

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

Faculté des Sciences de l'Ingénieur  
Département d'Hydraulique

Année : 2017/2018

# THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de *DOCTORAT ES sciences*

## ETUDE DE LA QUALITE DES EAUX STOCKEES A L'AMONT ET LES EAUX D'INFILTRATION A L'AVAL DES BARRAGES EN REMBLAI EN ALGERIE

Option  
Hydraulique

Par  
**BOUSLAH SORAYA**

Ing. d'état en hyd. Option: Aménagement et Ouvrages hydrotechniques  
Magister en Sciences de l'Hydraulique

Devant le Jury

Président : Lahbassi OUERDACHI

Pr. Univ. Badji Mokhtar, Annaba

Examineurs : Abderahmane BOUDOUKHA  
Azzedine HANI  
Salim HADDAM

Pr. Univ. Batna 2, Batna  
Pr. Univ. Badji Mokhtar, Annaba  
M.C.A Univ. 20 Aout 1956, Skikda

Directeur de Thèse : DJEMILI LAKHDAR  
CO-ENCADREUR : Larbi HOUICHI

Pr. Univ. Badji Mokhtar, Annaba  
Pr. Univ. Batna 2, Batna

**« Les plus importantes découvertes  
scientifiques sont le résultat de la patiente  
observation de petits faits subsidiaires, si  
particuliers, si menus, inclinant si  
imperceptiblement les balances que l'on ne  
consentait pas jusqu'alors à en tenir compte »**

**André Gide (1869-1951)**

## REMERCIEMENTS

Comme le veut la tradition, je vais tenter de satisfaire au difficile exercice de la page des remerciements, peut-être la tâche la plus ardue de ces années de thèse. Non qu'exprimer ma gratitude envers les personnes en qui j'ai trouvé un soutien soit contre ma nature, bien au contraire, la difficulté tient plutôt dans le fait de trouver les mots pour remercier chaque personne qui a, d'une manière ou d'une autre, contribué au bon déroulement et l'aboutissement de ce projet.

La première personne que je tiens à remercier est mon directeur d'étude, le Pr. *DJEMILI Lakhdar*, qui a su me laisser la liberté nécessaire à l'accomplissement de mes travaux, tout en y gardant un œil critique et avisé. Nos échanges continuels, si riches, ont sûrement été la clé de réussite de ce travail.

Je tiens également à remercier mon co-directeur de thèse Pr *HOUICHI Larbi* qui m'a accepté et m'épauler en tant que nouveau thésard. Il a montré une grande disponibilité et gentillesse durant toute la fin de ma thèse.

J'adresse également mes sincères remerciements aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail et malgré leur occupations, ils ont eu le temps d'évaluer ce travail et nous faire part de leurs critiques qui ne feront qu'améliorer la qualité de ce travail. Je cite en particulier :

Pr *OUERDACHI Lahbassi* Université de Annaba

Pr *BOUDOUKHA Abderrahmane* Université de Batna

Pr *HANI Azzedine* Université d'Annaba

Dr *HADDAM Salim* Université de Skikda

J'exprime mes profonds remerciements à mes collègues et amis, BOUTAGHANE Hamouda, LAKEHAL Moussa, et HACHEMI RACHEDI Lamia votre rigueur, votre sens de l'humour et vos connaissances ont grandement contribué à l'aboutissement de ce travail, pour tout le temps qu'on a passé ensemble en essayant de progresser et de développer nos talents.

Mes remerciements vont également aux Enseignants du département d'hydraulique. Il y a certaines personnes qui méritent un remerciement spécial : celles qui ont été à mes côtés dans les moments les plus durs et celles qui ont créé et partagé tant de si bons souvenirs avec moi. Je les remercie de croire en moi lorsque j'ai de la difficulté à croire en moi-même. A tout ce beau monde, je dédie cette thèse.

Enfin, Je voudrais spécialement remercier ma Mère, un grand merci pour tout ce que vous m'avez apporté tout au long de mes études et en dehors.

## RESUME

L'eau est un domaine prioritaire pour l'Algérie. Divers contaminants (anions, cations, métaux lourds, contaminants organiques, pesticides, fertilisants, ...) d'origine agricole ou urbaine générés par les activités humaines et déposés sur la surface du terrain sont collectés par le ruissellement des eaux. Ces eaux peuvent donc constituer un potentiel de pollution non négligeable pour les milieux récepteurs, surtout les eaux superficielles. En effet, ces effluents sont à l'origine de plus de la moitié des charges polluantes déversées dans les lacs des barrages qui représentent la source d'approvisionnement en eau.

Le Nord Est Algérien, a toujours connu des problèmes liés à la quantité et à la qualité des eaux de surface, les eaux souterraines étant très limitées. La ressource en eau de surface se trouve exposée à des risques potentiels d'altérations chroniques ou épisodiques. Cette situation est en partie due aux rejets urbains et industriels qui sont souvent déversés directement dans les cours d'eau. Cette étude a pour objectif, l'analyse et l'interprétation des analyses physico-chimiques d'eau pris de dix-huit barrages en remblai de l'Est Algérien suivi par ANBT. Ces données ont été analysées à l'aide d'outils statistiques afin de contribuer à la compréhension du comportement du chimisme des eaux de surface.

Cette étude a montré que les eaux de surface sont affectées par une pollution urbaine et ou industrielle; la présence d'éléments traces métalliques comme le plomb, le mercure et l'arsenic a fortement contribué à la dégradation de la qualité de ces eaux qui limite leur utilisation notamment pour l'alimentation en eau potable.

Pour évaluer la quantité et la qualité physicochimique des eaux de fuites des barrages Ain Dalia, Hammam Debagh et Zit Emba nous avons effectué deux campagnes de mesures basses et hautes eaux. Des mesures de débit et des échantillons ont été prélevés de la cuvette et des drains pendant l'année hydrologique 2016/2017.

La modélisation numérique a pour objectif de modéliser le mouvement des ions et ou cations à travers les digues étudiées. Pour cela, on utilise le logiciel CTRAN/W. Comme SEEP/W, CTRAN/W est un logiciel d'éléments finis qui est utilisé pour modéliser le mouvement des contaminants à travers des milieux poreux. La diffusion et l'advection ont ensemble été les deux processus de transport des ions.

**Mots clés :** barrage, eaux naturelles, modélisation, paramètres physico-chimiques, pollution, qualité de l'eau.

## ملخص

تعد المياه مجال أولوية للجزائر. عديد من الملوثات المختلفة (الأيونات، الكاتيونات، المعادن الثقيلة، الملوثات العضوية، المبيدات الحشرية، الأسمدة، إلخ) من أصل زراعي أو حضري ناتجة عن الأنشطة البشرية وتوضع على سطح الأرض من خلال جريان المياه. وبالتالي يمكن أن تشكل هذه المياه إمكانات تلوث كبيرة لبينات الاستقبال، لا سيما المياه السطحية. وبالفعل، فإن هذه النفايات السائلة مسؤولة عن أكثر من نصف الأحمال الملوثة التي تصب في بحيرات السدود التي تمثل مصدر إمدادات المياه.

لطالما واجه شمال شرق الجزائر مشاكل تتعلق بكمية ونوعية المياه السطحية، علما أن كمية المياه الجوفية جد محدودة بها. يتعرض مورد المياه السطحية للمخاطر المحتملة للتغيرات المزمعة أو العرضية. ويرجع هذا الوضع جزئيا إلى التصريفات الحضرية والصناعية التي غالبا ما يتم تصريفها مباشرة في المجاري المائية. تهدف هذه الدراسة إلى تحليل وتفسير التحاليل الفيزيوكيميائية للمياه المأخوذة من ثمانية عشر سداً في شرق الجزائر مراقب من طرف ANBT. تم تحليل هذه البيانات باستخدام أدوات إحصائية للمساعدة في فهم سلوك كيمياء المياه السطحية.

أظهرت هذه الدراسة أن المياه السطحية تتأثر بالتلوث الحضري والصناعي. وقد ساهم وجود العناصر المعدنية النادرة مثل الرصاص والزنك والزرنيخ إلى حد كبير في تدهور نوعية هذه المياه مما يحد من استخدامها، خاصة فيما يتعلق بإمدادات مياه الشرب.

لتقييم الكمية والنوعية الفيزيائية -الكيميائية لمياه التسرب في سدود عين داليا وحمام دباغ وزيت العنبة، أجريت مجموعتين من العينات للمياه. تم أخذ قياسات وتدقق العينات من الحوض والمصارف خلال العام الهيدرولوجي 2017/2016.

الغرض من النمذجة العددية هو نموذج حركة الأيونات والكاتيونات من خلال السدود التي تمت دراستها. لهذا، نستخدم البرنامج CTRAN / W. مثل SEEP / W، CTRAN / W هو برنامج العناصر المحدودة التي تستخدم لنمذجة حركة الملوثات من خلال وسائل الإعلام التي يسهل اختراقها. كان الانتشار والإنصاع معاً هما عمليتي النقل الأيوني.

**الكلمات المفتاحية:** سد، المياه السطحية، النمذجة، التلوث، جودة المياه.

## **ABSTRACT**

Water is a priority sector for Algeria. Various contaminants (anions, cations, heavy metals, organic contaminants, pesticides, fertilizers, etc.) of urban or agricultural origin generated by human activities and deposited on the surface of the land are collected by water runoff. These waters can therefore constitute a significant pollution potential for the receiving environments, especially the surface waters. Indeed, these effluents are responsible for more than half of the polluting loads discharged into the lakes of dams that represent the source of water supply.

Northeast of Algeria, has always known problems related to the quantity and quality of surface water, groundwater is very limited. The surface water resource is exposed to potential risks of chronic or episodic alterations. This situation is partly due to urban and industrial discharges that are often discharged directly into stream. This study aims to analyze and interpret the physicochemical analyzes of water taken from eighteen embankment dams in eastern Algeria followed by ANBT. These data were analyzed using statistical tools to help understand the behavior of surface water chemistry.

This study has shown that surface water is affected by urban and industrial pollution; the presence of trace metal elements such as lead, mercury and arsenic has greatly contributed to the degradation of the quality of these waters which limits their use, particularly for the supply of drinking water.

To evaluate the quantity and the physico-chemical quality of the leakage waters of the Ain Dalia, Hammam Debagh and Zit Emba dams, we performed two companions of low and high water measurements. Flow measurements and samples were taken from the basin and drains during the 2016/2017 hydrological year.

The purpose of numerical modeling is to model the movement of ions and cations through the dikes studied. For this, we use the software CTRAN / W. Like SEEP / W, CTRAN / W is a finite element software that is used to model the movement of contaminants through porous media. Diffusion and advection together were the two ion transport processes.

**Key words:** dam, natural waters, modeling, physico-chemical parameters, pollution, water quality.

## TABLE DES MATIERES

Remerciements	
Résumé Français	
Résumé Arabe	
Résumé Anglais	
Table des matières	
Liste des Figures par chapitre	
Liste des Tableaux par chapitre	
Liste des abréviations	
INTRODUCTION GENERALE.....	1

### Première partie : Synthèse bibliographique

#### Chapitre I :

#### LES BARRAGES EN ALGERIE

I.1. INTRODUCTION.....	6
I.2. LES DIFFERENTS TYPES DE BARRAGE EN TERRE.....	7
I.2.1. Les barrages en terre homogènes.....	8
I.2.2. Les barrages en terre à noyau étanche.....	8
I.2.3. Les barrages en terre à masque amont.....	9
I.3. HISTORIQUE DES BARRAGES ALGERIEN.....	10
I.3.1. La période coloniale.....	10
I.3.2. De 1962 à 1980.....	12
I.3.3. De 1980 à 1999.....	12
I.3.4. A partir de 2000.....	12
I.3.5. De 2010- 2015.....	12
I.4. PATHOLOGIE DES BARRAGES EN MATERIAUX LOCAUX.....	17
I.4.1 Pathologie liée à l'instabilité d'ensemble, conséquences pour l'ouvrage.....	17
I.4.2. Pathologie liée aux tassements.....	18
I.4.2.1. Le tassement de la fondation.....	18
I.4.2.2. Le tassement du remblai.....	18
I.4.3. Pathologie liée aux étanchéités.....	18
I.4.4. L'envasement.....	19
I.4.5. Les principaux problèmes hydrauliques en Algérie.....	20
I.4.5.1. Envasement des barrages en Algérie.....	20

I.4.5.2. Ampleur de l'évaporation au niveau des barrages.....	21
I.4.5.3. Fuites dans les barrages.....	21
I.4.5.4. Eutrophisation des retenues de barrages.....	22

I.5. CONCLUSION.....	22
BIBLIOGRAPHIE.....	23

## Chapitre II :

## LES EAUX SUPERFICIELLES

II.1. INTRODUCTION.....	26
II.2. CARACTERISATION ET EVALUATION.....	27
II.2.1. Les caractères chimiques et les propriétés physiques des eaux continentales .....	27
II.2.1.1. Caractères chimiques de l'eau et substances dissoutes.....	27
II.2.1.2. Analyse des eaux.....	28
II.3. ASPECTS GENERAUX DE LA POLLUTION DES EAUX.....	29
II.3.1. Origine de la pollution.....	30
II.3.1.1. La pollution domestique.....	30
II.3.1.2. La pollution industrielle.....	30
II.3.1.3. La pollution agricole.....	30
II.3.1.4. Phénomènes naturels.....	31
II.3.2. Conséquences de la pollution.....	31
II.3.2.1. Conséquences sanitaires.....	31
II.3.2.2. Conséquences écologiques.....	31
II.3.2.3. Conséquences esthétiques.....	32
II.3.2.4. Conséquences industrielles.....	32
II.3.2.5. Conséquences agricoles.....	32
II.3.3. Importance de la pollution.....	33
II.3.4. Etude de la pollution.....	33
II.4. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES TRAVAUX RÉALISÉS DANS LA REGION DU NORD EST ALGERIEN.....	34
II.5. CONCLUSION.....	37
BIBLIOGRAPHIE.....	37

## Chapitre III :

## TRANSFERT DE POLLUANTS (MIGRATION DES IONS)

III.1. INTRODUCTION.....	39
--------------------------	----

III.2. LES MECANISMES DE TRANSPORT EN MILIEU POREUX.....	39
III.2.1. Le processus de transport par advection.....	40
III.2.2. Le processus de transport par dispersion.....	41
III.2.2.1. Dispersion mécanique.....	42
III.2.3. La diffusion moléculaire.....	43
III.2.4. Dispersion hydrodynamique.....	44
III.2.5. Diffusion versus dispersion.....	45
III.3. LE TRANSPORT DE SOLUTES REACTIFS DANS LES MILIEUX POREUX.....	47
III.3.1. Devenir des contaminants.....	47
III.3.2. Effet des processus physico-chimiques sur le transport.....	48
III.4. QUANTIFICATION DES PROCESSUS DE TRANSPORT.....	49
III.4.1. Méthodes de résolution de l'équation d'advection-dispersion....., .....	49
III.5. CONCLUSION .....	50
BIBLIOGRAPHIE.....	51

## Deuxième partie : Qualité des eaux

### Chapitre IV :

### DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE

IV.1. INTRODUCTION.....	52
IV.2. SITUATION GEOGRAPHIQUE.....	52
IV.3. APERÇU TOPOGRAPHIQUE.....	53
IV.4. LE CLIMAT.....	54
IV.5. LA VEGITATION FORESTIERE.....	55
IV.6. LES SOLS.....	56
IV.7. CADRE GEOLOGIQUE.....	57
IV.8. L'HYDROGRAPHIE.....	59
IV.9. CONCLUSION .....	63
BIBLIOGRAPHIE.....	64

### Chapitre V :

### QUALITE DES EAUX SUPERFICIELLES (CUVETTES DES BARRAGES)

V.1. INTRODUCTION.....	65
V.2. ACQUISITION DES DONNEES.....	65
V.3. ANALYSE DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES.....	66
V.3.1. Statistiques descriptives.....	66
V.3.2. Chimie générale des eaux.....	69
V.3.2.1. Potentiel hydrogène.....	70

V.3.2.2. Résidu sec RS.....	71
V.3.2.3. Oxygène dissous OD et % de saturation en oxygène.....	73
V.3.2.4. Nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ).....	75
V.3.2.5. Les nitrites ( $\text{NO}_2^-$ ) ou azote nitreux.....	76
V.3.2.6. Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ).....	78
V.3.2.7. Phosphate ( $\text{PO}_4^{3-}$ ).....	79
V.3.2.8. La DBO5 (Demande Biologique en Oxygène).....	80
V.3.2.9. La demande Chimique en Oxygène (DCO).....	81
V.3.2.10. La matière organique MO.....	82
V.4. ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES (ACP).....	83
V.4. 1. Variance et valeurs propres.....	85
V.4. 2. Liaison Variables-Facteurs.....	86
V.4. 3. Corrélations entre les variables.....	86
V.5. QUALITE DES EAUX POUR L’A.E. P.....	89
V.5.1. Les indices de la qualité de l'eau.....	89
V.5.2. L'indice de qualité de l'eau arithmétique pondérée.....	93
V.6. CONCLUSION.....	106
BIBLIOGRAPHIE.....	107

## Chapitre 6 : **HYDROCHIMIE DES EAUX DES BARRAGES ET LES EAUX DE FUTES.**

### « Ain Dalia ; Hammam Debagh & Zit Emba »

VI.1. INTRODUCTION.....	110
VI.2. ÉCHANTILLONNAGES ET TECHNIQUES D’ANALYSES.....	110
VI.3. ANALYSE STATISTIQUE DES DONNEES PHYSICO-CHIMIQUES.....	112
VI.3.1. Corrélation entre les paramètres physico-chimiques.....	113
VI.4. ANALYSE DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES.....	113
VI.4.1. Les mesures in situ.....	113
VI.4.1.1. Température.....	113
VI.4.1.2. Oxygène dissous.....	114
VI.4.1.3. Conductivité.....	115
VI.4.1.4. Potentiel d’hydrogène.....	117
VI.4.1.5. La dureté totale.....	118
VI.4.2. Eléments minéraux majeurs.....	120
VI.4.2.1. Cations.....	120

VI.4.2.2. Anions.....	121
VI.4.2.3. Paramètres de pollution.....	122
VI.4.2.4. Composés azotés.....	123
VI.4.2.5. Eléments traces métalliques.....	125
VI.5. QUALITE DES EAUX DE BARRAGES AMONT.....	126
VI.5.1. Facies chimiques des eaux.....	126
VI.5.2. Aptitude des eaux en AEP.....	130
VI.5.3. Qualité des eaux pour l'irrigation.....	131
VI.5.3.1. Introduction.....	131
VI.5.3.2. Aptitude des eaux des barrages Ain Dalia, Hammam Debagh et Zit Emba à l'irrigation.....	131
VI.6. CONCLUSION.....	136
BIBLIOGRAPHIE.....	137

### Troisième partie : Infiltrations et transfert des ions

#### Chapitre VII : LES DEBITS DE FUTES (LES INFILTRATIONS A TRAVERS LA DIGUE)

VII.1. INTRODUCTION.....	139
VII.2. ESTIMATION DES DEBITS DE FUTES.....	140
VII.2.1. Méthode théorique de Kozeny.....	140
VII.2.1.1. La ligne de saturation.....	141
VII.2.2. Méthode des éléments finis.....	145
VII.3. BARRAGE AIN DALIA.....	149
VII.3.1. La méthode Kozeny.....	149
VII.3.2. La méthode des éléments finis (Géo studio).....	151
VII.3.3. Etude comparative.....	152
VII.4. BARRAGES HAMMAM DEBAGH ET ZITEMBA.....	152
VII.5. CONCLUSION.....	155
BIBLIOGRAPHIE.....	155

#### Chapitre VIII : MODELISATION NUMERIQUE (TRANSFERT DES IONS)

VIII.1. INTRODUCTION.....	157
VIII.2. ÉCOULEMENT ET TRANSPORT DES IONS.....	158
VIII.2. 1. Modélisation de l'écoulement de l'eau souterraine avec Seep/W.....	158
VIII.2. 1.1. Définition du type de problème.....	159

VIII.2. 2.Modélisation de la migration des chlorures avec Ctran/W.....	159
VIII.2. 2.1.Propriétés des matériaux.....	160
VIII.2. 2.2.Conditions aux frontières.....	160
VIII.2. 2.2.Type de l'analyse.....	161
VIII.2. 2.3.Résultats: Modélisation de la migration des chlorures.....	162
VIII.3. CONCLUSION.....	164
BIBLIOGRAPHIE.....	165
CONCLUSION GENERALE.....	166
Annexe 1... ..	168
Annexe 2.....	178
Annexe 3.....	181
Annexe 4.....	187

## LISTE DES FIGURES

### Chapitre I :

### LES BARRAGES EN ALGERIE

Figure I. 1: Barrage en terre homogène.....	8
Figure I. 2: Barrage à noyau central.....	9
Figure I. 3: Barrage en terre à masque amont.....	9

### Chapitre III :

### TRANSFERT DE POLLUANTS (MIGRATION DES IONS)

Figure III. 1: Transport par advection d'un contaminant.....	40
Figure III. 2: Transport par advection et dispersion du contaminant.....	41
Figure III. 3: Ecoulement de l'eau dans un media poreux.....	42
Figure III. 4: Ratio DL/Dd et DT/Dd par rapport au nombre de Péclet (Fetter 1999).....	46

### Chapitre IV :

### DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE

Figure IV. 1: Localisation de la région d'étude (ANBT).....	53
Figure IV. 2: Carte topographique montrant les différents reliefs de la région Est Algérienne.....	54
Figure IV. 3 : La répartition des principales espèces forestières à l'Est Algérien (DGF modifier).....	56
Figure IV. 4: Carte des sols de la région d'étude (source [fao 2005] modifié).....	57
Figure IV. 5 : Carte géologique de la région Nord-Est de l'Algérie) Meghraoui, 0988, modifié). Les structures actives sont inspirées selon (Vila, 1977, Meghraoui, 1988 ; Harbiet al. 2003 et Domzig, 2006).....	59
Figure IV. 6 : Le réseau hydrographique de l'Est Algérien.....	61
Figure IV. 7 : Localisation des sites des barrages en Algérie.....	62

### Chapitre V :

### QUALITE DES EAUX SUPERFICIELLES (CUVETTES DES BARRAGES)

Figure V. 1: Variation de pH des eaux de surface du Nord Est Algérien.....	71
Figure V. 2 : Variation de RS des eaux de surface du Nord Est Algérien.....	72
Figure V. 3 : Variation de O <sub>2</sub> des eaux de surface du Nord Est Algérien.....	74
Figure V. 4: Variation de NO <sub>3</sub> des eaux de surface du Nord Est Algérien.....	76
Figure V. 5: Variation de NO <sub>2</sub> des eaux de surface du Nord Est Algérien.....	77



Figure VI. 14 : Faciès chimiques des hautes eaux des 03 barrages .....	128
Figure VI. 15: Faciès chimiques des basses eaux des 03 barrages.....	129
Figure VI. 16 : Classification des hautes eaux des 03 barrages : diagramme de Wilcox, b) diagramme de Riverside.....	135
Figure VI. 17 : Classification des basses eaux des 03 barrages : diagramme de Wilcox, b) diagramme de Riverside.....	136

**Chapitre VII : LES DEBITS DE FUTTES (LES INFILTRATIONS A TRAVERS LA DIGUE)**

Figure VII. 1: Ligne de saturation dans barrage en terre non drainé d'après Kozeny.....	141
Figure VII.2: Détermination de la grandeur pour la correction de la ligne de saturation à l'amont.....	142
Figure VII. 3: Correction de la ligne de saturation avec le parement aval.....	142
Figure VII. 4: Courbe de Casagrande pour la détermination du paramètre alpha.....	143
Figure VII. 5: Ligne de saturation pour une digue non homogène.....	143
Figure VII. 6 : Fenêtre de lancement.....	146
Figure VII. 7: Coupe transversale de la digue.....	149
Figure VII. 8: Ligne de saturation par SEEP/W.....	151
Figure VII. 9: Les lignes de saturation théorique et SEEP.....	152
Figure VII. 10: Ligne de saturation par SEEP/W et le débit de fuite Barrage Hammam Debagh.....	154
Figure VII. 11: Ligne de saturation par SEEP/W et le débit de fuite Barrage Zit Emba.....	154

**Chapitre VIII : MODELISATION NUMERIQUE (TRANSFERT DES IONS)**

Figure VIII. 1: Schéma de la coupe type de la digue du barrage Bouhamdane.....	162
Figure VIII. 2 : Schéma des lignes de courants par géo studio.....	162
Figure VIII. 3: Schéma des débits de fuite.....	163
Figure VIII. 4: Schéma de la diffusion de la pollution.....	164

## LISTE DES TABLEAUX

### Chapitre I :

### LES BARRAGES EN ALGERIE

Tableau I. 1: Les barrages Algériens de première génération.....	10
Tableau I. 2: Les barrages Algériens de seconde génération.....	11
Tableau I. 3: Evolution et répartition des barrages par période de réalisation et par régions...	13
Tableau I. 4: Historique de la mise en service des barrages Algériens.....	14

### Chapitre III :

### TRANSFERT DE POLLUANTS (MIGRATION DES IONS)

Tableau III. 1: Quelques valeurs du coefficient de diffusion pour des anions et cations.....	44
Tableau III.2: Impact sur le devenir des contaminants des principaux processus physico-chimiques auxquels ils sont soumis.....	48

### Chapitre IV :

### DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE

Tableau IV: 1 : Barrages en exploitation et en construction dans l'Est Algérien.....	63
--	----

### Chapitre V :

### QUALITE DES EAUX SUPERFICIELLES (CUVETTES DES BARRAGES)

Tableau V. 1: Caractéristiques statistiques élémentaires du pH des eaux de barrages de l'Est Algérien pour la période 2010-2015 (pH sans dimension).....	68
Tableau V. 2: Les facteurs retenus pour l'ACP.....	85
Tableau V. 3: Liaison Variables-Facteurs.....	86
Tableau V. 4: Matrice de corrélations hautes eaux.....	87
Tableau V. 5: Matrice de corrélation basses eaux.....	87
Tableau V.6: Quelque indice avec le nombre de paramètres, la structure et la formule d'agrégation.....	91
Tableau V. 7: Evolution de la qualité de l'eau selon L'indice de qualité de l'eau arithmétique pondérée.....	94
Tableau V. 8: Avantages et Inconvénients de L'indice de qualité de l'eau arithmétique pondérée. (Yogendra & Puttaiah 2008; Akoteyon <i>et al.</i> 2011).....	95
Tableau V. 9 : Exemple de calcul de l'indice de qualité.....	95

**Chapitre 6 : HYDROCHIMIE DES EAUX DES BARRAGES ET LES EAUX DE FUTTES.**

**« Ain Dalia ; Hammam Debagh & Zit Emba »**

Tableau VI. 1 : Statistiques descriptives.....	112
Tableau VI. 2 : Classification de l'eau selon la dureté totale.....	119
Tableau VI. 3: Résultats de l'IQE Arithmétique Pondéré pour les trois barrages.....	130
Tableau VI. 4: Classification des eaux par degré d'aptitude à l'irrigation par la méthode du S.A.R (M. Louvier, 1976- B.R.G.M).....	133

**Chapitre VII : LES DEBITS DE FUTTES (LES INFILTRATIONS A TRAVERS LA DIGUE)**

Tableau VII. 1 : Les résultats du débit de fuite à travers la digue et le noyau du barrage Ain Dalia.....	151
Tableau VII. 2 : Débits de fuites du barrage Hammam Debagh (Formule VII.6).....	153
Tableau VII. 3 : Débits de fuites du barrage Hammam Debagh Geostudio.....	153

## LISTE DES ABREVIATIONS

A.E.P : Alimentation eau potable

Al: Aluminium

ALC : Alcalinité

ANBT : Agence nationale des barrages et transferts

ANRH : Agence nationale des ressources hydriques

A.C.P : Analyse en composante principale

°C : Degré Celsius

Ca<sup>++</sup> : Calcium

CE : Conductivité électrique

Na<sup>+</sup> : Sodium

K<sup>+</sup> : Potassium

Cl<sup>-</sup> : Chlorures

DBO<sub>5</sub> : Demande biochimique en oxygène

DCO : Demande chimique en oxygène

Hm<sup>3</sup> Hectomètre cube

Km : Kilomètre

Km<sup>2</sup> : Kilomètre carrée

Max : Maximum

Med : Médiane

Min : Minimum

Moy : Moyenne

MO: Matière Organique

mm : Millimètre

m : Mètre

m<sup>3</sup>/s : Mètre cube par seconde

$Mg^{++}$  : Magnésium

Méq/l : Milliéquivalent par litre

mg/l : Milligramme par litre

NE: Nord- Est

$NH_4^+$  : Ammonium

$NO_3^-$  : Nitrate

$NO_2^-$  : Nitrite

$O_{2dis}$  : Oxygène dissous

pH : potentiel d'hydrogène

$PO_4^{3-}$  : Phosphate

RS : Résidu sec

S.A.R : Sodium Adsorption Ratio

$SO_4^{2-}$  : Sulfate

T : Température

$\mu S/cm$  Micro Siemens par cm

UTM : Universel transverse de Mercator

# *Introduction Générale*

## INTRODUCTION GENERALE

L'eau étant une ressource naturelle essentielle à la vie, les utilisateurs doivent être redevables quant à son utilisation ou à sa détérioration. L'eau prend une importance croissante dans notre vie. Apprendre à la gérer, c'est apprendre à maîtriser sa rareté mais aussi ses excès, à assurer l'alimentation en eau potable, agricole et industrielle, à l'utiliser pour créer de l'énergie et à maintenir la qualité de notre environnement.

L'accès à la ressource en eau est vital tant dans les pays développés que dans les pays en voie de développement et tout indique que son mode de partage constitue un des grands défis du début du troisième millénaire. Les ressources en eau souterraine et de surface ainsi que le potentiel hydraulique d'un pays, bien que renouvelables, sont en effet limités et menacés tant par les activités industrielles, urbaines qu'agricoles (Bartram & Balance 1996). La quantité et la qualité des ressources en eau disponibles posent des problèmes de plus en plus complexes et difficiles à résoudre. La consommation d'eau augmente considérablement et la pénurie se fait sentir dans de nombreux pays en voie de développement.

A l'instar des pays de la rive Sud du bassin méditerranéen, l'Algérie, pays à climat essentiellement semi-aride à aride dans la majeure partie de son territoire, est confronté au problème du développement et de la gestion durable de ses ressources en eau. En effet, ces ressources en eau sont limitées vis à vis d'une forte demande qui résulte de la croissance démographique, de l'amélioration des conditions de vie, du développement des différentes industries et de l'extension de l'irrigation.

Devant ces contraintes, l'Algérie a fourni, depuis les années soixante, d'importants efforts de mobilisation de son potentiel hydraulique pour faire face à l'accroissement démographique et assurer son développement socio-économique. Cependant, le potentiel hydraulique limité nécessite d'adopter une stratégie de gestion de la demande en eau afin de satisfaire les besoins en eau et d'assurer les conditions d'une utilisation bénéfique de ces ressources hydriques, d'améliorer les performances des infrastructures (barrages, ouvrages de transfert d'eau, forages).

Les barrages ont une grande importance dans notre société, tant sur le plan économique qu'environnemental. Comme toute construction, ces barrages sont exposés à des dommages comme l'érosion interne, qui conduit à la présence de fuites d'eau dans le barrage et par conséquent des pertes considérables. Entre autre, il a été jugé nécessaire d'effectuer des inspections et d'adopter des programmes de surveillance appropriés pour obtenir plus d'informations sur le statut des barrages en remblai. Ceci est notamment évalué par la mesure des infiltrations ou l'évaluation des fuites. Une bonne qualité de ces eaux ainsi qu'une quantité suffisante sera comptabilisé comme une source d'approvisionnement utilisée pour un usage particulier.

L'écoulement de l'eau dans les sols est l'un des plus importants aspects en géotechnique et géo-environnement. L'intervention de plusieurs paramètres et données font que la résolution des problèmes liés aux écoulements à travers le corps de la digue nécessite l'utilisation d'outils informatiques et mathématiques et de logiciels de modélisation numérique. Par définition, un *modèle* est une représentation simplifiée de la réalité qui a pour objectif de décrire le comportement des systèmes naturels. Cela peut aller du modèle conceptuel au modèle numérique en passant par les modèles géologiques, hydrogéologiques, mathématiques et physiques.

Généralement, la conception d'un modèle passe par plusieurs étapes: tout d'abord, il faut mettre au point un modèle conceptuel du système, ensuite, il est nécessaire de choisir le code et donc la formulation mathématique du problème. Ce choix a été, dans notre cas, porté sur Seep /W. La géométrie du système à modéliser est ensuite définie. On détermine après les paramètres représentatifs décrivant les variations spatiales du système d'écoulement, les conditions aux limites et leurs variations dans le temps, les conditions initiales, le maillage et on effectue enfin les vérifications élémentaires. Après cette étape de conception du modèle, on effectue un calage de ce dernier en comparant les résultats aux données in situ et on finit par effectuer une analyse de sensibilité ou des prévisions.

La qualité de l'eau est influencée par un large éventail de phénomènes naturels et anthropiques (le taux de précipitation, les processus d'altération, transport de sédiments, tandis que les activités anthropiques comprennent le développement urbain, l'expansion industrielle et les pratiques d'agriculture). Différents processus naturels (hydrologiques, physiques, chimiques et biologiques) peuvent nuire aux caractéristiques des éléments et des composés chimiques de l'eau douce (Chapman & Organization 1996).

Par conséquent, une gestion efficace à long terme des eaux de barrages nécessite une compréhension fondamentale de caractéristiques chimiques et biologiques. Cependant, en raison de la temporalité variations de la qualité de l'eau (qui sont souvent difficiles à interpréter), un programme de surveillance fournissant un représentant fiable de la qualité des eaux de surface, nécessaire (Shrestha & Kazama 2007).

Dans ce contexte, on comprend la nécessité de mettre au point des outils de gestion et de protection qui permettent de mieux évaluer ces ressources superficielles, et les protéger contre toute pollution. L'exploitation de ces ressources peut bénéficier ainsi d'une meilleure connaissance de la répartition spatiale et temporelle des flux d'eau et des matières et composés qu'elle véhicule.

L'objectif de cette thèse se résume dans les axes suivants:

- Étudier la qualité des eaux superficielles du Nord Est Algérien;
- Étudier la qualité ainsi que l'origine de la pollution anthropique et naturelle dans les bassins versant de Ain Dalia, Hammam Debagh et Zit-Emba d'amont en aval ;
- Estimation des débits de fuite de ces trois barrages :
- L'aptitude de ces eaux;
- Modéliser le mouvement des chlorures dans la zone étudiée.

Ce travail a été mené dans ce sens, afin d'identifier les facteurs de la dégradation de la qualité de l'eau qui porte sur la caractérisation des paramètres physico-chimiques des eaux, leur variation spatio-temporelle ainsi que la détermination des faciès chimiques des eaux dans le Nord Est Algérien. Estimer les volumes perdus à travers les trois cas de barrages étudiés pour éventuelles utilisation en fonction de leur qualité. Et en fin le suivi des certains ions d'amont en aval de ces ouvrages et maitre l'accent sur le rôle de la digue en terre comme milieu poreux traversé par ces flux.

Pour ce faire, et afin de mieux comprendre l'impact des paramètres anthropiques, sur la qualité des eaux de surface, un réseau de 18 barrages en remblai du Nord Est Algérien suivi par ANBT ont été abordé.

Pour atteindre ces objectifs, la thèse sera sectionnée en trois volets. Ce travail sera parvenu par une introduction générale et accompli par une conclusion générale.

◆ **Première partie : partie bibliographique**

Cette partie consacré à l'élaboration d'une synthèse bibliographique relative aux :

- les barrages en Algérie ;
- les eaux superficielles ;
- transferts de pollution.

◆ **Deuxième partie : La qualité des eaux superficielles amont et aval**

Cette partie portera sur :

- la représentation globale de la zone d'étude ;
- La méthodologie adoptée pour la réalisation de cette étude.
- Les différentes méthodes d'analyse graphique et statistique abordées
- l'interprétation des résultats des analyses chimiques effectuées sur les eaux de surface de la région.
- l'analyse statistique des divers éléments ;
- Aptitude des eaux.

◆ **Troisième partie : Débit des fuites et modélisation numérique**

On détaille :

- les méthodes de calcul des débits de fuite par la méthode classique de Koseny, et la méthode des éléments finis ;
- les résultats obtenus par les différentes méthodes.
- Modélisation du transfert de chlorure à travers la digue.

◆ **Recommandations**

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE :**

Bartram J. and Balance R. (1996). Water quality monitoring-A Practical guide to the design and implementation of freshwater. *Quality Studies and Monitoring Programmes, United Nations Environment Programme and the World Health Organization (UNEP/WHO)*.

Chapman D. V. and Organization W. H. (1996). Water quality assessments: a guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring.

Shrestha S. and Kazama F. (2007). Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: A case study of the Fuji river basin, Japan. *Environmental Modelling & Software* 22(4), 464-75.

*Première partie*

*Synthèse Bibliographique*

# *CHAPITRE I*

## *Les barrages en Algérie*

## I.1. INTRODUCTION

L'eau constitue à la fois un élément essentiel et un facteur stratégique à l'aménagement du territoire ; sa disponibilité conditionne de manière déterminante la répartition des populations, de l'urbanisation et des activités économiques.

Les ressources en eau dépendent évidemment du climat, à la fois dans leur répartition spatiale et dans l'évaluation de leur bilan saisonnier ou annuel. Les eaux superficielles sont, pour leur plus grande part, entraînées, par ruissellement et par écoulement torrentiel, vers la mer ou les dépressions fermées ; la violence des précipitations, les fortes pentes, l'importance des terrains imperméables, sont les principaux responsables de cette énorme déperdition. Il s'y ajoute cependant une très forte évaporation, plus directement perceptible sur les nappes d'eau stagnantes, eaux douces permanentes ou temporaires, ou les retenues artificielles des barrages (Touati 2010).

La majeure partie du territoire Algérien est un désert (87 %) où les précipitations sont presque nulles, mais qui enferme d'importantes ressources fossiles d'eaux souterraines. La partie Nord, caractérisée par son climat méditerranéen, dispose de ressources en eau renouvelables, tant pour les eaux de surface que pour les nappes phréatiques. 90 % des eaux de surface sont situées dans la région du Tell qui couvre environ 4 % du territoire (Mozas & Ghosn 2013).

