rendements cultureux doit aussi être pris en compte avec la même priorité.

En résumé, la contamination des eaux souterraines par les nitrates n'est pas une conséquence fatale de l'intensification de la production agricole puisque les intérêts de

l'agriculture et de la protection de l'environnement se rejoignent. Par contre, ce risque de contamination est très élevé puisqu'il existe et subsistera un apport extérieur important d'engrais azotés inorganiques, facilement transportables par infiltration, et que les pratiques culturales conventionnelles favorisent la minéralisation de l'azote organique du sol, produisant une quantité de nitrate du même ordre de grandeur que l'apport externe. Les techniques permettant d'accroître les taux d'absorption par les plantes et de réduire les taux de minéralisation de l'azote dans le sol sont connues : il s'agit par exemple de l'épandage d'engrais fractionné dans le temps, adapté à la demande des plantes, de cultures de «nettoyage» dans l'intervalle des récoltes, de labours (ou même l'absence de labourage) adaptés à la réduction de la minéralisation etc. Toutefois, les connaissances des processus et des facteurs qui régissent le sort de l'azote dans le système eau-sol-plante demeurent insuffisantes (de même que la disponibilité de données est inadéquate pour quantifier ces effets et mécanismes qui varient d'un système de culture à l'autre et en fonction du temps à l'échelle de l'exploitation agricole). En conséquence, la pratique optimale pour maintenir le rendement des récoltes et conserver le nitrate dans la zone des racines ne peut être définie de façon sûre pour un système de culture donné, mais seulement pour quelques cas particuliers bien étudiés.

La science permettra-t-elle d'infirmer prochainement de telles assertions? La question posée est de savoir s'il sera possible d'accéder à l'évaluation quantitative des phénomènes dans les divers systèmes eau-sol-récoltes à l'échelle de la parcelle qui conditionne la définition de l'optimum de la pratique et des stratégies de gestion.

#### **IV. 6. Conclusion**

En plus des processus naturels de la minéralisation, la pollution d'origine anthropique a également joué un rôle significatif dans la salinisation et la contamination des eaux superficielles et souterraines du périmètre irrigué de Bounamoussa. En effet, les concentrations relativement importantes en nitrate, enregistrées surtout dans les eaux au niveau de la nappe superficielle dans la plaine d'El-Hadjar et Drean reflètent bien l'influence significative de l'activité agricole et l'usage excessif des engrais chimiques.

pour mettre en évidence l'impact des retours des eaux d'irrigation à la nappe, des corrélations des teneurs en sulfates, chlorures, sodium et potassium en fonction de nitrate (l'indicateur direct de la contamination par l'activité agricole) ont été élaborées, Globalement les apports anthropiques en ces éléments paraissent négligeables comparés aux apports naturels à l'exception de quelques points qui sont alignés et corrélés entre eux de la plaine d'El-Hadjar et dans la partie centrale où l'activité agricole se concentre indiquant qu'il y a un apport anthropique qui résulte de l'effet de l'infiltration après dissolution des éléments par les eaux d'irrigation contribuant ainsi à la contamination de la nappe.

L'établissement des Cartes d'aptitude des eaux à l'irrigation selon les diagrammes de Richard et Wilcox pour la nappe superficielle a montré une cartographie qui semble être identique, Les eaux de qualité admissible à médiocre occupent le secteur sud du terrain et allant jusqu'à l'embouchure de la Seybouse, Les eaux médiocres se présentent dans la nappe juste après l'élévation de Dagoussa et s'étendent jusqu'à la mer passant par les eaux de la nappe de la plaine d'El-Hadjar sous l'effet de la grande minéralisation issue de la zone industrielle. Les eaux de mauvaise qualité se localisent dans les eaux des puits P3 et P2 auprès des agglomérations de Ben M'hidi et Zrizer. Elles s'expliquent par les eaux chargées stagnantes auprès de la zone marécageuse de Mekrada et l'effet des différents rejets, tout en rappelant la contamination par la pratique agricole intense aux alentours immédiats de ce secteur.

Les résultats à notre possession, confirment que les eaux de bonne qualité sont celles de surface issues des monts du numidien de la Chaffia d'où provient l'Oued Bounamoussa, se localisant au Sud-ouest du terrain.

Pour Les choix en matière de contrôle, les principales stratégies de contrôle visent une utilisation rationnelle avec des méthodes l'épandage d'engrais fractionné dans le temps, adapté à la demande des plantes, des cultures de «nettoyage» dans l'intervalle des récoltes, de labours (ou même l'absence de labourage) adaptés à la réduction de la minéralisation de culture adaptées.

*CHAPITRE VII*

---

**EVALUATION ET CARTOGRAPHIE DE LA POLLUTION**

### **VII.1.Introduction**

La pollution des écosystèmes aquatiques est actuellement l'un des plus grands problèmes du siècle, auxquels s'attachent de nombreux pays dans le monde afin de le résoudre, c'est un vrai défi.

Cette partie, relative à l'évaluation de la pollution métallique des eaux du périmètre irrigué de Bounamoussa. Nous allons mettre en évidence la contamination métallique au niveau des eaux superficielles et souterraines à travers le dosage des ETM (Cr, Pb, Fer, Zn et Mn).

### **VII.2.Évaluation de la pollution métallique**

#### **VII.2.1.Introduction**

L'utilisation des Métaux lourds dans le cadre de cette étude, vise à une meilleure compréhension de la pollution métallique des eaux superficielles et souterraines du périmètre irrigué de Bounamoussa.

L'étude hydrochimique faite précédemment s'est appesantie essentiellement sur la question de l'origine de la minéralisation et les principaux mécanismes responsables de la composition chimique de l'eau, en liaison avec l'hydrodynamisme du système. Dans ce qui suit, on utilisera les données de l'analyse des métaux lourds pour but de diagnostiquer l'état de la pollution métallique, on effectuera des comparaisons spatiales et de mettre en évidence les différents facteurs pouvant jouer un rôle primordial dans l'établissement de la genèse et l'origine de la contamination du milieu et des eaux souterraines.

#### **VII.2.2.Matériels et méthode d'échantillonnage**

Les métaux lourds de la campagne d'échantillonnage 2017 sont dosés au sein du laboratoire de la raffinerie de Skikda, par spectrophotomètre à absorption atomique à flamme,

L'analyse est portée sur les métaux lourds suivants (Pb, Cr, Fer, Mn, et Zn). Les analyses effectuées se rapportent aux eaux prélevées dans les puits captant la nappe, les eaux de l'Oued Bounamoussa et l'Oued Seybouse.

#### **VII.2.3.Les métaux lourds**

Éléments naturellement présents dans les sols dont certains sont indispensables aux plantes. Ils font partie des oligo-éléments et des éléments traces. On utilise également

l'expression métaux lourds, qui correspond à une définition physique (masse volumique supérieure à 5 g/cm<sup>3</sup>) ou bien oligo-éléments. Les ETM les plus connus pour leur dangerosité sont le plomb (Pb), le mercure (Hg), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le nickel (Ni), le zinc (Zn). Il faut ajouter à cette liste l'arsenic (As) et le sélénium (Se), qui ne sont que des éléments traces et pas des métaux. Leur présence dans les eaux naturelles résulte des processus naturels (érosion et altération, émissions volcaniques, diffusion d'aérosols à partir des sols et de l'eau de mer) et de l'activité humaine. Cette dernière est aujourd'hui considérée comme la principale source de contamination des eaux par les métaux.

L'importance relative des sources de contamination anthropique (industrielle, domestique ou agricole) est variable selon l'élément considéré et l'occupation des sols sur le bassin versant.

Pour identifier la contamination des eaux, on compare les valeurs obtenues par rapport aux normes de potabilité fixées par l'OMS, tableau n° 32 et 33.

**Tableau.32. Comparaison des normes internationales des métaux lourds pour les eaux de consommation (OMS, États-Unis, CEE, France). (Callier et al. 2002)**

<b>Métaux lourds (µg/l)</b> \ <b>Pays</b>	<b>États-Unis</b>	<b>OMS (2011)</b>	<b>CEE (03/11/1998)</b>	<b>FRANCE</b>	<b>Limite qualité</b>	<b>Concentrations maximales d'origine naturelle</b>
Plomb	15	10	10	50	50	<1
Zinc	5 000	3000	/	5 000	5 000	/
Manganèse	1300	5000	2 000			24
Fer	300	300	200	200	200	/
Chrome		50	50			6.9

**Tableau.33. Les normes de rejets.**

<b>Paramètre</b>	<b>CE (µS/cm)</b>	<b>Cr</b>	<b>Mn</b>	<b>Pb</b>	<b>Fe</b>	<b>Zn</b>
<b>Normes de rejets OMS recommandés (mg/l)</b>	1000	2	0,6	4	10	7
<b>Normes de rejets Algérienne (mg/l) 2013</b>	2800	0.5	0.3	1	5	5

Les origines naturelles et anthropiques de ces métaux lourds sont présentées dans le tableau 34 (Benessam S., et al. 2015). Elles ont été tirées de la bibliographie et sélectionnées

en fonction des formations géologiques et des produits anthropiques présents dans notre zone d'étude.

**Tableau.34. Sources anthropique et naturelle des métaux lourds.**(Laperche et al. 2004, Baize D., 1997)

	Origines naturelles				Origines anthropiques
	Type de roche		Teneurs en mg/kg		
			Moyenne	Gamme de teneurs	
<b>Plomb (Pb)</b>	Métamorphique	Marbre	3.9	0.9 à 7	-Carburants -Batterie et piles -Canalisation -Etc...
		Gneiss et Schiste	17.6	0.4 à > 100	
	Sédimentaire	Grès	9.8	< 1 à > 50	
<b>Zinc (Zn)</b>	Gneiss		40	40 à 120	-pigments -Ordures -Agriculture -Etc...
	Argiles, Schistes				
<b>Manganèse (Mn)</b>	Argiles, Schistes			45 à 70	
<b>Fer (Fe)</b>	Argile,			3 à 15	
	Schiste, Micaschiste, Gneiss			0.5 à 1.5	
<b>Chrome (Cr)</b>	Gneiss, Muscovite		150	100 à 200	

#### VII.2.4. Interprétation des résultats

##### VII.2.4. 1. Le Chrome (Cr)

Dans la nature, le Chrome se trouve dans les roches basiques avec des teneurs plus importantes et sous forme de traces dans les silicates. A l'état pur, le chrome n'est utilisé que pour la fabrication d'aciers spéciaux, et pour le traitement de surface (dépôts anticorrosion dans l'industrie automobile, et chromage). Ces sels sont utilisés comme pigments pour l'industrie textile, la céramique, la verrerie. Les dérivés du chrome se retrouvent dans l'eau essentiellement sous forme oxydée : le chrome trivalent (Cr III) et le chrome hexavalent (Cr VI).

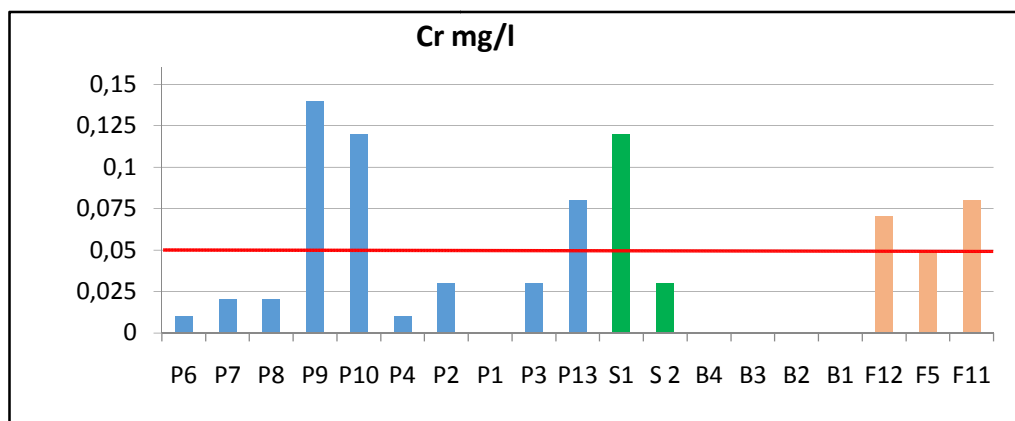


Figure.75. Variations de la teneur en Chrome des eaux du périmètre.