Depuis le début des années 2000, le gouvernement Algérien a pris des mesures importantes pour sortir de la situation de carence d'eau qui touchait le pays. La question hydraulique a été placée en priorité sur l'agenda politique et de gros moyens ont été mis en œuvre pour mobiliser de nouvelles ressources en eau conventionnelles et non conventionnelles.

La nouvelle politique de l'eau s'est ainsi structurée autour de deux axes stratégiques :

- Le développement de l'infrastructure hydraulique : barrages, transferts, stations de dessalement d'eau de mer, stations d'épuration, etc.
- La réforme institutionnelle du secteur de l'eau qui vise à approuver une meilleure gestion de la ressource.

Afin de développer la capacité de retenue des eaux de surface, de nombreux ouvrages ont été construits (Mozas & Ghosn 2013). Alors qu'en 1962, il n'existait que treize barrages permettant de stocker 450 millions de m<sup>3</sup> d'eau destinée essentiellement à l'irrigation des plaines agricoles de l'Ouest du pays, on en dénombre soixante-dix (70) pour une capacité globale de 7,3 milliards

de m<sup>3</sup> d'eau. Afin de mobiliser de nouvelles ressources en eau, l'Agence nationale des barrages et transferts (ANBT) a engagé d'importants moyens pour améliorer le rendement des exploitations déjà existantes et réaliser de nouveaux ouvrages hydrauliques (vingt-cinq (25) nouveaux barrages ont été réalisés ces dix dernières années).

## I.2. LES DIFFERENTS TYPES DE BARRAGES EN TERRE

L'histoire des barrages en remblai est surtout marquée par l'évolution des méthodes de calcul. Il fallait attendre 1717 pour qu'Henri Gautier publie un traité évoquant les murs de soutènement. Dans un mémoire daté de 1769, Jean Rodolphe Perronet étudie la stabilité des pentes (Le Delliou 2003).

En 1776, Charles A. Coulomb énonce les concepts de base de la résistance des sols par l'action combinée de la cohésion et du frottement.

Alexandre Colin établit, vers 1840, les principes généraux de l'étude de stabilité des pentes à partir des constatations faites au barrage de Cercey (21) qui connut plusieurs ruptures tant à l'amont qu'à l'aval.

Moins utilisés en France au XIX<sup>ème</sup> siècle, les barrages en terre se sont multipliés, notamment en Grande Bretagne et aux Etats Unis malgré de nombreux submersions, d'autre part à l'insuffisance de l'assise théorique qui prévaut lors de leur conception.

Malgré l'énoncé de la Loi de Darcy en 1856, il faut attendre 1911 pour voir apparaître les premières méthodes opérationnelles de calcul des écoulements dans les remblais.

L'ingénieur suédois Fellenius rénove en 1926 la méthode d'étude du risque de rupture par glissement circulaire.

Il existe dans le monde plus de 36 000 barrages dont la hauteur dépasse 15 m ; la plupart ont été construits depuis 1950. Ce rapide accroissement du parc (200 par an à l'heure actuelle) correspond à l'évolution de la population mondiale dans les pays en développement, et à la nécessité toujours plus pressante de gérer de manière rationnelle les ressources en eau (Carrère 1996).

Les barrages ont une grande importance dans notre société, tant sur le plan économique qu'environnemental. On dénombre deux grands types de barrages : les barrages en remblai et les barrages en béton.

Les barrages en remblai sont constitués d'un matériau meuble, qu'il soit très fin (argile) ou très grossier (enrochement) (Alonso 2005). Les différents types de barrage en remblai proviennent des types de matériaux utilisés et de la méthode employée pour l'étanchéité. Ces différents types se regroupent en trois catégories : les barrages homogènes, les barrages à noyau et les barrages à masques.

L'utilisation des matériaux locaux généralement bon marché et leurs disponibilités à proximité du site fait que la solution barrage en remblais est intuitivement choisie par rapport aux autres types de barrages considérés rigides et s'adaptent difficilement aux assises non rocheuses (Rolley *et al.* 1977).

### 1.2.1. Les barrages en terre homogènes

Le barrage homogène (Figure I. 1) est un barrage en remblai construit avec un matériau suffisamment étanche (argile ou limon). C'est la technique la plus ancienne de barrages en remblai.

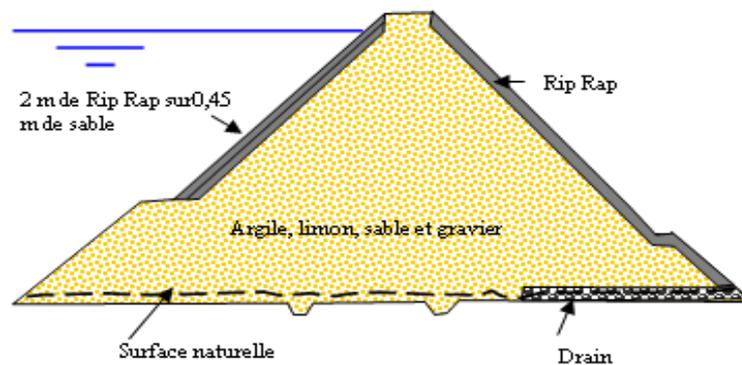


Figure I. 1: Barrage en terre homogène

### 1.2.2. Les barrages en terre à noyau étanche

Le barrage à noyau (Figure I. 2) est constitué en son centre d'un matériau de très faible perméabilité, le noyau, conforté à l'amont et à l'aval par des couches de matériaux plus grossiers, les recharges. Le noyau assure l'étanchéité de l'ouvrage tandis que les recharges assurent la stabilité. Un filtre protège le noyau à l'interface avec les recharges amont et aval.

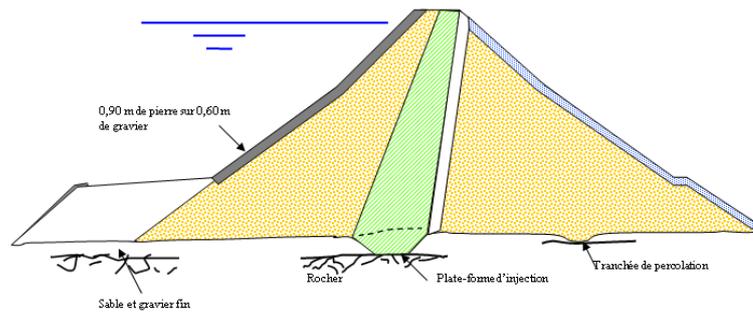


Figure I. 2: Barrage à noyau central

### 1.2.3. Les barrages en terre à masque amont

Le corps du barrage est construit avec un matériau quelconque pour autant qu'il soit peu déformable et pouvant assurer la stabilité au glissement de l'ensemble de l'ouvrage. L'étanchéité des barrages à masque Figure I. 3 est assurée par une couche imperméable (appelée masque) placée sur le parement amont. Les masques peuvent être de nature très différente : béton, béton bitumineux, ciment ou encore géo membrane.

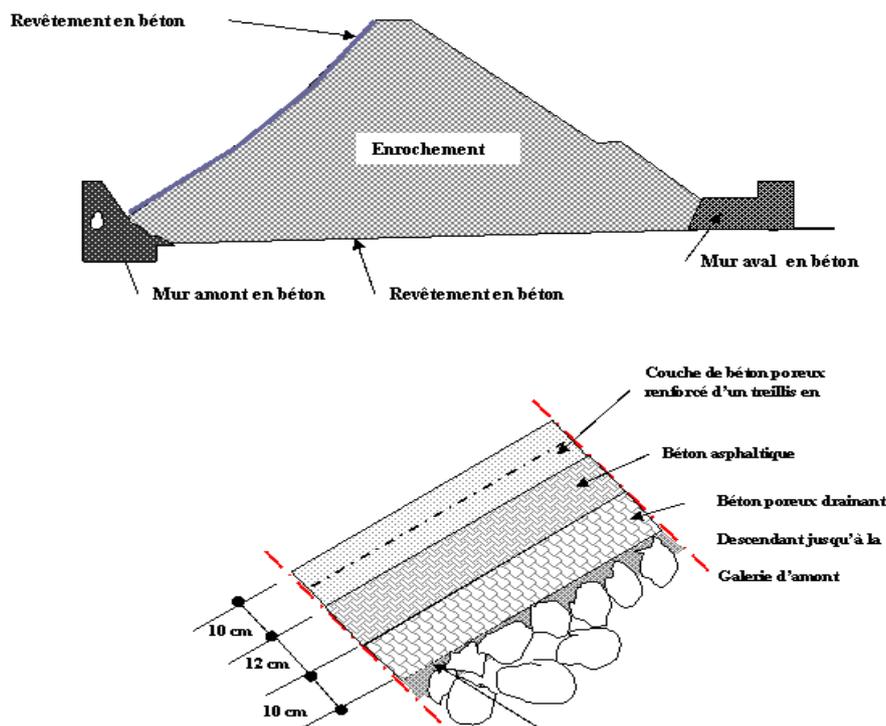


Figure I. 3: Barrage en terre à masque amont

### I.3. HISTORIQUE DES BARRAGES ALGERIEN

#### I.3.1 La période coloniale

Tout commence avec la loi de 16 juin 1851, qui intègre les eaux dans le domaine public (Benachenhou 1970; Perennes 1979). Quelques barrages de petite taille ont été réalisés dans la partie occidentale du pays au 19<sup>e</sup> siècle. Les premiers barrages construits dans l'Est Algérien furent au milieu du 20<sup>e</sup> siècle. Cependant, les techniques de construction de l'époque n'étant pas au point, certains d'entre eux ont été vite emportés par les oueds et d'autres ont été reconstruits plusieurs fois (Cheurfas, Tlelat, Fergoug) (Tableau I. 1).

Au moins trois raisons peuvent expliquer cela :

- la technologie des barrages n'était pas encore maîtrisée ;
- le régime des cours d'eau était mal connu ;
- les moyens techniques mis en œuvre pour la construction de ces barrages ont souvent été insuffisants, ce qui a fait traîner les chantiers.

Tableau I. 1: Les barrages Algériens de première génération

Nom	Oued	Année de construction	Volume initial (Hm <sup>3</sup> )
Meura	Djabroun	1852-1959	0,8
Tlelat	Tlelat	1860	-
Tlelat	Tlelat	1869-1970	0,7
Fergo	Habra	1865-1971 puis 1882	30
Cheur	Sig	1880-1982	3
Cheur	Sig	1886-1992	18
Djidio	Djidiouia	1857-1977	0,7
Hami	Hamiz	1869-1994	14

Source : Flamant in PERENNES

Entre 1932 et 1948, neuf (9) barrages seront construits Tableau I. 2. Ce sont des ouvrages de grandes et moyennes capacités (excepté celui de Foug El Gueiss de petite taille) qui ont, alors, été édifiés.

Tableau I. 2: Les barrages Algériens de seconde génération

Nom	Oued	Année de construction	Volume initial (Hm <sup>3</sup> )
O. Fodda	Fodda	1932	228
Boughzoul	Chelif	1934	55
Bakhadda	Mina	1936	56
Ghrib	Chelif	1939	280
Foum El Gueiss	Gueiss	1939	3,4
K'sob	K'sob	1940	12,4
Zardezas	Saf-Saf	1946	14,9
Beni Bahbel	Tafna	1946	63
Bouhanifia	Hammam	1948	73

Source : JJ. PERENNES, corrigé

A la fin de la période coloniale, les réalisations restaient relativement limitées avec seulement 15 ouvrages (Bouzid 2010)

Le volume qu'ils régularisaient était d'à peine 910 millions de m<sup>3</sup> et se concentraient principalement à l'Ouest du pays. A ce propos, COTE 1996 soulignait que 93 % de la capacité totale des quinze (15) barrages recensés se situaient à l'Ouest du méridien d'Alger. Il fallait donc, attendre la seconde génération de barrage, comportant plusieurs édifices hydrauliques, pour que l'Est Algérien bénéficie de quelques ouvrages (Ksob, Zardezas, Foum El Gueiss, Foum El Gherza, Cheffia). L'effort est resté soutenu à l'Ouest du pays qui a vu la construction des barrages de Sarno, Bakhadda, Meffrouch.

Durant cette période les barrages hydro électriques ont fait également partie de la politique coloniale. Deux importants barrages, dans la petite Kabylie, furent lancés : il s'agit d'Ighil Emda, construit en 1954 et d'Erraguene qui ne fut achevé qu'en 1963.

L'Algérie apparaît en très net décalage par rapport à ses deux voisins. L'héritage colonial en matière de grande hydraulique était plus notable qu'au Maroc et en Tunisie. De nombreuses études ont été lancées mais les réalisations ont été peu nombreuses (Mutin 2009; Bouzid 2010).

### I.3.2 De 1962 à 1980

Uniquement trois nouveaux barrages ont été construits, mais qui ont porté la capacité de stockage de 910 à 1.660 hm<sup>3</sup>. Or, pendant cette période, l'héritage de l'époque coloniale n'a fait

que se dégrader. Ce retard émouvant accumulé par l'Algérie en matière d'hydraulique entre 1962 et 1980 a eu pour conséquence une régression des superficies irriguées, donc une baisse de la production agricole et une forte dégradation de la satisfaction de la demande urbaine en eau potable.

### **I.3.3 De 1980 à 1999**

Dix-neuf (19) barrages ont été construits depuis 1980 ; désormais, chaque année un (Shrestha & Kazama) ou deux (2) barrages sont lancés, portant le total à trente-sept 37 ouvrages et un volume de stockage égal à 3,9 milliards de m<sup>3</sup>. Onze (11) se situaient à l'Ouest, neuf (9) dans le Cheliff, sept (7) au centre et dix (10) à l'Est (Mutin 2009; Bouzid 2010).

### **I.3.4 A partir de 2000**

La nouvelle prise de conscience du réel danger qui menace le pays tout entier ne s'est effectivement opéré qu'après la crise de 2002 qui avait réveillé les esprits et fait que la cadence, grâce à l'embellie financière découlant de l'importante flambée des prix du pétrole, a été augmentée entre 2000 et 2006 puisque pas moins de treize (13) barrages furent mis en eau. Ainsi, chaque année un (Shrestha & Kazama 2007) ou deux (2) barrages sont mis en service donnant, en 2009, soixante (60) barrages en exploitation dont cinquante-huit (58) avec une capacité supérieure à 10 millions de m<sup>3</sup> chacun et un volume régularisé global de plus de 7 milliards de m<sup>3</sup>. Les barrages Algériens sont, donc, de moyenne capacité, les plus grands d'entre eux ont une capacité de 450 Hm<sup>3</sup> pour le barrage de Gargar (Relizane), 640 hm<sup>3</sup> pour Koudiat Acerdoune (Bouira) et 795 Hm<sup>3</sup> pour le barrage de Beni Haroun (Mila). Les experts soulignent que les conditions naturelles en Algérie ne permettent pas d'avoir des barrages de plus grandes capacités comme c'est le cas par exemple du Maroc (avec 5 barrages dépassant le milliard de m<sup>3</sup> chacun) de la Syrie et son barrage de Tabqa (12km<sup>3</sup>) ou de l'Egypte avec le barrage d'Assouan (162 km<sup>3</sup>) (Mutin 2009; Bouzid 2010).

### **I.3.5 De 2010-2015**

Le parc hydraulique Algérien compte 75 barrages d'une capacité globale de 8 milliards de m<sup>3</sup>, dont :

- 03 barrages achevés en 2015, d'une capacité totale de 425 hm<sup>3</sup>: Tagharist (Wilaya de Khenchela), Kef-Eddir (Wilaya de Tipaza) et Tabellout (Wilaya de Jijel).

- 09 barrages en cours de réalisation d'une capacité de 519 hm<sup>3</sup>

Les réserves emmagasinées dans les 75 barrages sont de 4,08 milliards de m<sup>3</sup>, correspondant à un taux de remplissage de 60 %. Pour une meilleure exploitation de ces ouvrages et afin de garantir leur pérennité, l'ANBT mène des actions d'entretien et de maintenance des équipements hydromécaniques. Le contrôle et le suivi du comportement de ces ouvrages à travers leurs auscultations quotidiennes.

Le Tableau I. 3 résume la répartition des barrages réalisés de la période coloniale à l'heure actuel par région, tandis que le Tableau I. 4 regroupe la mise en service des barrages Algériens. La répartition fait ressortir que l'évolution du nombre des barrages, est beaucoup plus en faveur de la région Est qui a connu pas moins de 10 réalisations depuis 1980, suivi par celles de l'Ouest et du centre avec 5 ouvrages, et enfin la région du Cheliff avec 3 réalisations seulement.

Tableau I. 3: Evolution et répartition des barrages par période de réalisation et par régions

	Ouest	Cheliff	Centre	Est	Total
Jusqu'en 1962	5	4	2	4	15
1962-1980	7	4	2	5	18
1980-1990	11	9	7	10	37
1990-2000	13	9	8	14	44
2000-2009	16	12	12	20	60

Tableau I. 4: Historique de la mise en service des barrages Algériens

N	Barrage	Oued	Région	Wilaya	Année de mise en service
01	Meurad	Djebroune	Centre	Tipaza	1860
02	Hamiz	Arbatache	Centre	Boumerdes	1894 (s/1935)
03	Oued Fodda	Fodda	Cheliff	Chlef	1932
04	Boughzoul	Nahr Oussel	Cheliff	Médéa	1934
05	Bakhadda	Mina	Cheliff	Tiaret	1936 (s/1959)
06	Foum el Gueiss	Gueiss	Est	Khenchela	1939 (s/1969)
07	Ghrib	Chellif	Cheliff	Ain Defla	1939
08	K'sob	K'sob	Est	M'sila	1940 (s/1977)
09	Zerdezas	Safsaf	Est	Skikda	1945 (s/1974)
10	Beni-Bahdel	Tafna	Ouest	Tlemcen	1946
11	Bou Hanifia	El Hammam	Ouest	Mascara	1948
12	Foum el Gherza	El Abiod	Est	Biskra	1950
13	Serno	Sarno	Ouest	S.B.Abbes	1954
14	Meffrouch	Meffrouch	Ouest	Tlemcen	1963
15	Cheffia	Bouamoussa	Est	El Tarf	1965
16	DjorfTorba	Guir	Ouest	Bechar	1969
17	Fergoug	El Hammam	Ouest	Mascara	1970*
18	S.m.b. Aouda	Mina	Cheliff	Relizane	1970
19	Deurdeur M.	Tighzir	Cheliff	Ain Defla	1984
20	Harraza	Harraza	Cheliff	Ain Defla	1984
21	Guenitra	Fessa	Est	Skikda	1984
22	Merdja Sidi Abed	Chellif	Cheliff	Relizane	1984
23	Lekehal	Lekehal	Centre	Bouira	1985
24	Bouroumi	Bouroumi	Centre	Blida	1985
25	Keddara	Boudouaou	Centre	Boumerdes	1985
26	Sidi yakoub	Ardjen	Cheliff	Chlef	1985
27	Ouzert	Taria	Ouest	Mascara	1986

Tableau I.4 suite: Historique de la mise en service des barrages Algériens

N	Barrage	Oued	Région	Wilaya	Année de mise en service
28	Ain Zada	Bousselam	Est	B.B.Arzeridj	1986
29	Dahmouni	Nahr Oussel	Cheliff	Tiaret	1987
30	Ain Delia	Medjerda	Est	Souk Ahras	1987
31	Hammam Debagh	Bouhamdane	Est	Guelma	1987
32	HammanGrouz	Rhumel	Est	Mila	1987
33	Sidi Abdelli	Isser	Ouest	Tlemcen	1988
34	Beni-Amrane	Isser	Centre	Boumerdes	1988 (S/2003)
35	Gargar	Rhiou	Cheliff	Relizane	1988
36	Ladrat	Ladrat	Centre	Médéa	1989
37	Colonel Bougara	Nahr Oussel	Cheliff	Tissemsilt	1989
38	Boukourdane	El Hachem	Centre	Tipaza	1992
39	Cheurfas 2	Mebtouh	Ouest	Mascara	1992
40	Beni Zid	Beni Zid	Est	Skikda	1993
41	Foum el Khanga	Cherf	Est	Souk Ahras	1995
42	Babar	Babar	Est	Khenchela	1995
43	Mexa	Kebir Est	Est	El Tarf	1999
44	Hammam boughrara	Tafna	Ouest	Tlemcen	1999
45	F.d.Gazelles	El Hai	Est	Biskra	2000
46	Brezina	Mouilah	Ouest	El Bayadh	2000
47	Taksebt	Aissi	Centre	Tizi Ouzou	2001
48	Zit el Emba	Mougueur	Est	Skikda	2001
49	El Agrem	El Agrem	Est	Jijel	2002
50	Koudiat El Medaouar	Reboa	Est	Batna	2003
51	Oueled Mellouk	Rouina	Cheliff	AinDefla	2003
52	Beni Haroun	Rhumel	Est	Mila	2003
53	Koudiat Rosfa	Fodda	Cheliff	Tissemsilt	2004

Tableau I.4 : suite et fin: Historique de la mise en service des barrages Algériens

N	Barrage	Oued	Région	Wilaya	Année de mise en service
54	Kramis	Kramis	Ouest	Mostaganem	2004
55	Tilesdit	Dous	Centre	Bouira	2004
56	Sekkak	Sekkak	Ouest	Tlemcen	2004
57	SMB Taiba	Chellif	Chellif	Ain Defla	2006
58	Tichyhaf	boussalem	Centre	Béjaia	2007
59	O.Athmania	El Kaim	Est	Mila	2007
60	Prise de cheliff	Cheliff	Cheliff	Mostaganem	2009
61	Kerrada	Cheliff	Cheliff	Mostaganem	2009
62	K.Acerdoune	Isser	Centre	Bouira	2009
63	Kissir	Kissir	Est	Jijel	2010
64	Boussiaba	Boussiaba	Est	Jijel	2010
65	Bougous	Bougous	Est	El tarf	2010
66	Kef Eddir	Damous	Centre	Tipaza	2015
67	Mahouane	El guessar	Centre	Sétif	2015
68	Draa Diss	Medjaz	Centre	Sétif	2015
69	Douera	Oued ben	Centre	Alger	2015
70	IghilEmda	Agrioun	Centre	Bejaia	1953
71	Tabellout	DjenDjen	Est	Jijel	2018
72	Tagharist	Tagharist	Est	Khenchla	2018
73	Ourkiss	Ourkiss	Est	O.ElBouaghi	2018
74	SafSaf	SafSaf	Est	Tebessa	2010
75	Al Agrem	AlAgrem	Est	Jijel	2002

Source : ANBT et al.

S : surélévation

\* fut l'un des premiers barrages de l'époque coloniale et a connu des avatars (ruptures par 2 fois) reconstruit en 1970 pour augmenter sa capacité.

A titre indicatif, il existe près de 48.000 grands barrages recensés dans le monde (633 de plus de 500 hm<sup>3</sup>). Parmi ces barrages, 22.000 en Chine, plus de 6.500 aux Etats-Unis, plus de 4.000 en Inde et près de 3.000 au Japon (Dams & Degoutte 1997). Ainsi, les ¾ des barrages mondiaux sont situés dans 4 pays.

La classification adoptée en Algérie considère comme petits barrages, les ouvrages ayant une capacité inférieure à 10 millions de m<sup>3</sup> ; au-delà, ils sont classés dans la catégorie des grands barrages. Partant de là, seuls deux barrages –Meurad et Fom el Gueiss- sont de petits barrages. Tous les autres sont classés dans la catégorie des grands barrages.

#### **I.4. PATHOLOGIE DES BARRAGES EN MATERIAUX LOCAUX.**

Des recommandations sur l'entretien des barrages ont été établies par la Commission Internationale sur les Grands Barrages, ICOLD, en 1987. Entre autre, il a été jugé nécessaire d'effectuer des inspections et d'adopter des programmes de surveillance appropriés pour obtenir plus d'informations sur le statut des barrages en remblai. La surveillance des ouvrages hydrauliques, imposée et contrôlée par l'État, est primordiale pour assurer la sécurité des biens et des personnes. Elle débute dès la mise en eau de l'ouvrage et se poursuit tout au long de sa vie. La surveillance repose sur l'examen visuel régulier, la vérification périodique des organes de sécurité et l'auscultation (suivi du comportement à moyen et long terme d'un barrage face aux charges qui lui sont appliquées et face à son propre vieillissement).

Le comportement d'un barrage est caractérisé par un ensemble de paramètres mécaniques (déplacements, déformations) et hydrauliques (pression, débit de fuite). Ces paramètres, témoins du comportement, doivent être régulièrement mesurés à l'aide d'une instrumentation adaptée. L'analyse des données recueillies, mises en rapport avec les mesures passées, permet alors d'émettre un jugement sur le comportement de l'ouvrage et son évolution.

##### **I.4.1. Pathologie liée à l'instabilité d'ensemble, conséquences pour l'ouvrage**

Un ouvrage instable mécaniquement se caractérise par l'apparition de désordres dans sa masse qui se traduisent, en surface, par des déformations géo mécaniques décelables, au stade primaire, par l'auscultation topographique (Rolley *et al.* 1977; Design 1994; Le Delliou 2003)

Deux formes d'instabilité mécanique peuvent être distinguées dans l'étude de la pathologie des ouvrages en remblai (René *et al.* 1974; Rolley *et al.* 1977; Brown 1994; Design 1994; Novak *et al.* 2014)

1. Le glissement des talus : Il existe deux mécanismes de glissement :

- \_ Le glissement du talus côté aval, se produisant le plus souvent durant la crue ;
- \_ Le glissement du talus côté fleuve, se produisant lors de la décrue.

2. L'instabilité mécanique en fondation : Un barrage en remblai, par nature, sollicite moins sa fondation qu'un ouvrage poids : c'est la raison pour laquelle il est considéré comme le barrage des fondations « meubles ». En outre, dans certains cas particuliers, la présence en fondation d'une couche mince aux médiocres propriétés mécaniques est susceptible de favoriser, sous la poussée du remblai, l'apparition d'un glissement de type plan le long de cette ligne de faiblesse.

#### **I.4.2. Pathologie liée aux tassements**

##### **I.4.2.1. Le tassement de la fondation**

Un tassement significatif de la fondation, local ou généralisé peut :

- Réduire la revanche en crête d'ouvrage en se cumulant, par exemple, avec un tassement du remblai ;
- Détruire ou endommager des conduites et des dispositifs de drainage situés à la base du remblai : cassures ou déboitement des canalisations, apparition de contrepentes.

##### **I.4.2.2. Le tassement du remblai**

Le remblai, même après compactage, reste un matériau compressible, surtout s'il s'agit d'une argile. Les couches de base du remblai sont, en effet, soumises au poids des couches supérieures et sont d'autant plus sujettes au tassement que la hauteur de l'ouvrage est importante. On considère habituellement que le tassement après construction d'un remblai correctement compacté est de l'ordre de 1% de sa hauteur, ce tassement étant quasiment nul pour les remblais de moins de 10 à 15 m de hauteur.

#### **I.4.3. Pathologie liée aux étanchéités**

L'étanchéité au droit du barrage, qui seule nous intéresse ici, repose en fait sur :

- \_ L'étanchéité du corps du remblai :

- A) Les fuites diffuses ;
- B) La surélévation de la ligne de saturation ;
- C) Le phénomène de renard hydraulique.

Les pathologies liées au défaut d'étanchéité du remblai sont malgré tout fréquentes même si les conséquences ne se montrent pas systématiquement graves.

\_ L'étanchéité de la fondation et des rives, qui permet, en fait de raccorder l'étanchéité du remblai avec celle de la cuvette.

- A) Les fuites en fondation et / ou sur les rives ;
- B) La formation des renards.

#### **I.4.4. L'envasement**

Problématique de l'envasement des barrages causé essentiellement aux forts taux d'érosion des bassins versants dont les particules solides sont drainées directement par des cours d'eaux, elles se déposent au fond de la retenue. Les conséquences de cette forte sédimentation sont extrêmement gênantes.

L'envasement pose d'énormes problèmes à savoir :

\_ La réduction de la capacité : chaque année le fond vaseux évolue et se consolide avec occupation d'un volume considérable de la retenue.

\_ La sécurité de l'ouvrage : l'indépendamment du problème de la diminution de la capacité du réservoir.

\_ Obturation des organes de vidange : un autre danger présenté par l'envasement est celui du non fonctionnement des organes de vidange de fond.

\_ Envasement des canaux d'irrigation : l'irrigation se fait généralement par de l'eau chargée en sédiments, c'est ainsi que ces particules fines vont se déposer dans les canaux réduisant leurs sections mouillées ceci pose le problème de comblement du réseau des canaux d'irrigation se trouvant à l'aval du barrage.

\_ Dégradation de la qualité de l'eau : les sédiments véhiculent des produits chimiques (nitrates, sulfates) provenant en particulier des apports en éléments fertilisants pour les cultures, et se déposant dans les réservoirs entraînant ainsi une dégradation de la qualité de l'eau.

### **I.4.5. Les principaux problèmes hydrauliques en Algérie**

L'Algérie se situe, à l'instar des 17 pays Africains touchés par le stress hydrique, dans la catégorie des pays les plus pauvres en matière de potentialités hydriques, soit en dessous du seuil théorique de rareté fixé par la Banque Mondiale à 1000 m<sup>3</sup> par habitant et par an. Si en 1962, la disponibilité en eau théorique par habitant et par an était de 1500 m<sup>3</sup>, elle n'était plus que de 720 m<sup>3</sup> en 1990, 680 m<sup>3</sup> en 1995, 630 m<sup>3</sup> en 1998, 500 m<sup>3</sup> elle ne sera que de 430 m<sup>3</sup> en 2020. La disponibilité en eau potable en Algérie en m<sup>3</sup>/Habitant/An dépassera légèrement le seuil des 400 m<sup>3</sup>/ha (norme OMS)(Hadeff & Hadeff 2001).

La problématique de l'eau est indissociable du développement durable dans la mesure où l'eau doit permettre de répondre aux besoins des générations actuelles sans hypothéquer, la capacité des générations futures à satisfaire les leurs(Hadeff & Hadeff 2001).

Il faudrait disposer entre 15 et 20 milliards de m<sup>3</sup> par an, en réservant 70% à l'agriculture, pour parvenir à une sécurité alimentaire satisfaisante. C'est un défi titanesque lorsqu'on sait qu'on mobilise à peine au plus 5 milliards de m<sup>3</sup> d'eau par an. La pression exercée sur ces ressources ne cessera de s'amplifier sous les effets conjugués de la croissance démographique et des politiques appliquées vis-à-vis des activités consommatrices d'eau.

La faiblesse des ressources est encore aggravée par :

- la mauvaise répartition spatiale et temporelle de ces ressources ;
- l'érosion des sols et l'envasement des barrages ;
- les pertes dues à la vétusté des réseaux de distribution et à l'insuffisance de la gestion ;
- les coûts sans cesse importants des investissements nécessaires à la mobilisation et au transfert des ressources en eau.

Les principaux problèmes techniques qui affectent la quantité et la qualité des ressources en eau en Algérie sont :

#### **I.4.5.1. Envasement des barrages en Algérie**

L'envasement est un phénomène naturel très complexe, il est devenu actuellement une réelle menace pour l'infrastructure hydrotechnique en Algérie, tant au niveau de la réduction rapide de la capacité utile de barrage qu'à celui de la sécurité de l'ouvrage lui-même. La plupart des barrages en Algérie ont une durée de vie de l'ordre d'une trentaine d'année à cause de ce

phénomène, Ils sont dans une situation critique, leur exploitation reste en dessous de leur capacité réelle.(Diab Djeflal 2016)

L'Algérie perd par envasement 45 à 50 millions de m<sup>3</sup> chaque année, ce qui représente une perte de capacité annuelle égale à 0,65 % de la capacité totale(Remini & Hallouche 2004).

Les années 80 ont connu des taux d'envasement avoisinant les 20 millions de tonnes annuels alors que les années 90 ont atteint déjà les 35 millions de tonnes annuels, les années 2000 vont crescendo et grimpent à la valeur de 45 millions de tonnes annuels(Heusch & Millies-Lacroix 1971; Ghenim *et al.* 2008)

Cette hausse spectaculaire, qui n'est pas observée de manière uniforme, serait une conséquence de la sécheresse des années 1990 : le couvert végétal ainsi diminué et les sols dégradés auraient mal résisté à un retour des pluies et crues violentes des dernières années, causant une forte ablation de la couche superficielle du sol et favorisant une forte érosion.

#### **I.4.5.2. Ampleur de l'évaporation au niveau des barrages**

Une partie de l'eau des barrages réservoirs peut disparaître de manière non contrôlée par évaporation L'ANB réalise des mesures quotidiennes d'évaporation dans 39 grands barrages d'une capacité totale de 3 800 Mm<sup>3</sup>.

L'évaporation maximale, 350 Mm<sup>3</sup>, a été enregistrée en 1992-1993 et la minimale, 100 Mm<sup>3</sup>, en 2001/2002. La moyenne annuelle sur la période 1992-2002 est de 250 Mm<sup>3</sup>, soit 6,5 % de la capacité totale. Le gradient d'évaporation est donc de l'ordre de :

\_ dans la zone littorale (à moins de 50 km de la mer), l'évaporation annuelle est inférieure à 0,5 m ;

\_ dans une bande intermédiaire (entre 50 et 150 km de la côte), l'évaporation est comprise entre 0,5 et 1 m/an ; plus au sud, l'évaporation dépasse 1 m/an.

L'établissement d'une carte de prévision de l'évaporation et l'obtention de relation entre l'évaporation et la superficie des lacs permet d'estimer le volume d'eau évaporée pour tout barrage en projet ou en exploitation(BENFETTA *et al.* 2016).

#### **I.4.5.3. Fuites dans les barrages**

L'ANB suit depuis 1992 les fuites dans 22 barrages, mais, jusqu'à ce jour, aucune analyse détaillée n'a été réalisée. Dans certains cas, les fuites sont tellement importantes qu'un réseau de

collecte récupère à l'aval les eaux perdues et les réorientent vers les terres agricoles (Remini *et al.* 2009).

Selon les années, le volume total perdu par infiltration a varié de 20 à 75 Mm<sup>3</sup>. Les volumes perdus plus faibles sur la période 1998-2002 s'expliquent simplement par l'assèchement de plusieurs barrages durant cette période de pluies déficitaires.

#### **I.4.5.4. Eutrophisation des retenues de barrages**

L'eutrophisation est l'enrichissement d'une eau en sels minéraux (nitrates et phosphates notamment) entraînant des déséquilibres écologiques comme la prolifération de la végétation aquatique et l'appauvrissement en oxygène dissous.

Ces dernières années les rejets des eaux usées d'origine urbaine et industrielle ont augmenté dans les oueds. Ceci constitue une menace pour la qualité des ressources en eau dans les barrages. Plusieurs tronçons d'oueds sont déjà pollués (Tafna, Mekerra, Chellif, Soummam et Seybouse). Si le phénomène persiste encore, des retenues de barrages comme Beni Bahdel, Bakhada, Ouizert, Bouhanifia, Fergoug, Oued Lekhel Hammam Grouz et Oued Harbil seront pollués.

En plus de ces rejets, le dépôt des sédiments dans les retenues de barrages génère l'eutrophisation des eaux de retenues. Le phosphore et l'azote sont des substances nutritives limitant le cycle de croissance de la végétation dans la retenue. Le phosphore est transporté en solution dans les retenues et se fixe aux sédiments. Une fois déposées dans la retenue, les sédiments libèrent le phosphore et contribuent au processus d'eutrophisation (Stigter *et al.* 1989). Selon Thornton *et al.* ; la turbidité et la formation d'algues sont inversement proportionnelles.

Des phénomènes d'eutrophisation, déjà occasionnellement observés en divers sites, limitent les usages, et, en premier lieu, la production d'eau potable. (Remini *et al.* 2009).

### **I.5. CONCLUSION**

En Algérie, un déficit de 1 milliards de m<sup>3</sup> sera enregistré en 2025 (dans le cas d'une mauvaise gestion de l'eau et d'une non maîtrise des ressources non conventionnelles). Avec une capacité disponible de 500 m<sup>3</sup> par hab/an, l'Algérie est largement en dessous du seuil des 1000 m<sup>3</sup> qui séparent les pays dans le rouge de ceux qui ont encore un sursis. Notre consommation, quant à elle, augmente. Nous sommes de plus en plus nombreux, nous nous concentrons dans les villes et il pleut de moins en moins. La politique de construction de barrages et d'usines de dessalement suffira-t-elle à nous mettre à l'abri ?

Pour pallier au déficit d'eau prévu d'ici 2025 dans la région, il faut augmenter la capacité de stockage, minimiser les pertes et explorer d'autres réservoirs beaucoup plus rentables. Le manque de sites favorables et du coût excessif du projet réduisent les chances de réaliser les grands barrages.

Le taux d'évaporation environ 200 millions de m<sup>3</sup>/an sont perdus sur les 5 milliards de m<sup>3</sup> stockés dans les barrages. L'érosion hydrique est considérable dans la région du Maghreb. On enregistre chaque année un envasement évalué à plus de 130 millions de m<sup>3</sup> dans les barrages des trois pays du Maghreb. Un autre problème qui est en train de prendre de l'ampleur dans la région, est l'eutrophisation des lacs et de barrages. C'est pour ces raisons qu'il est temps de recourir de préférence aux petites et moyennes retenues, ainsi qu'aux aquifères et d'éviter les grands ouvrages.

En Algérie, un projet de construction de 500 retenues collinaires a été lancé depuis l'an 2000. La recharge artificielle des nappes constitue le meilleur moyen de stocker l'eau, elle permet d'éviter des pertes considérables par évaporation et par envasement et d'avoir une eau de meilleure qualité.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- Alonso E. (2005). Compactage et comportement de sols fins humides. *Revue française de géotechnique*(111), 33-43.
- Benachenhou A. (1970). Régime des terres et structures agraires au maghreb.
- Benfetta H., OUADJA A., ACHOUR B. and REMINI B. (2016). CAPACITY LOSS IN DAMS LOCATED IN ARID AND SEMI ARID ZONES. CASE OF GARGAR, BOUHANIFIA, OUIZERT AND FOUM EL GHERZA DAMS. *LARHYSS Journal ISSN 1112-3680*(25), 183-201.
- Bouzid T. (2010). *Les barrages et la politique hydraulique en Algérie : état, diagnostic et perspectives d'un aménagement durable* thèse de doctorat, DEPARTEMENT DE L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE, UNIVERSITE MENTOURI – CONSTANTINE.
- Brown W. D. (1994). *Engineering and Design EARTH AND ROCK-FILL DAMS—GENERAL DESIGN AND CONSTRUCTION CONSIDERATIONS*.
- Carrère A. (1996). *Barrages*. Ed. Techniques Ingénieur.
- Dams I. C. o. L. D. F. C. o. L. and Degoutte G. (1997). *Petits barrages: recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi*. Cemagref Editions.
- Design G. (1994). *Earth and Rock-Fill Dams-General Design and Construction Considerations*.

- Diab Djefal I. (2016). L'Envasement dans Les Barrages de l'Algérie. Silting in the Dams of Algeria.
- Ghenim A., Seddini A. and Terfous A. (2008). Variation temporelle de la dégradation spécifique du bassin versant de l'Oued Mouilah (nord-ouest Algérien)/Temporal variation of the specific sediment yield of the Wadi Mouilah basin (northwest Algeria). *Hydrological sciences journal*53(2), 448-56.
- Hadef R. and Hadef A. (2001). Le déficit d'eau en Algérie: une situation alarmante. *Desalination*137(1-3), 215-8.
- Heusch B. and Millies-Lacroix A. (1971). Une méthode pour estimer l'écoulement et l'érosion dans un bassin. *Application au Maghreb. Mines et Géologie*33, 21-39.
- Le Delliou P. (2003). *Les barrages: conception et maintenance*. Presses Universitaires Lyon.
- Mozas M. and Ghosn A. (2013). État des lieux du secteur de l'eau en Algérie. *Rapport de l'institut de prospective économique du monde méditerranéen (IPEMED)*. 27p.
- Mutin G. (2009). Le monde arabe face aux défis de l'eau: enjeux et conflits. *arXiv preprint arXiv:0911.4948*.
- Novak P., Moffat A., Nalluri C. and Narayanan R. (2014). *Hydraulic structures*. CRC Press.
- Perennes J. J. (1979). *Structures agraires et décolonisation: les oasis de l'Oued R'hir (Algérie)*. Editions L'Harmattan.
- Remini B. and Hallouche W. (2004). Sédimentation des barrages en Algérie. *Revue Internationale La Houille Blanche*(1), 1-5.
- Remini B., Leduc C. and Hallouche W. (2009). Évolution des grands barrages en régions arides: quelques exemples algériens. *Sécheresse*20(1), 96-103.
- René R., Henri K., Jean D., André P., LIONEL R., villepigue, dANIEL I., Guy O., Léopold R., E A., CHEYLAN, Etienne C., R C., Maurice D., FRANCIS K., lalanne, cLAUDE m., Jaques P. and René P. (1974). *Technique des barrages en aménagement rural*.
- Rolley R., Kreitmann H., Dunglas J., Pierrejean A. and Rolland L. (1977). *Technique des barrages en aménagement rural*.
- Shrestha S. and Kazama F. (2007). Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: A case study of the Fuji river basin, Japan. *Environmental Modelling & Software*22(4), 464-75.
- Stigter C., Darnhofer T. and Herreras H. (1989). Crop protection from very strong winds: recommendations from a Costa Rican agroforestry case study. In: *International Workshop on the Applications of Meteorology to Agroforestry Systems Planning and Management, Nairobi (Kenya), 9-13 Feb 1987*, ICRAF.
- Touati B. (2010). *Les Barrages et la politique hydraulique en Algérie*.

## *CHAPITRE III*

### *Les eaux superficielles*

## II.1. INTRODUCTION

« L'eau » : ce mot très court est porteur d'innombrables significations et sujet à une foule d'idées enracinées dans notre culture générale et notre vision du monde (Bleu 2005; Margat & Andréassian 2008).

Un des quatre éléments primordiaux des mythes antiques, composante sous trois états de l'hydrosphère planétaire et constituant de tout être vivant, onde des poète, H<sub>2</sub>O des chimistes et flotte du vulgaire, l'eau est à la fois boisson, milieu de vie aquatique, de natation et de nautisme, décor mobile « fontaine et jets », moyen de défense ou de répression, puissance qui fait tourner les moulins et les turbines. Elle sert à désaltérer, à mouiller, à dissoudre, à délayer, à laver, à chauffer, à arroser, à éteindre les incendies, à soigner et noyer, à pousser Archimède, à réfléchir narcisses, à sauver Moïse, à perdre Ophélie (Margat & Andréassian 2008).

Les attributs témoins de cette variété foisonnent : l'eau peut être pure et lustrale, potable, douce ou polluée, trouble, vive ou morte, bénite, miraculeuse... Elle est également sujette à une foule d'actions : l'eau se recherche, se capte, se distribue, s'embouteille, se consomme, se facture, se coupe, se perd, se draine, s'endigue...

La multiplicité et la diversité des idées reçues sur l'eau peuvent être attribuées aux perceptions partielles disparates de cette extraordinaire variété des rôles de l'eau dans la nature et la société. Elles sont aussi en partie la conséquence des approches séparées délivrées par l'enseignement.

Ces idées procèdent à la fois d'un mélange de savoirs et de méconnaissances, d'expériences quotidiennes et de nos relations variées avec l'eau (corporelles, usuelles, visuelles, culturelles, sans lien évident), de mémoire et de rêve. Et il ne faudrait pas oublier l'influence des croyances, des mythes et symboles attachés à l'eau (Margat & Andréassian 2008).

L'eau est sujette à double crainte paradoxale : d'en manquer et qu'elle se pollue.

Elles ont trait à ses vertus matérielles et spirituelles, à ses caprices et états changeants dans la nature, à la nature et au devenir des ressources offertes à l'humanité, à ses pénuries et ses dégradations, à ces utilités et dangers, aux bienfaits et aux malfaisances des actions humaines à son égard, à sa géographie planétaire, aux problèmes locaux et mondiaux à résoudre...

## II.2. CARACTERISATION ET EVALUATION

Dans la nature l'eau se trouve sous trois états : solide (neige et glace), liquide, la plus répandue, elle s'accumule principalement dans les océans et les mers (1.38 milliards de km<sup>3</sup>), tandis que l'eau continentale représentent un volume de 33 millions de km<sup>3</sup>, mais les estimations varient beaucoup en raison de notre grande ignorance sur les dimensions des nappes d'eau souterraines (LOUP 1974).

### II.2.1. Les caractères chimiques et les propriétés physiques des eaux continentales

L'eau continentale contient, dès sa chute, de nombreuses substances en dissolution ou en suspension (gaz, poussière minérale, matières organiques) dont la présence modifie ses caractères chimiques et change ces propriétés physiques.

#### II.2.1.1. Caractères chimiques de l'eau et substances dissoutes

L'eau dissout la plupart des minéraux. La dissolution est rendue possible par la structure moléculaire de l'eau et surtout par l'acidité aquatique définie par le potentiel hydrogène (pH) du milieu. Les gaz et les substances minérales agissent sur cette acidité (Loup 1974; Degrémont 1989; Baird & Cann 2016)

\_ *Le pH de l'eau* : l'eau renferme des ions H<sup>+</sup> et OH<sup>-</sup> libres (qui ne sont pas combinés pour donner des molécules de liquide). Le taux de concentration en ions H<sup>+</sup> est le potentiel hydrogène (en abrégé pH) du milieu. On l'exprime par le cologarithme de la concentration en ions H<sup>+</sup>. Il est de 7 dans l'eau pure à 25°C, valeur qui définit la neutralité d'une solution. au dessous le milieu est acide, au-dessus il est basique. Les sels d'aluminium et de fer accroissent l'acidité tandis que les carbonates la diminuent. Dans la nature, le pH de l'eau compris entre 5 et 9. Le pH s'évalue avec un pH-mètre (LOUP 1974; DEGRÉMONT 1989; Baird & Cann 2016).

Les changements de température modifient les rapports en CO<sub>2</sub>, bicarbonates et carbonates donc le pH et la stagnation de l'eau favorise la croissance des algues et autres microorganismes dont l'activité change le pH.

\_ *Le gaz dissous* : l'eau dissout, par contact, tous les gaz, d'autant mieux que sa température est plus basse. Elle les prend d'abord à l'atmosphère : l'oxygène qui est mieux absorbé que l'azote et qui est indispensable à la vie aérobie. Les teneurs maximums sont de 10 mg/l à 10°C et de 14 mg/l à 0°C. La teneur augmente avec la turbulence du liquide qui favorise les échanges air-eau.

Quand l'oxygène disparaît, la vie anaérobie dégage de l'hydrogène sulfuré (LouP 1974; Degrémont 1989; Baird & Cann 2016). L'eau dissout l'anhydride carbonique (CO<sub>2</sub>) qui constitue avec elle l'acide carbonique (CO<sub>3</sub>H<sub>2</sub>) qui attaque les carbonates en les transformant en bicarbonates solubles. En principe ce sont les eaux des pays froids qui sont les plus agressives, car le gaz carbonique se dissout d'autant mieux que le liquide est plus froid. D'autres acides et des bactéries attaquent aussi les minéraux.

\_ *Une concentration importante en matières en suspension*, tout au moins pour les eaux courantes. Ces matières en suspension sont très diverses, allant des particules colloïdales aux éléments figurés entraînés par les rivières en cas d'augmentation importante de débit. Dans le cas des eaux de barrage, le temps de séjour provoque une décantation naturelle des éléments les plus grossiers : la turbidité résiduelle est alors faible et colloïdale (Degrémont 1989);

\_ *La présence de matière organiques* d'origine naturelle provenant du métabolisme, puis de la décomposition post mortem des organismes végétaux ou animaux vivant à la surface du bassin versant ou dans la rivière (Degrémont 1989);

\_ *La présence de plancton* : les eaux de surface sont parfois le siège d'un développement important de phytoplancton (algues...) et de zooplancton, surtout dans le cas d'eutrophisation. Certains de ces organismes peuvent sécréter des produits sapides et odorants ou des toxines (Degrémont, 1995) ;

\_ *Des variations journalières* (différence de température, d'ensoleillement) ou *saisonniers* : variations climatiques (température, précipitations, fonte des neiges), de végétation (chute des feuilles). Elles peuvent être aléatoires pluies soudaines, orages, pollution accidentelles (Degrémont 1989).

Dans les retenues d'eau de surface, la qualité de l'eau varie de la surface jusqu'au fond de la retenue (température, pH, O<sub>2</sub>, Fe, Mn, oxydabilité, plancton). Le profil de ces paramètres varie lui-même en fonction des périodes de stratification ou de circulation des couches d'eau suivant les saisons (Degrémont 1989).

### **II.2.1.2. Analyse des eaux**

Elle se fait sur des échantillons prélevés en plusieurs points dans les lacs, en un seul point sur une transversale d'un cours d'eau ou les brassages donnent une composition homogène. Après

filtration, on fait évaporer l'eau. On obtient un résidu sec dont on détermine le poids. Le résultat en mg/l exprime la salinité du liquide (Loup 1974).

La salinité ne fait pas l'objet de mesures régulières comme les débits. Les salinités fortes affectent les eaux de rivières dans les bassins calcaires sous climat tempéré froid (de 300 à 600 mg/l). Mais ces valeurs sont largement dépassées dans les rivières sous climat chaud et aride. Dans l'espace la salinité croît sur les plans d'eau victimes d'une intense évaporation et décroît sur ceux qui sont soumis à de fortes pluies. Dans le temps, les variations sont sensibles : les basses eaux et étiages ont les teneurs les plus fortes car les eaux proviennent des nappes ou elles sont restées longtemps au contact de la roche. Les hautes eaux et les crues ont des teneurs plus faibles, les eaux de ruissellement ayant moins le temps d'exercer leur action corrosive.

L'analyse qualitative a pour objet de déterminer la nature des composants dans le résidu sec, d'en dresser la liste et d'en donner en mg/l les quantités. Il s'agit d'électrolytes représentés par des anions à charge négative (Cl, SO<sub>4</sub>, PO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>...) et des cations chargés positivement. Dans ces derniers on distingue les alcalins (K, Na), les alcalo-terreux (Ca, Mg), les oligo-éléments métalliques dont le principal est le fer mais n'existe qu'en très petite quantité (traces). Les eaux continentales subissent plus que les eaux marines des modifications saisonnières de température et d'activité biologique ; les échanges entre ions et cations sont incessants, parfois réversibles. Jointes aux prélèvements opérés par les êtres vivants, ils font de l'eau un milieu en constante évolution chimique.

### **II.3. ASPECTS GÉNÉRAUX DE LA POLLUTION DES EAUX**

La pollution résulte de l'introduction dans un milieu de substances conduisant à son altération. En ce qui nous concerne, les milieux considérés seront les milieux aquatiques : cours d'eau, lacs, mers, nappes souterraines.

La notion d'altération du milieu est fondamentale. En effet, un rejet ne sera par définition polluant que s'il amène une altération, c'est-à-dire une dégradation. Ainsi, deux rejets de caractéristiques identiques pourront être plus ou moins polluants suivant le milieu récepteur. De plus, la notion d'altération dépend de l'usage que l'on attribue au milieu. Le problème se posera dès qu'un rejet aura un effet sur la qualité de l'eau et le milieu récepteur ; si cet effet a des conséquences jugées négatives, il s'agira d'une pollution.

Les aspects généraux de la pollution que nous traiterons dans cette partie concernant la classification des polluants, suivant leur origine ou leur conséquence et l'étude de la pollution (Grosclaude 1999; Bliefert & Perraud 2007; Amiard 2011; Baird & Cann 2016).

### **II.3.1. Origine de la pollution**

Suivant l'origine des substances polluants, on distinguera (Gaujoux & Lair 1995) :

#### **II.3.1.1. La pollution domestique**

Provenant des habitations, elle est en général véhiculée par le réseau d'assainissement jusqu'à la station d'épuration.

La pollution domestique se caractérise par :

- Des germes fécaux ;
- Des fortes teneurs en matières organiques ;
- Des sels minéraux (azote, phosphore) ;
- Des détergents.

En sortie de station d'épuration, on retrouve les mêmes éléments en quantités moindres (50 à 90% extraits) mais concentrés en un point de rejet.

#### **II.3.1.2. La pollution industrielle**

Provenant des usines, elle est caractérisée par une grande diversité, suivant l'utilisation de l'eau (process) ; tous les produits ou sous-produits de l'activité humaine se retrouvent ainsi dans l'eau, qui est un bon solvant :

- Matières organiques et graisses (industries agro-alimentaires, équarrissages...) ;
- Hydrocarbures (raffineries) ;
- Métaux (traitement de surface, métallurgie) ;
- Acides, bases, produits chimiques divers (industries chimiques, tanneries...) ;
- Eau chaude (circuits de refroidissement des centrales thermiques) ;
- Matières radioactives (centrales nucléaires, traitement des déchets radioactifs).

#### **II.3.1.3. La pollution agricole**

Provenant des fermes ou des cultures, elle se caractérise par :

- De fortes teneurs en sels minéraux (azote, phosphore, potassium) provenant : des engrais et des purins lisiers (élevage) ;
- La présence de produits chimiques de traitement (pesticides, herbicides...).

#### **II.3.1.4. Phénomènes naturels**

Certains auteurs considèrent que divers phénomènes naturels sont aussi à l'origine de la pollution (par exemple, une irruption volcanique, un épanchement sous-marin d'hydrocarbures, le contact avec des filons géologiques (métaux, arsenic), une source thermo minérale...)

### **II.3.2. Conséquences de la pollution**

Les conséquences d'une pollution peuvent être classées en trois catégories principales (Gaujoux & Lair 1995).

#### **II.3.2.1. Conséquences sanitaires**

C'est-à-dire qui ont trait à la santé d'une population humaine. Les conséquences sanitaires sont donc celles à prendre en compte en priorité.

Elles peuvent être liées à l'ingestion d'eau, de poissons, mais aussi au simple contact avec le milieu aquatique (cas de nombreux parasites).

A noter qu'il ne s'agit pas toujours de problèmes de toxicité immédiats, les conséquences sanitaires pouvant intervenir au travers de phénomènes complexes.

La conséquence sanitaire d'une pollution est variable dans le temps en fonction de l'usage de l'eau : par exemple, la pollution d'une nappe non exploitée n'a aucune conséquence sanitaire immédiate, mais peut en avoir longtemps après si on utilise cette eau pour l'alimentation en eau potable.

#### **II.3.2.2. Conséquences écologiques**

C'est-à-dire qui ont trait à la dégradation du milieu biologique.

Les conséquences écologiques se mesurent en comparant l'état du milieu pollué par rapport à ce qu'il aurait été sans pollution.

Ceci n'a rien d'évident, la pollution se traduisant parfois uniquement par l'accumulation d'un phénomène naturel.

D'une manière générale, les conséquences écologiques sont à considérer au travers de la réduction des potentialités d'exploitation du milieu (pêche, aquaculture, tourisme, promenade...), à court et long termes.

Des certains cas, la conservation du milieu à l'état naturel peut être aussi choisie comme un objectif en soi (notion de réserve).

### **II.3.2.3. Conséquences esthétiques**

Cette troisième catégorie de conséquences, pour être la plus subjective, n'en est pas moins importante.

Il s'agit de pollution n'ayant pas de conséquences sanitaires ou écologiques importantes, mais perturbant l'image d'un milieu (par exemple des bouteilles plastiques ou du goudron rejeté sur une plage).

On peut inclure, dans cette catégorie, les problèmes de gout de l'eau (le chlore en AEP).

Les conséquences esthétiques sont, par définition, les plus perceptibles, et c'est donc celles dont les riverains et le grand public auront, en premier, conscience.

On peut également distinguer deux autres conséquences liées à l'utilisation de l'eau comme produit :

### **II.3.2.4. Conséquences industrielles**

L'industrie est un grand consommateur d'eau : il faut par exemple 1 m<sup>3</sup> d'eau pour produire 1 kg d'aluminium.

La qualité requise pour les utilisations industrielles est souvent très élevée, tant sur le plan chimique (minéralisation, corrosion, entartrage), que biologique (problème de biofouling, c'est-à-dire d'encrassement des canalisations par des organismes).

Le développement industriel peut donc être stoppé par la pollution (c'est une des raisons pour laquelle la préoccupation pollution est apparue d'abord dans les pays industrialisés).

### **II.3.2.5. Conséquences agricoles**

L'eau est, dans certaines régions, largement utilisée pour l'arrosage ou l'irrigation, souvent sous forme brute (non traitée).

La texture du sol (complexe argilo humique), sa flore bactérienne, les cultures et le bétail, sont sensibles à la qualité de l'eau.

De même, les boues issues du traitement des eaux usées pourront, si elles contiennent des toxiques (métaux lourds) être à l'origine de la pollution des sols.

### **II.3.3. Importance de la pollution**

Qu'elle ait des conséquences sanitaires, écologiques, esthétiques, industrielles ou agricoles (et le plus souvent les cinq), une pollution est importante parce qu'elle a des répercussions économiques et sociales (Gaujoux & Lair 1995), par exemple :

- Le coût de traitement de potabilisation ou de recherche d'une ressource lointaine ;
- Le manque à gagner d'une exploitation piscicole ou d'un lieu de loisir ;
- La dépréciation d'un site par suite de la diminution de la qualité de la vie.

D'une manière générale, ce sont ces répercussions socioéconomiques qu'il faut évaluer et mettre en avant pour choisir les priorités et convaincre les décideurs à agir.

De nos jours, il semble qu'au-delà de l'aspect économique, la lutte contre la pollution et la préservation de l'environnement, s'apparentent à un phénomène sociologique plus complexe (décrit comme une recherche du « sens authentique » de la société).

### **II.3.4. Etude de la pollution**

La pollution ayant, par définition, des conséquences négatives on peut, en théorie la quantifier en mesurant celles-ci (Gaujoux & Lair 1995).

Ainsi, l'étude épidémiologique permet de quantifier, sur une population, les effets sanitaires d'une pollution microbienne ou toxique.

De même, les études socio-économiques peuvent évaluer l'impact d'une pollution sur l'économie ou la qualité de vie dans une région.

Ce genre d'étude est absolument nécessaire et devrait se développer, car il permet d'évaluer l'importance réelle de la pollution.

Toutefois, il est également nécessaire d'approcher l'étude de la pollution en amont de ses conséquences, dans ses causes et ses mécanismes d'action.

#### II.4. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES TRAVAUX RÉALISÉS DANS LA RÉGION DU NORD EST ALGÉRIEN

Le suivi de la qualité des eaux et l'évolution de leur chimisme a été traité par plusieurs chercheurs, citons quelques travaux dans la région du Nord Est Algérien :

Bouguerne, (2001) a cherché à mieux connaître le comportement hydro chimique des eaux du barrage de Ain Zada et celui de Hammam Grouz se trouvant respectivement dans la wilaya de Sétif et celle de Mila. Le suivi de ces eaux a montré une évolution croissante surtout pour certains éléments tels que le chlorure, le plomb, le zinc...etc.

Mekaoussi, (2003) il a cherché à connaître les mécanismes du comportement hydro chimique des confluent de Oued el Hai du bassin versant de fontaine des gazelles, cette étude consiste à analyser des échantillons d'eau pris dans les différentes stations et déterminer par suite l'origine de cette pollution.

Tiri, (2005 et 2010) qui a traité le comportement hydro chimique du bassin versant de Oued Reboa qui alimente le barrage de Koudiat Medaour, qui a essayé de déterminer l'origine de la pollution de ces eaux, en fonction du débit. Les données acquises sur le terrain lors de l'élaboration de ce travail, a permis de définir le degré de pollution des eaux de surface.

Kemoukh, (2005) a étudié une autre région Oued SAF- SAF contrôlé par le barrage de Zardezas se trouvant au Nord Est de l'Algérie. Au terme de son étude, il a montré que les eaux du barrage de Zardezas sont aptes à être utilisées pour l'agriculture mais non pas pour l'AEP à cause de l'existence de quelques minéraux nocifs et dangereux pour la santé tel que le mercure et le plomb.

Mebarki, (2005) lors de ses travaux sur hydrologie des bassins de L'est Algérien il a indiqué que la protection des eaux de surface est d'autant plus nécessaire que celles-ci sont aujourd'hui largement sollicitées par l'aménagement. Le réseau de barrages-réservoirs encourt d'implantation, complété par de longs transferts hydrauliques, tend à couvrir un large espace de l'Est algérien de même que le taux de régularisation des apports des oueds est appelé à augmenter sensiblement. A ce titre, l'approche régionale des barrages est abordée. Les barrages-réservoirs à l'horizon 2020-2030. L'effet escompte est de combler le déficit d'alimentation en eau des villes et l'intensification de l'agriculture par le biais des grands périmètres irrigation.

Belhadj, (2006 et 2017) il a basé ses études sur la pollution du barrage de Zit –Emba wilaya de Skikda, il s'est intéressé par les causes et l'origine de la pollution de Oued el Hammam et l'évaluation de sa charge polluante, et il a essayé de comprendre le mécanisme de cette pollution le long du cours d'eau principal et de mettre au point une approche permettant d'appréhender l'état de l'environnement aquatique du barrage de Zit-Emba afin de caractériser la qualité de l'eau de l'amont à l'aval de ce dernier. Il ressort de ces études que le secteur présente des anomalies métallologiques pouvant être un réservoir d'ETM toxiques.

Benrabeh, (2006) s'intéresse à l'état des ressources en eau dans la wilaya de Skikda (bilan qualité pollution) dont deux principaux objectifs sont visés ; le premier est celui de l'estimation approximative des ressources en eaux (superficielles et souterraines) et leurs utilisations dans les divers secteurs dans la wilaya, le second est celui de l'évolution de la qualité des eaux de la région au cours des années. Après l'étude d'altération organique des eaux de surfaces (oueds). Après l'étude d'altération organique des eaux de surfaces (oueds), ils s'est avéré que les eaux de l'oued Safsaf et Guebli sont de qualité moyenne et les eaux de l'oued Kebir Ouest sont de mauvaise qualité.

Nouar (2007) s'est intéressé dans son étude à la région de Guelma, cette région est connue par des potentialités hydriques importantes caractérisées surtout par les eaux souterraines et de surface. La mise en évidence de la dégradation quasi- générale des eaux de surface de la région et ce par la présence d'une pollution chimique et bactériologique de l'amont à l'aval des différents sites de prélèvement du bassin de Guelma. En effet, le développement agricole, industriel, urbain et les constructions anarchiques avec des rejets non assainis font que les eaux souterraines et les eaux de surface situées aux alentours de Guelma sont dégradées en qualité.

Boukhouna (2008) ces intérêts sont penchés sur l'utilisation des eaux de l'Oued Bounamoussa pour l'irrigation des terres agricoles, tout en tenant en considération des risques sanitaires liés à la présence potentielle de composés chimiques toxiques et des germes infectieux, qui peuvent dégrader la qualité des eaux superficielles ainsi que souterraines de la plaine d'El Asfour. Pour avoir une idée de l'impact des eaux d'irrigation sur les eaux superficielles de la plaine, des prélèvements ont été effectués dans puits, durant la période d'irrigation. Sans oublier les lâchers du barrage de la Chaffia, qui joue un rôle important dans l'amélioration de la qualité des eaux de l'Oued Bounamoussa, dont l'utilisation devient possible avec précautions dans les domaines d'irrigation. L'ensemble de cette étude sur la qualité des eaux de la plaine, fait apparaître l'existence de fortes concentrations en éléments nutritifs et en éléments majeurs de la

minéralisation, ce qui indique une origine multiple de la pollution, agricole, urbaine et naturelle par l'action du lessivage des formations géologiques.

Gaagai, (2009) il s'est intéressé par l'étude hydrologique et hydro chimique du bassin versant du barrage de Babar Foum El Guieess sur oued el Arab région Est de l'Algérie. Il a cherché à connaître le type de pollution qui affecte le barrage qui a une origine domestique, industrielle, agricole et peut être naturelle. Son travail a été achevé par une étude approfondie de la qualité des eaux du barrage de Babar et celle des Oueds qui l'alimentent.

Mouchara (2009) son travail s'articule sur l'impact des lâchées du barrage Debagh sur la qualité des eaux de la vallée de Seybouse dans sa partie amont, ainsi que sur les caractéristiques physico-chimiques et bactériologique de chaque famille d'eau surtout celles des eaux d'irrigation du périmètre Guelma- Bouchegouf.

Mansouri (2009) l'objectif de son étude est la gestion de l'eau du bassin versant de l'oued Bouhamdane pour améliorer sa gestion actuelle en eau, entre les divers besoins et intérêts des communautés humaines et ceux des écosystèmes par l'identification des caractéristiques du bassin, la quantification de ses ressources en eau (superficielles et souterraines).

Guesmi (2009) L'Oued Medjerda alimente le barrage de Ain Dalia dans la région de Souk-Ahras (constitue une des principales ressources en eau de l'Est Algérien) a fait l'objet d'une étude pluridisciplinaire sur la propagation spatio-temporelle, la quantification des différents types de pollution, la qualité des eaux de surfaces et son utilisation à des fins agricoles. Cependant il est soumis à une pollution anthropique anarchique et naturelle. Le bassin de l'Oued Medjerda reçoit les rejets urbains et ceux issus de plusieurs activités industrielles (CELPAP-ROSA, SNIC, ELATEX, etc....) sont utilisés entre autres à l'irrigation de quelques périmètres agricoles. Dès lors, ces facteurs exposent les eaux superficielles à une pollution sévère. Il est à noter que l'étude a montré que les eaux sont fortement polluées.

Mebarkia (2011), l'Oued Boussellam qui alimente le barrage de Ain Zada dans la région de bordj Bou-Arredj, constitue une des principales ressources en eau des hauts plateaux et de l'Est Algérien. Cependant il est soumis à une pollution anthropique anarchique et naturelle. Il est à noter que les eaux sont bonnes à modérées pour les premières années de la mise en service du barrage (1986 à 1991) et fortement polluées pour les dernières années, due à l'immense de rejets urbains, industriels et agricoles. Cette pollution présente une menace majeure à l'entourage de la région, et notamment un grand risque sur la santé et la vie des habitants.

Kherzi (2011) l'étude hydro chimique sur le bassin versant de l'Oued Djemaa Bejaia, en raison de sa représentativité dans la région d'un côté et d'autre par manque de données sur ce dernier été son objectif. Cette étude a été réalisée afin de caractériser la qualité des eaux souterraines et superficielles. Un suivi de la qualité physico-chimique des eaux souterraines et de surface a été réalisé. Deux campagnes (Avril 2010) et (Décembre 2011) ont été effectués. Plusieurs outils (Chimique, statistique et informatique) ont été utilisés pour mieux interpréter les données acquises. Quant à l'aspect environnemental, les investigations sur les sources de pollution ont fait apparaître la présence de quelques polluants, tirant leurs origines des activités agricoles et des rejets urbains.

Sadoune (2012) les ressources en eau sont abondantes dans la région de l'extrême Nord-Est Algérien et sont surtout constitués par les écoulements des Oueds Kébir Est, Bounamoussa et Seybouse et leurs affluents. En effet, ces ressources sont peu utilisées puisque sur un volume de 836 Hm<sup>3</sup>/an, seule une quantité assez limitée est emmagasinée par les barrages et quelques retenues collinaires, et le reste du volume s'écoule vers la mer. L'établissement de la carte d'altération des eaux superficielles ainsi leurs vulnérabilités, dans des régions de l'extrême Est-Algérien a permis de classer les eaux de surface en fonction de leur degré d'altération. En effet, les eaux des sources du massif dunaire sont de bonne qualité, par contre les eaux de l'oued Seybouse sont parmi les plus contaminés de la région.

Agouni (2013) dans le cadre d'un projet de recherche CNEPRU intitulé "Biodiversité de la faune et flore aquatiques de l'extrême Est Algérien : Cas du barrage de Ain El Dalia". D'où l'identification et l'inventaire des genres de Cyanobactéries toxiques qui peuplent le barrage d'Ain Dalia, le suivi de la distribution et de la dynamique saisonnière des micro-algues recensées, le suivi des variations des paramètres physico-chimiques de l'eau du barrage d'Ain Dalia, l'évolution des Cyanobactéries en fonction de certains paramètres physico-chimiques de l'eau du barrage, et enfin l'identification du ou des genres de Cyanobactéries pouvant servir de bio indicateur d'eutrophisation et de potabilité des eaux stagnantes de surface.

Mekaoussi (2014) se focalise sur l'analyse et l'interprétation d'échantillons d'eau prélevés au pat mensuel entre décembre 1999 et janvier 2004 au niveau de la cuvette du barrage de Hammam Debagh. L'étude de l'évolution des éléments physico-chimiques en fonction de temps montre que les eaux du barrage de Hammam Debagh contiennent une forte proportion de matière organique non dégradable. La variation des éléments chimiques selon le volume de l'eau de la retenue montre

que presque tous les éléments évoluent d'une manière inverse avec le volume d'eau suite à des phénomènes de dilution et de concentration. Les eaux du barrage présentent une potabilité permanente pour l'alimentation en eau potable et d'une manière générale sont des bonnes qualités pour l'irrigation.

Guerraiche (2017) à aborder une étude hydro chimique des eaux de quelques barrages situés dans deux niveaux bioclimatiques contiguës, arides et semi-arides. Il s'agit des barrages «Hammam-Grouz» et «Beni-Haroun» appartenant aux « Hauts plateaux Constantinois » et celui du barrage « Menbaa El Ghozlanes » appartenant au bassin versant « Chott Melhrir ». Pour cela plus de quatre centaines d'échantillons ont été prélevés et traités. Les analyses ont montré que ces eaux ont le même faciès hydrochimique (Sulfaté calcique) et que les concentrations des nutriments ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ) augmentent de Grouz vers Beni-Haroun. Le rapport DCO/DBO5 augmente aussi dans le même sens et prend des valeurs maximales à Beni-Haroun pour l'année 2009. La présence de certains éléments traces métallique(ETM) comme  $\text{Zn}^+$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  et  $\text{Cu}^{2+}$ , est à signaler. Les concentrations des éléments majeurs dans leur majorité dépassent les normes fixées. La conductivité est minimale au barrage Grouz et maximale à Manbaa El-Ghozlanes.

#### II.4. CONCLUSION

Malgré la pénurie, le gaspillage de l'eau est généralisé. Au village comme dans les grandes villes, à la ferme comme dans l'industrie et dans les pays en développement comme dans les économies industrialisées, on méduse universellement l'eau. La qualité de l'eau superficielle se dégrade dans les bassins versants sous l'effet des rejets de déchets urbains et industriels.

L'importance de plus en plus grande qu'on attache aujourd'hui à la protection des milieux naturels et en particulier à la préservation de la qualité des eaux. Différentes instances internationales chargées d'inspecter et de surveiller l'environnement, sonnent l'alarme à l'occasion de chaque catastrophe et proposent des réglementations de plus en plus strictes.

Des évaluations récentes ont permis de rapporter que les principaux polluants de l'eau sont les effluents d'égout, les nutriments, les métaux toxiques rejetés par les industries en activité et surtout les installations minières abandonnées ainsi que les produits chimiques utilisés dans l'industrie et en agriculture [PNUE. 1991].

La lutte contre cette pollution est d'autant plus difficile car elle est diluée dans l'eau et souvent invisible et que certains toxiques infiltrés dans le sol ne produisent souvent leur effet qu'à long terme et que de nombreux polluants agissent en synergies complexes.

La concentration de ces différents paramètres physico-chimiques évolue avec l'écoulement de surface ce qui nécessite une étude de ces écoulements en liaison directe avec les paramètres chimiques.

## **BIBLIOGRAPHIE**

---

- Amiard J.-C. (2011). *Les risques chimiques environnementaux: méthodes d'évaluation et impacts sur les organismes*. Lavoisier.
- Baird C. and Cann M. (2016). *Chimie de l'environnement*. De Boeck supérieur.
- Bleu P. (2005). L'Eau. *Méditerranée, les perspectives du Plan Bleu sur l'Environnement et le Développement*, 71-107.
- Bliefert C. and Perraud R. (2007). *Chimie de l'environnement: air, eau, sols, déchets*. De Boeck Supérieur.
- Degrémont S. (1989). Mémento technique de l'eau, édition du cinquantenaire. In, Lavoisier (Éditeur), Paris, France, tomes.
- Gaujoux D. and Lair N. (1995). La pollution des milieux aquatiques: aide-memoire. *Année Biologique* 34(2), 106.
- Grosclaude G. (1999). *L'eau: Tome 2: Usages et polluants*. Quae.
- Loup J. (1974). *LES EAUX TERRESTRE HYDROLOGIE CONTINENTALE*.
- Margat J. and Andréassian V. (2008). L'Eau, les Idées Reçues. *Editions le Clavier Blue, Paris*.
- PNUE. 1991. Pollution des eaux douces. Bibliothèque de l'environnement PNUE/GEMS. N° 6. Nairobi.

## *CHAPITRE III*

### *Transfert de polluants*

### III.1. INTRODUCTION

Les polluants sont transportés par le mouvement de l'eau et sont soumis à un nombre d'interactions physiques, chimiques, voire biologiques avec la matrice solide. L'évolution de ces polluants est très lente, comparativement à ce qui se passe en surface (cours d'eau). Il s'écoule des mois, des années, ou même des dizaines d'années, entre le début de la pollution et sa mise en évidence.

Un élément conservatif (ou inerte ou non réactif ou traceur parfait) est un élément en solution ne subissant aucune modification et n'interagissant pas avec la phase solide lorsqu'il est transporté à travers le milieu poreux. Dans la nature il n'existe pas d'éléments inertes au sens strict mais seulement des éléments considérés comme tel car leur réactivité est négligeable.

Au fur et à mesure que l'eau migre à travers le milieu, les solutés qu'elle transporte sont soumis à un certain nombre de processus : processus de transport, réactions chimiques en phase liquide, interactions avec la matrice solide ou avec des êtres vivants. Le transport de masse en milieux poreux est ainsi influencé par une grande variété de processus physiques, chimiques, voire biologiques, complexes et interdépendants (Besnard 2003; Benabdallah 2010).

La compréhension des processus qui régissent les phénomènes d'écoulement et de transport en milieux poreux a toujours constitué un centre majeur d'intérêt pour la communauté scientifique, l'attachement général pour le développement durable justifie certainement l'intensification des démarches de modélisation dans ce domaine (Fredj 2000).

Dans cette partie, nous présentons les différents processus qui affectent le transport des éléments en solution, leurs conséquences sur le transport et leur description mathématique. Nous décrivons également les outils quantitatifs disponibles pour décrire le transport des éléments.

### III.2. LES MECANISMES DE TRANSPORT EN MILIEU POREUX

Différents phénomènes sont responsables du transport de la matière. La matière peut être transportée par le mouvement du fluide (transport convectif), par diffusion de zones concentrées vers des zones de concentrations plus faibles (transport diffusif) ou par d'autres phénomènes. Le mouvement d'un soluté dans un milieu poreux est la résultante de deux composantes, la première en est l'advection où le processus implique que chaque molécule d'un soluté non réactif se déplace à la vitesse moyenne du mouvement de l'eau. La seconde composante est la

dispersion qui tend à propager les molécules aussi bien dans le sens longitudinal de l'écoulement que dans des directions transversales (Zheng & Bennett 1995). La migration des éléments en solution: l'advection, la diffusion moléculaire et la dispersion (De Marsily 1994)

### III.2.1. Le processus de transport par advection

L'entraînement des éléments en solution par le fluide qui se déplace est le phénomène le plus intuitif de déplacement. Le flux advectif du soluté s'exprime par le produit de la concentration et de la vitesse de Darcy (Freeze & Cherry 1979). Le contaminant est donc transporté à travers les pores sous l'effet d'un gradient hydraulique.

L'équation de transport par advection pure dans un milieu monodimensionnel est la suivante :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -U_x \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1)$$

Avec  $U_x$ , vitesse moyenne linéaire du fluide.