D'après (Fig. 75 et 76), on remarque qu'à travers quelques points des teneurs en chrome supérieures à la norme (P9, P10) dans la plaine d'El-Hadjar où la valeur atteint son maximum (0.14mg/l), Ces fortes valeurs à la sortie de l'usine d'El-Hadjar sont liées à l'effet des rejets surtout industriels (les terrils et la métallurgie de l'usine sidérurgique). Elles sont minimales et ne dépassent pas 0.01mg/l dans les eaux de surface (oued Bounamoussa). Quant aux eaux de la nappe, les teneurs ne dépassent plus la norme.

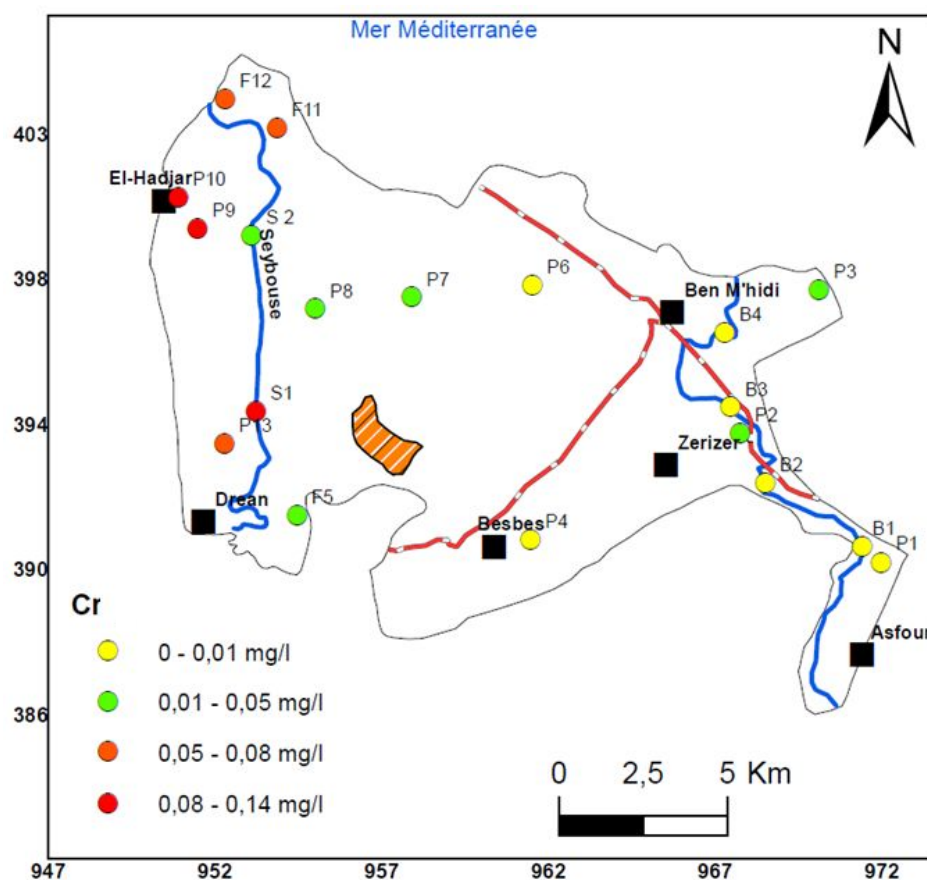


Figure.76. Carte des teneurs en Cr (mg/l), Campagne d'Octobre 2017.

### VII.2.4.2. Le Plomb (Pb)

En dehors des zones des gisements plombifères, le plomb est un constituant naturel largement répandu dans la croûte terrestre. La norme fixée par l’OMS est de 0.01 mg/l.

Le plomb est concentré dans les gisements de sulfures où il est communément rencontré sous forme de galène ( $\text{PbS}(s)$ ). Il peut être également rencontré sous la forme d’anglésite ( $\text{PbSO}_4(s)$ ) et de cérusite ( $\text{PbCO}_3(s)$ ). La concentration moyenne en plomb de la croûte terrestre serait de l’ordre de 13 à 16 mg/kg. Le plomb soluble ajouté au sol réagit avec des argiles, phosphates, sulfates, carbonates, hydroxydes et la matière organique, si bien que la concentration du plomb en phase aqueuse est fortement diminuée. Pour des pH supérieurs à 6, le plomb est soit adsorbé à la surface des argiles soit sous forme de carbonate de plomb. Il existe sous deux états de valence : +2 et +4. A cause de son caractère basique, cet élément ne s’hydrolyse qu’à des pH neutres ou alcalins.

La (Fig.78) montre que les eaux de surface le long de Bounamoussa ne représentent aucun danger alors que les eaux de surface dans la Seybouse sont contaminées surtout dans la partie avale où elles s’infiltrent pour contaminer ainsi quelque puits avoisinants ( $\text{P9}=0.27\text{mg/l}$ ), Ces concentrations très importantes du plomb proviennent de sa fréquente utilisation dans l’industrie : la fabrication de la soudure, des pigments, des batteries, des gaines des câbles électriques,...etc.

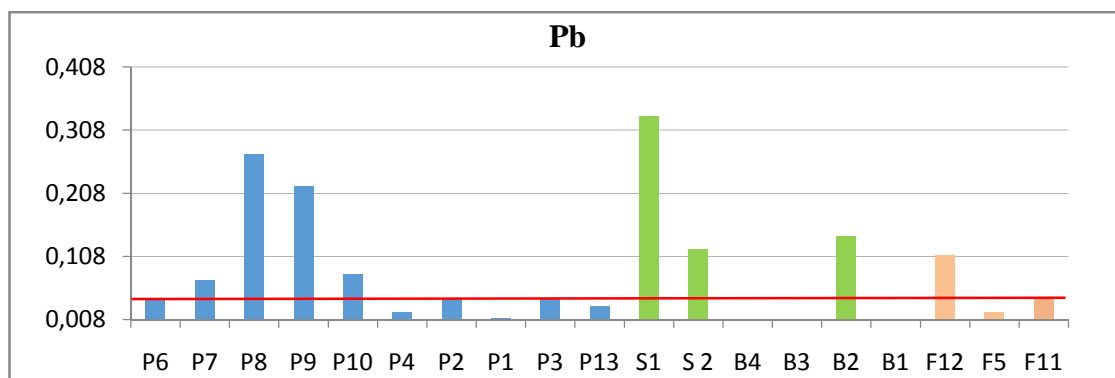


Figure.77. Variations de la teneur en Plomb des eaux du périmètre.

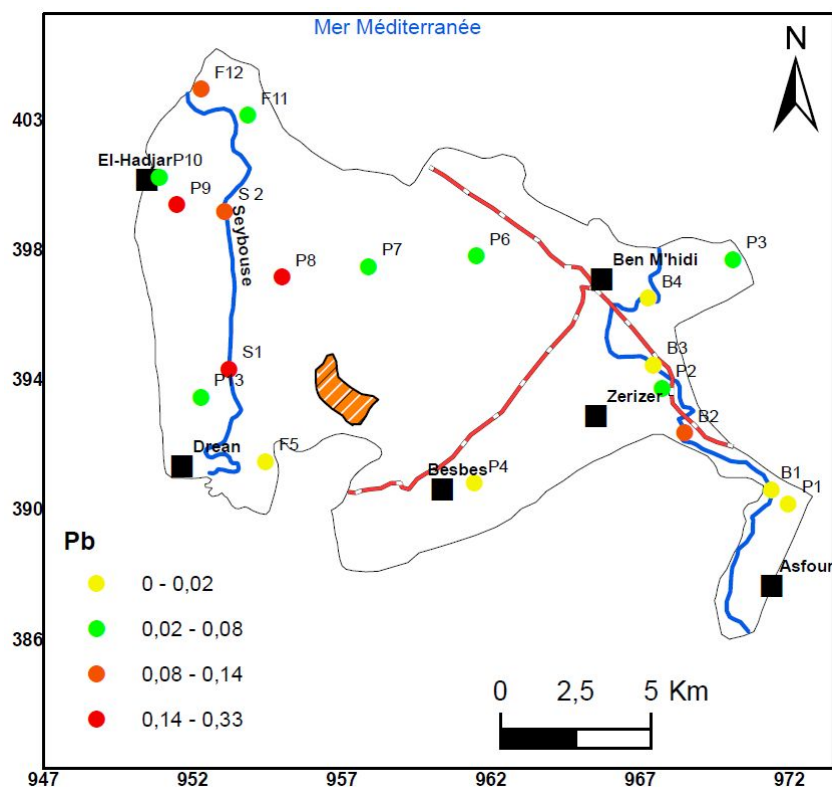


Figure.78. Carte des teneurs en Pb (mg/l), Campagne d'Octobre 2017.

#### VII.2.4.3. Le Fer total (Fe. T)

La présence de fer dans les eaux souterraines est d'origine multiple, le fer sous forme de pyrite (FeS) est couramment associé aux roches sédimentaires déposées en milieu réducteur (marnes, argiles) et aux roches métamorphique. Le fer se trouve à de fortes concentrations dans les eaux des cuirasses d'altération de socle.

Les teneurs en cet élément sont assez faibles dans tout le périmètre à l'exception de quelques points, on note la contamination de la nappe superficielle le long de la seybouse, La concentration arrive au seuil de 0.81 mg/l dans les eaux de surface (Fig.80).

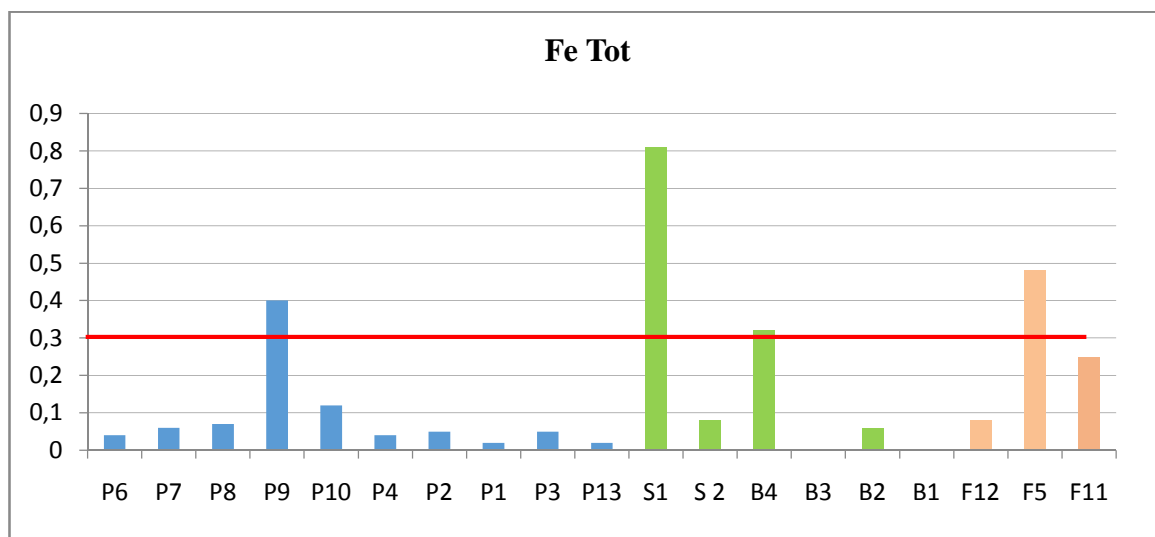


Figure.79. Variations de la teneur en Fer Total des eaux du périmètre.

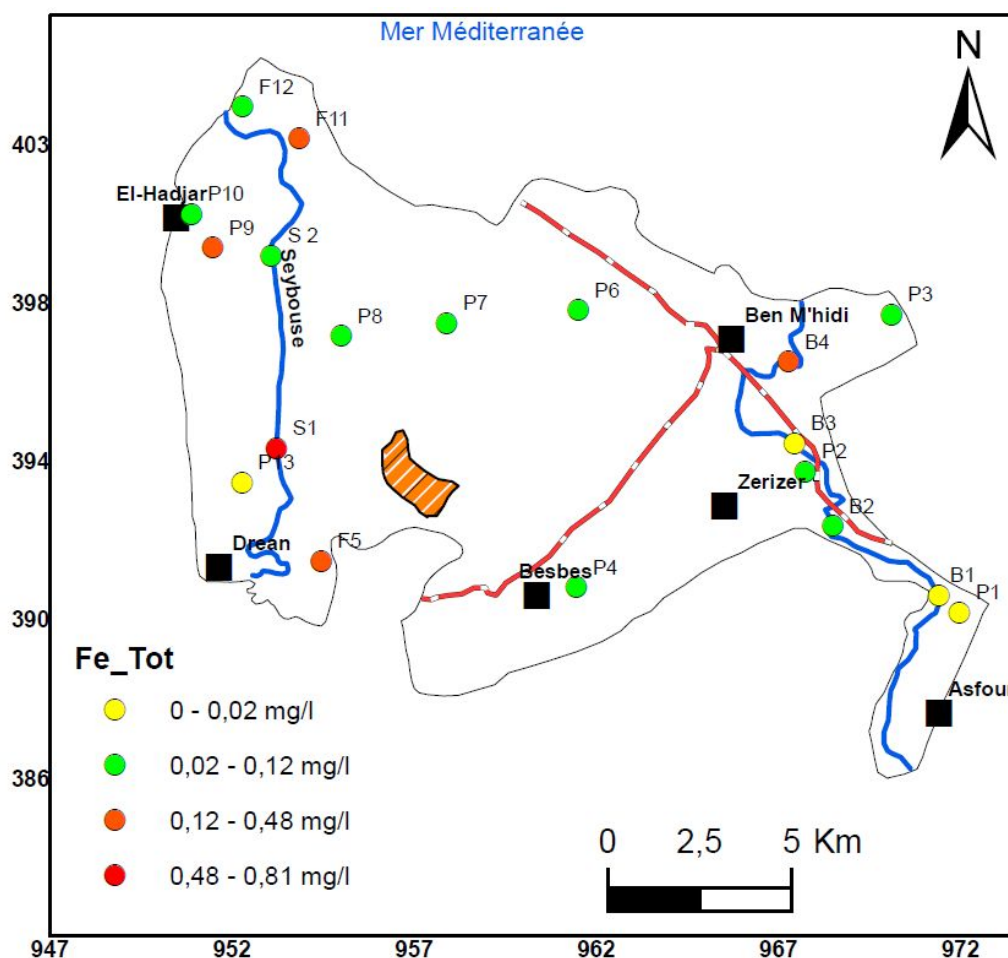


Figure.80. Carte des teneurs en Fer Tot (mg/l), Campagne d'Octobre 2017.

#### VII.2.4.4. Le Manganèse (Mn)

Le manganèse est un métal de transition, dur et friable, largement répandu dans la croûte terrestre. C'est un bon conducteur d'électricité. Ce métal de transition fond sans difficulté, mais s'oxyde facilement. Le manganèse comporte plusieurs degrés d'oxydation. Il est utilisé pour la préparation d'alliages. Le dioxyde de manganèse est utilisé dans les batteries sèches. Des composés de manganèse sont utilisés pour fabriquer de la céramique, certains sels de manganèse entrent dans la composition des encres et des huiles à vernis, le permanganate de potassium violet est utilisé pour le traitement de l'eau.

De plus, cet élément est essentiel pour les végétaux: une carence en manganèse peut nuire à la photosynthèse et entraîner la décoloration des végétaux. Il est également un oligoélément essentiel.

D'après la figure.82, Les concentrations observées pour cet élément dans tout le périmètre sans acceptables et ne dépassent guère la norme, le maximum est enregistré au niveau des eaux de surface de la Seybouse où la concentration est de l'ordre de 1.51mg/l.

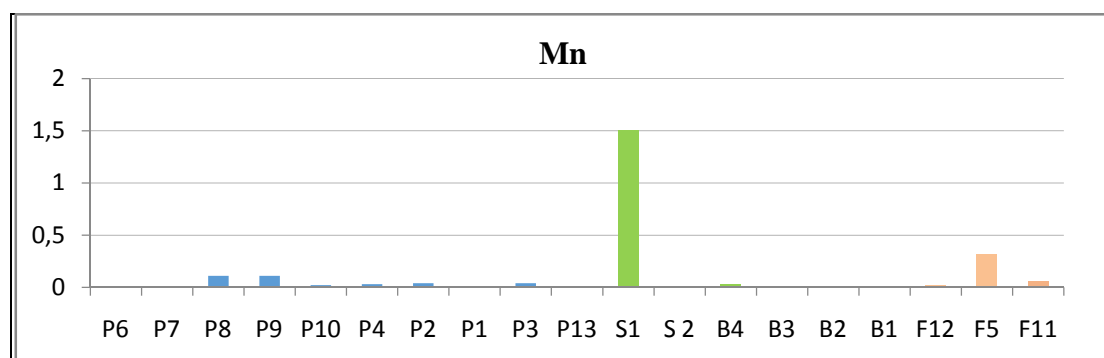


Figure.81. Variations de la teneur en Manganèse des eaux du périmètre.

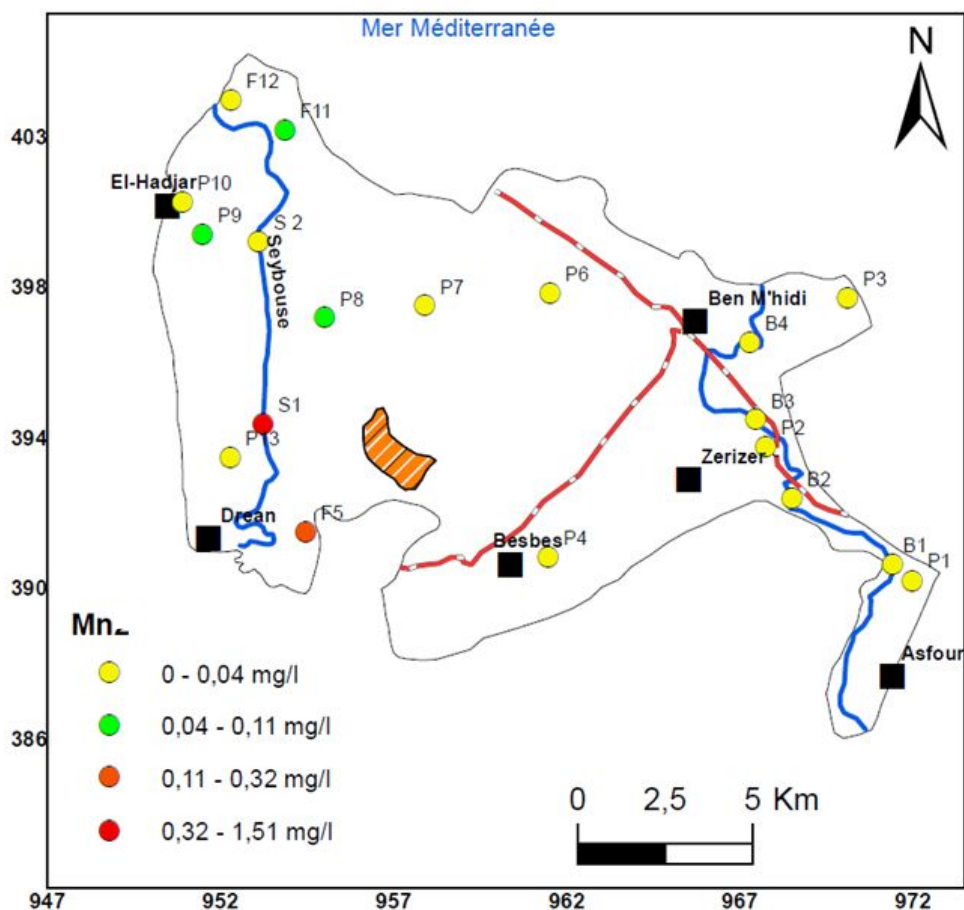


Figure.82. Carte des teneurs en Mn (mg/l), Campagne d'Octobre 2017.

#### VII.2.4. 5. Le Zinc (Zn)

La teneur moyenne en zinc de la croûte terrestre serait comprise entre 70 et 132 mg/kg. Le zinc est facilement adsorbé par les minéraux argileux, les carbonates ou hydroxydes (Hickey, M. G., 1984) ont montré que la plus grande proportion de zinc dans des sols et sédiments contaminés était associée aux oxydes de fer et de manganèse. De point de vue électrochimique, le Zinc est un réducteur vis-à-vis de la plupart des métaux de l'Aluminium et du magnésium.

D'après les données des analyses (Fig.84), les teneurs en élément Zinc ne dépassent plus la norme directrice à travers tout le périmètre irrigué que ce soit pour les eaux de surface ou bien celles souterraines.