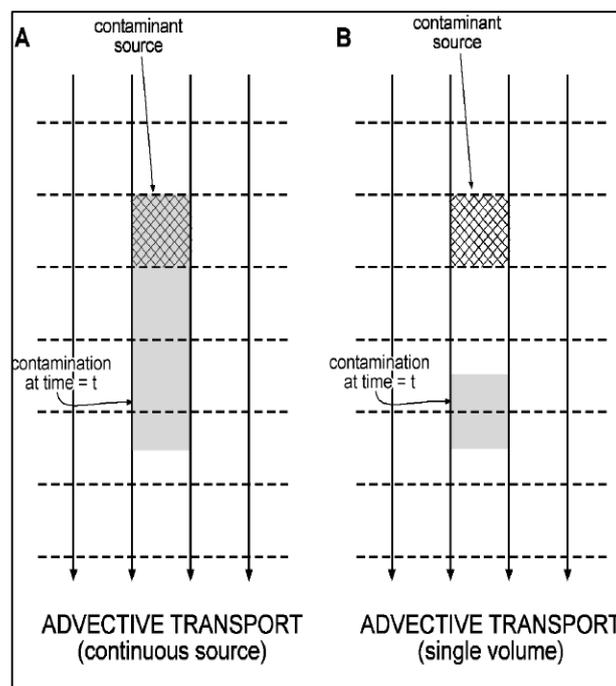


Figure III. 1: Transport par advection d'un contaminant

(Extrait de: [www.geo.utexas.edu/courses/391/ppt/Water%20Quality.ppt](http://www.geo.utexas.edu/courses/391/ppt/Water%20Quality.ppt))

Notons que la source de contamination peut être continue ou ponctuelle. Dans les deux cas, et comme il apparaît dans la figure ci-dessous (Figure III. 1), on constate que lors de l'écoulement, la contamination ne dépasse pas les limites du tube de courant.

### III.2.2. Le processus de transport par dispersion

La dispersion étale la masse du contaminant au-delà de la région qu'elle occuperait si seulement l'advection se produisait. Il se crée alors une zone de mélange entre le fluide « déplaçant » et le fluide « déplacé ». La dispersion est un phénomène qui se produit toujours lors de transport de contaminants et en résulte une diminution de la concentration du contaminant dissous.

Dans la Figure III. 2 ci-dessous, la dispersion d'un contaminant est illustrée dans le cas d'une source de contamination ponctuelle et d'une source de contamination continue. Dans les deux cas, on constate que la contamination s'étale au-delà d'un tube de courant contrairement à la figure III.1 qui illustre un cas de transport d'un contaminant sous l'effet d'advection seulement et où la contamination ne dépasse pas les limites d'un tube d'écoulement.

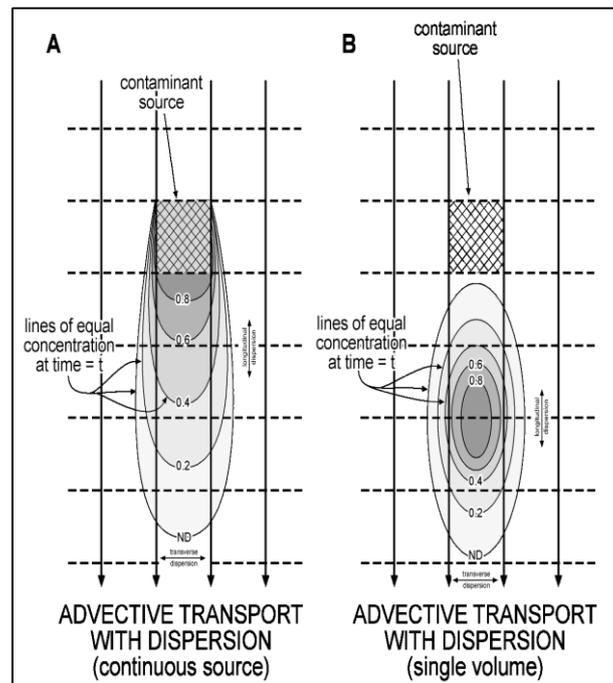


Figure III. 2: Transport par advection et dispersion du contaminant

(Extrait de : [www.geo.utexas.edu/courses/391/ppt/Water%20Quality.ppt](http://www.geo.utexas.edu/courses/391/ppt/Water%20Quality.ppt))

La dispersion se produit dans un milieu poreux et est l'association de deux processus : La diffusion et le mélange causé par les variations de vitesse. Ce dernier est nommé dispersion mécanique.

### III.2.2.1. Dispersion mécanique

Du fait de la microstructure du milieu, la vitesse du fluide varie en magnitude et en direction au sein du milieu poreux. Cette variation des vitesses entraîne une dilution du soluté, appelée dispersion cinématique (Bear 1979).

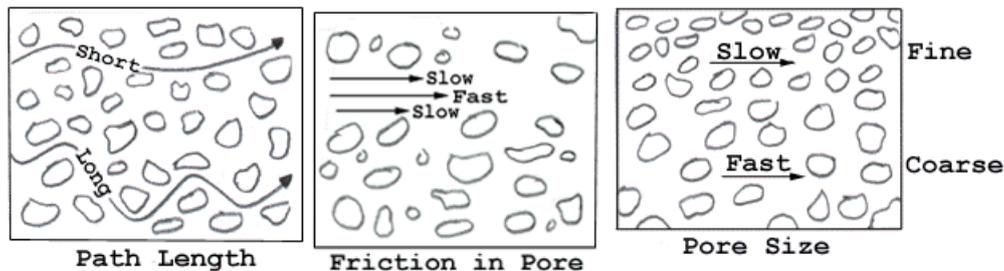


Figure III. 3: Ecoulement de l'eau dans un media poreux

(Extrait de: <http://www.cee.vt.edu/ewr/environmental/teach/gwprimer/disperse/disperse.html>)

La dispersion mécanique est un processus microscopique qui se caractérise par un brassage causé par des variations locales de vitesse par rapport à la vitesse moyenne d'écoulement. La masse qui occupe certains pores et volumes devient graduellement plus dispersée car différentes fractions de masse sont transportées dans un régime de vitesse variable (Fredj 2000; Besnard 2003; Benabdallah 2010; Djerafi 2012).

Pour quantifier la dispersion mécanique, un paramètre nommé dispersivité dynamique ou dispersivité,  $\alpha$ , est introduit. Ainsi, les dispersions longitudinale et transversale sont calculées comme suit :

$$D_L = \alpha_L \cdot v \quad (2)$$

Et

$$D_T = \alpha_T \cdot v \quad (3)$$

Avec  $D_L$ ,  $D_T$ ,  $\alpha_L$ ,  $\alpha_T$  et  $v$  respectivement sont la dispersion mécanique longitudinale, dispersion mécanique transversale, dispersivité longitudinale, dispersivité transversale et vitesse d'écoulement linéaire. La dispersivité a par ailleurs l'unité de la longueur [L]. Dans la littérature, il y a un consensus pour que la dispersivité transversale soit 10 fois inférieure à la dispersivité longitudinale et la dispersivité verticale 1 ou 2 ordres de grandeurs plus petites que la dispersivité longitudinale.

Le rapport ( $\alpha_L / \alpha_T$ ) contrôle la forme du panache : plus ce rapport est petit, plus le panache résultant sera large. Les très rares données disponibles dans la littérature sur les relations entre  $\alpha_T$  et  $\alpha_L$  montrent que le rapport ( $\alpha_L / \alpha_T$ ) varie entre 6 et 20 (Klotz *et al.* 1980).

### III.2.3. La diffusion moléculaire

La diffusion est un processus qui se produit à une échelle microscopique, et qui cause un mouvement de solutés dans l'eau suivant un gradient de concentrations. Quelle que soit la vitesse d'écoulement dû à l'advection, le soluté va diffuser tant qu'il y aura un gradient de concentrations. Ce processus de diffusion est un mélange causé par un mouvement moléculaire aléatoire provoqué par l'énergie cinétique thermique du soluté. Contrairement à la dispersion cinématique, la diffusion moléculaire peut se dérouler indépendamment de l'advection. C'est un phénomène physique lié à l'agitation moléculaire. Dans un fluide au repos, le mouvement brownien envoie des particules dans toutes les directions de l'espace.

Le taux de diffusion pour les différentes espèces chimiques va dépendre du gradient de concentrations et du coefficient de diffusion (Benabdallah 2010).

Si la concentration n'est pas homogène, c'est à dire s'il existe un gradient de concentration entre deux points voisins, le point ayant la concentration la plus élevée enverra en moyenne plus de particules dans toutes les directions que l'autre point. La résultante sera donc un transfert de particules des zones à concentration élevée vers les zones à concentration faible selon une loi de Fick classique ou le coefficient de diffusion moléculaire  $D^*$  traduit la proportionnalité du flux massique au gradient de concentration (Besnard 2003; Benabdallah 2010).

Le coefficient de diffusion moléculaire  $D^*$  s'écrit :

$$D^* = \frac{D_{mol}}{\tau_e} \quad (4)$$

Avec :

$\tau_e$  : Tortuosité du milieu.

$D_{mol}$  : coefficient de diffusion moléculaire du soluté dans l'eau en absence de solide (dans l'eau libre).

Dans les milieux poreux, la présence des grains ralentit la diffusion car les ions doivent alors suivre des chemins plus longs que dans de l'eau libre. Le coefficient de diffusion moléculaire,

dit effectif,  $D^*$  tient compte de ce phénomène et est associé au coefficient en eau libre  $D_{mol}$ . En outre, le coefficient dépend de la nature de l'ion, de la température (selon une loi d'Arrhénius), de la pression et de la composition du fluide (Besnard 2003; Benabdallah 2010).

Les valeurs de  $D_{mol}$  sont propres à chaque espèce. Pour les ions majeurs présents dans l'eau libre varient généralement entre  $1.10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s et  $2.10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s à 25°C (Freeze & Cherry 1979). Les coefficients de diffusion varient en fonction de la température de l'eau.

Etant donné ces valeurs la diffusion est généralement négligeable par rapport à la dispersion cinématique, sauf lorsque les vitesses d'écoulement sont très faibles.

Dans le tableau (Tableau III. 1) ci-dessous, quelques valeurs du coefficient de diffusion d'anions et cations sont présentées. Notons que ces valeurs varient entre  $5.10^{-6}$  et  $20.10^{-6}$  cm<sup>2</sup>/s dans tous les ions à l'exception de H<sup>+</sup> et OH<sup>-</sup>. Aussi, plus la charge de l'ion est grande, moins grande sera la valeur du coefficient de diffusion (Benabdallah 2010).

Tableau III. 1: Quelques valeurs du coefficient de diffusion pour des anions et cations

Cation	$D_a$ ( $10^{-6}$ cm <sup>2</sup> /s)	Anion	$D_a$ ( $10^{-6}$ cm <sup>2</sup> /s)
H <sup>+</sup>	93.1	OH <sup>-</sup>	52.7
Na <sup>+</sup>	13.3	F <sup>-</sup>	14.6
K <sup>+</sup>	19.6	Cl <sup>-</sup>	20.3
Mg <sup>+</sup>	7.05	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	11.8
Ca <sup>+</sup>	7.93	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	10.7

Adapté de Li et Gregory (1974).

#### III.2.4. Dispersion hydrodynamique

Les deux processus définis et décrits précédemment (diffusion et dispersion mécanique) ne peuvent être dissociés pendant un écoulement. Combinés ensemble, ils forment le coefficient de dispersion hydrodynamique  $D$ . C'est pourquoi elles sont généralement décrites par une équation unique, loi de diffusion de Fick. Ce dernier se compose d'une composante dans la direction de l'écoulement  $D_L$  et une composante dans le sens transversal à l'écoulement  $D_T$  (Gorelick 1983; Fredj 2000; Besnard 2003; Benabdallah 2010).

$$D_L = \alpha_L \cdot v_i + D^* \quad (5)$$

$$D_T = \alpha_T \cdot v + D^* \quad (6)$$

Ou  $D_L$ ,  $D_T$ ,  $\alpha_L$ ,  $\alpha_T$  et  $v$  sont respectivement la dispersion mécanique longitudinale, dispersion mécanique transversale, dispersivité longitudinale, dispersivité transversale et vitesse d'écoulement linéaire.

Enfin, on peut dériver une équation d'advection-dispersion. C'est dans cet objectif que ce sont orientées les recherches de (Ogata 1970; Freeze & Cherry 1979) on suppose que le milieu est homogène, isotopique et saturé. Aussi, on considère que la loi de Darcy est valide.

Donc, à partir de la loi de la conservation de masse, on déduit l'équation suivante :

$$D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_T \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (7)$$

### III.2.5. Diffusion versus dispersion

Le mouvement de l'eau dans les milieux poreux dépend donc de la conjugaison de deux processus : La diffusion moléculaire et la dispersion mécanique. Dans la majorité des cas, la diffusion moléculaire est négligeable devant la valeur de la dispersion mécanique. Mais, il existe toutefois des cas où les deux processus interviennent.

Il est donc possible d'évaluer la contribution de chaque processus dans le mouvement d'un soluté dans un milieu poreux. Le nombre de Péclet ( $Pe$ ) est un nombre sans dimension. En transfert massique, Il représente le rapport entre le transfert par convection et le transfert par diffusion pour les transferts massiques. Le nombre de Péclet s'écrit ainsi sous deux formes :

$$P_e = \frac{v_x \cdot d}{D_d} \quad (8)$$

$$P_e = \frac{v_x \cdot L}{D_L} \quad (9)$$

Où  $v_x$  est la vitesse d'advection,  $d$  et  $L$  sont des caractéristiques de la distance d'écoulement,  $D_d$  est le coefficient de diffusion moléculaire et  $D_L$  est le coefficient de dispersion hydrodynamique longitudinal.

Les graphes ci-dessous montrent la variation des deux rapports  $DL/Dd$  et  $DT/Dd$  en fonction du nombre de Péclet  $Pe$ .

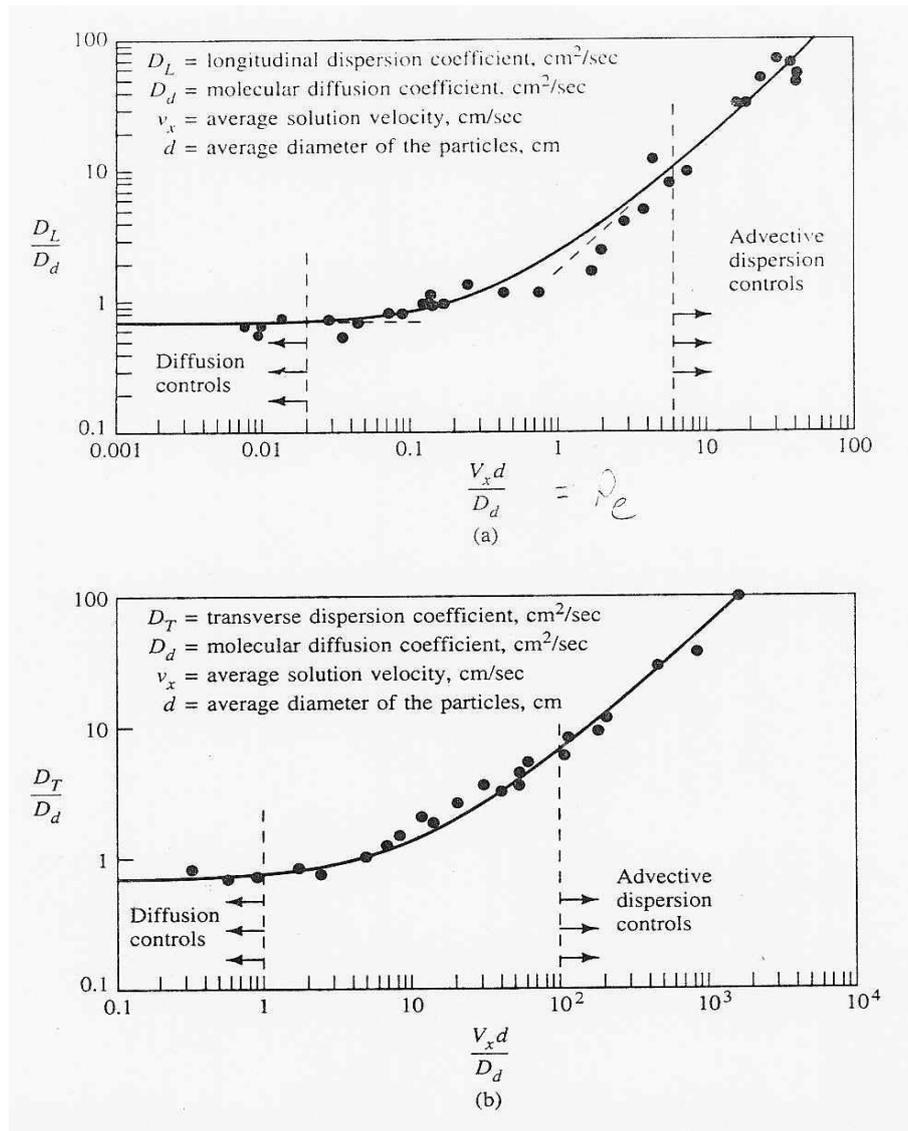


Figure III. 4: Ratio  $D_L/D_d$  et  $D_T/D_d$  par rapport au nombre de Péclet (Fetter 1999)

D'après ces graphiques, il apparaît qu'il y a des zones où la diffusion est dominante alors que la dispersion est négligeable, dans d'autres zones, c'est le contraire qui se produit alors qu'entre ces deux zones, les deux processus se produisent.

Ces trois zones sont caractérisées par (Fetter 1999) :

- Diffusion seulement : Pour  $D_L/D_d$  versus  $Pe$ ,  $Pe < 0.02$  et pour  $D_T/D_d$  versus  $Pe$ ,  $Pe < 1$  ;
- Advection seulement : Pour  $D_L/D_d$  versus  $Pe$ ,  $Pe > 6$  et pour  $D_T/D_d$  versus  $Pe$ ,  $Pe > 100$

- Diffusion et advection : Pour  $DL/Dd$  versus  $Pe$ ,  $0.02 < Pe < 6$  et pour  $DT/Dd$  versus  $Pe$ ,  $1 < Pe < 100$

### III.3. LE TRANSPORT DE SOLUTES REACTIFS DANS LES MILIEUX POREUX

#### III.3.1. Devenir des contaminants

La migration d'un contaminant en solution est généralement le résultat de l'interaction de nombreux processus physiques, chimiques et biologiques (Tableau III. 2).

Les quatre principaux processus contrôlant le mouvement des contaminants en sub - surface sont l'advection, la dispersion, le transfert de masse entre différentes phases et la réaction au sens large. Les transferts de phase tels que les phénomènes de sorption, les partitions liquide-liquide ou la volatilisation, correspondent à un transfert de matière en réponse à un gradient chimique (Besnard 2003; Benabdallah 2010).

La réaction correspond à tous les processus modifiant la nature physico-chimique du contaminant. Il s'agit, par exemple, de la décroissance radioactive, des bio- transformations ou de l'hydrolyse.

Les théories originelles du transport de contaminants en milieu poreux sont basées sur les hypothèses d'un milieu homogène et de transferts de masse entre phases et réactions instantanées (Besnard 2003; Benabdallah 2010).

Lorsqu'un transport se déroule dans ces conditions, il est dit "idéal". En réalité, comme nous l'avons vu, le milieu souterrain est hautement hétérogène et de nombreuses réactions chimiques ne sont pas instantanées. C'est pourquoi le transport d'éléments en solution diffère généralement de ce qui est attendu à partir des hypothèses initiales. Il s'agit alors d'un transport "non idéal" (Besnard 2003; Benabdallah 2010).

Tableau III. 2: Impact sur le devenir des contaminants des principaux processus physico-chimiques auxquels ils sont soumis.

Processus	Impact sur le transport
Advection	C'est le moyen le plus efficace de transporter un soluté loin de la source.
Diffusion	Étalement du panache mais généralement négligeable
Dispersion	Diminue la concentration du pic, augmente la taille du panache et diminue le premier temps d'arrivée
Transformations biologiques	Diminue la concentration en solution
Décroissance radioactive	Diminue la concentration en solution, mais pour être efficace la demi-vie doit être inférieure au temps de résidence dans le système
Sorption	Réduit la vitesse apparente du soluté (retardation) et rend la remédiation d'un site plus difficile
Dissolution/précipitation	Retard du soluté, changement de la porosité du milieu donc du champ de vitesse
Réaction acide - base	Contrôle le pH de la solution
Complexations	Augmentation de la mobilité des métaux car formations d'espèces chargées négativement ou augmentation de leur solubilité
Hydrolyse / échange d'ions	Rend souvent les composés organiques plus solubles ou plus biodégradables
Oxydo - réductions	Effet important sur la solubilité des métaux et sur la dégradation des composés organiques

### III.3.2. Effet des processus physico-chimiques sur le transport

Comme nous venons de le voir, les solutés dissous dans les eaux souterraines sont sujet à un certain nombre de processus physico-chimiques (Khiter 2013). Au cours de leur trajet, les solutés peuvent subir trois sortes de phénomènes :

- **Retard** via une immobilisation, souvent réversible (sorption, échange d'ions, filtration, précipitation) ;
- **Atténuation** c'est-à-dire une disparition irréversible ou transformation (oxydo - réductions chimiques, oxydo - réductions biologiques i.e. biodégradation, volatilisation, hydrolyse) ;

- **Augmentation de la mobilité** : vitesse accélérée (dissolution, ionisation complexation-chélation).

### III.4. QUANTIFICATION DES PROCESSUS DE TRANSPORT

#### III.4.1. Méthodes de résolution de l'équation d'advection-dispersion

L'équation d'advection-dispersion peut être résolue soit par des méthodes analytiques voire quasi analytiques, soit par des méthodes numériques. Pour obtenir une solution unique de l'équation, il est nécessaire de spécifier les conditions initiales (valeurs des variables étudiées à l'instant  $t = 0$ ) et conditions aux limites (interaction entre le domaine d'étude et son environnement) (Khiter 2013).

- Les **méthodes analytiques** nécessitent la résolution de l'équation aux dérivées partielles avec des conditions initiales et limites précises. Ces méthodes sont limitées à des systèmes géométriques simples et généralement à un milieu homogène. Ogata (1961, 1964), Sauty (1980) et van Genuchten (1981)), entre autres, ont fourni des solutions analytiques pour des transports monodimensionnels avec des conditions aux limites du 1er type (Dirichlet), second-type Neumann et 3e type (Cauchy) respectivement. De Josselin de Jong (1958), Fried (1975), Bear (1979), Wilson (1978), Batu (1989), Batu (1993), par exemple, ont présenté des solutions analytiques du transport bidimensionnel. Enfin, Domenico et al. (1985) se sont intéressés au transport multidimensionnel (Besnard 2003).

- Dans certains cas, il peut s'avérer utile d'utiliser une méthode **semi-analytique**. Le problème est d'abord résolu analytiquement dans les domaines des transformées de Fourier ou de Laplace et la transformée inverse est ensuite calculée numériquement (Besnard 2003; Khiter 2013).

- Lorsque les méthodes précédentes ont échoué, l'équation d'advection-dispersion doit être résolue **numériquement**.

Le caractère mixte de l'équation avec une dérivée seconde, terme parabolique, exprimant la dispersion et une dérivée première, terme hyperbolique, exprimant l'advection rend sa résolution numérique difficile. Il existe trois grandes techniques numériques (Besnard 2003; Khiter 2013):

- **Schéma numérique eulérien** : le système d'équations est résolu à l'aide d'un maillage fixe. Les deux principales méthodes numériques correspondantes sont les différences finies et les éléments finis. Ces méthodes sont simples, conservent la masse et sont faciles à mettre en œuvre. Néanmoins, lorsque le transport par advection est le processus de transport dominant, comme c'est le cas dans la majorité des transports de soluté dans les eaux souterraines, ces méthodes entraînent une dispersion numérique excessive et/ou des oscillations. Ces erreurs peuvent être réduites en diminuant les discrétisations spatiale et temporelle (pas de temps et taille des mailles de la grille) mais l'effort de calcul engendré peut être trop important (Besnard 2003; Khiter 2013).
- **Approche Lagrangienne** : cette méthode emploie une grille mobile ou des coordonnées mobiles dans une grille fixe pour résoudre le système d'équations. La méthode lagrangienne de base est le particle tracking (Besnard 2003; Khiter 2013).
- **Approche mixte eulérienne-lagrangienne** : l'advection est abordée par une approche lagrangienne alors que la dispersion est résolue par une approche eulérienne. La méthode des caractéristiques (MOC) est une méthode classique correspondant à cette approche (Besnard 2003; Khiter 2013).

### III.5. CONCLUSION

Dans les milieux souterrains les éléments inertes sont principalement transportés sous l'effet de deux forces : une force liée au gradient moléculaire « diffusion moléculaire » et une force liée au gradient de charge hydraulique advection. Si la diffusion moléculaire est un phénomène important dans les milieux dans lesquels l'eau stagne ou dans les milieux à faible perméabilité, elle est le plus généralement négligeable. Dans les milieux hétérogènes, les éléments transportés par le flux d'eau subissent une dispersion due à l'hétérogénéité du champ de vitesse à l'échelle du pore (dispersion locale) mais une dispersion encore plus forte due à l'hétérogénéité du champ de vitesse (dispersion macroscopique).

L'équation d'advection-dispersion utilisée pour décrire le transport inerte ne se résout analytiquement que dans de très rares cas. De nombreuses méthodes numériques ont été développées pour modéliser ce transport.

Les modèles stochastiques fournissent notamment des expressions analytiques des moments spatiaux asymptotiques du panache inerte.

Le comportement des éléments en solution est également et surtout le résultat de l'interaction des processus couplés physico-chimiques avec l'hétérogénéité du milieu.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- Bear J. (1979). Groundwater hydraulics. *McGraw, New York*.
- Benabdallah E. M. (2010). *Mouvement des eaux souterraines et des ions majeurs dans une argile Champlain depuis sa formation*. École Polytechnique de Montréal.
- Besnard K. (2003). *Modélisation du transport réactif dans les milieux poreux hétérogènes. Application aux processus d'adsorption cinétique non linéaire*. Université Rennes 1.
- De Marsily G. (1994). Hydrogéologie: Comprendre et estimer les écoulements souterrains et le transport de polluants. *Ecole des mines de Paris*.
- Djerafi N. K. K. (2012). Etude du transport de soluté réactif dans un milieu poreux chimiquement hétérogène.
- Fetter C. (1999). Contaminant hydrogeology. 2.
- Fredj A. (2000). Modelisation de la propagation de polluants dans un milieu poreux saturé et non saturé (French text).
- Freeze R. A. and Cherry J. A. (1979). Groundwater, 604 pp. In, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Gorelick S. M. (1983). A review of distributed parameter groundwater management modeling methods. *Water Resources Research* 19(2), 305-19.
- Khiter A. E. (2013). *Modélisation du transport réactif dans les aquifères. Application aux processus d'adsorption cinétique non linéaire*. Université des sciences et de la technologie Houari Boumediène (USTHB).
- Klotz D., Seiler K.-P., Moser H. and Neumaier F. (1980). Dispersivity and velocity relationship from laboratory and field experiments. *Journal of Hydrology* 45(3-4), 169-84.
- Ogata A. (1970). *Theory of dispersion in a granular medium*. US Government Printing Office.
- Zheng C. and Bennett G. (1995). Applied Contaminant Transport Modeling: Theory and Practice. @ Van Nostrand Reinhold. *New York, NY*.

*Deuxième partie*

*Qualité des eaux*

# *CHAPITRE IV*

## *Présentation de la zone*

### *d'étude*

### IV.1. INTRODUCTION

Le domaine d'étude concerne toute la partie Nord Est de l'Algérie d'après le classement de l'agence nationale des barrages et transfert ANBT qui englobe treize wilaya (Annaba, Guelma, Constantine, El Tarf, Skikda, Batna, Souk Ahras, Oum Al bouaghi, Khanchla, Mila, Tebessa, Jijel et Biskra). Une représentation de ses caractéristiques géographiques, climatiques et hydrographiques sera donnée dans ce chapitre ainsi que les différents barrages en remblai de cette zone.

D'un point de vue climatique, la région correspond à la zone de déplacement saisonnier des positions hautes pressions subtropicales, qui connaît un balancement régulier entre le 30<sup>ème</sup> et le 40<sup>ème</sup> parallèle, vers le Sud en hiver et vers le Nord en été. Le front polaire saisonnier connaît un mouvement entre le 35<sup>ème</sup> et le 65<sup>ème</sup> parallèle, ce dernier régit le climat de la région de l'Est Algérien pendant la saison la plus froide de l'année.

L'Algérie du Nord par sa position subit un balancement contrasté entre la circulation d'un air saharien sévissant l'été et une circulation polaire sévissant en hiver ; expliquant ainsi un climat aride en été et tempéré humide en hiver.

### IV.2. SITUATION GEOGRAPHIQUE

Notre étude concerne la région localisée au niveau du Nord Est Algérien, la région s'étend de Bejaia, Sétif et Msila à l'Ouest jusqu'à la frontière Algéro-Tunisienne à l'Est et de la mer méditerranée au Nord jusqu'à El Oued, Ouargla et Djelfa au Sud, le territoire se trouve limité par les parallèles : 37° et 33° de latitude Nord, par les longitudes 9° Est et 5° Ouest (Figure IV.1). Cette zone est d'environ 89616 Km<sup>2</sup> de superficie.

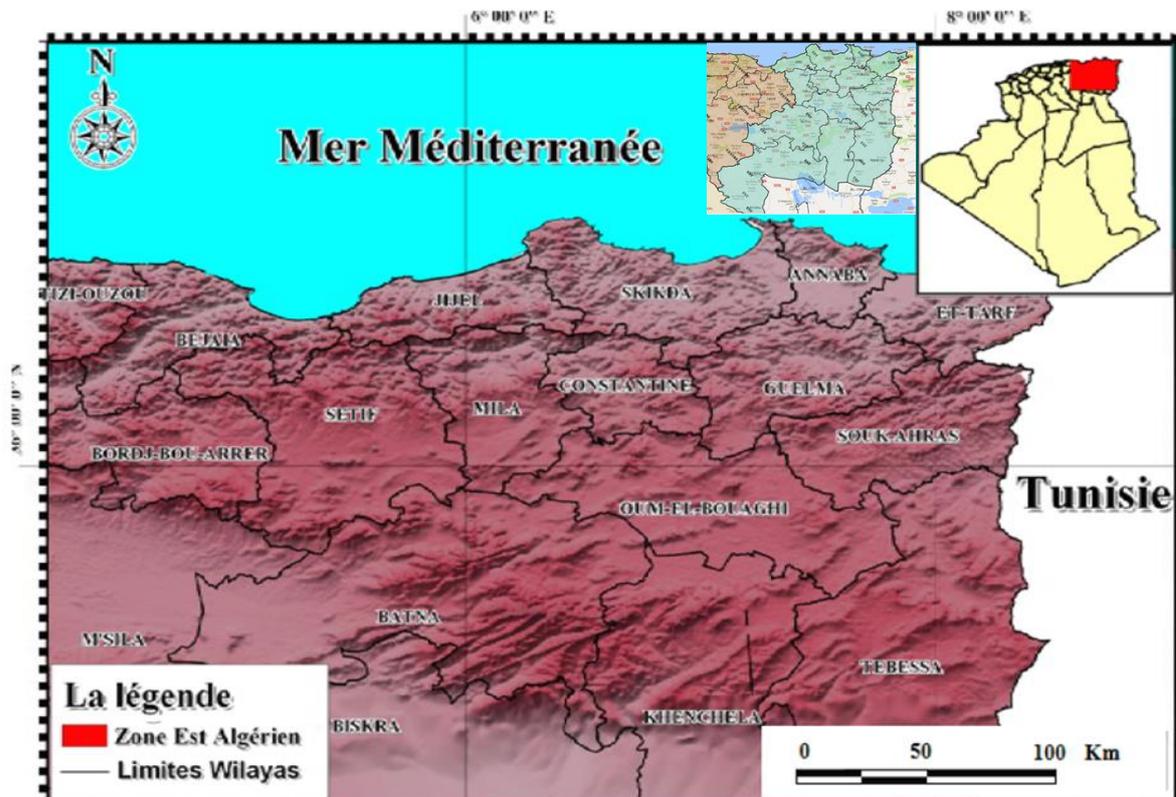


Figure IV. 1: Localisation de la région d'étude (ANBT)

### IV.3. APERÇU TOPOGRAPHIQUE

Le relief est le résultat d'une conjugaison de plusieurs facteurs et particulièrement par l'évolution géologique et par l'action de l'érosion à une grande échelle (des milliers ou millions d'années). Dans ce contexte l'Algérie est divisée en trois ensembles distincts (Figure IV.2).

Au Nord, l'Atlas tellien forme avec l'Atlas Saharien, plus au Sud, deux ensembles de relief parallèles se rapprochent en allant vers l'Est, et entre lesquels s'intercalent de vastes plaines et hauts plateaux. Les deux Atlas tendent à se confondre dans l'Est de l'Algérie où l'on retrouve les vastes chaînes montagneuses des Aurès (Batna, Khenchla, Oum El Bouaghi, Ain Mlila, Souk Ahras, Guelma, Biskra, etc.) et de la Nememcha (Tebessa) qui occupent la totalité de l'Est Algérien.

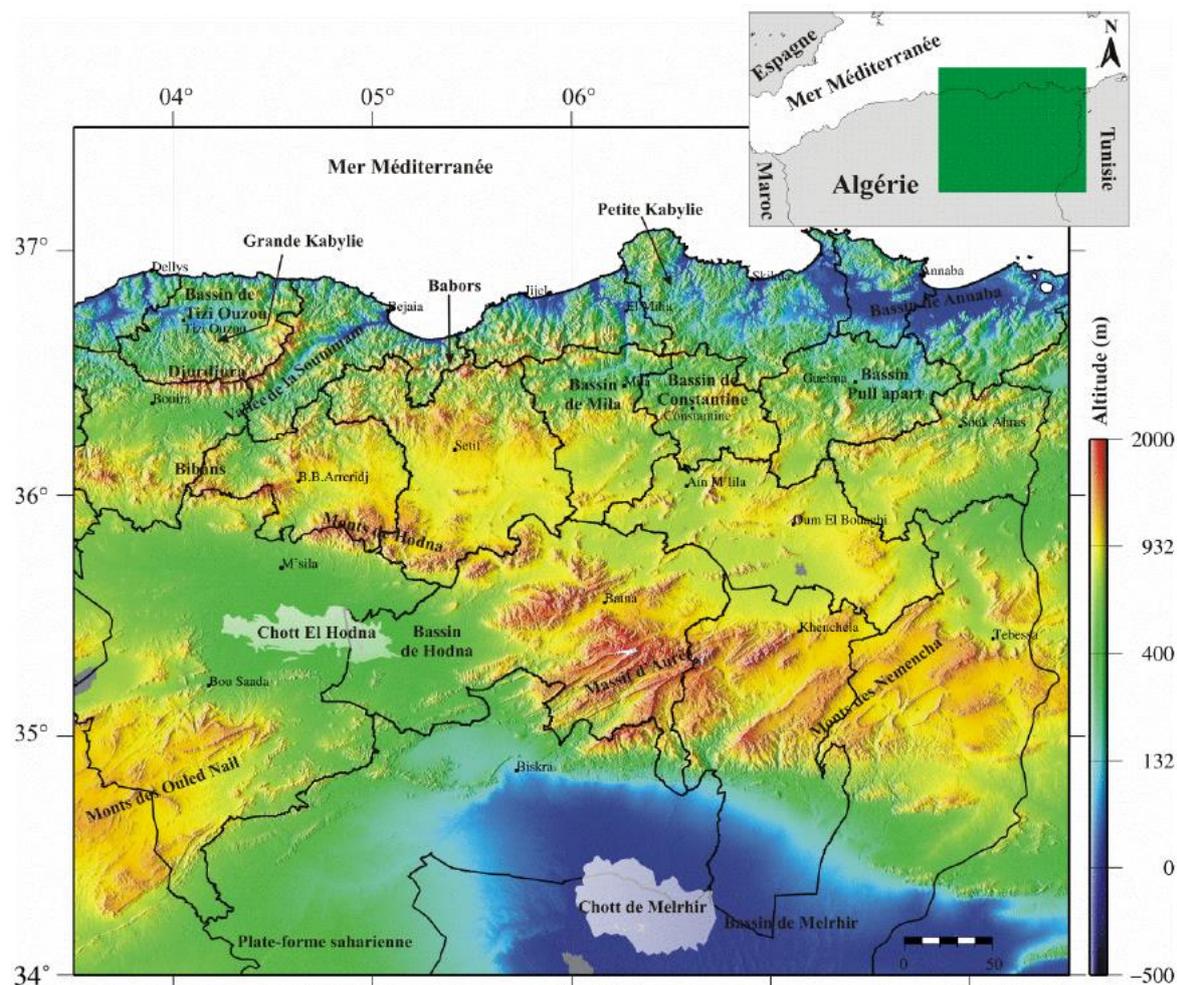


Figure IV. 2: Carte topographique montrant les différents reliefs de la région Est Algérienne. Les traits noirs représentent les limites administratives de chaque Wilaya.

#### IV.4. LE CLIMAT

La zone d'étude connaît un climat très varié selon un axe Nord-Sud :

- Un climat type méditerranéen qui caractérise le Tell ;
- Un climat semi-aride domine les hauts plateaux. Il est plus froid et neigeux pendant l'hiver et plus chaud et sec pendant l'été.

Les régimes de pluies sont très irréguliers d'une région à l'autre, notamment entre le Nord et les hauts plateaux. Les précipitations en Algérie augmentent d'Ouest en Est et diminuent du Nord au Sud. L'irrégularité des régimes de pluies est très prononcée à l'échelle saisonnière.

Les quantités de pluies les plus importantes tombent entre le mois de Novembre et Février, alors que la saison d'été est la plus sèche. L'irrégularité est aussi bien marquée d'une année à l'autre.

Les températures moyennes annuelles et mensuelles réagissent directement en interaction avec les autres facteurs météorologiques (insolation, déficit hygrométrique, pression barométrique, etc.). L'influence de la mer, comme facteur attiédissant en hiver et rafraichissant en été, est assez marquée sur les régions du littoral. De même, les contrastes saisonniers sont bien marqués entre l'hiver et l'été.

Les minimas thermiques sont généralement atteints au mois de Janvier alors que les maximas sont atteints en Juillet et Août.

Le Sirocco est un vent violent venant du Sud. Le plus souvent, il est chargé de particules de sables extrêmement ténues. Il se produit en toute saison, mais il est beaucoup plus fréquent pendant le printemps, l'été et l'automne que pendant l'hiver.

#### **IV.5. LA VEGETATION FORESTIERE**

La végétation Algérienne est fortement diversifiée. Cela est dû aux grands ensembles topographiques, climatiques et la diversité des sols variant du Nord au Sud. Le relief et la pluviométrie agissent comme des facteurs déterminants de la distribution de la végétation dans L'Est Algérien.