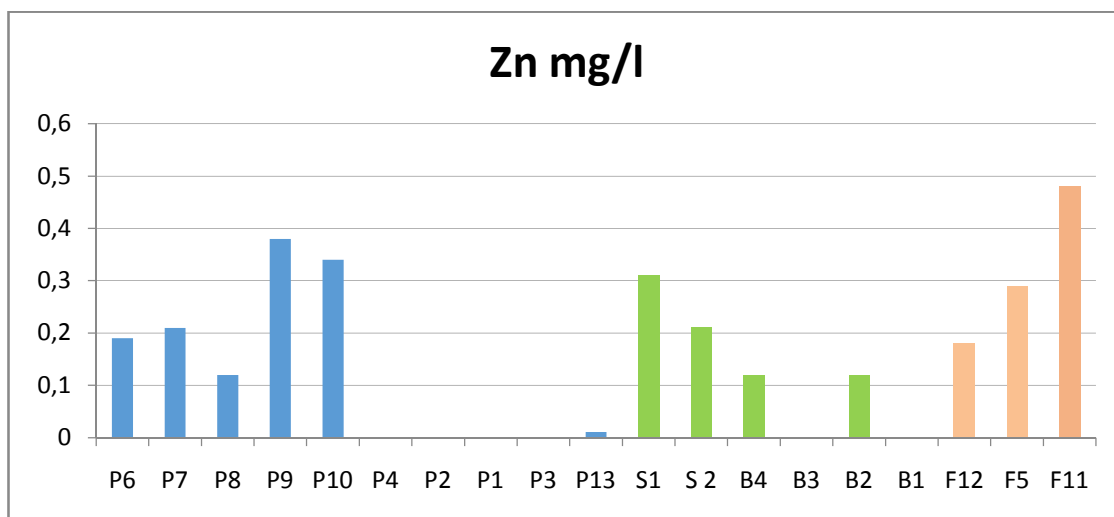


Figure.83. Variations de la teneur en Zinc des eaux du périmètre

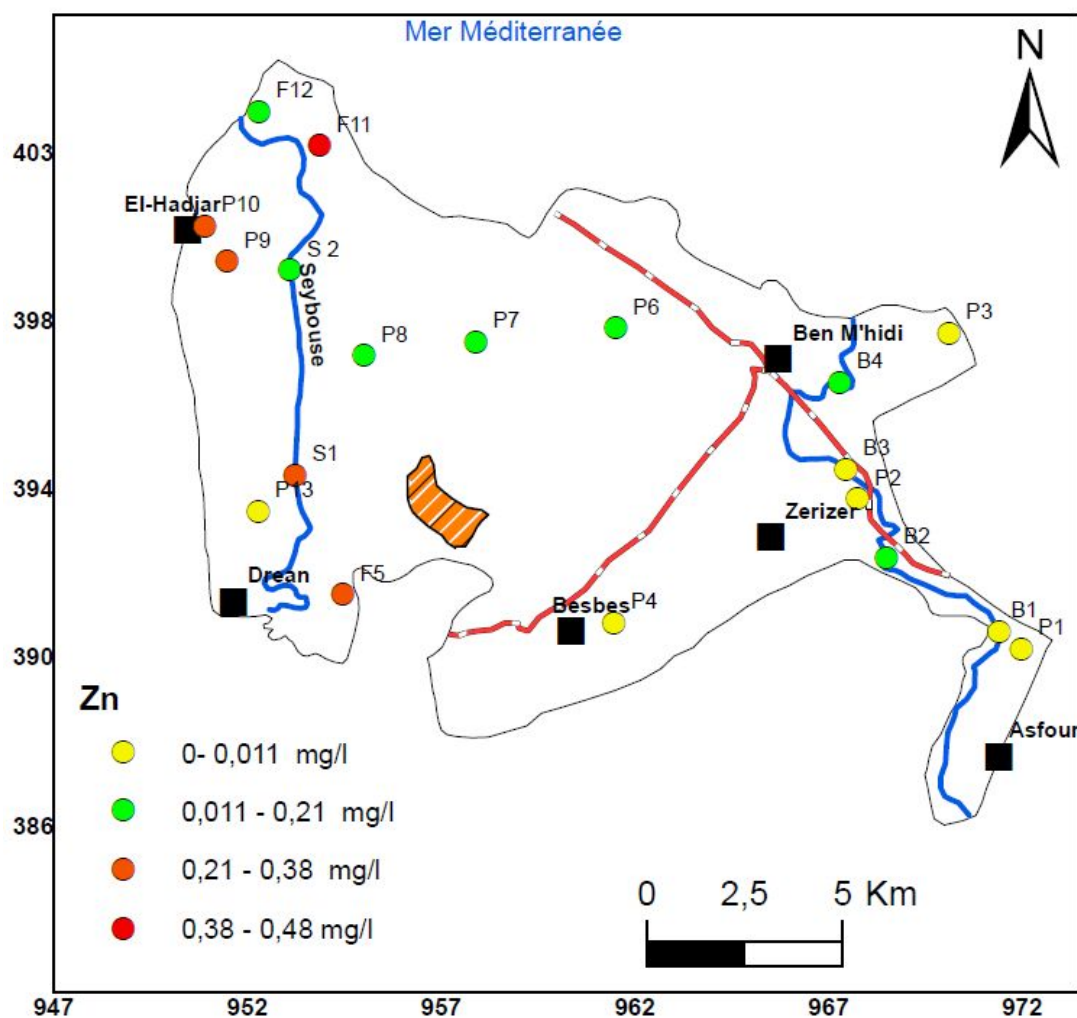


Figure.84. Carte des teneurs en Zinc (mg/l), Campagne d'Octobre 2017.

### **VII.3. Evaluation du risque liée à la santé humaine**

#### **VII.3.1. Introduction**

La notion de risque fait appel à celle de nuisance. Une nuisance est tout ce qui fait du tort, qui agresse et qui perturbe. C'est un produit ou un phénomène susceptible d'agresser l'homme et la nature en général (la flore et la faune) et d'altérer leur équilibre. Bien que le terme nuisance soit surtout utilisé pour les produits chimiques et certains phénomènes physiques, il est possible d'affirmer qu'une nuisance engendre un risque lorsqu'elle atteint un certain seuil insupportable par l'organisme humain.

Sur la base des résultats d'analyses de notre travail, on va essayer de cartographier la pollution métallique dans le périmètre irrigué de Bounamoussa, l'utilisation des indices de la qualité des eaux et son impact sur l'homme et l'environnement, est une approche très pratique. Cette dernière permet de faire la synthèse de données complexes de l'eau et faciliter la présentation des résultats de traitement de ces données sous forme de cartes de répartition sectorielle.

#### **VII.3.2. Utilisation de l'Indice de Risque (IR)**

##### **VII.3.2.1. Evaluation du risque (EDR) sur la santé**

Sur la base des résultats d'analyses obtenues, on va essayer, d'une part, de mettre en relief la toxicité des E.T.M., d'autre part de quantifier le risque de leur pollution.

L'étude de risque a pour objectif :

- D'identifier les différents types de risques qui peuvent découler de la pollution.
- De quantifier ces risques.
- De définir les buts de réhabilitation pour mettre en conformité le site avec la réglementation sur l'environnement.
- De déterminer les actions qui vont réduire le risque pour le rendre acceptable.

### **VII.3.2.2. La toxicité des métaux lourds**

#### **VII.3.2.2.1. Le Chrome (Cr)**

##### **VII.3.2.2.1. 1.Impact sur l'environnement**

Le chrome existe principalement dans la nature sous forme de dérivées. Le principal minerai est le chrome de fer ou chromite. Le chrome pur est obtenu par réaction d'aluminium et d'oxydes (III) de chrome (aluminothermie) par électrolyse ou à partir d'iodure de chrome. Le chrome est utilisé comme catalyseur dans la synthèse de l'ammoniac, dans la fabrication d'aciers chromés, d'aciers de fabrication, d'aciers inoxydables et d'alliages ainsi que pour chromage galvanique. Des complexes organiques sont utilisés comme colorant de développement dans la photographie couleur. Les dérivées inorganiques du chrome sont utilisées comme pigments. Les sels de chrome (VI) connaissent une très large utilisation dans les produits de conservation du bois et la tannerie.

Les quantités de chrome détectées dans l'hydrosphère, la pédosphère, l'atmosphère et la biosphère sont liées pour l'essentiel à des émissions d'origine industrielle.

Les déchets contenant du chrome sont considérés comme problématiques en raison de leur comportement dans les couches profondes du sol lorsqu'ils sont stockés dans des décharges. En milieu alcalin, on estime que la stabilité des chromes peut atteindre 50 ans, et qu'ils peuvent migrer vers les nappes aquifères, même au travers des sols cohérents. La combustion des boues contenant des composants chromiques doit être évitée en raison du risque de formation de chromâtes.

##### **VII.3.2.2.1. 2.Impact sur la santé**

Il existe deux formes du chrome (trivalent et hexavalent). Le chrome métal et le chrome trivalent ne sont pas toxiques. Le chrome hexavalent qui entraîne des inflammations muqueuses et des ulcères est cancérigène. On note également le risque de cancer important pour les embryons et les fœtus concernant le chrome VI. Les intoxications chromiques peuvent entraîner des altérations du tube gastro-intestinal. Le composé peut s'accumuler dans le foie, les reins, la glande thyroïde et dans la moelle osseuse.

**VII.3.2.2.2. Le Plomb (Pb)**

Le plomb est un élément chimique dense et ductile. Il est généralement associé au zinc dont le minerai est appelé « galène ».

D'importantes quantités du plomb sont utilisées dans les batteries et dans les gaines des câbles électriques, ainsi que dans l'industrie pour garnir les conduites, les réservoirs et les dispositifs à rayons X. Il est utilisé aussi comme adjuvant dans les essences.

**VII.3.2.2.2.1. Impact sur la santé**

Le plomb est introduit dans le corps sous quelques formes reste très toxique. Ses effets se font généralement sentir après une période d'accumulation du métal dans l'organisme.

Les enfants sont particulièrement exposés à l'intoxication, même pour des concentrations minimales, le plomb peut retarder le développement moteur, altérer la mémoire et provoquer des problèmes d'audition et des troubles de l'équilibre. L'empoisonnement par le plomb se manifeste par l'anémie, la faiblesse, la constipation, la colique et la paralysie, en particulier des poignets et des chevilles.

**VII.3.2.2.3. Le Fer total (Fe)**

Le fer est le métal le plus largement utilisé par l'industrie métallurgique (fontes, aciers,...).

**VII.3.2.2.3.1. Impact sur l'environnement**

Dans l'eau, le fer est présent avec une concentration très faible qui peut être augmentée suite au lessivage des terrains riches en fer ou à cause d'une pollution industrielle. Le fer se trouve dans l'eau sous une forme dissoute ou en solution colloïdale. Cet élément présente un danger de toxicité assez modéré pour la vie aquatique. Cette toxicité est difficile à préciser car elle est fonction de l'état chimique du métal et de la présence du précipité de l'hydroxyde de fer qui tend à se déposer sur les branchies des poissons et entraîner leur colmatage.

**VII.3.2.2.3.2. Impact sur la santé**

L'ingestion d'une forte dose d'un sel de fer peut produire une intense altération des muqueuses digestives se traduisant par des douleurs abdominales, de vomissement et une diarrhée souvent sanglante. Les intoxications sévères peuvent entraîner des complications hémorragiques, des brûlures chimiques de tube digestif pouvant conduire à la mort.

**VII.3.2.2.4. Le Manganèse (Mn)**

Le manganèse est un métal de transition gris-blanc qui ressemble au fer. C'est un métal dur et fragile, il fond sans difficulté, mais est facilement oxydé. Il est utilisé pour l'acier : rails et notamment aiguillages, outillage, roulements, coffres-forts...

**VII.3.2.2.4.1. Impact sur l'environnement**

Le manganèse est présent naturellement dans l'environnement, sous forme solide dans le sol et sous forme de petites particules dans l'eau. Les particules de manganèse dans l'air sont présentes dans les particules de poussière. L'homme augmente les concentrations en manganèse dans l'air par l'activité industrielle et en brûlant les fluides fossiles. Le manganèse provenant de sources humaines peut aussi pénétrer dans les eaux de surface, les eaux souterraines, et les eaux d'égout. Lors de l'utilisation de pesticides au manganèse, le manganèse pénètre dans le sol.

Les plantes peuvent souffrir de la toxicité du manganèse aussi bien que de manque de manganèse. Quand le pH du sol est faible, le manque de magnésium est plus commun. Des concentrations hautement toxiques en manganèse dans le sol peuvent provoquer un grossissement des parois cellulaires, un étiolement des feuilles, et des points marron sur les feuilles. Ces symptômes peuvent aussi être dus à un manque de manganèse. Il y a une concentration optimale pour la croissance des plantes entre les concentrations toxiques et les concentrations trop faibles.

**VII.3.2.2.4.2. Impact sur la santé**

Le manganèse est un composé très commun que l'on peut trouver partout sur terre. Le manganèse est nécessaire à l'homme pour survivre mais il est aussi toxique lorsque des concentrations trop élevées sont présentes dans le corps humain. Quand on ne prend pas la

dose quotidienne recommandée, l'état de santé se détériore. Mais lorsque la consommation est trop élevée, des problèmes de santé apparaissent aussi. La consommation de manganèse chez l'homme se fait essentiellement par la nourriture, telle que les épinards, le thé et les herbes. Les aliments contenant les concentrations les plus élevées sont les grains de riz, les graines de soja, les œufs, les noix, l'huile d'olive, les haricots verts et les huîtres. Après avoir été absorbé dans le corps humain, le manganèse est transporté par le sang jusqu'au foie, aux reins, au pancréas, et aux glandes endocrines.

Le manganèse agit essentiellement au niveau du système respiratoire et du cerveau. Les symptômes d'un empoisonnement au manganèse sont des hallucinations, un manque de mémoire, et des problèmes aux nerfs. Le manganèse peut aussi provoquer la maladie de Parkinson, des embolies pulmonaires et des bronchites. Lorsque les hommes sont exposés au manganèse pendant une trop longue période, ils peuvent devenir impuissants, un syndrome provoqué par le manganèse a des symptômes tels que la schizophrénie, l'ennui, la faiblesse musculaire, des maux de tête et l'insomnie. Le manganèse étant essentiel pour notre santé, une carence en manganèse a aussi des conséquences telles que la Corpulence, l'intolérance au glucose, la coagulation du sang, problèmes de peau, augmentation du niveau de cholestérol, Problèmes au niveau du squelette, changement de la couleur des cheveux, symptômes neurologiques.

#### **VII.3.2.2.5. Le Zinc (Zn)**

Le zinc est une substance très commune qui est présent naturellement dans l'air, l'eau et le sol, c'est un élément essentiel (à faibles doses) pour l'organisme humain.

##### **VII.3.2.2.5.1. Impact sur l'environnement**

Le zinc en fortes concentrations dans un sol, seul un nombre limité de plantes a des chances de survivre. C'est pourquoi il n'y a pas beaucoup de diversité des plantes près des usines manipulant du zinc. Du fait de ces effets sur les plantes, le zinc est une sérieuse menace pour la production des terres agricoles. Enfin le zinc peut interrompre l'activité du sol, car il a une influence négative sur l'activité des micro-organismes et les vers de terre. De ce fait, La décomposition de la matière organique peut être sérieusement ralentie.

### VII.3.2.2.5.1.2 Impact sur la santé

Le zinc est un élément essentiel pour la santé de l'homme. Lorsqu'on absorbe trop peu de zinc on peut alors avoir une perte de l'appétit, une diminution des sensations de goût et d'odeur, les blessures cicatrisent lentement et on peut avoir des plaies. Les carences en zinc peuvent aussi provoquer des problèmes lors des naissances. Trop de zinc peut tout de même provoquer des problèmes de santé importants, comme des crampes d'estomac; des irritations de la peau, des vomissements, des nausées, de l'anémie.

### VII.3.3. Evaluation des risques des métaux lourds sur la santé

L'étude des risques est basée sur les étapes suivantes :

- ◆ Définition des concentrations d'exposition.
- ◆ Estimation des doses journalières d'exposition (DJE).

#### VII.3.3.1. Définition des concentrations d'exposition

La première phase de l'analyse des risques consiste à l'estimation des concentrations en polluants présents dans l'environnement aux différents points d'exposition. Dans le cadre de cette étude, les concentrations employées pour l'estimation des risques sont les concentrations des métaux lourds (chrome, plomb et zinc) observés dans les secteurs étudiés.

#### VII.3.3.2. Estimation des doses d'exposition

Après l'estimation des concentrations des métaux lourds, l'analyse des risques s'appuie sur l'estimation des doses d'exposition des individus à ces métaux.

##### VII.3.3.2.1. Dose journalière d'exposition (DJE) :

La dose journalière d'exposition est la dose de substance reçue par l'organisme rapportée au poids de l'individu et au nombre des jours d'exposition. Elle a pour but de définir une quantité de polluant administrée, exprimée en mg/kg/j. Le calcul de la DJE pour les différents scénarios se déroule toujours en appliquant des équations adaptées pour chacune des voies d'exposition. Les équations se présentent de la manière suivante :

$$DJE = \frac{CxQxFspxDexFe}{x}$$

Tel Que :

**DJE** : Dose journalière d'exposition (mg/kg/j). **C** : Concentration dans le milieu d'exposition (mg/ kg). **Q** : Quantité ingérée (kg). **Fsp** : Facteur d'absorption. **De** : Durée d'exposition (années). **Fe** : Fréquence d'exposition (j/an). **P** : Poids de l'individu (Kg).

**T** : Période du temps sur laquelle l'exposition est moyennée (j).

#### VII.3.3.2.2.DJE pour le contact dermique avec le sol

L'équation utilisée pour le calcul de la dose journalière d'exposition due au contact dermique est basée sur des hypothèses de fraction de peau exposée, de la fraction du sol qui adhère à la peau et des propriétés de la peau à absorber le composant chimique.

La DJE pour la voie d'exposition par contact dermique est estimée par l'équation suivante :

$$DJE = \frac{Cs \times S \times F_s \times S \times 0.000001 \times EF \times Z}{365}$$

Tel que :

**DJE** : Dose journalière exposée. **Cs** : Concentration du composé dans le sol (mg/kg). **Sa** : Surface de peau (cm<sup>2</sup>). **Fs** : Facteur d'adsorption. **SL** : Facteur climatique (sans dimension). **EF** : Fréquence d'exposition (j/an). **Z** : Poids du corps (Kg). **Bw** : Fraction de peau exposée.

#### VII.3.3.2.3.Dose journalière acceptable (DJA)

La dose journalière acceptable présente la quantité de substance chimique que peut ingérer un homme par jour au cours de sa vie sans aucun risque appréciable pour sa santé.

#### VII.3.3.2.Estimation du risque

L'estimation du risque est différente en fonction de la substance qui est cancérigène ou non cancérigène.

##### VII.3.3.2.1.Estimation du risque non cancérigène

L'estimation du risque non cancérigène est exprimée par le rapport entre la dose journalière d'exposition (DJE) et la dose journalière acceptable (DJA).

Le rapport est appelé indice de risque (IR) :

$$IR = \frac{DJE}{DJA}$$

Si « IR » est inférieur à 1, alors le risque toxique est considéré comme acceptable.

### VII.3.3.2. Estimation du risque cancérigène

L'introduction des données dans le logiciel risk5 nous a permis de dégager les observations suivantes:

Le risque cancérigène est estimé par la notion d'excès de risque individuel (ERI) qui est obtenu par multiplication de la dose journalière d'exposition par l'excès de risque unitaire (ERU); soit une probabilité d'attraper un cancer de 1 sur 1 million comme niveau de risque certainement acceptable. Si par contre la valeur atteint  $10^{-4}$ , le risque sera considéré comme certainement inacceptable en terme de santé publique.

Dans ce travail, en fonction de la disponibilité de données, nous avons pris en considération le scénario de l'usage eaux superficielles et souterraines pour les populations des agglomérations urbaines incluses dans le périmètre irrigué de Bounamoussa.

Les résultats obtenus par le logiciel RISK5 sur les deux catégories de la société (adultes et enfants) sont illustrés dans le tableau N°35 et les histogrammes (Fig.85 et Fig.86), ainsi les cartes des risques du plomb qui semble être le plus nuisible dans tous les cas. (Fig.87 et Fig.88).

**Tableau.35. Indice du risque total pour l'usage des eaux du périmètre irrigué de Bounamoussa, Octobre 2017.**

point d'eau	Indice du Risque					
	Cr		Pb		Zn	
	enfant	adulte	enfant	adulte	enfant	adulte
P6	$1.1 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$3.6 \cdot 10^{-1}$	$1.7 \cdot 10^{-1}$	$2.7 \cdot 10^{-2}$	$1.3 \cdot 10^{-2}$
P7	$2.1 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$6.2 \cdot 10^{-1}$	$2.9 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$1.4 \cdot 10^{-2}$
P8	$2.1 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-1}$	<b>2.4</b>	<b>1.1</b>	$1.7 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-3}$
F11	$8.6 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-1}$	$3.6 \cdot 10^{-1}$	$1.7 \cdot 10^{-1}$	$6.9 \cdot 10^{-2}$	$3.2 \cdot 10^{-2}$
P9	<b>1.5</b>	$7.1 \cdot 10^{-1}$	<b>2</b>	$9.2 \cdot 10^{-1}$	$5.5 \cdot 10^{-2}$	$2.5 \cdot 10^{-2}$
P10	<b>1.3</b>	$6 \cdot 10^{-1}$	$7.1 \cdot 10^{-1}$	$3.3 \cdot 10^{-1}$	$4.9 \cdot 10^{-2}$	$2.3 \cdot 10^{-2}$
B4	/	/	/		$1.7 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-3}$
B3	/	/	/		/	/
B2	/	/	<b>1.2</b>	$5.9 \cdot 10^{-1}$	$1.3 \cdot 10^{-5}$	$1.7 \cdot 10^{-5}$
B1	/	/	/		/	/
P4	$1.1 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$1.8 \cdot 10^{-1}$	$8.4 \cdot 10^{-2}$	/	/
P2	$3.2 \cdot 10^{-1}$	$1.5 \cdot 10^{-1}$	$3.6 \cdot 10^{-1}$	$1.7 \cdot 10^{-1}$	/	/
F5	$5.3 \cdot 10^{-1}$	$2.5 \cdot 10^{-1}$	$1.8 \cdot 10^{-1}$	$8.4 \cdot 10^{-2}$	$4.2 \cdot 10^{-2}$	$1.9 \cdot 10^{-2}$
F12	$7.5 \cdot 10^{-1}$	$3.5 \cdot 10^{-1}$	$9.8 \cdot 10^{-1}$	$4.6 \cdot 10^{-1}$	$2.6 \cdot 10^{-2}$	$1.2 \cdot 10^{-2}$
P1			$8.9 \cdot 10^{-2}$	$4.2 \cdot 10^{-2}$	$1.6 \cdot 10^{-3}$	$7.4 \cdot 10^{-4}$

P3	$3.2 \cdot 10^{-1}$	$1.5 \cdot 10^{-2}$	$3.6 \cdot 10^{-1}$	$1.7 \cdot 10^{-1}$	$3.5 \cdot 10^{-5}$	$4.4 \cdot 10^{-5}$
P13	$8.6 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-1}$	$2.7 \cdot 10^{-1}$	$1.3 \cdot 10^{-1}$	$2.3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$
S1	<b>1.3</b>	$6 \cdot 10^{-1}$	<b>2.9</b>	<b>1.4</b>	$4.2 \cdot 10^{-2}$	$1.9 \cdot 10^{-2}$
S 2	$4.5 \cdot 10^{-4}$	$9.6 \cdot 10^{-4}$	<b>1.1</b>	$5 \cdot 10^{-1}$	$2.6 \cdot 10^{-2}$	$1.2 \cdot 10^{-2}$

L'évaluation du risque dans le périmètre irrigué de Bounamoussa en ce qui concerne la contamination par le zinc, présente un indice du risque acceptable chez l'enfant et l'adulte dans tous les points. Cependant L'IR dans le cas du Chrome est inacceptable chez l'enfant dans les eaux de la nappe superficielle au niveau d'El-Hadjar (P9, P10) et aux eaux superficielles de la Seybouse alors qu'il est tolérable pour la catégorie adulte à travers tous les points.

Quant au Plomb, L'IR est inacceptable pour les deux catégories et dépasse le seuil toléré dans le puits (P8), encore dans les eaux de surface des oueds, L'IR est souvent nuisible pour l'enfant et inacceptable chez l'adulte à l'exception du point S1 des eaux de surface de la Seybouse ou il est de l'ordre de 2.9 et 1.4 respectivement pour l'enfant et l'adulte.