La forêt Algérienne est irrégulière, avec des peuplements feuillus ou résineux le plus souvent ouverts formés d'arbres de toutes tailles et de tousâges en mélange parfois désordonné.

La présence d'un épais sous-bois composé d'un grand nombre d'espèces secondaires limitant la visibilité et l'accessibilité et favorisant la propagation des feux (Ouedraogo 2001).

Malgré sa faible extension en termes de surface et sa discontinuité le couvert forestier en Algérie orientale s'étend depuis les forêts des montagnes méditerranéennes, surplombant la mer jusqu'aux forêts subalpines des montagnes de l'atlas saharien (Mate 2003).

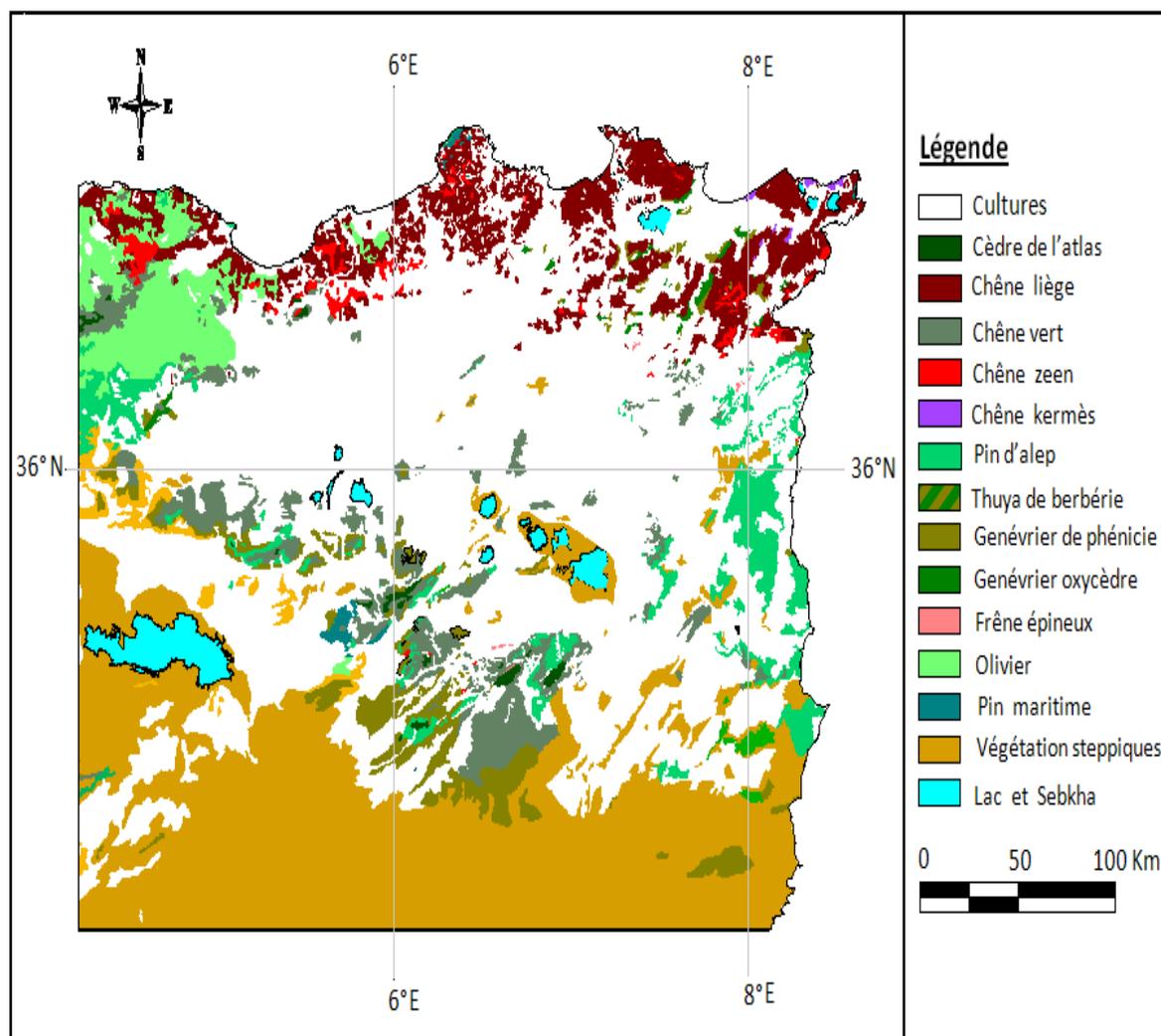


Figure IV. 3 : La répartition des principales espèces forestières à l'Est Algérien (DGF modifier).

#### IV.6. LES SOLS

La répartition des sols présente une zonation qui reflète celle du climat. Cependant, elle est largement modifiée par l'influence de la nature des roches mères, du relief, de l'eau, de la végétation, ainsi que des facteurs biotiques et anthropogènes (Figure IV.4).

On rencontre différents types de sols :

Sols bruns lessivés et sols bruns calcaires dans les bioclimats humides et sub-humides (Luvisols, Calcisols) ;

Sols châtaîns et bruns iso humiques, souvent avec des accumulations calcaires en profondeur, dans les bioclimats semi-arides et arides (Kastanozems, Calcisols) ;

Sols gris subdésertiques, minéraux bruts d'érosion ou d'apport, ainsi que des sols salinaux bioclimats arides et désertiques (Regosols, Solonchaks) (fao 2005). (Chabane 2012)

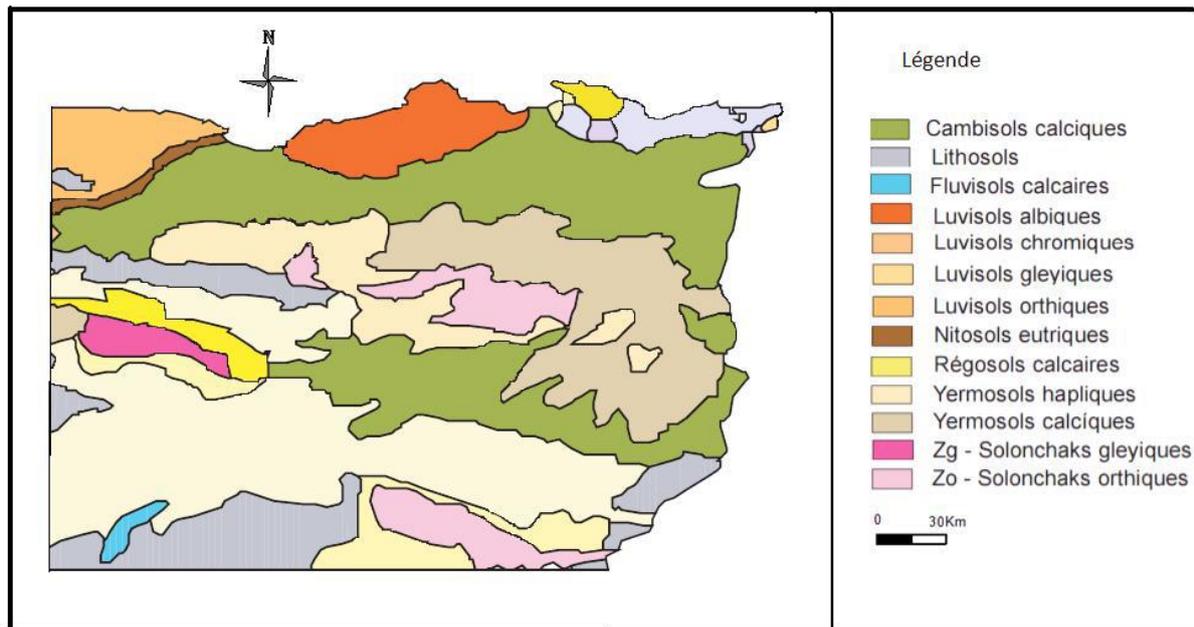


Figure IV. 4: Carte des sols de la région d'étude (source [fao 2005] modifier)

#### IV.7. CADRE GEOLOGIQUE

Du point de vue géologique, notre zone d'étude correspond à la partie Est de la zone tellienne et atlasique. A l'instar de l'Algérie septentrionale, l'Est est constitué de reliefs jeunes, modelés au cours du tertiaire par les mouvements alpins (figure IV.5).

L'Algérie alpine est composée des ensembles structuro-sédimentaires suivants, du Nord au Sud:

- Le plateau continental Algérien réduit, à dépôts tertiaires et quaternaires (1000 à 3500 m), repose sur un socle métamorphique.
- L'Atlas Tellien est le domaine des nappes, avec des bassins de type intra-montagneux dont la série sédimentaire s'étend du Jurassique au Miocène.

- Le Hodna est un bassin d'avant-fosse dont la séquence de remplissage débute par des dépôts continentaux d'âge Eocène et Oligocène et se poursuit par un Miocène marin.
- Les hauts plateaux, avant-pays alpin, à couverture sédimentaire réduite, où les processus locaux de distension ont permis la formation des bassins intra-montagneux comme ceux de Telagh et de Tiaret.
- L'Atlas saharien est né d'un long sillon subsident pincé entre les hauts plateaux et la plateforme saharienne. Au Mésozoïque, ce sillon fut comblé par une puissante série sédimentaire (7000 à 9000 m), durant le tertiaire, une tectonique compressive réactive les structures extensives antérieures en failles et structures inverses aboutissant à la formation de cette chaîne montagneuse.
- Les bassins du Chott Melrhir dans le Sud-Est constantinois, structurés au tertiaire, à remplissage créacé (5000 m), ont engendrés et accumulés des hydrocarbures principalement dans le créacé (Djbel Onk,) (Askri 1995).

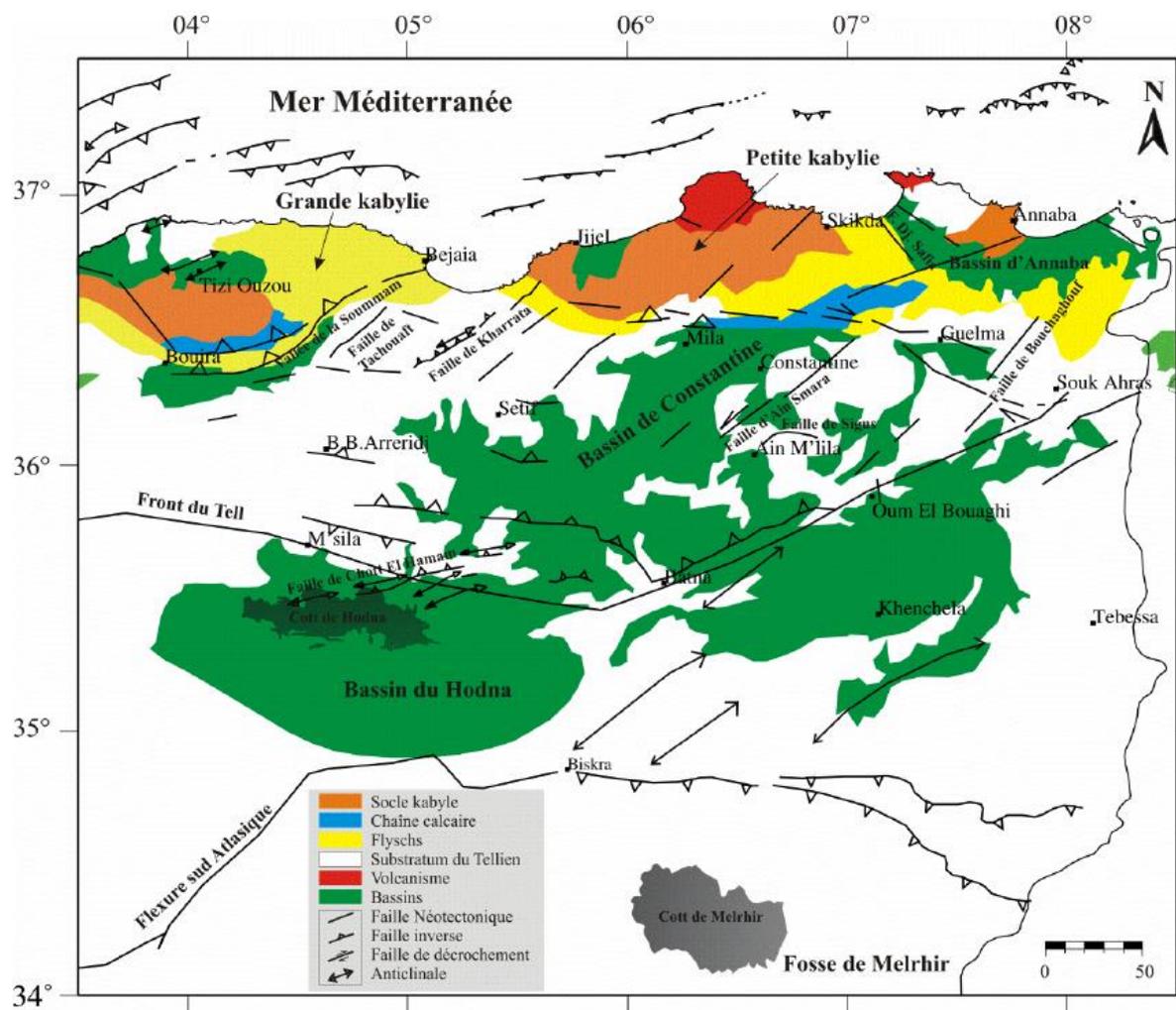


Figure IV. 5 : Carte géologique de la région Nord-Est de l'Algérie) Meghraoui, 0988, modifié). Les structures actives sont inspirées selon (Vila, 1977, Meghraoui, 1988 ; Harbiet al. 2003 et Domzig, 2006).

#### IV.8. L'HYDROGRAPHIE

L'Est Algérien couvre la région Constantinois- Seybouse- Mellegue (bassins hydrographiques 03,07,10,14 et 12), le bassin hydrographique 05 de Algérois-Soummam-Hodna et le bassin du Chott Melrhir 06 du flanc Sud de l'Atlas.

Le bassin versant est défini comme une unité topographique et hydrologique dans laquelle se produit des entrées d'eau (sous forme de précipitation, et les apports souterrains issus d'autres bassins) où l'écoulement s'effectue suivant un système de pente et de drains naturels, en direction de l'exutoire ou de l'embouchure du cours d'eau collecteur.

De par la nature et le sens d'écoulement des Oueds, l'Est Algérien juxtapose deux grands types de bassin hydrographiques (Figure IV.6) :

- Au Nord, des bassins à écoulement exoréique (les oueds se jettent dans la mer Méditerranée, à régime quasiment pérenne : Oued Rhumel -El-kebir Beni Haroun, oued Safsaf à Zardezas et oued Seybouse au Nador), et plus à l'Ouest l'oued Djendjen et l'oued Soummam.

Des cours d'eau secondaire qui naissent sur le versant Nord du tell sont à signaler (Oued Guebli, Oued Bougues).

- Au Sud des bassins à écoulement endoréique (les Oueds se jettent dans des dépressions intérieures fermées), à régime temporaire : Oued El arabe, Oued El Abiod et Oued Abdi, qui traversent le massif des Aurès du Nord est vers le Sud-Ouest et s'éteignent tous dans les chotts. A l'instar des autres régions du pays, l'Algérie orientale connaît au cours de ces dernières décennies une dynamique hydraulique saisissante qui se traduit par une mobilisation accrue des eaux de surface.

L'application d'un vaste programme de construction de barrages réservoirs est menée dans le but de rattraper l'énorme retard hydraulique accumulé par cette région d'Algérie, pourtant la mieux nantie du point de vue hydrologique (40 % du potentiel en eau de surface du territoire). Les eaux de surface sont aujourd'hui fortement sollicitées par l'aménagement. En Algérie orientale, un volume annuel de plus de deux milliards de mètres cubes devrait être régularisé par les barrages-réservoirs, à l'horizon 2020.

Les barrages hydrauliques ont un rôle structurant de l'espace indéniable mais sont aux prises à des contraintes diverses, liées à la gestion des infrastructures de la ressource, à la planification des utilisations de l'eau, en plus de la menace de la pollution et de l'épineux problème de l'envasement.

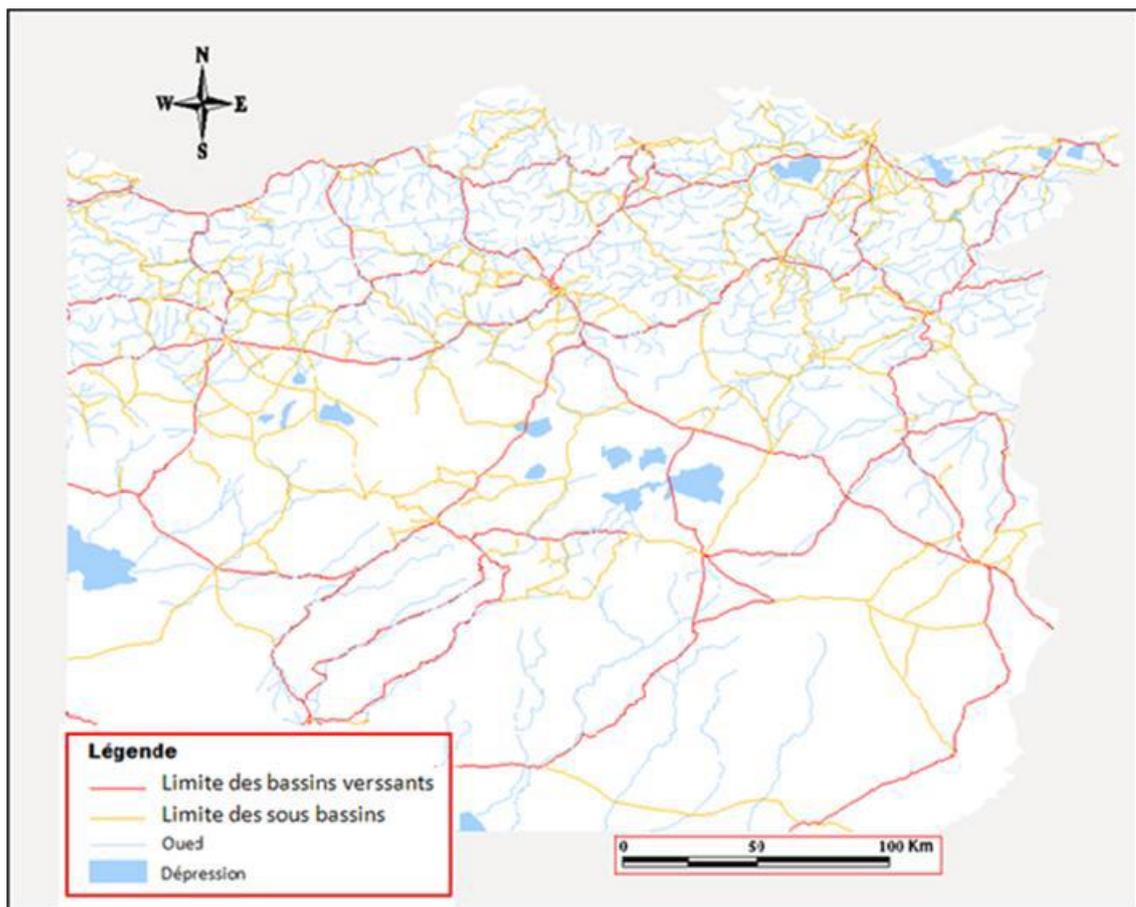


Figure IV. 6 : Le réseau hydrographique de l'Est Algérien

Un développement particulier est consacré à l'étude de ces ouvrages hydrauliques : inventaire et examen de la qualité des eaux brutes emmagasinées des barrages en remblai, la quantification des fuites sur trois exemples d'aménagement, enfin l'aptitude de l'eau mobilisée et, en particulier, ceux de fuite et le transfert de polluant d'amont en aval des ouvrages hydraulique étudiés. Pour la qualité des eaux amont nous avons abordés les **18** barrages en remblais de l'Est Algérien suivi par ANRH (Figure IV.7). Trois exemples d'aménagement hydraulique sont ensuite abordés pour la qualité des eaux d'amont en aval et le transfert de polluants :

- le barrage de Hammam Debagh sur l'Oued Bouhamdane, destiné principalement à l'irrigation (périmètre de Guelma-Boucheougouf : 13 000 ha) et à l'alimentation en eau potable et industrielle de la région de Guelma ;
- le barrage de Zit Emba sur l'Oued Hammam, affluent du Kébir Ouest. L'eau du barrage est destinée au périmètre d'irrigation, prévu sur la plaine alluviale (7 000 ha) mais le projet hydro-

agricole a accusé plusieurs années de retard (étude et réalisation). Suite à la sécheresse de 2002, un projet d'A.E.P. de la ville de Skikda à partir de ce barrage a été mis en œuvre ;

- sur la haute vallée de Medjerda est implanté le barrage d'Ain Dalia, au Sud-Ouest de la ville de Souk Ahras. Il est venu renforcer l'alimentation en eau de la ville de Souk Ahras, et plus tard approvisionner des villes « assoiffées » situées plus au Sud (El Aouinet, Sedrata, Ain Beida, Ain Babouche, Oum El Bouaghi...).

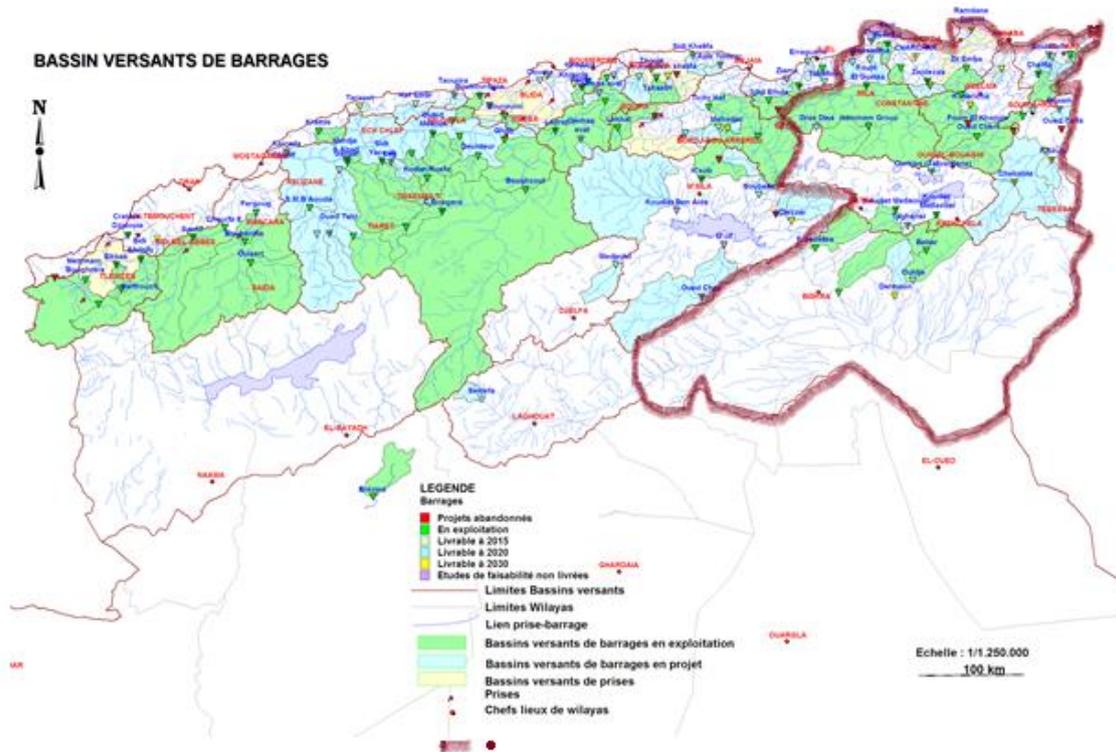


Figure IV. 7 : Localisation des sites des barrages en Algérie

Le tableau IV.1 résume les différents barrages en remblai étudiés dans cette thèse.

Tableau IV: 1 : Barrages en exploitation et en construction dans l'Est Algérien

Barrages	Wilaya	Oued	Année de mise en eau	Capacité en Hm <sup>3</sup>	Volume régularisé en Hm <sup>3</sup> /an	Destination
Cheffia	El Tarf	Bouamoussa	1965	171	95	AEP, IRR,
Guénitra	Skikda	Fessa	1984	125	48	AEI, IRR
Beni Zid	Skikda	Beni Zid	1993	40	20	AEP, IRR
Mexa	El Tarf	Kebir Est	1999	51	61	AEP
Zit Emba	Skikda	El Hammam	2001	120	43.2	IRR
El Agrem	Jijel	El Agrem	2002	41	21	AEP, IRR
Babar	Khenchla	El Arab	1995	41	12	IRR
Fontaine des	Biskra	El Hai	2000	57.70	13	IRR
Foum El Gueiss	Khenchla	El Gueiss	1939	3	3.2	IRR
Koudiat	Batna	Chemora	2003	62	62	AEP, IRR
Ain Dalia	Souk	Medjerda	1987	82	45	AEP, AEI
Hammam	Guelma	Bouhamdane	1987	220	55	AEP, IRR
Ain Zada	Bordj Bou	Boussellam	1986	125	50	AEP, IRR
Bougous	El Tarf	Bougous	2009	69.50	60	AEP, IRR
Kissir	Jijel	Kissir		68	48	AEP, IRR,

#### IV.9. CONCLUSION

La zone d'étude concerne le Nord Est de l'Algérie qui se trouve limitée par les parallèles 37° et 33° de latitude Nord, par les longitudes 9° Est et 5° Ouest. La surface totale de cette zone est d'environ 89 616 Km<sup>2</sup> et regroupe 13 wilayas. Le climat est de type méditerranéen avec un hiver relativement doux et pluvieux et un été chaud et sec. Les précipitations moyennes varient selon un gradient Est-Ouest et Nord Sud. Les températures varient considérablement en passant

du littoral aux hauts plateaux, les minimas sont enregistrés en Janvier et les maximas en Juillet et Aout.

L'infra structure hydraulique regroupe dix-huit (18) barrages en remblai dont la qualité des eaux brutes est suivi par l'agence nationale des ressource hydrographique ANRH Constantine répartie sur l'ensemble de la zone d'étude sur la période 2010-2015 et pour l'étude de la qualité aval des barrages et le transfert de polluant nous avons étudié les trois barrages Zit Emba, Hammam Debagh et Ain Dalia pour l'année 2016/2017.

## **BIBLIOGRAPHIE**

---

Askri H. (1995). Géologie de l'Algérie «Contribution de SONATRACH Division Exploration. *Centre de Recherche et Développement et Division Petroleum Engineering et Développement.*

Chabane M. (2012). Comment concilier changement climatique et développement agricole en Algérie? *Territoire en mouvement Revue de géographie et aménagement. Territory in movement Journal of geography and planning*(14-15), 73-91.

Ouedraogo K. (2001). L'étude prospective du secteur forestier en Afrique. *Forestry Outlook Study for Africa, FAO, Rome, Italy.*

*CHAPITRE V:*

*QUALITE DES EAUX*

*SUPERFICIELLES*

*(CUVETTES DES BARRAGES)*

## V.1. INTRODUCTION

L'eau douce est une ressource indispensable à la vie, elle mérite une attention toute particulière, étant donné qu'elle peut être très altérée et sérieusement menacée par l'activité humaine. En effet, la croissance démographique accompagnée d'une urbanisation rapide cause de nombreuses perturbations pour les milieux naturels (Mc Kinney 2002). L'industrialisation, l'utilisation non rationnelle des engrais et des pesticides et le manque de sensibilisation de la population envers la protection de l'environnement, conduisent au déséquilibre de l'écosystème et génèrent des éléments polluants qui peuvent affecter la qualité physico-chimique et biologique des milieux aquatiques récepteurs (Mulliss *et al.* 1997). Ces actions conduisent également à l'altération de l'usage de l'eau (captage de l'eau, baignade, etc.) (Burton Jr & Pitt 2001).

En effet, les rejets liquides d'origines domestiques et industrielles générés par les villes limitrophes sont déversés directement dans les Oueds d'une façon précaire et sans traitement préalable dans la plupart des cas, ce qui peut être une source importante de contamination de l'écosystème aquatique.

La connaissance des caractéristiques physico-chimiques des eaux de surface constitue un moyen d'investigation parmi d'autres pour l'évaluation des risques de pollution et l'état de contamination de ces eaux. Une eau possède un patrimoine géochimique d'origine naturelle qui évolue en fonction de la nature géologique des terrains traversés. Le degré de pollution est apprécié par la mesure de l'écart ou de la différence entre le chimisme naturel de l'eau qu'il soit à l'échelle locale ou régionale et un chimisme nouvellement acquis suite à l'intervention négative de l'homme sur l'environnement hydrologique (Belkhiri 2011). Il est parfois difficile d'apprécier le degré de pollution à l'échelle d'une région qui fait l'objet de plusieurs exploitations agricoles et de développement industriel. Quant à la qualité de l'eau elle est comparée aux normes de qualité fixées par les exigences de l'OMS (WHO 2011) et les normes nationales (JORA 2011).

## V.2. ACQUISITION DES DONNEES

Un réseau de dix-huit barrages a été retenu pour permettre d'acquérir des données représentatives sur la variabilité spatiale et temporelle de la qualité des eaux de surface du Nord

Est Algérien. Pour cela, nous avons utilisé les données des analyses chimiques réalisées par l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) de Constantine.

Les éléments et les paramètres mesurés et déterminés par l'ANRH sont le pH, le résidu sec, les nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ), les nitrites ( $\text{NO}_2^-$ ), l'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ), le phosphate ( $\text{PO}_4$ ), la demande biologique en oxygène en cinq jours ( $\text{DBO}_5$ ), la demande chimique en oxygène (DCO), l'oxygène dissous ( $\text{O}_2\text{dis}$ ) et la matière organique.

Les données de l'ANRH, ont été obtenues à partir d'échantillons prélevés lors d'un pas de temps mensuel :

1. Entre janvier 2010 et décembre 2015 pour onze barrages (Ain Zada, Guénitra, Ain Dalia, Cheffia, Hammam Debagh, Mexa, Al Agrem, Beni Zid, Zit Emba, Koudiat Mdouar, Oued Athmania). Il s'agit d'une série de 57 valeurs ce qui permet de remarquer l'absence de quelques mois au cours de la période d'échantillonnage pour des raisons inconnues.
2. Entre novembre 2010 et décembre 2015 pour le barrage de Kissir ce qui fait une série de 49 valeurs ;
3. Entre Septembre 2013 et décembre 2015 pour les six barrages restant du réseau (Babar, Boussiaba, Foum El Gueis, Oued Charef, Fontaine des Gazelles, Bougous) avec 22 valeurs.

Ce réseau a fait l'objet d'une étude approfondie et dont les résultats nous ont permis d'aborder:

- Le problème de la qualité physico-chimique des eaux de surface de l'Est Algérien.
- De faire des traitements statistiques afin de déterminer la qualité de ces eaux.

### **V.3. ANALYSE DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES**

#### **V.3.1. Statistiques descriptives**

La statistique a pour but de mesurer et de présenter les données observées d'une manière telle qu'on puisse en prendre connaissance aisément, par exemple sous forme de tableaux ou de graphiques.

Concernant le présent travail, le tableau des données est formé par 2 colonnes (éléments physicochimique ou variables) et de lignes (analyses chimiques mensuelles) qu'il faut

synthétiser et tirer le maximum d'information. A cet effet, il est important de tester l'homogénéité des données à l'aide :

1. La valeur maximale qui est la valeur la plus élevée de la série et qui correspond à la borne supérieure de la série ;
2. La valeur moyenne qui est égale à la somme des valeurs divisée par leur nombre ;
3. La médiane qui est la valeur de la variable qui correspond à la fréquence cumulée 50% ou à l'effectif cumulé  $n/2$  ;
4. La valeur minimale qui est la valeur la plus faible de la série et qui constitue la borne inférieure de la série ;
5. L'écart type qui représente la caractéristique de dispersion la plus usuelle ;
6. Le coefficient d'aplatissement (kurtosis) correspond à la mesure de l'étalement de la distribution. La forme de la courbe de distribution est comparée à celle de la loi normale. Un coefficient négatif est révélateur d'une courbe aplatie alors qu'un coefficient positif signifie une concentration des observations ;
7. Le coefficient de symétrie ou de dissymétrie (skewness) correspond à une mesure de l'asymétrie de la distribution d'une variable aléatoire réelle.

Tous les calculs ont été réalisés par le biais du logiciel STATISTICA 8.

Le Tableau V. 1 montre la variabilité et l'ordre de grandeur du pH et les autres paramètres physico-chimiques des eaux superficielles analysées et pour les dix-huit barrages de l'Est Algérien voir annexe 1.

Tableau V. 1: Caractéristiques statistiques élémentaires du pH des eaux de barrages de l’Est Algérien pour la période 2010-2015  
(pH sans dimension).

pH	Ain Zada	Guénitra	Ain dalia	Cheffia	H- Debagh	Mexa	Al Agrem	Beni Zid	Zit Emba	Koudiat Mdouar	Oued Athmania	Kissir	Babar	Boussiaba	FoumEl Gueis	O- Charef	F- Gazelles	Bougous	OMS	ALG
<b>Min</b>	6,97	7,38	7,07	6,65	6,92	7,16	7,27	6,88	7,24	7,20	6,00	7,11	7,17	7,27	7,325	7,64	7,08	7,19	6.5 - 8.5	6.5 - 8.5
<b>Max</b>	8,46	11,00	8,00	14,00	10,00	12,00	13,00	9,00	12,00	9,00	8,11	11,0	8,08	8,06	7,85	8,01	8,01	7,77		
<b>1<sup>er</sup> Quart</b>	7,38	7,66	7,630	7,57	7,68	7,53	7,61	7,26	7,69	7,66	7,62	7,45	7,71	7,53	7,47	7,78	7,54	7,32		
<b>Médiane</b>	7,63	7,79	7,740	7,74	7,82	7,63	7,70	7,36	7,76	7,79	7,82	7,58	7,79	7,64	7,5	7,92	7,65	7,41		
<b>3<sup>ème</sup> Quart</b>	7,91	7,97	7,860	7,86	7,97	7,76	7,87	7,55	7,91	7,87	7,94	7,81	7,88	7,81	7,62	7,95	7,75	7,53		
<b>Moy</b>	7,63	7,86	7,730	7,81	7,86	7,78	7,83	7,43	7,85	7,77	7,74	7,69	7,77	7,67	7,54	7,87	7,63	7,43		
<b>C V</b>	0,05	0,06	0,022	0,11	0,05	0,08	0,09	0,04	0,07	0,03	0,04	0,07	0,03	0,02	0,02	0,01	0,03	0,02		
<b>Skew</b>	0,21	5,37	-1,07	6,27	3,15	6,26	6,31	2,17	6,27	2,14	-2,66	4,92	-1,15	0,37	0,13	-0,72	-0,55	0,63		
<b>Kurt</b>	-0,58	37,09	2,487	46,39	19,65	45,84	46,18	8,98	46,08	12,56	11,34	31,46	2,56	0,13	0,24	-0,83	1,03	-0,27		
<b>Ecart-type</b>	0,05	0,06	0,023	0,12	0,05	0,08	0,09	0,04	0,07	0,03	0,05	0,08	0,04	0,04	0,03	0,03	0,05	0,03		

La médiane et la moyenne mesurent toutes les deux la tendance centrale. Les valeurs inhabituelles, appelées valeurs aberrantes, peuvent avoir davantage d'impact sur la moyenne que sur la médiane. Si les données sont symétriques, la moyenne et la médiane sont similaires. Dans notre cas la comparaison de la moyenne avec la médiane, montre que les valeurs de ces deux caractéristiques statistiques sont très proches pour tous les paramètres et les barrages, à l'exception de  $\text{NO}_2$  et  $\text{NH}_4$  pour le barrage de Ain Zada et le volume du barrage Ain Dalia. Ceci montre que les valeurs de ces paramètres ne sont pas homogènes.

Les valeurs de Kurt et Skew, ces deux paramètres sont l'indice d'une action anthropique sur les eaux de surface. L'examen des valeurs de Kurt et de Skew de l'ensemble des données, montre que les valeurs de ces caractéristiques statistiques, sont comprises entre -2 et +2 pour MO de tous les barrages et quelques barrages selon différents paramètres. Des valeurs supérieures à 2 pour les autres éléments et barrages. Ceci est expliqué par les séries des valeurs de ces paramètres se répartissent selon des courbes aplaties et présentant une dissymétrie vers la droite. L'écart type est la mesure la plus courante de la dispersion ou de la répartition des données sur la moyenne. Utilisez l'écart type pour déterminer la dispersion des données par rapport à la moyenne. Une valeur d'écart type élevée indique que les données sont dispersées. D'une manière générale. L'écart type de la série n'est pas élevé pour tous les paramètres.

### **V.3.2. Chimie générale des eaux**

La boîte à moustaches une traduction de Box & Whiskers Plot, est une invention de TUKEY (1977)(Le Guen 2001) pour représenter schématiquement une distribution. Cette représentation graphique peut être un moyen pour approcher les concepts abstraits de la statistique.

Une boîte à moustaches fournit un récapitulatif graphique de la loi de distribution d'un échantillon. La boîte à moustaches indique la forme, la tendance centrale et la variabilité des données. Les boîtes à moustaches sont plus adaptées lorsque l'effectif d'échantillon est supérieur à 20.

Le terme spécifique Box & Whiskers Plot et le terme générique Box Plot recouvrent une grande variété de diagrammes en forme de boîtes qui se différencient par leur construction, leurs interprétations, et leurs usages. E. HORBER qui a effectué des recherches bibliographiques sur ce thème a repéré une soixantaine de formes et de constructions différentes.

Les parcelles de la boîte sont construites pour représenter schématiquement la répartition des variables les plus significatives de la qualité des eaux superficielles, pour les dix-huit barrages. Plus le corps de la boîte est petit les valeurs sont plus uniformes et plus le corps de la boîte est grand plus les valeurs sont hétérogènes ou dispersées. Plus les moustaches sont longues, plus les valeurs sont dispersées, plus les moustaches sont courtes plus les valeurs sont moins dispersées et plus les axes sont orientés de la gauche vers la droite, plus la boîte est orientée à gauche, plus les valeurs sont faibles, plus la boîte est à droite plus les valeurs sont élevées, quand la forme de la boîte est symétrique cela veut dire que plusieurs valeurs sont bien réparties, moins la forme de la boîte est symétrique, plus les valeurs sont inégalement réparties.

#### **V.3.2.1. Potentiel hydrogène**

Le pH est une mesure de l'acidité de l'eau c'est-à-dire de la concentration en ions d'hydrogène ( $H^+$ ). L'échelle des pH s'étend en pratique de 0 (très acide) à 14 (très alcalin) ; la valeur médiane 7 correspond à une solution neutre à 25°C. Le pH d'une eau naturelle peut varier de 4 à 10 en fonction de la nature acide ou basique des terrains traversés. Des pH faibles (eaux acides) augmentent notamment le risque de présence de métaux sous une forme ionique plus toxique. Le corps de la boîte est petit (Figure V. 1), les axes sont orientés de la gauche vers la droite et les moustaches sont courtes donc les valeurs de pH sont plus uniformes, faibles pour les barrages Ain Zada, Ain Dalia, Babar, Boussiaba, Fom El Gueiss, Oued Charef, Fontaine des Gazelles et Bougous. Les valeurs du pH de ces barrages sont conformes aux normes de l'OMS. Elles sont comprises entre 6 et 9, ce sont donc des eaux légèrement alcalines. Hétérogènes ou dispersées les valeurs sont élevées pour le reste d'où les moustaches sont longues, la boîte est orientée à droite.

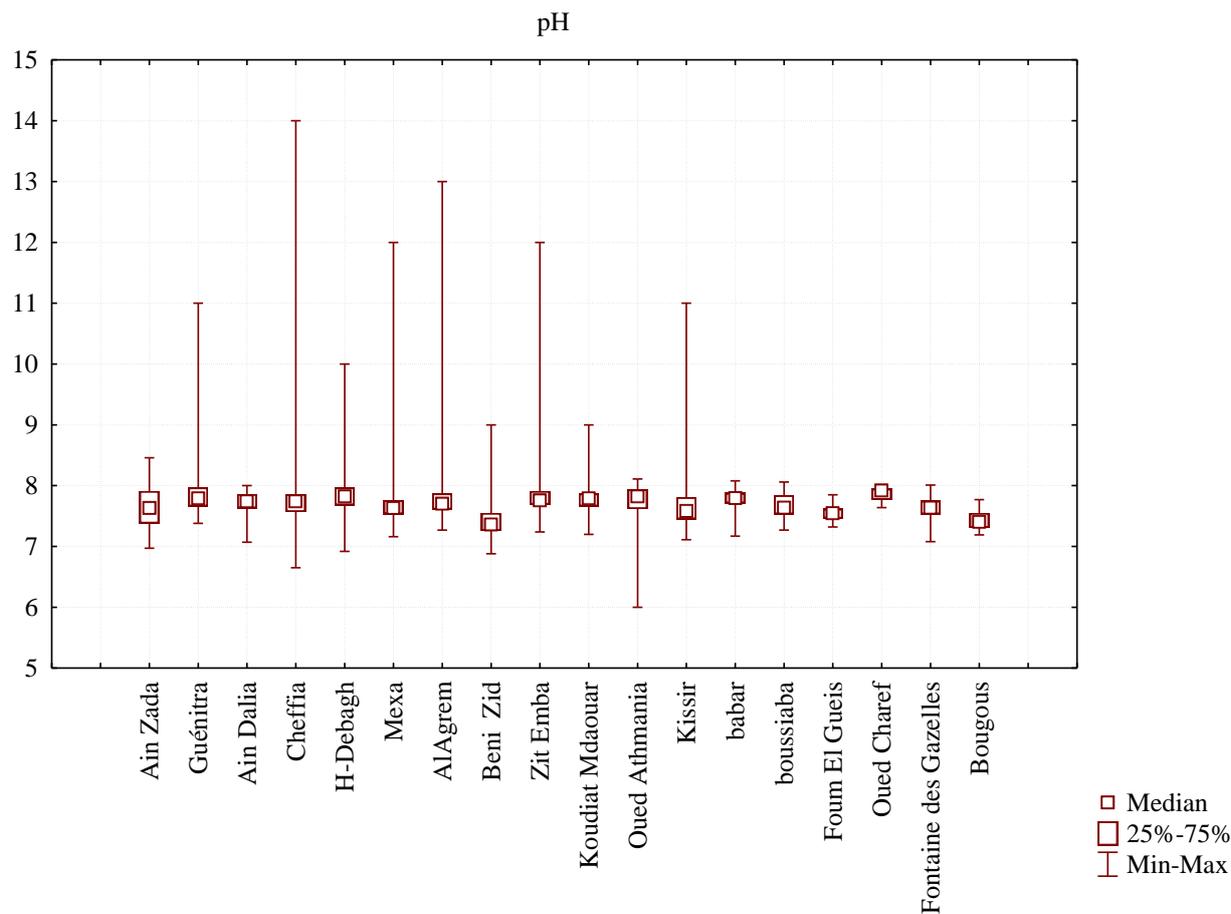


Figure V. 1: Variation de pH des eaux de surface du Nord Est Algérien.

Des pH élevés augmentent les concentrations d'ammoniac, toxique pour les poissons. On assiste à une décroissance de l'alcalinité en relation avec l'oxydation de la matière organique ou à l'augmentation de la pression du CO<sub>2</sub> qui conduit à une diminution du pH (Kempe 1982) cette augmentation est observée dans les eaux de barrages de la wilaya d'El Tarf et Skikda.

### V.3.2.2. Résidu sec RS

Résulte de l'évaporation simple de l'eau et de l'évaporation, en totalité ou en partie, de l'eau occluse et de l'eau de cristallisation des sels.

Le résidu sec pesé suite à l'évaporation de 100 ml d'eau non filtrée permet de déterminer les teneurs en matières dissoutes après soustraction des matières en suspension. Ces matières dissoutes représentent la majeure partie du résidu sec (Rodier *et al.* 2009).

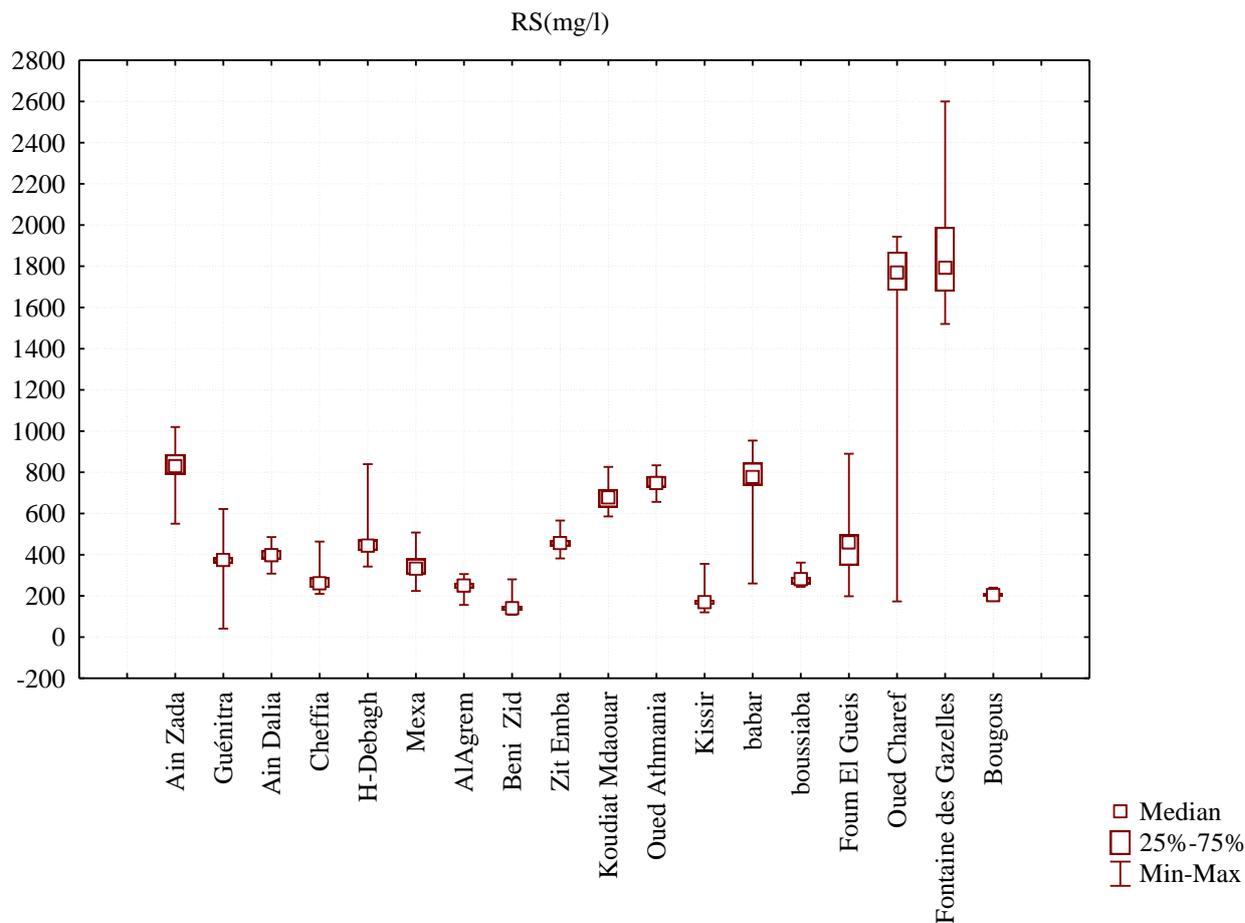


Figure V. 2 : Variation de RS des eaux de surface du Nord Est Algérien.

Les teneurs extrêmes sont 2600 mg/l (Figure V. 2) observé au barrage Fontaine des Gazelles. Le corps des boîtes est petit les valeurs sont plus uniformes pour la majorité des barrages. Le corps de la boîte plus grand et des valeurs hétérogènes ou dispersées sont observées pour les barrages Fontaine des Gazelles, Oued Charef et Foum El Gueiss. Donc la majorité des valeurs de RS sont bien réparties (une symétrie de la boîte).

Les eaux superficielles de l'Est Algérien sont :

- L'eau est "riche en minéraux" (calcium, magnésium et/ou sodium) avec un taux supérieur à 1500 mg/l pour les barrages Oued Charef et Fontaine des Gazelles ;
- L'eau est moyennement minéralisée des barrages Ain Zada, Hammam Debagh, Koudiat Mdaouar, Oued Athmania, Babar et Foum El Gueiss avec une valeur de RS comprise entre 500 et 1500 mg/l.

- Une eau faiblement minéralisée d'où le RS est inférieur à 500 mg / l des eaux de barrages Ain Dalia, Cheffia, Al Agrem, Beni Zid et Bougous ;
- L'absence d'une eau très faiblement minéralisée ou  $RS < 50$  mg/l.

### V.3.2.3. Oxygène dissous OD et % de saturation en oxygène

L'oxygène dissous dans les eaux de surface provient essentiellement de l'atmosphère et de l'activité photosynthétique des algues et des plantes aquatiques. La concentration en oxygène dissous varie de manière journalière et saisonnière car elle dépend de nombreux facteurs tels que la pression partielle en oxygène de l'atmosphère, la température de l'eau, la salinité, la pénétration de la lumière, l'agitation de l'eau et la disponibilité en nutriments. Cette concentration en oxygène dissous est également fonction de la vitesse d'appauvrissement du milieu en oxygène par l'activité des organismes aquatiques et les processus d'oxydation et de décomposition de la matière organique présente dans l'eau.

Globalement, plus la concentration en oxygène dissous (Rodier *et al.*) est proche de la saturation, plus l'aptitude de la rivière à absorber la pollution est grande :

- des teneurs supérieures à la teneur naturelle de saturation en oxygène indiquent une eutrophisation du milieu se traduisant par une activité photosynthétique intense (Les espèces de poissons sensibles peuvent être perturbées par une teneur en oxygène inférieure à 4 mg/l.

La concentration en oxygène dissous peut être exprimée en mg d'O<sub>2</sub> par litre ou en % de saturation en oxygène (Figure V. 3).

La distribution est plus allongée vers les valeurs élevées du O<sub>2</sub> dans le barrage de Zit Emba et vers les valeurs minimales dans les barrages Ain Zada et Kissir. L'écart interquartile est plus étalé pour les barrages Guénitra, Mexa, Al Agrem, Beni Zid, Oued Athmania, Fom El Gueiss, Fontaine des gazelles et Bougous que pour les barrages Cheffia, Koudiat Mdaouar, Babar et la distribution est plus dissymétrique.

Le taux de saturation en oxygène est majoritairement moyenne à bonne Ceci est en relation avec la grande surface du lac du barrage qui permet une meilleure oxygénation du milieu. Une oxygénation continue en liaison avec la grande dimension du lac et la forte précipitation de la région.

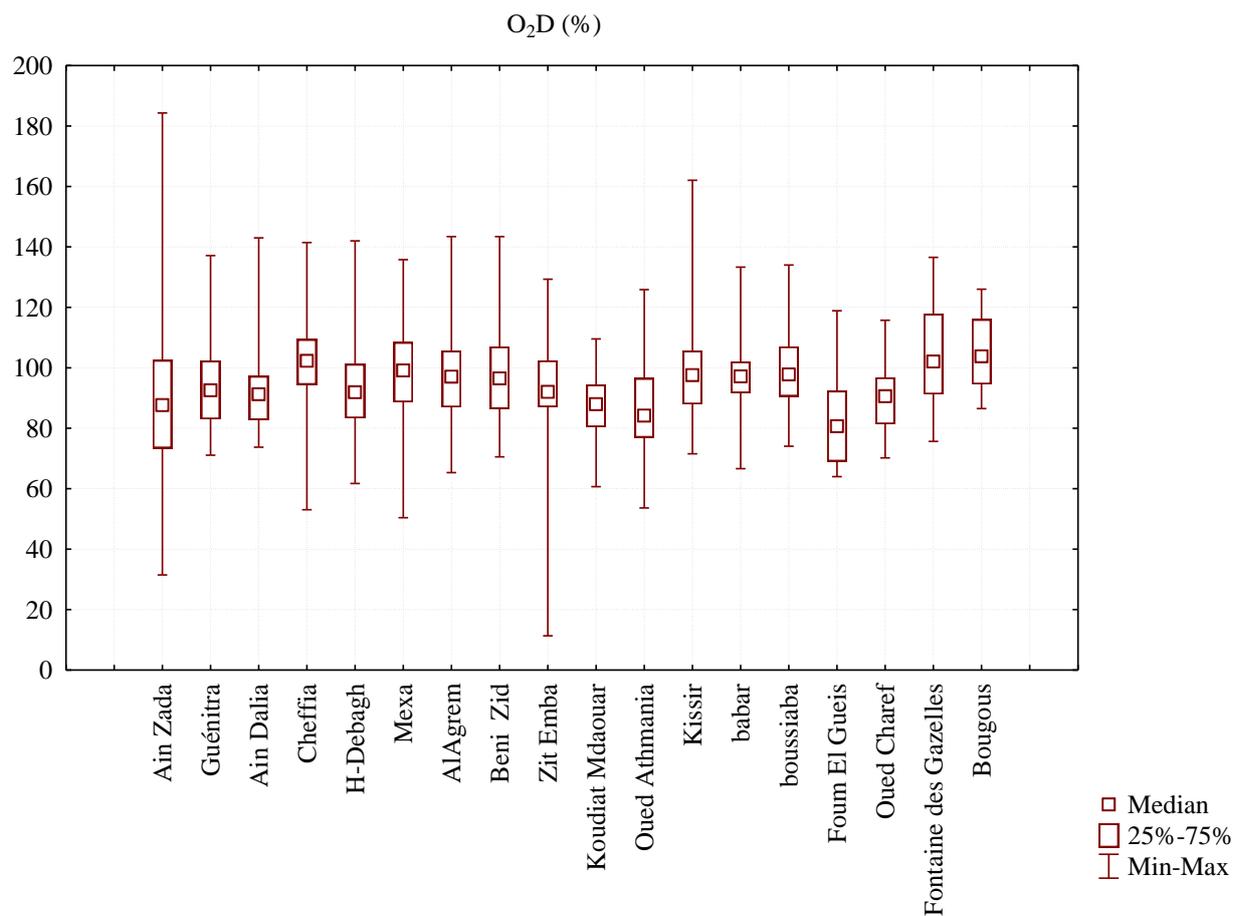


Figure V. 3 : Variation de O<sub>2</sub> des eaux de surface du Nord Est Algérien.

Les eaux de surface sont classées (Bliefert & Perraud 2007) avec des indicateurs en cinq classes :

- **1A** qualité d'eau normale ;
- **1B** : eau possédant des propriétés requises pour la vie et la reproduction des poissons, ainsi que pour la production d'eau destinée à l'alimentation humaine après traitement simple ou normal ;
- **2** : eau possédant des propriétés requises pour la vie piscicole mais où la reproduction des poissons est aléatoire, et permettant la production d'eau destinée à l'alimentation humaine après traitement poussé (affinage et stérilisation) ;
- **3** : eaux dans laquelle la vie piscicole est aléatoire et impropre à la production d'eau destinée à l'alimentation humaine ;
- **4** : dégradations du milieu, possibilité de mort biotique ou azoïque.

D'après les résultats moyennes des échantillons des eaux brutes des eaux superficielles de l'Est Algérien est considérées de moyenne à bonne classes 2 et 1B.

#### V.3.2.4. Nitrates ( $\text{NO}_3^-$ )

Ils représentent la forme la plus oxygénée de l'azote. C'est une forme très soluble. Sa présence est liée à l'utilisation intensive des engrais chimiques (Lhadi *et al.* 1996). Sous cette forme, l'azote est un sel nutritif utilisable par la majorité des végétaux. Les concentrations moyennes au niveau de l'oued sont inférieures à la norme des eaux de surface (Fryar *et al.* 2000). L'augmentation des nitrates est due à l'apport par les engrais et à la nitrification de l'ammonium qui a été accompagnée par une baisse de l'oxygène dissous de 32 % suite à la nitrification de l'ammonium.

La faible concentration de nitrates dans les eaux de surface est due à la réduction des bactéries (Martin, 1979).

Une dissymétrie est observée sur toutes les boîtes (Figure V. 4) ce qui explique la variation saisonnière des nitrates et l'apport des eaux de drainage. Les valeurs maximales sont observées au niveau des barrages de la wilaya d'El Tarf qui est à vocation agricole.

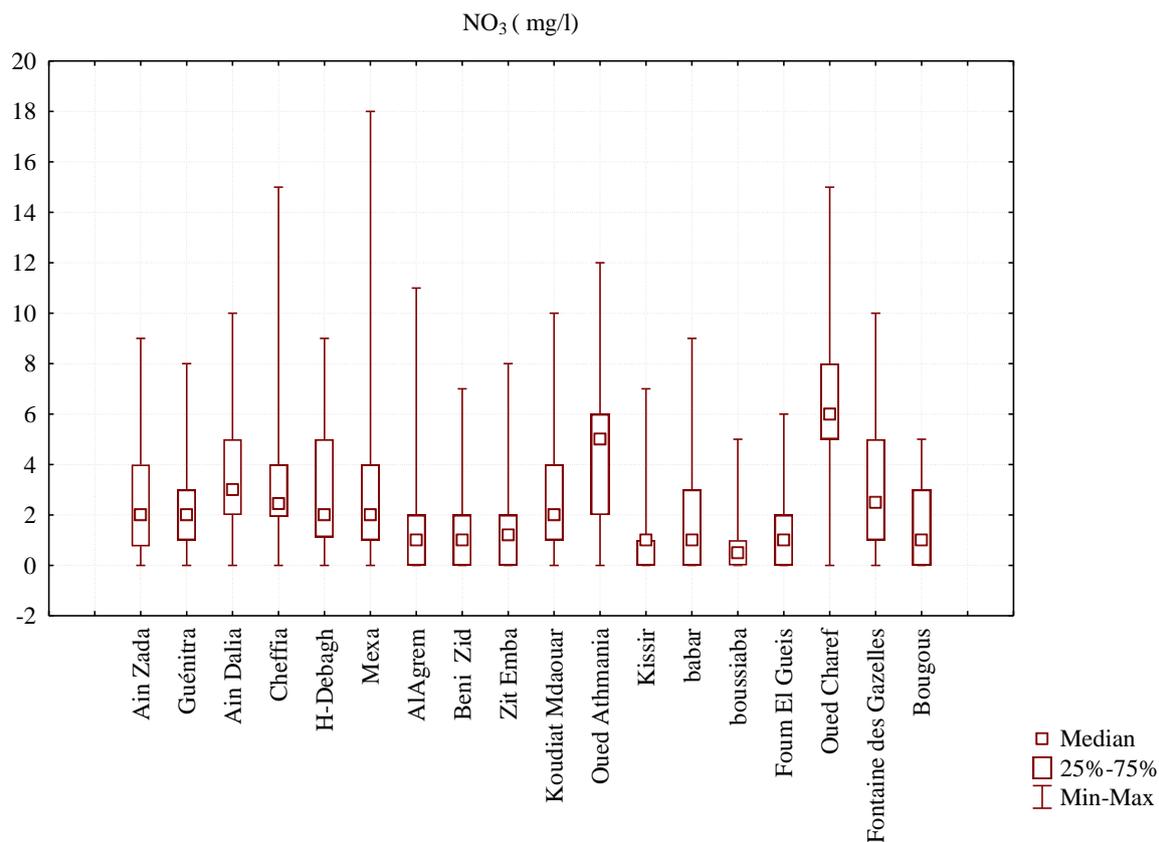


Figure V. 4: Variation de NO<sub>3</sub> des eaux de surface du Nord Est Algérien.

Le double mouvement d'augmentation des teneurs en nitrate et la diminution des teneurs en phosphore dans les eaux accroît des ratios N/P. L'augmentation des teneurs en nitrates, qui est en soi une dégradation. Une quantité abondante d'eaux usées introduite dans les eaux naturelles et une quantité d'oxygène insuffisante sont aussi des sources de substances nutritives pour les microorganismes.

### V.3.2.5. Les nitrites (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) ou azote nitreux

L'azote nitreux représente une forme moins oxygénée et moins stable représentant ainsi la forme du passage entre les nitrates et l'ammonium. Il s'agit d'une forme toxique (Debieche 2002). Les nitrites sont dus à l'effet de l'oxydation de la forme ammonium. Les concentrations moyennes en teneur de nitrite au niveau des eaux de surface (Figure V. 5) est inférieur à 1 pour tous les barrages traduisent une moyenne qualité. Quand barrages de Ain Zada et Kissir ou le max des nitrites dépasse le 3mg/l.

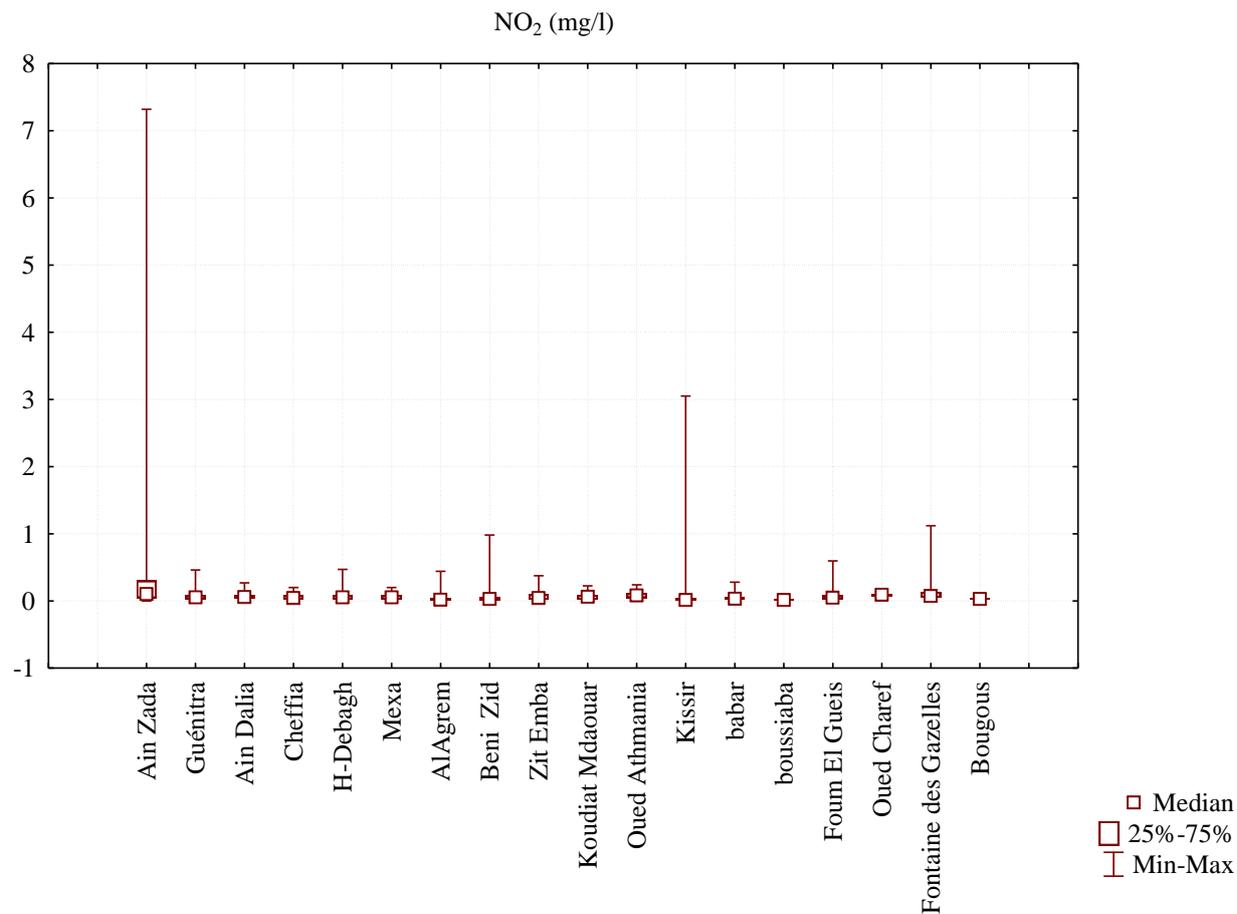


Figure V. 5: Variation de NO<sub>2</sub> des eaux de surface du Nord Est Algérien.

Il faut savoir également que les concentrations élevées en nitrites témoignent souvent de la présence de matières toxiques. Les nitrites sont surtout nuisibles pour les jeunes poissons. On considère que la situation est très critique à partir d'une concentration de plus de 3 mg NO<sub>2</sub>/l. On remarque que le milieu est réducteur d'où la présence des nitrites avec des fortes teneurs, qui disparaissent, par la suite, pour donner naissance aux nitrates sous l'effet de la nitrification. Cette situation a été observée au niveau des barrages Ain Zada et Kissir. Le déficit en oxygène paralyse les bactéries aérobies et active les bactéries anaérobies (en particulier les mauvaises bactéries, capables de transformer les nitrates en nitrites et en composés ammoniacaux).

L'absence des stations d'épuration des eaux usées le long des affluents qui alimentent le Barrage, se reflètent clairement sur la qualité de l'eau. Par conséquent, les niveaux élevés de nitrites dans l'eau potable peuvent causer des maladies graves.

### V.3.2.6. Ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)

L'ammonium est la forme d'azote la plus toxique. Sa présence dans l'eau est liée soit aux rejets urbains et industriels, soit à la réduction des formes azotées (nitrates et nitrites) en conditions réduites (Debieche 2002). A l'échelle saisonnière, la concentration en ammonium semble évoluer de la même manière que les nitrites et en sens inverse avec les nitrates (Figure V. 6). L'origine des nitrates dans les eaux superficielles, aurait pour origine d'une part les eaux usées domestiques, d'autre part les eaux d'irrigation ruisselées par épandage des engrais (Lacroix 1995).

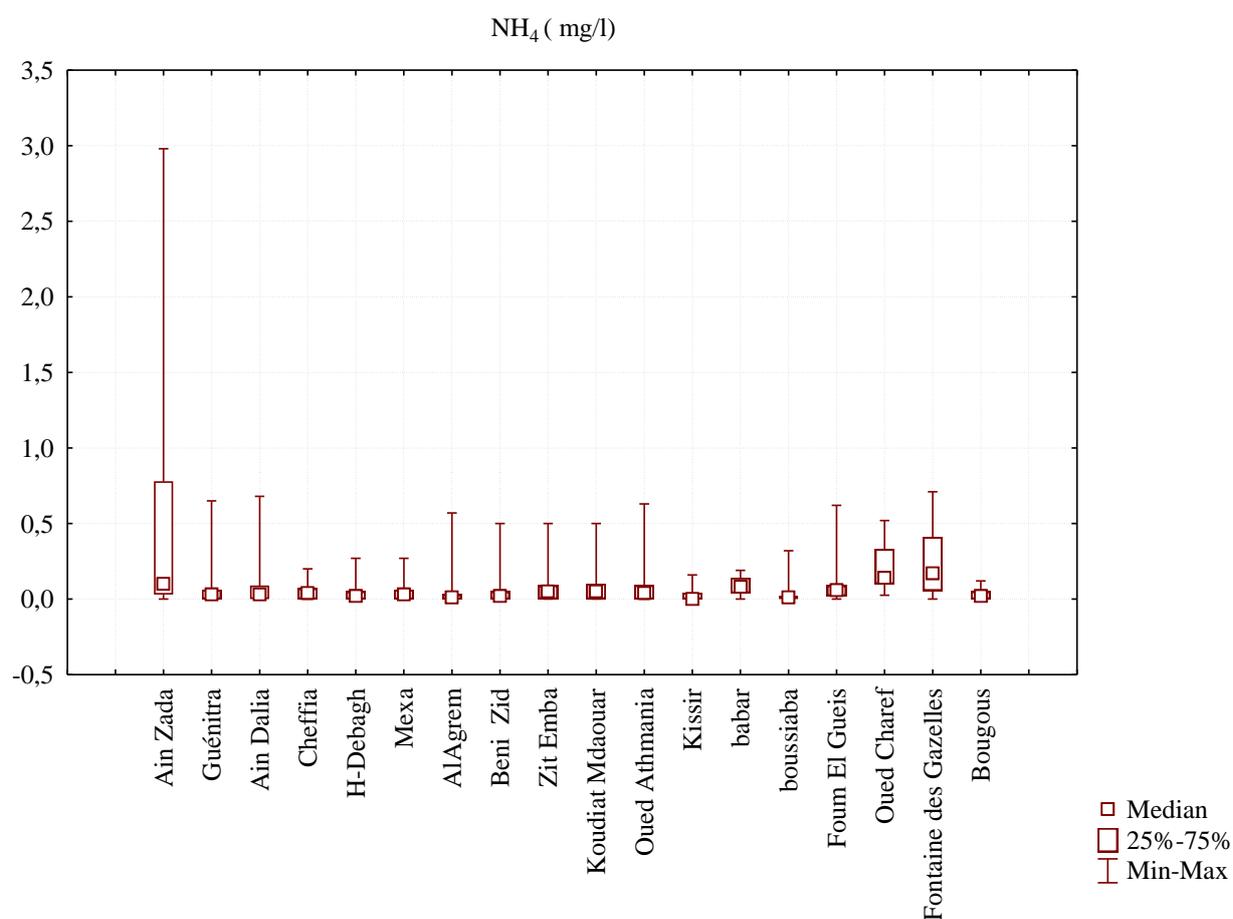


Figure V. 6 : Variation de NH<sub>4</sub> des eaux de surface du Nord Est Algérien.

La présence des nitrites et de l'ammonium serait liée au processus de dénitrification par consommation d'oxygène (Hiscock *et al.* 1991). La forte teneur en CO<sub>2</sub> et la faible teneur en oxygène accroissent la concentration en ammonium dans l'eau (Mariotti 1994).

Les teneurs en ammonium sont considérables au niveau de barrage Ain Zada cela par l'oxydation de l'azote et la réduction de l'oxygène durant la période des basses eaux, dues au lessivage et épandage des engrais sur le sol qui aboutissent au niveau de l'Oued ainsi que les rejets urbains chargés en éléments organiques et aux détergents utilisés dans les activités ménagères. Lorsque les valeurs de  $NH_4$  sont présentes dans l'eau avec des niveaux supérieurs à 0,2 mg/l, on peut soupçonner une éventuelle contamination des eaux.

### V.3.2.7. Phosphate ( $PO_4^{3-}$ )

Comme l'azote, le phosphate est un élément essentiel à la vie aquatique car il est considéré comme étant un sel nutritif. Il peut se trouver sous différentes formes oxydées, méta  $HPO_3$ , pyro  $H_4P_2O_7$  et ortho  $H_3PO_4$ . En milieu aqueux, les formes méta et pyro tendant vers la forme ortho pour des pH compris entre 5 et 8.

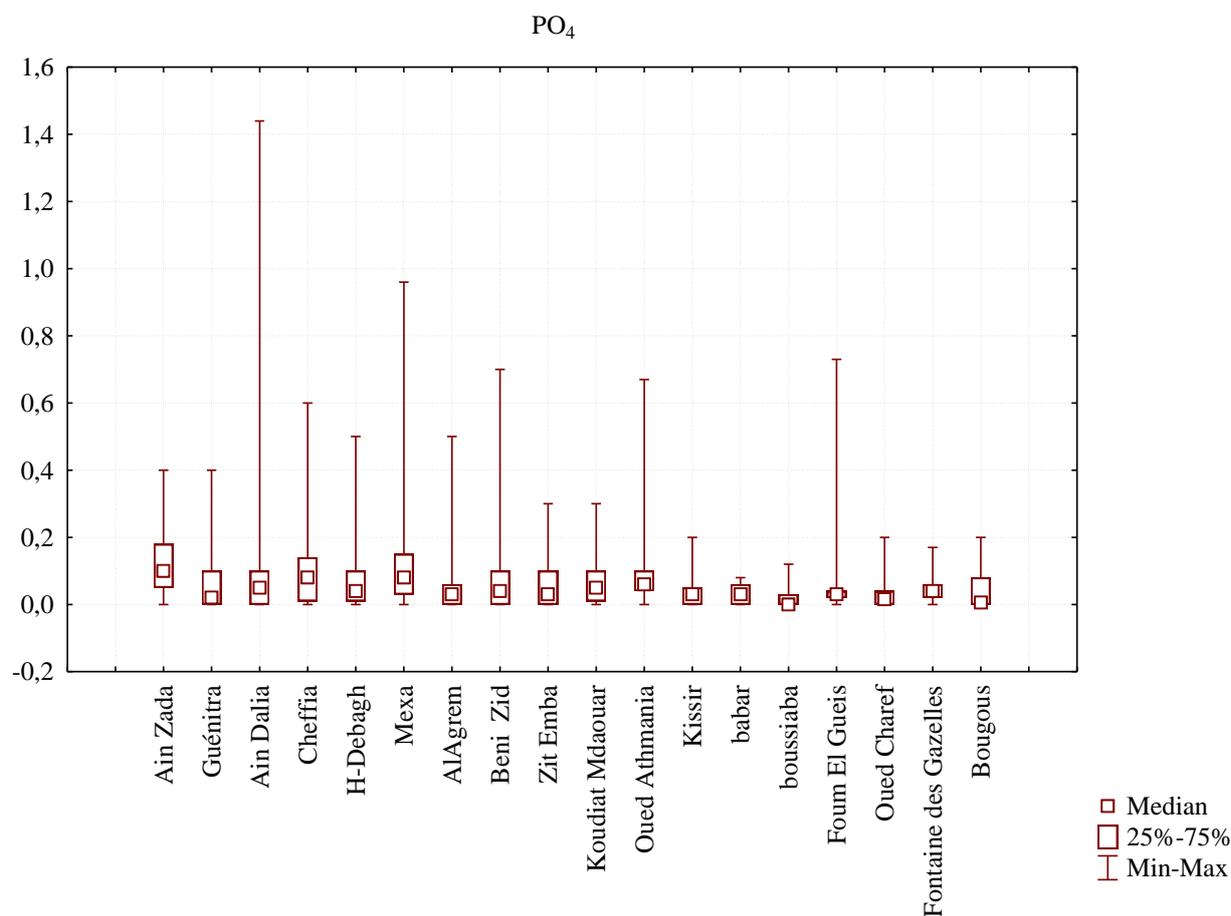


Figure V. 7 : Variation de  $PO_4$  des eaux de surface du Nord Est Algérien.

Les résultats donnés dans (Figure V. 7), montre la présence de fortes concentrations pour les eaux de barrages Ain Dalia, Mexa, Beni Zid, Oued Al Athmania et Foug El Gueiss. Dépassant la valeur guide des eaux superficielles, ces concentrations sont liées aux apports d'engrais, aux rejets urbains et des eaux stagnantes dans les cuvettes ainsi qu'à la précipitation des minéraux phosphatés (Apatite) par leurs faible solubilité dans un milieu réducteur chargé en sels minéraux (Galvez-Cloutier et al. 2002). La diminution progressive des phosphates est due à l'effet de dilution au niveau du cours d'eau alimentant les réservoirs de Babar, Boussiaba, Oued Charef, Fontaine des Gazelles et Bougous.

### V.3.2.8. La DBO<sub>5</sub> (Demande Biologique en Oxygène)

La demande biologique en oxygène est la quantité d'oxygène utilisée en 5 jours par la dégradation naturelle. Parmi les substances organiques consommatrices d'oxygène, on trouve l'azote, le phosphore et le carbone.