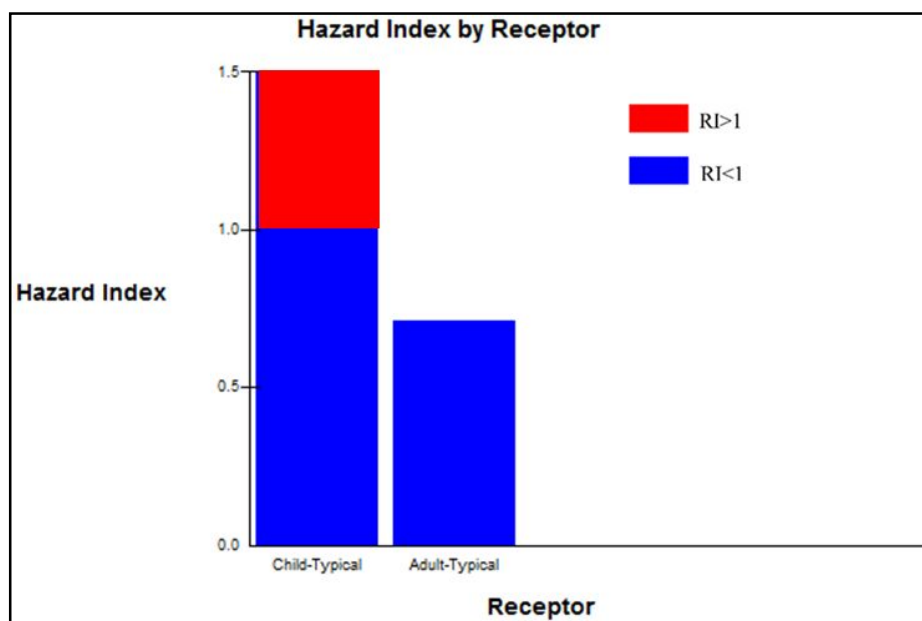


Figure.85. Indice du risque total du Cr dans le périmètre irrigué de Bounamoussa, (Octobre 2017).

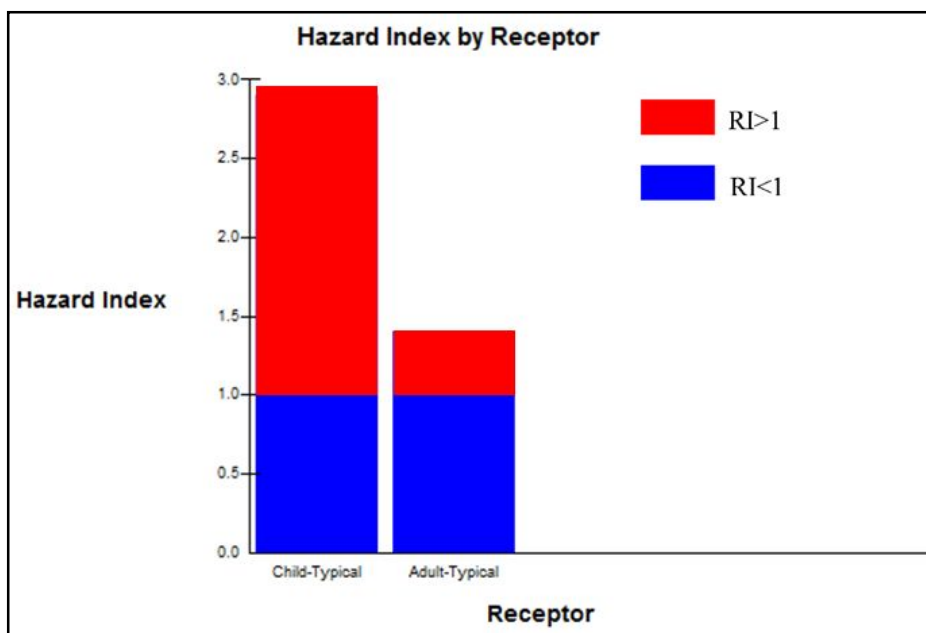


Figure.86. Indice du risque total du Pb dans le périmètre irrigué de Bounamoussa), (Octobre 2017).

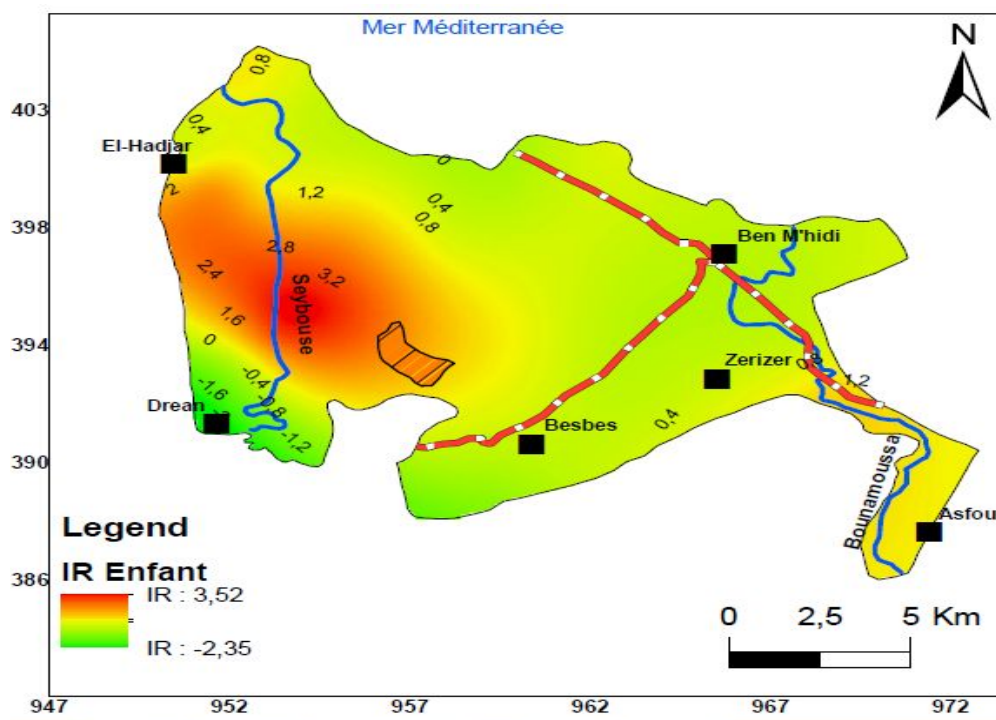
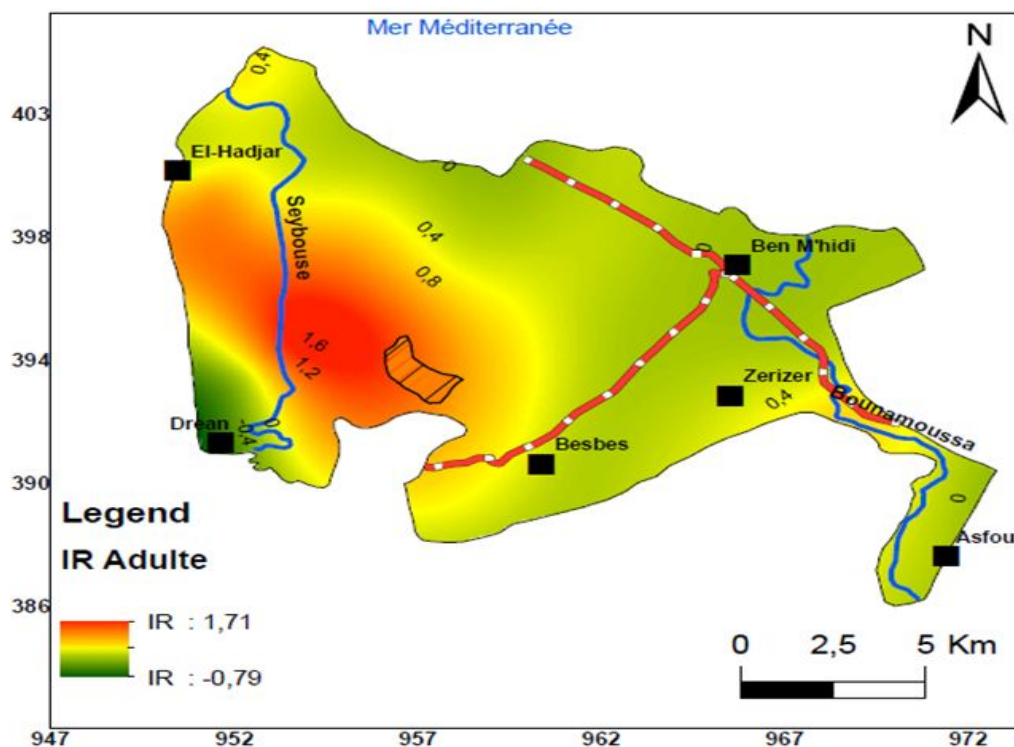


Figure.87. Carte de L'IR du Pb pour l'enfant (La nappe superficielle du périmètre irrigué de Bounamoussa, Octobre 2017).



**Figure.88. Carte de L'IR du Pb pour l'adulte (La nappe superficielle du périmètre irrigué de Bounamoussa, Octobre 2017).**

Les cartes (Fig.89 et Fig.90) montrent que les eaux de la nappe au centre du périmètre vers la plaine d'El-Hadjar sont les plus exposées au risque de contamination cancérigène par les métaux lourds et plus particulièrement, par les éléments Plomb et chrome. Au niveau du périmètre irrigué, On constate que L'IR augmente de l'Est vers L'Ouest, il devient important dans la plaine d'El-Hadjar (3 pour l'enfant et 1.5 pour l'adulte) prouvant ainsi le risque considérable engendré par ces eaux fortement chargées par les éléments en traces métalliques.

Par contre et dans le secteur Ouest et à proximité de l'oued Bounamoussa, le risque devient négligeable et ne représente aucun danger sur la santé des populations.

**VII.4.Conclusion**

Le traitement des données des éléments chimiques (métaux lourds) par le logiciel RISK5 montre que Les valeurs calculées de l'indice de risque des eaux du périmètre irrigué définissent un gradient de contamination métallique qui augmente du centre vers l'aval d'oued Seybouse ou L'IR pour les eaux de la nappe et les eaux superficielles est inacceptable pour les deux catégories (enfant, adulte) dans le cas du Plomb.

L'IR dans le cas du Chrome est inacceptable chez l'enfant dans les eaux de la nappe superficielle au niveau d'El-Hadjar (P9, P10) et aux eaux superficielles de la Seybouse alors qu'il est tolérable pour la catégorie adulte à travers tous les points.

L'évaluation du risque par le zinc, présente un indice du risque acceptable chez l'enfant et l'adulte dans tout le périmètre. Les eaux superficielles et souterraines aux alentours d'oued Bounamoussa dans la partie Ouest ne représentent aucun danger sur la santé des populations ce qui traduit par des valeurs de l'IR inférieure à 1, Alors on peut dire que ces eaux sont considérées comme dépourvues de toute contamination métallique.

***CONCLUSION GENERALE***

### Conclusion générale

Le périmètre irrigué de Bounamoussa est inclus dans le bassin versant côtiers constantinois Est, avec une superficie nette irrigable de 14800 ha. Il appartient à la série des plaines côtières de l'Est Algérien.

Du point de vue géologique, le terrain en question représente plusieurs formations géologiques d'origine métamorphique, sédimentaire, et éruptive attribuées au primaire, secondaire, tertiaire et quaternaire. Le massif cristallophyllien de l'Edough, constitue la terminaison Est de la ligne des crêtes du massif kabyle. Il forme aujourd'hui un dôme anticlinal sous l'aspect d'une amygdale elliptique dont l'axe orienté SW – NE prolonge la plaine au NW. Au relief principal s'ajoutent à l'Est le Djebel Bougantas, le Kef N'sour et le Bouhamra, les coteaux de Annaba et enfin le promontoire du Cap de Garde qui est tranché brusquement par l'affaissement méditerranéen.

Les principales unités géomorphologiques caractérisant la région d'étude sont : les terrasses de la Seybouse, les massifs de bordure et les marécages. Ces unités sont largement dominées par des formations quaternaires qui sont le siège des nappes aquifères.

La zone d'étude est soumise à un climat méditerranéen caractérisé par une pluviosité moyenne annuelle de 665.90 mm (les Salines), 641.95 mm (Ben M'hidi) et 762.13 mm (Boutheldja) et par une température moyenne modérée de 18.0°C. Ces deux paramètres climatiques ont permis de distinguer deux saisons hydriques du climat méditerranéen, l'une sèche et l'autre humide.