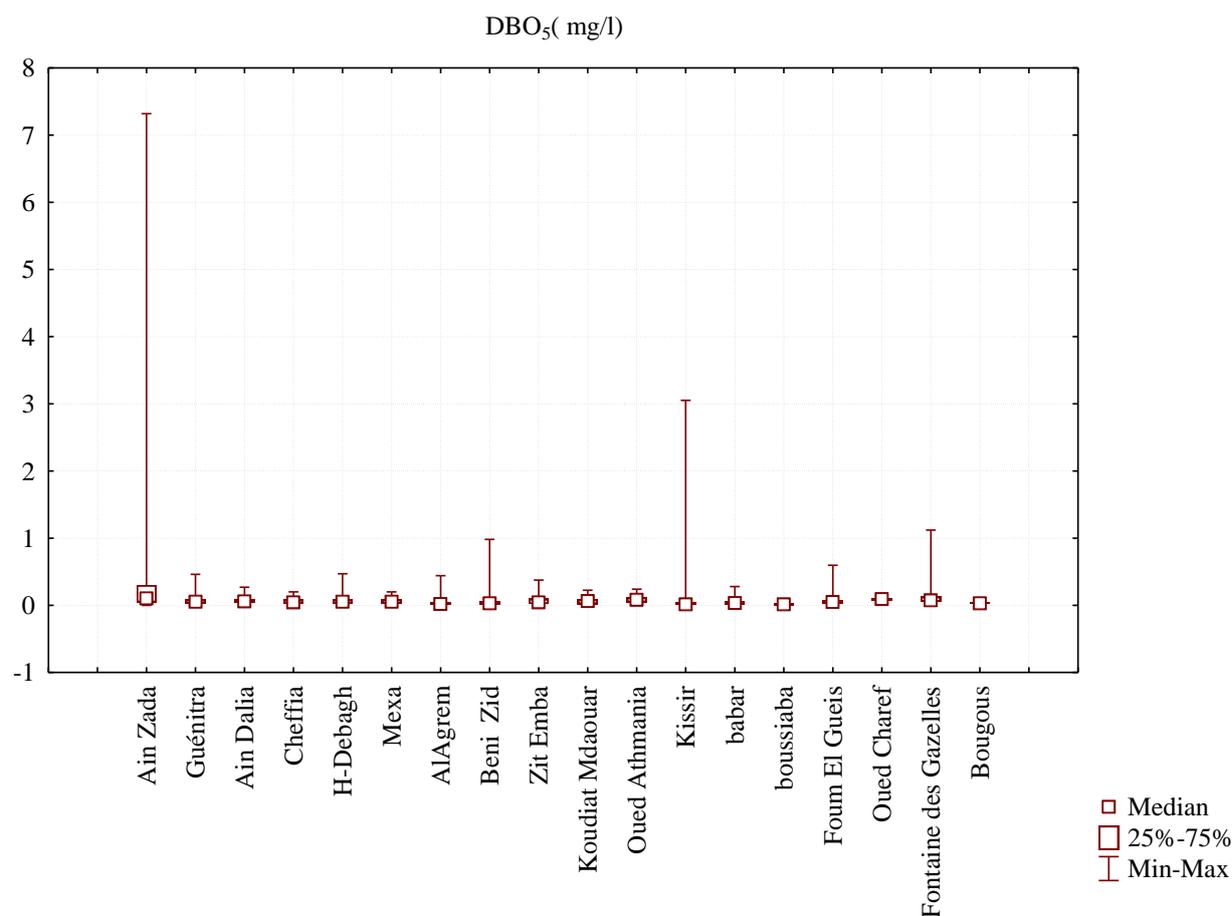


Figure V. 8: Variation de DBO<sub>5</sub> des eaux de surface du Nord Est Algérien.

L'effet principal d'un apport de matières organiques dégradables dans le milieu naturel est la consommation d'oxygène qui en résulte. En effet, la présence de microorganismes dans les eaux permet la dégradation en éléments plus simples, de certaines substances plus complexes d'origine naturelle (végétaux ou animaux morts) ou artificielles (eaux usées). Or, cette activité de dégradation ou auto-épuration, est consommatrice d'oxygène. Il nous a paru évident d'évaluer cette pollution organique en quantité d'oxygène demandée. La DBO<sub>5</sub> exprime la quantité d'oxygène nécessaire à la dégradation des matières organiques, avec le concours des microorganismes, dans des conditions données et sur une période fixée à cinq jours.

Le corps de la boîte est petit dans la totalité des barrages sont plus uniformes (Figure V. 8). Les moustaches sont longues, plus les valeurs sont dispersées, pour le barrage Ain Zada, Beni Zid, Kissir et Fontaine des gazelles. La boîte est orientée à gauche, plus les valeurs sont faibles avec l'exception de quelques valeurs extrêmes qui dépasse les 3mg/l.

#### **V.3.2.9. La demande Chimique en Oxygène (DCO)**

Elle représente la quantité d'oxygène consommée, exprimée en milligrammes par litre, par les matières oxydables chimiquement contenues dans un effluent. La DCO correspond à la quantité d'oxygène nécessaire pour la dégradation par voie chimique, effectuée à l'aide d'un oxydant puissant, des composés organiques présents dans l'eau.

Elle permet de mesurer la teneur en matières organiques totales (excepté quelques composés qui ne sont pas dégradés), y compris celles qui ne sont pas dégradables par les bactéries. Il s'agit donc d'un paramètre important permettant de caractériser la pollution globale d'une eau par des composés organiques.

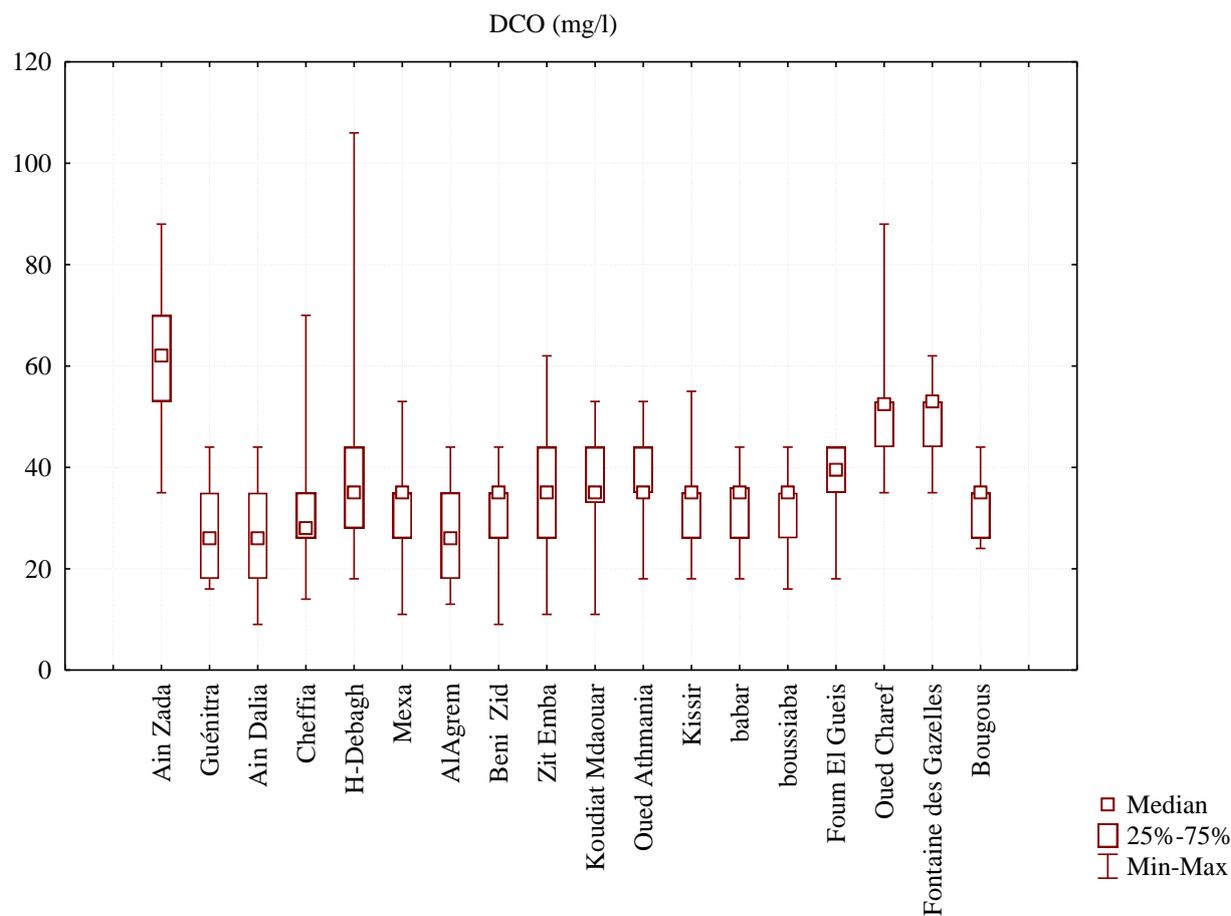


Figure V. 9: Variation de DCO des eaux de surface du Nord Est Algérien.

La Figure V. 9 montre que le DCO suit une distribution dissymétrique pour les 18 barrages et atteint des valeurs élevées dans la période estivale traduisant l'augmentation de la charge polluante suite à l'action anthropique.

### V.3.2.10. La matière organique MO

La matière organique dans les eaux superficielles englobe une importante variété de molécules d'origine organique. Ce sont les molécules de petite taille qui posent un problème pour le traitement des eaux brutes destinées à la consommation humaine.

Cette matière organique se trouve naturellement dans l'eau lorsqu'elle résulte du lessivage des sols (source exogène au milieu aquatique) ou qu'elle dérive de la biomasse aquatique (source endogène). Les activités humaines peuvent avoir une influence directe sur les sources exogènes,

notamment sur le stock lessivable/transportable des sols ainsi que sur les conditions de lessivage et de transport de ce stock, mais aussi en émettant ponctuellement de la matière organique.

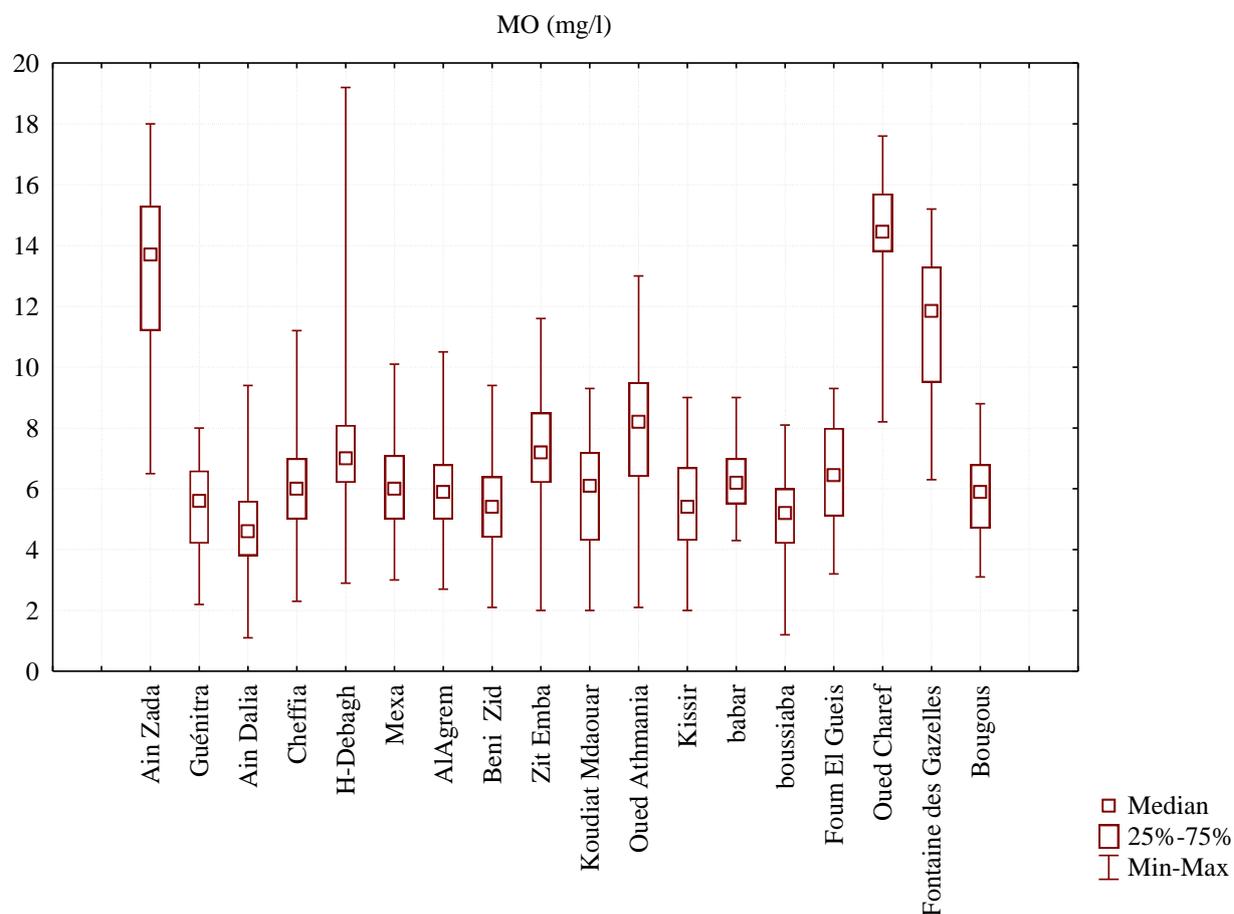


Figure V. 10: Variation de MO des eaux de surface du Nord Est Algérien.

Les activités anthropiques pourraient bien aussi augmenter indirectement les sources endogènes de matière organique en stimulant la production primaire par réduction des facteurs limitant de croissance associée aux concentrations en nutriment (Figure V. 10).

La matière organique suit la même distribution que DCO et qui reste toujours admissible.

#### V.4. ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES (ACP)

Des techniques environnementales utilisent des modèles statistiques multi variées pour une meilleure interprétation de la qualité des données. Parmi les modèles statistiques multi- variées couramment utilisés pour l'analyse des données environnementales on trouve : l'Analyse de Cluster (Bear), l'Analyse en Composantes Principales (ACP), l'Analyse Factorielle (Djerafi) et

l'Analyse Discriminante (AD). Ces techniques d'exploration de données sont très utiles pour la reconnaissance des formes et l'analyse exploratoire des données, révélant aussi des informations cachées sur l'ensemble de données (Kanade & Gaikwad 2011).

L'ACP est une méthode exploratoire et descriptive (Dagnelie 1975). Elle est utilisée pour interpréter une matrice de données sans structure particulière ne comportant, à priori, aucune distinction, ni entre les variables, ni entre les individus. Elle a pour but de remplacer les  $p$  variables initiales fortement corrélées entre elles en  $p$  variables appelées composantes principales ou axes principaux synthétiques non corrélés entre elles, et de variance progressivement décroissante. Les premières composantes pouvant éventuellement faire l'objet d'une interprétation particulière et les dernières pouvant généralement être négligées (Dagnelie 1975).

Dagnelie (1986) propose deux tests statistiques pour déterminer le nombre de composantes significatives à prendre en considération. Cependant, dans la pratique, l'expérience montre que ces tests conduisent souvent à considérer comme distinctes un nombre relativement élevé de composantes, dont certaines ne possèdent en effet aucun intérêt. Comme, d'autre part, ces tests ne sont applicables que dans des conditions relativement strictes de normalité notamment. Certains auteurs préfèrent utiliser d'autres règles, les unes plus sommaires que les autres. Parmi celles-ci, citons l'idée de négliger à priori, pour toute la matrice de corrélation, les valeurs propres inférieures à l'unité, c'est-à-dire inférieures à la contribution moyenne des différentes variables (Lyamine 2008). Dans cette étude seules les composantes principales ayant une valeur propre égale ou supérieure à l'unité sont prises en considération.

Dans cette étude, on a effectué une analyse statistique des eaux superficielles sur les deux périodes (basses eaux et hautes eaux). La méthode regroupe le traitement et la comparaison simultanée des différentes variables et l'analyse des données multi dimensionnelles (statistique descriptive). En d'autre terme, ce qu'on cherche à mettre en évidence, ce sont les liens éventuels qui pourraient regrouper deux ou plusieurs variables au cours de leur évolution (Debieche 2002; Abdelkader 2006).

Le but de cette analyse statistique est de faire ressortir :

- Les différentes corrélations significatives entre éléments chimiques afin de comprendre le mécanisme du chimisme des eaux ;

- Les points d'eau qui possèdent des concentrations élevées en éléments chimiques par rapport à l'ensemble des autres points. Cela nous permet d'avoir une idée préalable sur les éléments.

L'ACP utilisée est centrée réduite et elle a été appliquée aux données hydrochimiques des eaux de surface du Nord Est Algérien sur un tableau de 10 variables (pH, RS, O<sub>2</sub>D, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>DCO, DBO<sub>5</sub>, et MO) et 83 individus (échantillons prélevés au niveau des 18 barrages.). Le but de ce traitement est de déterminer les principaux facteurs qui contrôlent le chimisme de ces eaux et les différentes sources de contamination et de pollution.

#### V.4. 1.Variance et valeurs propres

Selon le critère de Kaiser (Kaiser 1960) qui a été appliqué afin de déterminer le nombre total de facteurs (F) significatifs, seuls les facteurs ayant une valeur propre supérieure ou égale à 1 seront acceptés comme sources possibles de variance dans les données (Tableau V. 2). Cette analyse a été poussée jusqu'à trois facteurs et 63.65 % de la variance ont pu être exprimés pour l'ACP des basses eaux ; ce qui est assez bon et peut être utilisée pour identifier les principales variations dans l'hydrochimie. F1 exprime 37.43 % de la variance, F2 exprime 14.76 % de la variance et F3 exprime 11.45% de la variance. L'ACP des hautes eaux résume sur les trois premiers axes 67.50 % de l'information totale. La première composante contribuant pour 39.24 % de la variance totale. La deuxième composante (16.19 % de l'inertie. Le plan principal Axes (1-2) qui va servir pour les projections résume 52.19 % de l'information pour les basses eaux et 55.43 % de l'information des hautes eaux.

Tableau V. 2: Les facteurs retenus pour l'ACP.

Saisons	Facteurs	F1	F2	F3	F4
BASSES EAUX	Valeurs propres	3,74	1,47	1,14	0,96
	Variance (%)	37,43	14,76	11,45	9,68
	Variance cumulée (%)	37,43	52,19	63,65	73,32
HAUTES EAUX	Valeurs propres	3,92	1,61	1,20	0,87
	Variance (%)	39,24	16,19	12,07	8,79
	Variance cumulée (%)	39,24	55,43	67,50	76,29

#### V.4. 2. Liaison Variables-Facteurs

F1 est déterminé positivement par O<sub>2</sub> et négativement par les nutriments et les paramètres de pollution organiques (NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>, PO<sub>4</sub>, DCO, DBO<sub>5</sub> et MO). F2, qui représente 14.76 % de la variance totale est déterminé négativement par le pH et NO<sub>3</sub> et positivement par les paramètres de pollution organiques (DCO, DBO<sub>5</sub> et MO) tandis que le F3 est déterminé négativement par O<sub>2</sub> et positivement avec NO<sub>2</sub> et PO<sub>4</sub> ce qui explique bien la pollution anthropique. Donc F1, F2 et F3 sont supposées être représentatifs du processus d'acquisition du chimisme de l'eau lié à l'interaction eau-roche et à la pollution externe.

Tableau V. 3: Liaison Variables-Facteurs.

Variables	F1		F2		F3	
	Basses eaux	Hautes eaux	Basses eaux	Hautes eaux	Basses eaux	Hautes eaux
<b>pH</b>	0,0738	0,0765	<b>-0,7021</b>	<b>0,8020</b>	-0,2066	0,2516
<b>RS</b>	<b>-0,7972</b>	<b>-0,7219</b>	-0,1622	0,0201	-0,3205	<b>0,5418</b>
<b>O<sub>2</sub></b>	<b>0,2119</b>	<b>0,3416</b>	<b>0,6468</b>	<b>-0,3931</b>	<b>-0,5013</b>	0,0133
<b>NO<sub>2</sub></b>	-0,3293	<b>-0,4979</b>	<b>-0,6602</b>	<b>0,3291</b>	-0,0642	0,3938
<b>NO<sub>3</sub></b>	-0,4248	<b>-0,6317</b>	0,1956	0,0167	<b>0,5159</b>	<b>-0,5684</b>
<b>PO<sub>4</sub></b>	<b>-0,6975</b>	<b>-0,7675</b>	0,1261	-0,1704	0,0768	-0,3677
<b>NH<sub>4</sub></b>	-0,3200	-0,0638	0,0287	<b>0,7641</b>	<b>0,6241</b>	<b>-0,4080</b>
<b>DBO<sub>5</sub></b>	<b>-0,8672</b>	<b>-0,7758</b>	0,0444	0,1471	0,0230	-0,1721
<b>DCO</b>	<b>-0,8420</b>	<b>-0,8070</b>	0,2080	-0,2636	-0,1650	0,1587
<b>MO</b>	<b>-0,8474</b>	<b>-0,8867</b>	0,0450	-0,0917	-0,2339	0,1234

#### V.4. 3. Corrélations entre les variables

Le premier résultat de l'ACP qui apparait, est le coefficient de corrélation qui est couramment utilisé pour estimer la relation entre deux variables. C'est un outil statistique simple pour montrer le degré de liaison entre deux variables. La matrice de corrélation des variables a été présentée dans le Tableau V. 4 et Tableau V. 5.

Un examen rapide de la matrice de corrélation permet de constater que, pour la période considérée (2010-2015), les coefficients atteignent des valeurs élevées pour les basses eaux (0,97 à 0,98) et 0.75 pour les hautes eaux. Le plus petit coefficient est égal à (- 0,02) qui correspondent au couple (pH-DBO<sub>5</sub>). Cette matrice nous permet d'apercevoir les éléments corrélables entre eux suivant la valeur du coefficient de corrélation. La bonne corrélation se définit par le coefficient de corrélation ( $r > 0,8$ ), ce qui nous permet d'extraire les couples

suivants : pH-O<sub>2</sub>, pH-DCO, pH-MO, RS-O<sub>2</sub>, RS-DBO<sub>5</sub>, RS-DCO, RS-MO, O<sub>2</sub>-DBO<sub>5</sub>, O<sub>2</sub>-DCO, O<sub>2</sub>-MO, DCO-DBO<sub>5</sub>, MO-DBO<sub>5</sub>. Les éléments corrélés présentent la même origine.

Tableau V. 4: Matrice de corrélations hautes eaux

	pH	RS	O <sub>2</sub> D	NO <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub>	NH <sub>4</sub>	PO <sub>4</sub>	DBO <sub>5</sub>	DCO	MO
pH	1,00									
RS	0,09	1,00								
O <sub>2</sub> D	-0,15	-0,19	1,00							
NO <sub>3</sub>	0,17	0,45	-0,13	1,00						
NO <sub>2</sub>	-0,08	0,17	-0,11	0,21	1,00					
NH <sub>4</sub>	-0,20	0,34	-0,19	0,19	0,61	1,00				
PO <sub>4</sub>	0,37	-0,12	-0,16	0,13	0,16	0,04	1,00			
DBO <sub>5</sub>	-0,02	0,49	-0,28	0,29	0,53	0,49	0,19	1,00		
DCO	-0,18	0,57	-0,18	0,31	0,38	0,55	-0,15	0,49	1,00	
MO	-0,07	0,68	-0,21	0,35	0,40	0,66	0,011	0,60	0,75	1,00

Tableau V. 5: Matrice de corrélation basses eaux

	pH	RS	O <sub>2</sub> D	NO <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub>	NH <sub>4</sub>	PO <sub>4</sub>	DBO <sub>5</sub>	DCO	MO
pH	1,00									
RS	0,78	1,00								
O <sub>2</sub> D	0,98	0,84	1,00							
NO <sub>3</sub>	0,74	0,93	0,78	1,00						
NO <sub>2</sub>	-0,18	-0,06	-0,11	-0,06	1,00					
NH <sub>4</sub>	-0,23	-0,22	-0,19	-0,20	0,23	1,00				
PO <sub>4</sub>	-0,14	-0,17	-0,13	-0,20	0,18	0,34	1,00			
DBO <sub>5</sub>	0,79	0,90	0,86	0,86	0,13	0,07	-0,07	1,00		
DCO	0,94	0,92	0,98	0,86	-0,08	-0,18	-0,14	0,91	1,00	
MO	0,87	0,96	0,93	0,90	-0,04	-0,09	-0,14	0,96	0,97	1,00

Les résultats montrent que le pH montre une corrélation positive significative (de 0,78 à 0,94) avec des éléments anthropiques et les éléments de pollution (NO<sub>3</sub>, DBO<sub>5</sub>, DCO et MO) ceci est en liaison avec les effluents industriels, agricoles et le rejet des eaux usées domestiques. Salinité représentée par le RS, montre une corrélation positive (0,84 à 0,98) avec tous les éléments sauf NO<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub> et PO<sub>4</sub>. Ceci est lié à la dissolution des minéraux, l'échange de base, l'évaporation, et l'activité anthropique (Molla *et al.* 2015). Cette analyse montre également une corrélation positive (0,49 à 0,72) avec des paramètres de pollution (DCO, DBO<sub>5</sub> et MO).

La relation positive entre ces paramètres indique l'oxydation de la matière organique par les microorganismes dans l'eau.

Les eaux superficielles sont polluées par les déchets solides provenant des rejets domestiques, les eaux de ruissellement, le développement urbain.

Le cercle I-II (55.43% de l'inertie cumulée) : l'axe I est déterminé négativement par les paramètres de salinité, pollution et l'anthropique et opposé à O<sub>2</sub> (Figure V. 11). L'axe II porte positivement pH, PO<sub>4</sub> qui n'est opposé à aucun autre paramètre.

Le cercle I-III (48.88% de l'inertie cumulée) : L'axe I a la même signification que précédemment alors que l'axe III porte négativement PO<sub>4</sub>.

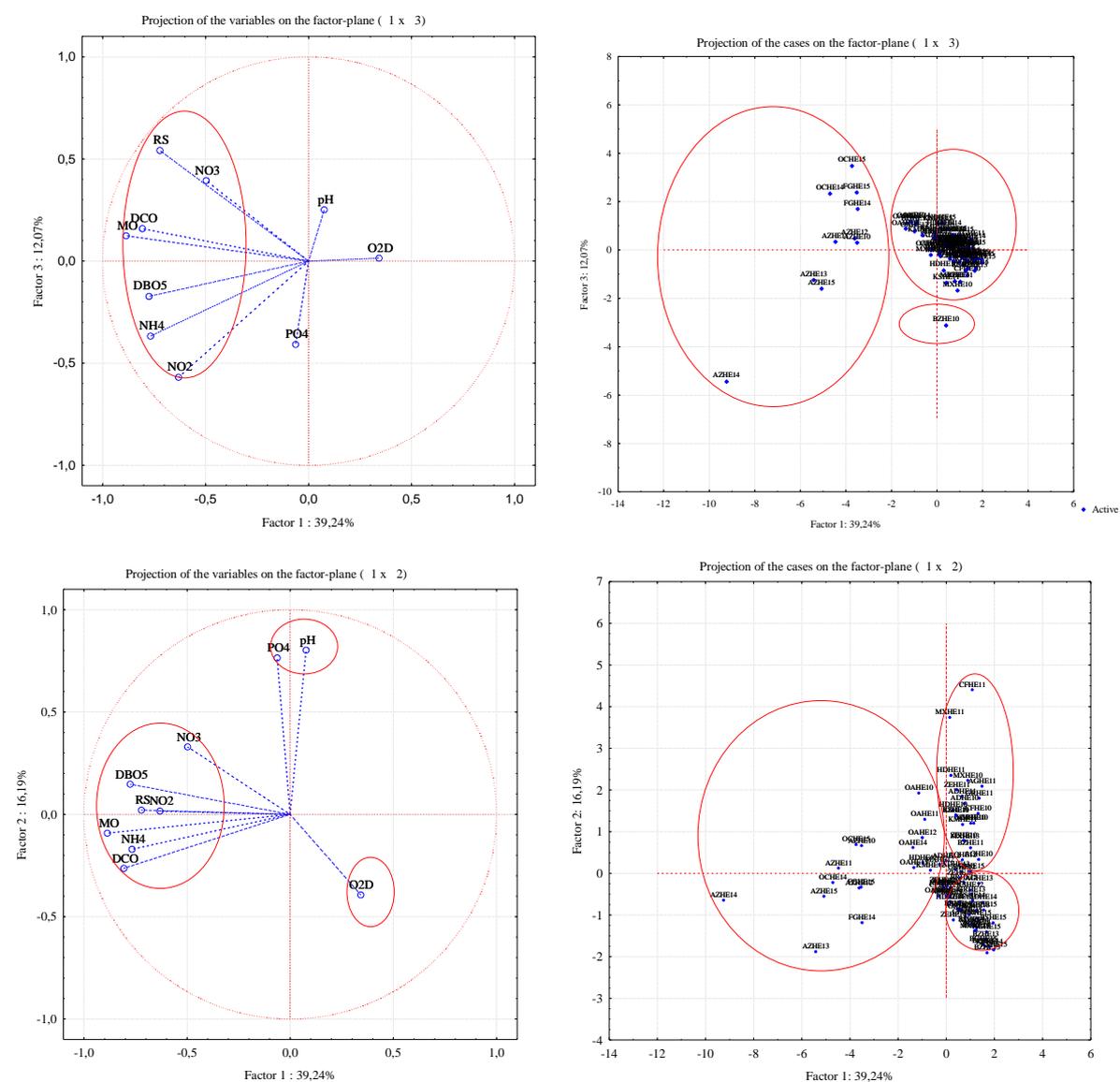


Figure V. 11 : Résultats de l'Analyse en Composantes Principales

L'analyse du plan factoriel des individus (F1/F3) montre que ce sont les barrages Oued Charef, Ain Zada et Fontaine des Gazelles qui sont caractérisées par des eaux relativement chargées. Le reste des stations ont une concentration maximale d'oxygène.

Le facteur 2 est lié aux eaux des stations Oued Athmania, Oued Charef et Ain Zada riches en NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>, DBO<sub>5</sub> et DCO. De même que les eaux des stations pendant la période des basses eaux.

Les cercles d'ACP des basses eaux sont représentés dans l'annexes N°2.

## **V.5. QUALITE DES EAUX POUR L'A.E. P**

### **V.5.1. Les indices de la qualité de l'eau**

Les indices de qualité de l'eau visent à donner une valeur unique à la qualité d'une source sur la base de l'un ou l'autre système qui se traduit par la liste des constituants et leurs concentrations présentes dans un échantillon dans une seule valeur de l'eau. On peut alors comparer les différentes qualités des échantillons sur la base de la valeur d'indice de chaque échantillon.

Dans un premier temps, IQE a été développé par Horton (1965) (Horton 1965) en États-Unis en sélectionnant les 10 variables de qualité de l'eau plus couramment utilisées comme l'oxygène dissous (DO), le pH, Coliformes, conductance spécifique, alcalinité et etc. chlorure et a été largement appliquée et acceptée dans les pays européens, africains et asiatiques. Le poids affecté réfléchit la signification d'un paramètre pour une utilisation particulière et a un impact considérable sur l'indice. En outre, une nouvelle IQE semblable à l'indice de Horton a également été mis au point par le groupe de Brown en 1970 (Brown *et al.* 1970), qui était basée sur des poids à des paramètres individuels. Récemment, de nombreuses modifications ont été envisagées pour le concept de IQE par divers scientifiques et experts (Bhargava & Saxena 1990; Dwivedi *et al.* 1997).

Une approche IQE générale (Fernández *et al.* 2004) est fondée sur des facteurs les plus courants qui sont décrits dans les trois étapes suivantes :

- 1. Sélection des paramètres :** Ceci est réalisé par un jugement d'experts professionnels, des organismes ou des institutions gouvernementales qui est déterminé dans le domaine législatif. La sélection des variables des 5 classes à savoir au niveau de l'oxygène, l'eutrophisation, les

aspects de la santé, les caractéristiques physiques et les substances dissoutes, qui ont l'impact considérable sur la qualité de l'eau, il est recommandé (Dunnette 1979).

**2.** Détermination de la fonction de la qualité (courbe) pour chaque paramètre considéré comme sous-indice : Les sous-indices de transformation des valeurs d'échelle non dimensions à partir des variables de ses différentes unités (ppm, pourcentage de saturation, le nombre / volume, etc.).

**3.** L'agrégation sous-indices de l'expression mathématique : Ceci est fréquemment utilisé par les moyennes arithmétiques ou géométriques.

Cependant, un grand nombre d'indices de qualité de l'eau à savoir :

L'indice de qualité de l'eau arithmétique pondérée, la National Sanitation Fondation Indice de la qualité des Eaux (NSFWQI), Conseil canadien des ministres de l'Environnement Indice de la qualité de l'eau (CCMEWQI), Oregon eau Indice de qualité (OWQI), etc. ont été formulées par plusieurs nationaux et internationaux organisations. Ces IQE ont été appliquées pour l'évaluation de la qualité de l'eau dans une zone particulière (Lumb *et al.* 2002; Chaturvedi & Bassin 2010). De plus, ces indices sont souvent basés sur le nombre et les types différents de paramètres de qualité de l'eau par rapport aux normes respectives d'une région particulière. Les indices de qualité de l'eau sont accrédités pour démontrer les cycles annuels, les variations spatiales et temporelles de la qualité de l'eau et les tendances de la qualité de l'eau, même à des concentrations faibles d'une manière efficace et rapide.

Le Tableau V. 6 regroupe quelques indices de qualité et de pollution des eaux avec le nombre de paramètres, la structure et la formule d'agrégation.

Tableau V. 6: Quelque indice avec le nombre de paramètres, la structure et la formule d'agrégation.

Indices	Nombre de paramètres	Structure	Formule d'agrégation
<b>Indice de pollution de l'eau</b>			
ICOMI(Minéralisation)	3	Équation	Moyenne arithmétique
ICOMO (Organic Matter)	3	Équation	Moyenne arithmétique
ICOSUS (Suspended Solids)	1	Diagramme et équation	Lecture directe
ICOTEMP(Température)	1	Diagramme et équation	Lecture directe
ICO-pH (pH)	1	Diagramme et équation	Lecture directe
ICOTOX(Toxicité)	Toxiques par temps	Équation	Équation
ICOBIO(Biological)	Indéterminés	Équation	Équation
ICO5 for Hydrocarbone index	Pour chaque index	Équation	Équation

Tableau V. 6 suite et fin : Quelque indice avec le nombre de paramètres, la structure et la formule d'agrégation.

Indices	Nombre de paramètres	Structure	Formule d'agrégation
<b>Indices de qualité des eaux</b>			
Bactériale Pollution Index (BPI)	1	Diagramme	Lecture directe
Benthique Saprobity Index (BSI)	Au moins 30	Table	Moyenne en pourcentage
Biological Diversity Index (BDI)	Indéterminé	Table	Proportion
British Colombia	Jusqu'à 47	Formules	Somme au carré harmonique
Dalmatia	9	Formules	Proportion de la somme pondérée
Dinius (1987)	12	Équation	Moyennes géométriques pondérées
DRM	7	Diagramme	Moyennes pondérées
Greensboro	9	Diagramme	Multiplicatif non pondérée
Idaho	5	Équation	Proportion logarithmique
Léon (1998)	15	Formules	Moyennes géométriques pondérées
Industriel Pollution Index (IPI)	5 à 14	Diagramme	Moyenne pondérée modifiée
Malaysia	6	Équation	Moyennes pondérées
Montoya (1997)	17	Équation	Moyennes pondérées
Miami River Index (MRI)	7	Table	Somme
Nutrimet Pollution Index (NPI)	9	Diagramme	Moyenne pondérée modifiée
NSF	9	Diagramme	Moyennes géométriques pondérées
Organics Pollution Index (OPI)	5	Diagramme	Moyenne pondérée modifiée
Oregon (OWQI)	8	Équation	Quadratique moyenne harmonique non pondérée
Pesticide Pollution Index (PPI)	2 à 7	Diagramme	Moyenne pondérée modifiée
Poland	6	Formules	Carré de la moyenne harmonique
Prati	8 à 13	Formules	Moyennes pondérées
Production Respiration Index	2 à 3	Diagramme	Lecture directe
Washington	8	Équation	Équation quadratique

### V.5.2. L'indice de qualité de l'eau arithmétique pondérée

Dans le but de voir l'aptitude des eaux des barrages de l'Est Algérien dans le domaine d'alimentation en eau potable, en utilisant les normes d'organisation mondiale de la santé OMS pour calculer l'indice de qualité de l'eau arithmétique pondérée suite à des normes manquantes dans les normes Algériennes.

Dans ce modèle, les différentes composantes de la qualité de l'eau sont multipliées par un facteur de pondération et sont ensuite agrégés en utilisant moyenne arithmétique simple.

La méthode de l'indice de qualité de l'eau arithmétique pondérée classe la qualité de l'eau en fonction du degré de pureté en utilisant des variables de qualité de l'eau les plus couramment mesurés. La méthode a été largement utilisée par les différents scientifiques (Chauhan & Singh 2010; Rao *et al.* 2010; Abbasi & Abbasi 2012; Balan *et al.* 2012; Chowdhury *et al.* 2012) et le calcul de l'IQE a été fait (Brown *et al.* 1972) en utilisant l'équation suivante :

$$WQI = \sum Q_i W_i / \sum W_i \quad V.1$$

L'échelle de notation de la qualité ( $Q_i$ ) pour chaque paramètre est calculée en utilisant cette expression :

$$Q_i = 100 [(V_i - V_o) / (S_i - V_o)] \quad V.2$$

Où,

$V_i$  : On estime la concentration du paramètre  $i$ th dans l'eau analysée.

$V_o$  : est la valeur idéale de ce paramètre dans l'eau pure.

$V_o = 0$  (sauf pH=7 et DO=14.6 mg/l).

$S_i$  : il est recommandé de valeur standard du paramètre  $i$ th.

Le poids unitaire ( $W_i$ ) pour chaque paramètre de qualité de l'eau est calculé en utilisant la formule suivante :

$$W_i = K / S_i \quad V.3$$

Où,

$K$  : constante de proportionnalité et peut être calculée en utilisant l'équation suivante :

$$K = \frac{1}{\sum(1/s_i)} \quad \text{V.4}$$

L'estimation de la qualité de l'eau selon la présente IQE est donnée dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

En général, IQE est défini pour une utilisation spécifique et destinée de l'eau. Dans cette étude, l'IQE a été considéré pour la consommation humaine ou les utilisations et l'IQE maximale admissible pour l'eau potable a été prise comme 100 points.

L'IQE a été classé en 5 classes. Le Tableau V. 7 représente les cinq (05) classes de qualité de l'eau basée sur la méthode IQE Arithmétique Pondéré.

Tableau V. 7: Evolution de la qualité de l'eau selon L'indice de qualité de l'eau arithmétique pondérée.