Le bilan hydrique nous a permis d'évaluer les quantités d'eau entrées et sorties de la surface étudiée. L'évapotranspiration potentielle annuelle est de 885 mm pour l'ensemble des stations. La reconstitution de la recharge commence au mois d'Octobre et s'achève au mois de Décembre. L'épuisement du stock du sol s'observe au mois de Mai et la nécessité d'irriguer s'impose surtout pour la période allant de Juin à Octobre où l'on constate un déficit agricole pouvant atteindre 413.6 mm (les Salines), 425.6 mm (Ben M'hidi et Boutheldja).

## Conclusion générale

Du point de vue hydrogéologique, Les plaines de Annaba-El-Tarf sont constituées par des sédiments mio-plio-quaternaires qui comportent plusieurs horizons aquifères. Ces formations sont très variées tant par la dimension des grains que par la géométrie des couches conférant aux matériaux des propriétés hydrauliques différentes dans l'espace. Dans ce remplissage hétérogène on distingue deux principales nappes aquifères d'importance quantitative et qualitative inégales vis-à-vis de l'étendue, l'une superficielle libre, l'autre profonde ; semi-captive qui devient captive à l'Ouest de la zone d'étude ces nappes sont largement exploitées par de nombreux ouvrages de captage destinés à l'alimentation des populations et pour répondre aux besoins de l'industrie et de l'agriculture.

L'allure générale des courbes isopièzes montre que la nappe suit le modèle topographique, Le sens d'écoulement se fait de l'amont vers l'aval (Sud Nord) constitue donc l'aire d'accumulation de l'ensemble des eaux souterraines, Cependant, au niveau de la partie avale (nord), nous constatons un changement de direction du flux, qui va de la mer vers le continent.

On note aussi, que la région est caractérisée par des gradients hydrauliques faibles dans la partie centrale ce qui représente une forte perméabilité indiquant, ainsi une probable exposition de la nappe à toute forme de pollution.

La représentation graphique et la cartographie du chimisme des eaux analysées, montre que les concentrations des ions majeurs reflètent l'environnement géologique. Les eaux salifères présentant un faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien, caractérisent la quasi-totalité des puits captant les eaux de la nappe superficielle où la charge minérale est élevée, ceci est du probablement à l'effet de l'évaporation dans les zones où le niveau statique de la nappe aquifère est peu profond.

Les eaux carbonatées, représentées par un faciès bicarbonaté calcique et magnésien, caractérise les eaux superficielles des oueds et les eaux de la nappe profonde, ce qui confirme que les apports de ces deux éléments sont liés à la dissolution des évaporites et les formations dolomitiques gréseuses qui affleurent dans la bordure Sud et Sud-Ouest de la nappe (le gré et l'argile du numidien dans les monts de la Chaffia).

En outre, plusieurs phénomènes secondaires ont été mis en évidence comme le processus d'échanges de base, présent en particulier dans les niveaux profonds, et joue dans les deux sens (Na/Ca ou Ca/Na), le remplacement du sodium par le calcium, sur les surfaces

## Conclusion générale

chargées des argiles, est sans doute favorisé par les fortes concentrations en Ca liées à la dissolution du gypse. Localement, en particulier dans les niveaux de la nappe superficielle un apport de cations est également possible du fait de l'hydrolyse des argiles.

Les autres processus de dissolution/précipitation des minéraux carbonatés (calcite et dolomite) sont généralement à l'origine de la variation des concentrations des cations des eaux.

En plus de ces processus naturels de la minéralisation, la pollution d'origine anthropique liée aux pratiques agricoles mal contrôlées, se traduit par des concentrations en nitrate, parfois très élevées. Elle peut également jouer, localement, un rôle significatif dans l'apport d'autres éléments tels que les sulfates dans les eaux de la nappe du périmètre.

L'apport de la salinité marine et La dissolution de l'halite contribuerait à la salinisation des eaux souterraines. Ceci est en accord avec l'état de sous-saturation des eaux vis-à-vis ce minéral.

L'étude statistique (ACP et AHC) confirme les résultats obtenus par l'approche hydrochimique.

Pour mettre en évidence l'impact des retours des eaux d'irrigation à la nappe, des corrélations des teneurs en sulfates, chlorures, sodium et potassium en fonction de nitrate (l'indicateur direct de la contamination par l'activité agricole ) ont été élaborées, Globalement les apports anthropiques en ces éléments paraissent négligeables comparés aux apports naturels à l'exception de quelques points qui sont alignés et corrélés entre eux de la plaine d'El-Hadjar et dans la partie centrale ou l'activité agricole se concentre indiquant qu' il y a un apport anthropique qui se résulte dans l'effet de l'infiltration après dissolution des éléments par les eaux d'irrigation contribuant ainsi à la contaminant de la nappe.

L'établissement des Cartes d'aptitude des eaux à l'irrigation selon les diagrammes de Richard et Wilcox a montré une cartographie qui semble être identique, Les eaux de bonne qualité sont celles de surface issues des monts du numidien de la Chaffia d'où provient l'Oued Bounamoussa, se localisant au Sud-ouest du terrain, Les eaux de qualité admissible à médiocre occupent le secteur sud du terrain et allant jusqu' à l'embouchure de la Seybouse, Les eaux médiocres se présentent dans la nappe juste après l'élévation de Dagoussa et s'étendent jusqu' à la mer passant par les eaux de la nappe de la plaine d'El hadjar, ici, l'effet de la grande minéralisation issue de la zone industrielle. Les eaux de mauvaise qualité se localisent dans les eaux des puits P3 et P2 auprès des agglomérations de Ben M'hidi et Zrizer.

## Conclusion générale

Elles s'expliquent par les eaux chargées stagnantes auprès de la zone marécageuse de Mekrada et l'effet des différents rejets, tout en rappelant la contamination par la pratique agricole intense aux alentours immédiats de ce secteur.

Le traitement des données des éléments chimiques (métaux lourds) par le logiciel RISK5 montre que Les valeurs calculées de l'indice de risque des eaux du périmètre irrigué définissent un gradient de contamination métallique qui augmente du centre vers l'aval d'oued Seybouse ou L'IR pour les eaux de la nappe et les eaux superficielles est inacceptable pour les deux catégories (enfant, adulte) dans le cas du Plomb.

L'IR dans le cas du Chrome est inacceptable chez l'enfant dans les eaux de la nappe superficielle au niveau d'El-Hadjjar (P9, P10) et aux eaux superficielles de la Seybouse alors qu'il est tolérable pour la catégorie adulte à travers tous les points.

L'évaluation du risque par le zinc, présente un indice du risque acceptable chez l'enfant et l'adulte dans tout le périmètre. Les eaux superficielles et souterraines aux alentours d'oued Bounamoussa dans la partie Ouest ne représentent aucun danger sur la santé des populations ce qui traduit par des valeurs de l'IR inférieure à 1, Alors on peut dire que ces eaux sont considérées comme dépourvues de toute contamination métallique.

***REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES***

### Références bibliographiques

**Agence de bassin hydrographique. Constantinois -Seybouse- Mellegue, 2003.** Actualisation du Caneva 2003, Bassin Côtiers Constantinois.

**A, Berrouard, M, Giroux, M Blackburn., 2001.** Site de saint-lambert-de-lauzon, institut de recherche et de développement en agroenvironnement, 33p.

**Aissa, D.E., 1985.** Etude des indices et gisements métallifères du massif de l'Edough (Annaba). Thèse de doctorat 3<sup>ème</sup> cycle. USTHB Alger, 134p.

**Allen, H.E., Hansen, D.J., 1996.** The importance of trace metal speciation to water quality criteria. *Water Environment Research*, 68, 42-54.

**Alloway, B.J., 1975.** Heavy metals in soils. Second Edition., Ed. Blakie Academic & Professional, Glasgow, 408 p.

**Bahroun Sofia, Kherici Bousnoubra Houria., 2011.** Evaluation de L'indice de pollution organique dans les eaux naturelles, Cas de la région d'El Tarf (Nord Est Algérien), *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n°9, pp.171-178.

**Baize, D., 1997.** Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). Références et stratégies d'interprétation. INRA Éditions, Paris. 410 p.

**Banton, O.M., Bangoy, L., 1999.** Hydrogéologie multiscience environnementale des eaux souterraines, Presses de l'université du Québec, 460p.

**Belhamra, A., 2001.** Contrôle de la salinité des eaux du Lac Fetzara jusqu'à la mer. Mémoire de Magister, option : Biologie et Physiologie des Organismes Marins. Univ. Annaba, 110 p.

**Billen, G., Garnier, J., Lassaletta, L., 2013.** The nitrogen cascade from agricultural soils to the sea: modelling nitrogen transfers at regional watershed and global scales. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.* 368, 20130123. doi:10.1098/rstb.2013.0123

**Boumaraf, K., Goucem, S., 2017.** Les possibilités d'utilisation des eaux de la plaine d'Annaba pour l'irrigation avec différentes méthodes. Master de l'université Badji Mokhtar Annaba, 65p

**Cahier de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques., 2000.** n°04, septembre 2000.

**Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec., 2010.** (CRAAQ).

**Callier, L., Clozel, B., Nowak, C., 2002.** Méthode de recherche de l'origine de pollution (s) dans les sols ou dans les eaux souterraines. BRGM RP-51260-Fr, 133p.

**Castany, G., 1982.** Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Ed. Dunod, Paris, France. 238p.

**Debieche, T.H., 2002.** Evolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle. Application à la basse plaine de la seyhouse – nord – est Algérien. Thèse de Doctorat, université de Franche -Compte, pp 197.

**DERRADJI F., 2004.** Identification quantitative et qualitative des ressources en eau dans la région d'Annaba – El Tarf ( Nord-Est de l'Algérie) . Thèse de doctorat d'état. Université d'Annaba. P124 -200.

### **DIRECTION DES FORETS DE ANNABA.**

**Djabri, L., Hani, A., Mania, J., Mudry J., 2000.** Conséquences des pratiques agricoles sur la qualité des eaux du bassin de la Seyhouse (Est algérien). Actes du colloque ESRA'2000, Poitiers, S3, pp.39-42.

**Djabri, L., 1996.** Mécanismes de la pollution et vulnérabilité des eaux de la Seyhouse. Origines géologique industrielle, agricole et urbaine. Th. Doct. Es-Sciences, Univ. Annaba, 261p.

**Djabri, L., Ghrieb, L., Hani,A.,Bouhsina, S. ,2013.** Impacts of morphological factors on the marine intrusion in Annaba region (east of Algeria).

**Djerrab, A., Gherbi, C., 1991.** Etude pétrologique et géochimique du magmatisme de l'Edough : conséquences métallogéniques (Pb-Zn-Cu). Mémoire d'ingénieur, univ. d'Annaba, 119p.

**Djorfi, S., Hani, A., Laouar, R., Djabri, L., 2008.** Impacts des rejets industriels sur la qualité du milieu et sur les eaux de la nappe superficielle. Cas de la région d'Annaba (Algérie). Bulletin du Service Géologique National, Alger ; Vol. 19 N°1- (2008). pp. 33-49.

**Doneen, L., D., 1962.** The influence of crop and soil on percolating water. Proc. 1961 Biennial Conf. on groundwater recharge. P10.

**Durov, S.A., 1948.** Classification of natural waters and graphical representation of their composition. Dokl. Akad. Nauk. USSR. 59(1):87-90.

**Erisman, J.W., Sutton, M. a., Galloway, J., Klimont, Z., Winiwarter, W., 2008.** How a century of ammonia synthesis changed the world. Nat. Geosci. 1. doi:10.1038/ngeo325.

**F,Derradji,H, Bousnoubra., N, Kherici., M, Romeo., R, Caruba., 2007.** Impact de la pollution organique sur la qualité des eaux superficielles dans le Nord-Est algérien Article scientifique Sécheresse ; 18 (1) : 23-73.

### Fond National pour la Régulation du Développement Agricole (FNRDA) en 2001.

**FouFou, A., Djorfi, S., Lekoui, S., Hani, A., 2011.** Modélisation de la dégradation de la qualité des eaux ; Zone industrielle Meboudja, Annaba. Euro-Mediterranean Seminar in Environment and Industrial Safety, April 24 & 25 (2011), Oran, Algeria. 16 p.

**FouFou, A., 2018.** Diagnostic et modelisation de la pollution des eaux par les metaux lourds au niveau de la decharge de Berka Zerga (Annaba)., Thèse Doct. en Sciences, Univ. Annaba, 165 p.

**Gaud., 1976.** Etude hydrogéologique du système aquifère d'Annaba - Bouteldja (synthèse des connaissances et recherche des conditions de modélisation) Rapport de l'ANRH. Algérie. 151p

**Géza JALANSKAI., 1990.** Les impacts de l'agriculture sur les ressources en eau et les voies de transfert par l'eau dans l'environnement. Les cahier du Murs n 19-20-1<sup>er</sup>/ 2<sup>eme</sup> trimestres.

**Gleizes, G., Boulton, J., Bossière, G., Collome, P., 1988.** Données lithologiques et pétrostructurales nouvelles sur le massif cristallophyllien de l'Edough (Est Algérien). C ; R. Acad. Sci. Paris, t 306, série II, p 1001-1008.

**Habes, S., 2013.** Caractéristiques chimiques d'un lac appartenant aux écosystèmes humides du Nord de l'Algérie ; Cas : Lac Fetzara Nord - Est Algérien., Thèse Doct. en Sciences, Univ. Annaba, 198 p.

**Hammor, D., 1992.** Du panafricain au miocène : 600 millions d'années d'évolution polycyclique dans le massif de l'Edough (Algérie Nord-orientale) retracees par la pétrologie, la tectonique et la géochronologie (V/Pb, Rb/Sr, Sm/Nd et Ar39/Ar40). Thèse de doctorat, université de Montpellier II, 205p.

**Haou, F., 2001.** Ornithologie en Algérie, les espèces existantes au niveau du Lac Fetzara (Nord-Est algérien). Archives de la liste de discussion « ornithologique ».

**Hamzaoui ,W., 2007.** Caractérisation de la pollution des eaux en milieux industriels et urbain cas de la plaine d'El-Hadjar .Mémoire de magister .Université d'Annaba.P21-24-25.

**Hani, A., 2003.** Analyse méthodologique de la structure et des processus anthropiques : application aux ressources en eau d'un bassin côtier méditerranéen. Thèse de doctorat d'état en géologie appliquée. Univ. Annaba, 214 p.

**Hilly, J., 1962.** Etude géologique du massif de l'Edough et du Cap de Fer, (Est Constantinois), carte géologique Algérie. Bull, n°19, 399p. thèse de doctorat.

**Ilavsky, J., Snopkova, P., 1987.** Découverte d'Acritarches paléozoïques dans les terrains métamorphiques de l'Edough (Wilaya d'Annaba, Algérie). Comptes rendus de l'académie des sciences, Paris 305 (serie II), 881-884.

- J.M.Villa., 1980.** La chaîne Alpine d'Algérie orientale et des couffins Algéro-Tunisiens. Thèse doctorat d'état, université Paris VI, 3 volumes, 650p (In. Tlili).
- Joleaud, L., 1936.** Etude géologique de la région de Bône et de la Calle-pub. Service carte géologique. Algérie n°12. 200p.
- Kherici, N., 1993.** Vulnérabilité à la pollution chimique des eaux souterraines d'un système de nappes superposées en milieu industriel et agricole (Annaba la Mafragh-nord-est algérien). Th. Doct. Es-Sciences, Université d'Annaba. 170p.
- Laouar, R., Boyce, A.J., Ahmed Said, Y., Ouabadi, A., Fallick, A.E., Toubal, A., 2002.** Stable isotope study of igneous, metamorphic and mineralized rocks of the Edough complex, Annaba, Northeast Algeria, Journal of African earth sciences 35 pp. 271-283.
- Laperche, V., Dictor, M.C., Clozel-Leloup, P.Baranger., 2004.** Guide méthodologique du plomb appliqué à la gestion des sites et des sols pollués. BRGM. 136 p.
- Lekoui , S. 2010.** Évaluation du risque lié aux sites pollués en milieu urbain et industriel (Annaba, Nord Est algérien). Thèse de Magister, Université d'Annaba, Algérie, 138 p.
- Lekoui et al. 2019.** The Impact of irrigation water returns on the water quality of Annaba El Tarf aquifers, (Northeastern Algeria), Journal of Biodiversity and Environmental Sciences (JBES), Vol.14, No.6, p.290-298.
- Lloyd, J.A., Heathcote, J.A., 1985.** Natural inorganic hydrochemistry in relation to groundwater: An introduction. Oxford Uni. Press, New York, 296 p.
- Malkia, R. 2007.** Diagnostique hydro-agricole du perimetre de la bounamoussa Nord Est Algérie. Thèse de Magister, Algérie, Institut national agronomique d-El-Harrach, Alger. 128 p.
- Marre, A., 1987.** Le Tell Oriental Algériens de Collo à la frontière Tunisienne. Etude géomorphologique, volume 1 et 2 O.P.U. Alger. Algérie.
- M,Durand Delga., 1969.** Publ. Serv. géol. Algérie, Mise au point sur la structure du Nord-Est de la Berbérie.
- M. G. Hickey and J. A. Kittrick, 1984.** Chemical Partitioning of Cadmium, Copper, Nickel and Zinc in Soils and Sediments Containing High Levels of Heavy Metals1 Journal of Environmental Quality, Vol. 13 No. 3, p. 372-376.
- Mouchara Nabil ,2009 .** Impacts des lachees de barrage hammam debah sur la qualite des eaux de la valee de la seybose dans sa partie amont (Nord –Est Algerien), Mémoire de majister universite de annaba ,123p
- Marre, A., 1992.** Le Tell oriental Algérien de Collo à la frontière Tunisienne, étude géomorphologique, volume 1 & 2 O.P.U Alger, Algérie.

- NOUACER R., 1993.** Essai de synthèse des caractéristiques hydrologiques et hydrochimiques de la nappe du massif dunaire de Boutheldja, Thèse de Magister, Université de Annaba.
- O.M.S., 2004.** Guidelines for drinking-water quality, Vol. 1, Recommendations, 3rd Ed., World Health Organization, Geneva, 515 p.
- ONS., 2008.** Office national de la statistique.
- OPI ., 2016.** Office du perimetre irrigue d'EL Tarf.
- Person, J., 1978.** Irrigation et drainage en Tunisie problème posé par la salinité des sols et des eaux. Bull. BRGM (2ème série) section III, n°2 : 143-151.P.
- Piper, A.M., 1944.** A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. American Geophysical Union Transactions, 25, 914–928.
- PNDA., 2000.** Programme National de Développement de l'Agriculture.
- Raoult, J.F.1974.** Géologie du centre de la chaine numidique (Nord du constantinois, Algérie).mem.soc géol.Fr.N.S, 53-121.
- Richards, L.A., Sous la direction U.S.S.L.S. (United State Salinity Laboratory Staff), 1954.** Diagnosis and improvement of saline and alkali soils.US Department of Agriculture, Handbook n°60, U. S. Gov. Print. Office, Washington DC (USA), 160p.
- Rodier, J., 2005.** Avec la collaboration de C. Bazin, J. –P. Broutin, P. Chambon, H. Champsaur, L., L'analyse de l'eau ; eaux naturelles, eaux résiduaires ; eaux de mer, 9e édition. DUNOD, 1529p.
- Rouabhia, A., 2006.** Vulnérabilité et risque de pollution des eaux souterraines de lanappe des sables miocène de la plaine d'El Ma El Abiod. N.E Algérie. Thèsede doctorat en sciences, 210 p, Université d'Annaba, Algérie.
- Saadali, B.,2007.** Concentration des éléments chimiques des sources dans le massif dunaire de Bouteldja .Mémoire de magister .Université d'Annaba. 138 P.
- Saaidia, B., 1992.** Etude des conditions de protection des ouvrages de captage dans la plainede Annaba contre l'avancée du biseau salé / Mémoire de Magistère. Universitéd'Annaba (94p).
- Salvadore J. Locascio 1 , George J. Hochmuth 1 , Fred M. Rhoads 2 ,Steve M. Olson 2 , Alan G. Smajstrla 3 and Ed A. Hanlon 4, 1997.**Nitrogen and Potassium Application Scheduling Effects on Drip-irrigated Tomato Yield and Leaf Tissue Analysis,Hort science, Volume 32: Issue 2, 230–235p

- Samia Benrabah, Houria Bousnoubra, Nacer Kherici. 2013.** Caracterisation de la qualite des eaux de l'oued Kebir Quest (Nord Est algerien) .Rev. Sci. Technol., Synthese 26, 30-39.
- SAU.** surface agricole utile
- Sedrati, N., 2006.** Vulnérabilité et impact des agglomérations sur la qualité des eaux .du massif dunaires de Bouteldja Mémoire de magister .géologie .Université d'Annaba. P43.
- SEATA. ,2016.** Société de l'Eau et l'Assainissement de Tarf et Annaba.
- Sonatrach, 1966.** Esquisse structurale de la plaine d'Annaba. Rapport A.N.R.H., inédit. Annaba, Algérie.
- Strojexport, 1975.** Prospection géophysique de la plaine d'Annaba. Réinterprétation. Rapport A.N.R.H., inédit, Annaba, Algérie, 30 p.
- Suarez, D., Wood, J., Lesch, S., 2006.** Effect of SAR on water infiltration under a sequential rain-irrigation management system. Agric water Manage; 86: 2006, pp150-64.
- Thorntwaite, C.W., 1948.** An approach towards a rational classification of climate. Geographical Review 38, pp 55-94.
- Todd, K., 1980.** Groundwater hydrology. New York. 2ndedn. Wiley, 1980, p 510.
- Turc, L., 1961.** Evaluation des besoins en eau d'irrigation ; évapotranspiration potentielle. Ann. Agr. n° 12. p 13 - 49.
- VAN SCHILFGAARDE, 1974.** Book: Drainage for Agriculture, Published by: American Society of Agronomy, ISBN: 978-0-89118-211-5.
- Villa, J.M., 1970.** Le Dj. Edough ; un massif cristallin externe du Nord-Est de la Berberie/ Bull. Soc. Géol. Fr. 7-XII, n°5, p805-812.
- Villa, J.M., 1980.** La chaîne Alpine d'Algérie orientale et des couffins Algéro-Tunisiens. Thèse doctorat d'état, université Paris VI, 3 volumes, 650p.
- Waste couture. 2007.** Environmental impact of the clothing industry L Claudio - 2007 Environmental Health Perspectives • VOLUME 115 , NUMBER 9,September 2007
- Wilcox, L., 1948.** The quality of water for agricultural use. US Dept. Agriculture Tech Bull 962. Washington.
- Zenati, N., Messadi, D., 2010.** Utilisation de la géostatistique dans l'établissement de la carte de vulnérabilité intrinsèque d'une nappe superficielle à un polluant par infiltration verticale. Cas de la nappe superficielle de la plaine Ouest d'El Hadjar, Annaba, Algérie. Communication Science & technologie N° 8, pp 105-110.

**Zenati, N.E., 1999.** Relation nappe-lac, confirmation par l'hydrochimie, cas de la nappe superficielle de la plaine ouest d'El Hadjar lac Fetzara ; nord-est Algérien. Mémoire de magister. Univ. D'Annaba.