Valeur IQE	Evaluation de la qualité de l'eau
0-25	Excellente qualité de l'eau
26-50	Bonne qualité de l'eau
51-75	La mauvaise qualité de l'eau
76-100	Très mauvaise qualité de l'eau
Au-dessus de 100	Inadaptée à des fins de consommation

Tableau V. 8: Avantages et Inconvénients de L'indice de qualité de l'eau arithmétique pondérée. (Yogendra & Puttaiah 2008; Akoteyon *et al.* 2011)

L'indice de qualité de l'eau arithmétique pondérée	
Avantages	Inconvénients
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Incorporer des données à partir de plusieurs paramètres de qualité de l'eau dans une équation mathématique qui évalue la santé du corps de l'eau avec le numéro.</li> <li>2. Moins nombre de paramètres requis par rapport à tous les paramètres de qualité de l'eau pour une utilisation particulière.</li> <li>3. Utile pour la communication de l'information de la qualité globale de l'eau aux citoyens concernés et les décideurs politiques.</li> <li>4. Tient compte de l'influence composée de différents paramètres importants à savoir pour l'évaluation et la gestion de la qualité de l'eau.</li> <li>5. Décrit la pertinence des deux sources de surface et souterraines pour la consommation humaine.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. IQE peut ne pas transporter suffisamment d'informations sur la situation réelle de la qualité de l'eau.</li> <li>2. De nombreuses utilisations des données de qualité de l'eau ne peuvent pas être remplies avec un indice.</li> <li>3. L'éclipse ou trop d'importance à une seule mauvaise valeur du paramètre.</li> <li>4. Un seul numéro ne peut pas raconter toute l'histoire de la qualité de l'eau ; il y a beaucoup d'autres paramètres de qualité de l'eau qui ne sont pas inclus dans l'indice.</li> <li>5. IQE en fonction de certains paramètres très importants peut fournir un indicateur simple de la qualité de l'eau.</li> </ol>

Dans le tableau ci-dessous on montre un exemple de calcul de l'indice de la qualité de l'eau Arithmétique Pondéré en utilisant les normes de potabilité OMS.

Tableau V. 9 : Exemple de calcul de l'indice de qualité

Paramètres	Unité	Vi	OMS	V0	1/Si	k	Wi	Qi	Wi*Qi	38,78
pH	-	7,825	8,5	7	0,11764	0,06956	0,00818	55	0,45010	
Rs	mg/l	887,000	1500	0	0,00067	0,06956	4,6374E-05	59,1333	0,00274	
NO <sub>2</sub>	mg/l	0,038	0,1	0	10	0,06956	0,69561	37,5	26,08547	
O <sub>2</sub> D	%	109,875	80	14,6	0,0125	0,06956	0,00086	145,6804	0,12667	
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/l	3,000	50	0	0,02	0,069561	0,00139	6	0,00834	
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	mg/l	0,060	0,5	0	2	0,069561	0,13912	12	1,66947	
PO <sub>4</sub>	mg/l	0,300	0,5	0	2	0,069561	0,13912	60	8,34735	
DBO <sub>5</sub>	mg/l	6,500	5	0	0,2	0,069561	0,01391	130	1,80859	
DCO	mg/l	65,500	40	0	0,025	0,069561	0,00173	163,75	0,28476	
					14,37581		1		38,78352	

Enfin, l'IQE globale a été calculée en additionnant la cote de qualité avec le poids unitaire de façon linéaire en utilisant l'équation suivante :

$$IQE = \frac{\sum Q_i W_i}{\sum W_i} \quad V.5$$

Où,

$Q_i$  : Évaluation de la qualité

$W_i$  : Poids relatif

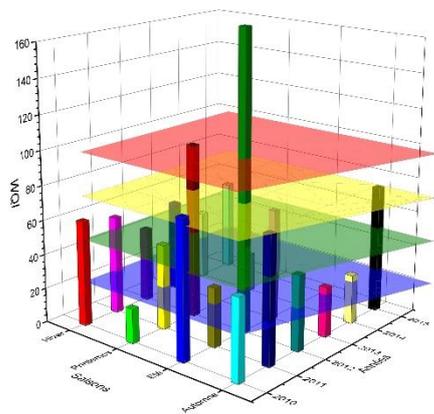
Les résultats de l'indice de qualité saisonnier de la durée 2010-2015 pour les barrages de l'Est Algérien sont représentés sous forme de graphiques tandis que les tableaux de résultats sont regroupés dans l'annexe 3.

La salinité des eaux de surface dépend, ainsi, de nombreux facteurs et de leurs interactions, particulièrement le régime hydrologique du bassin versant, puisque la plupart des cours d'eau sont caractérisés par un régime très irrégulier, torrentiel en hiver et sec en été.

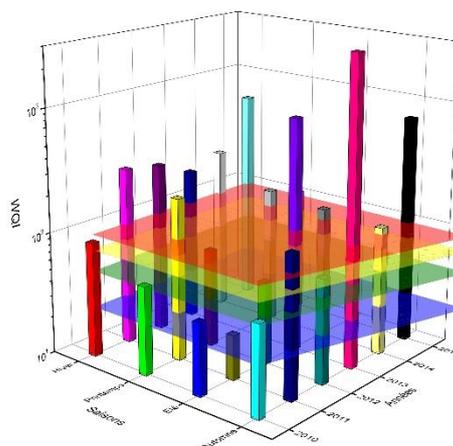
L'évaporation joue un rôle fondamental dans l'évolution du taux de salinité des eaux en fonction de la saison, du volume du réservoir (lac) et de la gestion des apports fluviaux, elle est particulièrement influente durant les périodes de basses eaux. La nature des formations géologiques traversées et les échanges entre le lac et la nappe sous-jacente. Suite au manque des données on s'intéresse uniquement aux éléments de l'ANRH malgré leurs effets importants sur la qualité de ces eaux.

Les Figure V. 12 (a) jusqu'à Figure V.12 (c) montre l'évolution de l'indice de qualité des eaux de barrages de l'Est Algérien d'une saison à une autre de 2010 jusqu' au 2015.

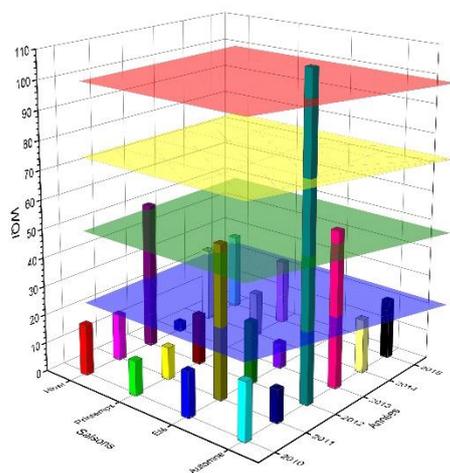
Barrage Ain Dalia



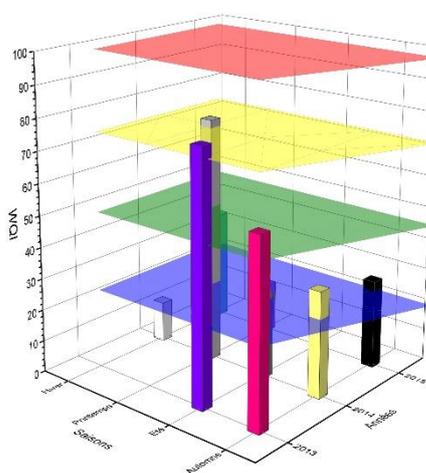
Barrage Ain Zada



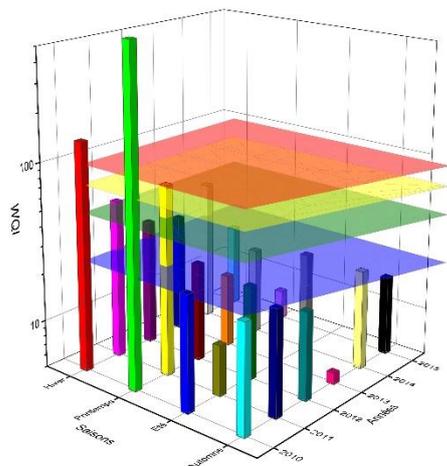
Barrage Al Agrem



Barrage Babar



Barrage Beni Zid



Barrage Bougous

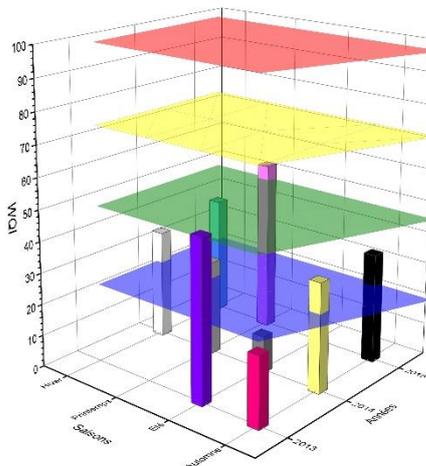
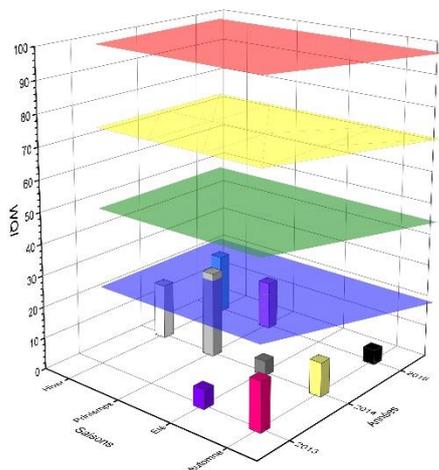
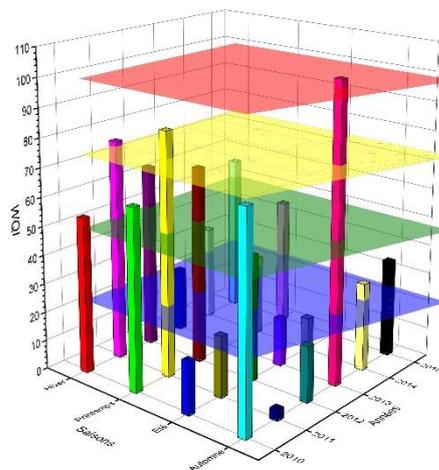


Figure V. 12 (a) : Variation de l'indice de qualité des eaux de surface de l'Est Algérien

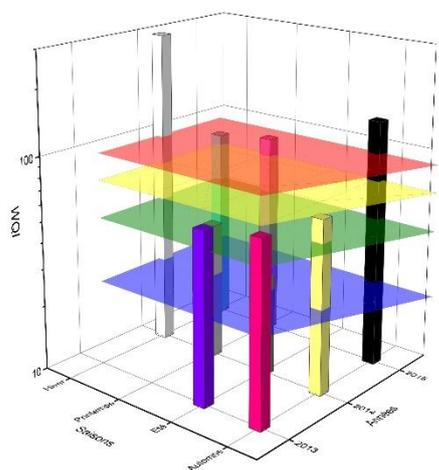
Barrage Boussiaba



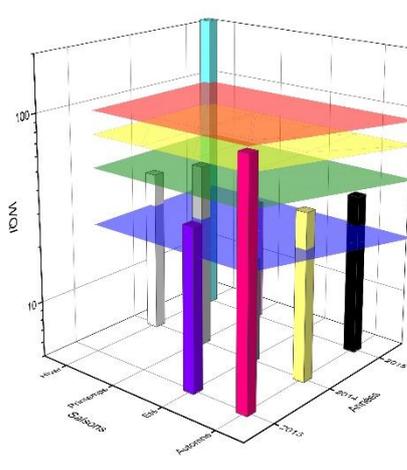
Barrage Chaffia



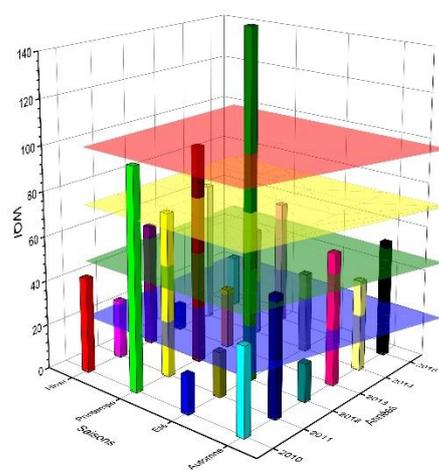
Barrage Fontaine des Gazelles



Barrage Foug El Gueis



Barrage Guénitra



Barrage Hammam Debagh

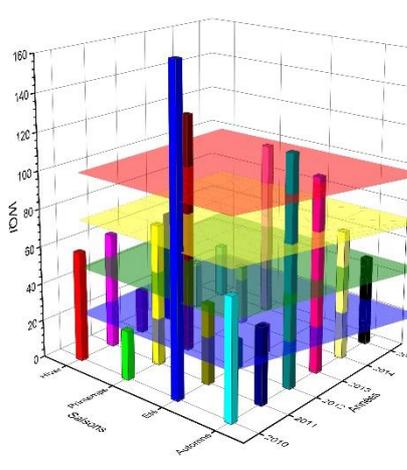
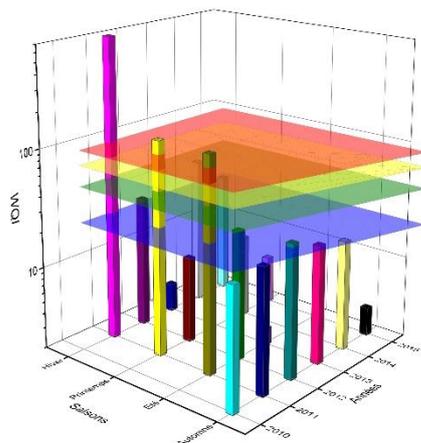
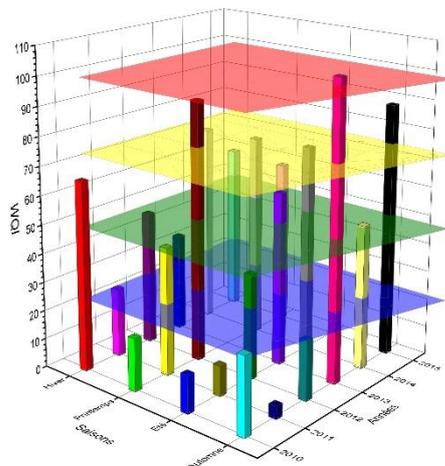


Figure V. 12 (b) : Variation de l'indice de qualité des eaux de surface de l'Est Algérien

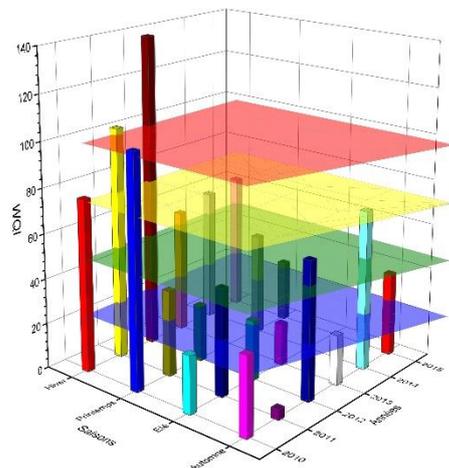
Barrage Kissir



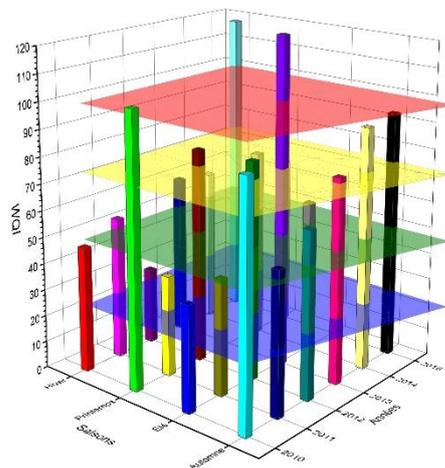
Barrage Koudiat Medouar



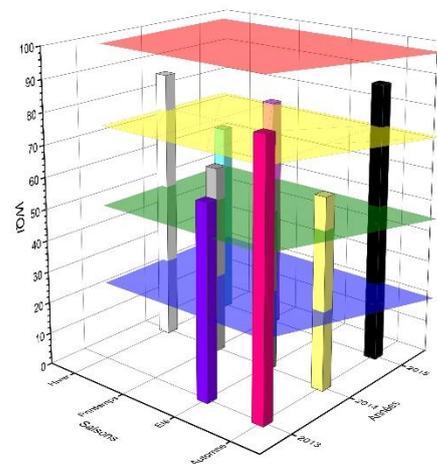
Barrage Mexa



Barrage Oued Al Athmania



Barrage Oued Charef



Barrage Zit Emba

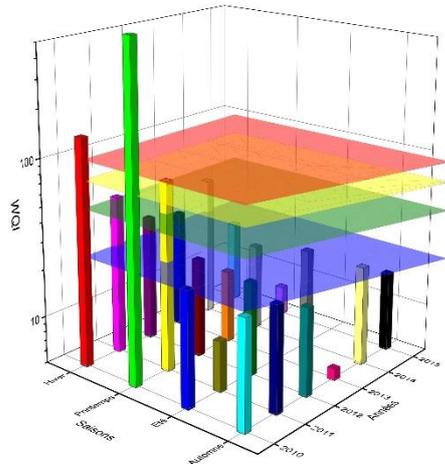


Figure V. 12 (c) : Variation de l'indice de qualité des eaux de surface de l'Est Algérien

Les résultats obtenus pour l'IQE dans les différentes stations d'échantillonnage variaient de 12,10 à 638,21 pour l'année 2010, de 10,43 à 738,70 pour 2011 et de 4,43 à 253,67 pour 2012, quant à l'année 2013 elle est marquée par une pollution remarquable de nitrite qui a influencé d'une façon remarquable IQE dont il a varié de 3,3 à 3136,3. Cette pollution a été momentanée et la qualité a repris son ordre de grandeur en 2014 de 4,72 à 299,41 et de 3,49 à 591,4 en 2015.

L'indice de qualité de l'eau est soutenu par les paramètres physico-chimiques suivants : pH, RS,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{O}_2\text{D}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{PO}_4$ ,  $\text{DBO}_5$ ,  $\text{DCO}$ . Les variations des paramètres physico-chimiques ci-dessus observées parmi les différents échantillons d'eau étaient toutes conformes aux normes recommandées sauf les nitrites et l'oxygène dissous. Parmi tous les paramètres physico-chimiques sélectionnés pour les calculs de l'IQE, le pH est un paramètre important qui détermine l'aptitude de l'eau à diverses fins.

En particulier, les nutriments (N et P) ont joué un rôle crucial, avec des valeurs supérieures à la norme qui étaient les principaux paramètres influençant la qualité de l'eau, tandis que d'autres paramètres inclus dans la norme de qualité des eaux de surface en étaient absents.

Au cours de la période 2010-2015, les concentrations de nitrites ont augmenté de 3,05 mg/l en 2011 à barrage Kissir à 7,32 mg/l en 2013 dans les eaux de barrage Ain Zada où l'IQE atteint 3136,33. Ainsi, ces augmentations ont été les principaux contributeurs à la détérioration de la tendance de la qualité de l'eau à l'échelle interannuelle. De plus, les concentrations moyennes étaient plus élevées en hiver et l'automne et plus faibles en printemps et l'été, ce qui était conforme aux variations saisonnières de l'IQE.

Selon la méthode de l'IQE, la qualité globale de l'eau dans l'Est Algérien était "bonne à mauvaise". Ces résultats ont indiqué que la qualité de l'eau répondait toujours aux besoins en eau potable de la population pendant la période à l'étude à l'exception de quelques valeurs inadaptées, mais qu'elle se détériorait à l'échelle interannuelle et variait selon les saisons.

En ce qui concerne la variation temporelle, nous avons constaté une amélioration de la tendance à l'échelle interannuelle et la meilleure qualité de l'eau a été observée en été.

La pollution par les nutriments est un problème courant dans les écosystèmes aquatiques. Par conséquent, les nutriments sont probablement les paramètres clés qui déterminent la qualité de l'eau des eaux de l'Est Algérien.

Ces figures montrent aussi que la qualité des eaux est généralement bonne à mauvaise sauf pour le barrage Ain Zada, Fontaine des Gazelles et Hammam Debagh qui représente une eau inadaptée à la consommation humaine surtout les dernières années suite à l'évolution de l'industrie et l'urbanisation intense.

L'évolution de la qualité des eaux saisonnières et annuelles sont représenté dans les figures V.13 à V.16.

L'interprétation des cercles d'indice de qualité des eaux naturelles du Nord Est Algérien indique le degré d'altération des eaux de la région d'étude. On note que les eaux passent d'une excellente qualité à une qualité médiocre inadaptée surtout pour l'année 2013 où le nombre des barrages saute de 11 à 18 barrages surveillé par ANRH. L'évolution de la qualité est traduite comme suit :

Automne : 25% de la qualité de ces eaux est excellent en 2010 et s'améliore en 2011 pour atteindre 50%. Une fois le nombre augmente le pourcentage à partir de 2013 pour atteindre 22.22% cette diminution est justifier par l'apport de pollution des premières pluies et les lessivages des bassins versants. Cependant, l'apport d'eau de pluie et le ruissèlement peut jouer le rôle de dégradant de la pollution par le fait de la dilution.

La qualité en cette saison varie entre bonne avec 33.33% en 2010 à 38.89 % en 2015 et mauvaise en 2010 le taux été 25% et diminue jusqu' à 11.11% en 2015.

27% des eaux de l'Est Algérien sont inadaptées à l'utilisation humaine et ceux en 2013 l'année marquée par une pollution de nitrite.

Dans la période estivale ; printemps et hiver l'évolution pluriannuelle depuis 2010 indique sur les eaux de surface, une amélioration jusqu'en 2015, en réponse aux évolutions inter annuelles de la pluviométrie, Les variations inter mensuelles sur cette même période et sur les stations suivies mensuellement indiquent une dégradation de la qualité en hiver 2012 et 2014, printemps et été 2012 à 2014. La présence de nitrates dans les eaux enrichit le milieu et favorise le développement des végétaux aquatiques, mais constitue aussi une pollution diffuse qui met en péril l'usage « eau potable » de la ressource en eau.

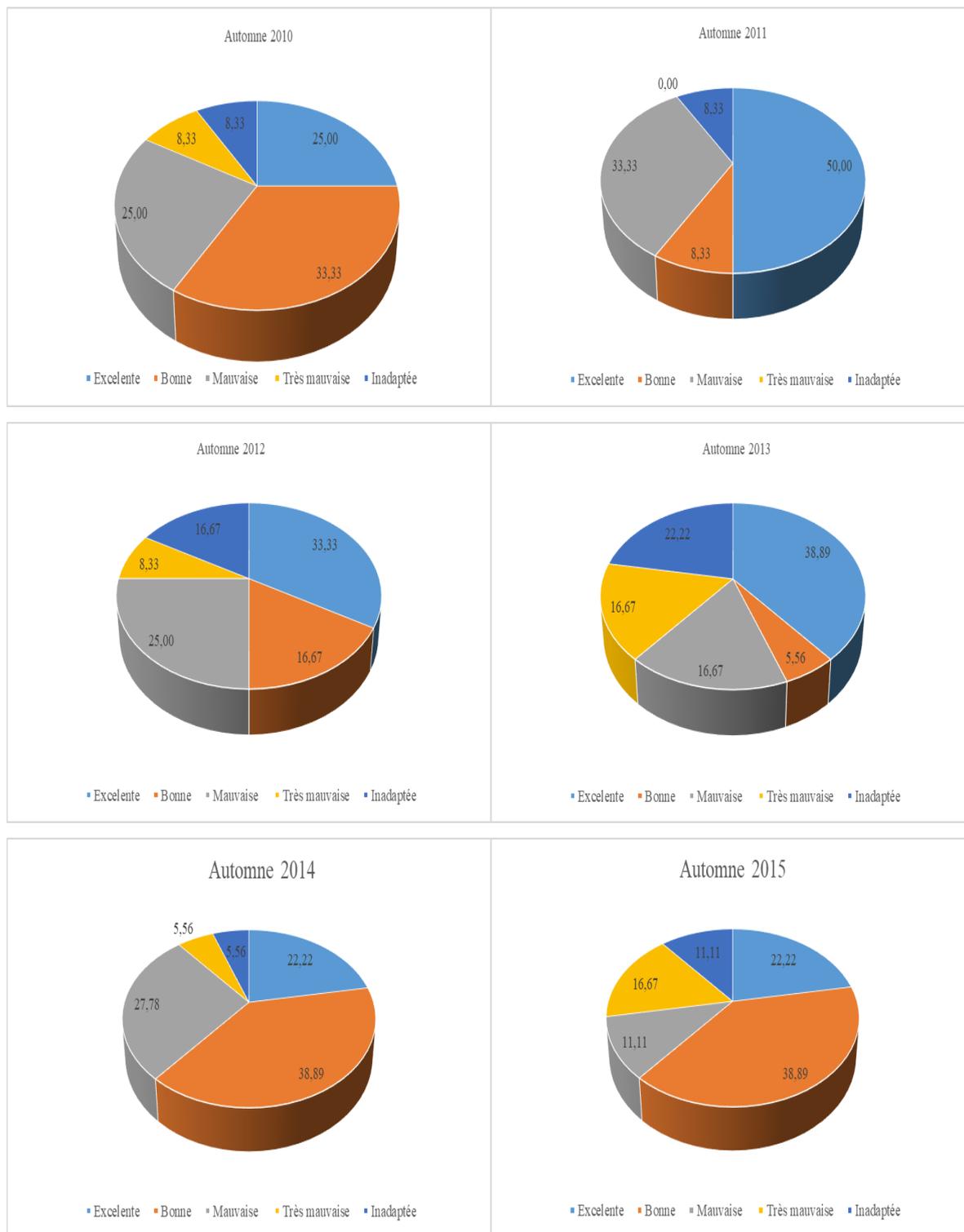


Figure V. 13 : Evolution de la qualité des eaux superficielles de l’Est Algérien (Automne 2010-2015)

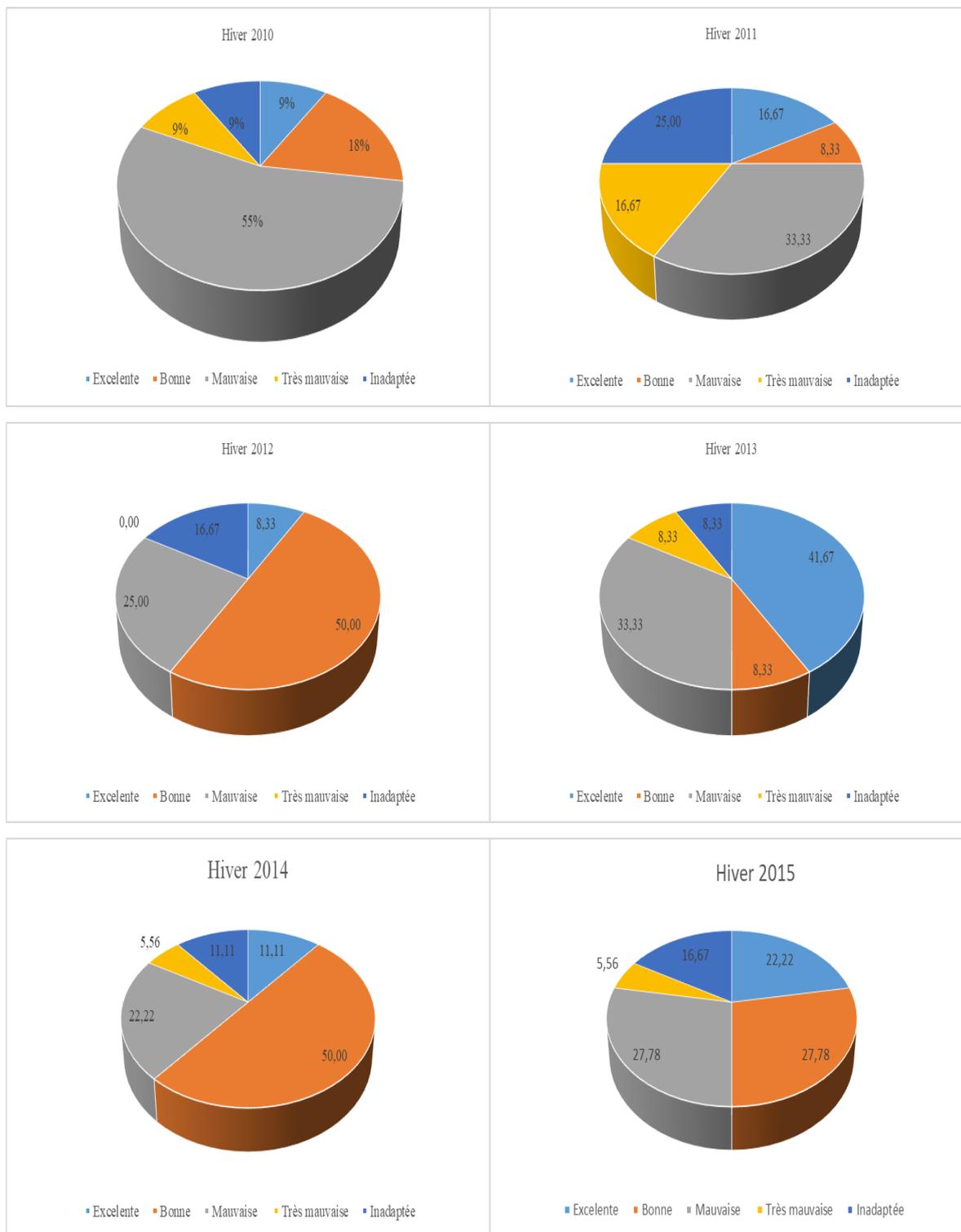


Figure V. 14: Evolution de la qualité des eaux superficielles de l’Est Algérien (Hiver 2010-2015)



Figure V. 15 : Evolution de la qualité des eaux superficielles de l’Est Algérien (Printemps 2010-2015)

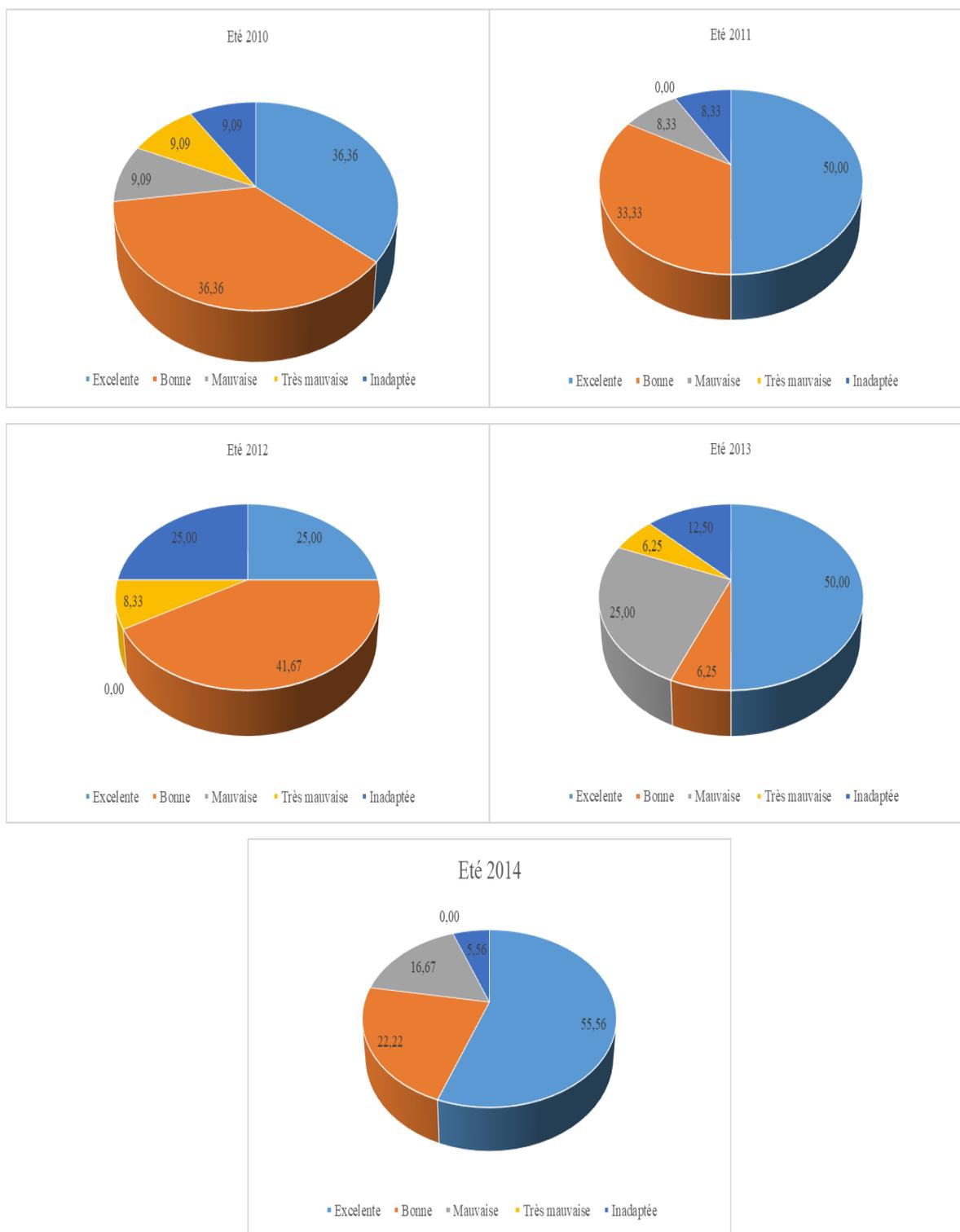


Figure V. 16: Evolution de la qualité des eaux superficielles de l'Est Algérien (Été 2010-2015)

## V.6. CONCLUSION

L'étude hydrochimique entreprise pour les barrages en remblai du Nord Est Algérien a montré que cette série est homogène dans son ensemble, néanmoins les paramètres de pollution ( $\text{NO}_3$ ,  $\text{PO}_4$ , DCO, DBO5 et MO) qui présentent des valeurs des paramètres d'aplatissement de dissymétrie supérieurs à 2. Les différentes corrélations entre les éléments ont montré que le chimisme de l'eau est le résultat d'une contamination naturelle liée à la géologie et d'une action anthropique urbaine, industrielle et agricole.

L'analyse en composantes principales a montré que le facteur 1 est celui de la pollution agricole et la minéralisation alors que le facteur 2 est celui de pH.

Les données chimiques montrent que les eaux des barrages ont une minéralisation moyenne à forte exprimée par un résidu sec allant de 41 à 2600 mg/l. L'examen de la variation de ce chimisme à long terme a permis de voir que les différents éléments chimiques aussi bien les éléments majeurs, mineurs ou de pollution ont une tendance positive suite à une pollution croissante de l'environnement aquatique.

Les résultats de l'analyse des composantes principales ont montré que la variation de qualité d'eau a été expliquée par des sources naturelles (érosion des sols), des sources de pollution ponctuelles et des sources de pollution non ponctuelles (nutriments, les matières organiques, métaux lourds).

Notre étude a fourni une image de la qualité de l'eau à grande échelle en utilisant la méthode de l'IQE et a établi les principaux paramètres affectant la qualité de l'eau. Tout d'abord, l'IQE joue un rôle important dans l'évaluation de la qualité de l'eau, car elle combine plusieurs paramètres environnementaux et les convertit efficacement en une seule valeur qui reflète les conditions de qualité de l'eau. En revanche, lorsqu'on utilise un paramètre unique pour l'évaluation de la qualité de l'eau, les gestionnaires recevront probablement des résultats différents des masses d'eau en fonction des différents paramètres mesurés. Ainsi, les gestionnaires ne savent pas exactement quel paramètre évaluer et quel est l'état général des masses d'eau.

De plus, la qualité de l'eau déterminée par le paramètre le plus altéré ne peut évidemment pas refléter l'état réel de la qualité de l'eau. En tant que valeur d'indicateur intégrée, l'IQE est crucial pour les gestionnaires, qui ont besoin d'informations concises sur la qualité de l'eau plutôt que sur divers résultats d'évaluation selon différentes méthodes. Deuxièmement, comme indiqué ci-

dessus, les variables facilement traitées, en particulier les nutriments, déterminent la qualité de l'eau. Par conséquent, pour améliorer la qualité de l'eau dans les organismes de gestion locaux devraient accorder plus d'attention aux concentrations de nutriments présentes dans l'eau, ainsi qu'aux programmes visant à réduire la pollution par les nutriments. Il convient de mettre davantage l'accent sur la période des basses eaux, qui se caractérise par une qualité de l'eau relativement bonne à mauvaise.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- Abbasi T. and Abbasi S. A. (2012). *Water quality indices*. Elsevier.
- Abdelkader R. (2006). *VULNERABILITE ET RISQUES DE POLLUTION DES EAUX SOUTERRAINES DE LA NAPPE DES SABLES MIOCENES DE LA PLAINE D'EL MA EL ABIOD Nord-Est ALGERIEN*. Université Badji Mokhtar de Annaba.
- Akoteyon I., Omotayo A., Soladoye O. and Olaoye H. (2011). Determination of water quality index and suitability of urban river for municipal water supply in Lagos-Nigeria. *European Journal of Scientific Research* 54(2), 263-71.
- Balan I. N., Shivakumar M. and Kumar P. M. (2012). An assessment of groundwater quality using water quality index in Chennai, Tamil Nadu, India. *Chronicles of young scientists* 3(2), 146.
- Bear J. (1979). *Groundwater hydraulics*. McGraw, New York.
- Belkhiri L. (2011). Étude de la pollution des eaux souterraines: cas de la plaine d'Ain Azel-Est Algérien. *Doctorat en Sciences de l'Université Hadj Lakhdar BATNA, Algérie, 121p*.
- Bhargava D. and Saxena B. (1990). A study of the geopotentials in the Godavary river basin of India. *Asian Environment* 12(2), 36-59.
- Briefert C. and Perraud R. (2007). *Chimie de l'environnement: air, eau, sols, déchets*. De Boeck Supérieur.
- Brown R., McClelland N., Deiniger R. and Oconnor M. (1972). Water quality index-crossing the physical barrier Proc. In: *Int. Conf. on water pollution research, Jerusalem*, pp. 787-97.
- Brown R. M., McClelland N. I., Deininger R. A. and Tozer R. G. (1970). A WATER QUALITY INDEX- DO WE DARE.
- Burton Jr G. A. and Pitt R. (2001). *Stormwater effects handbook: A toolbox for watershed managers, scientists, and engineers*. CRC Press.
- Chaturvedi M. and Bassin J. (2010). Assessing the water quality index of water treatment plant and bore wells, in Delhi, India. *Environmental Monitoring and Assessment* 163(1-4), 449-53.

- Chauhan A. and Singh S. (2010). Evaluation of Ganga water for drinking purpose by water quality index at Rishikesh, Uttarakhand, India. *Report and Opinion* 2(9), 53-61.
- Chowdhury R. M., Muntasir S. Y. and Hossain M. M. (2012). Water quality index of water bodies along Faridpur-Barisal road in Bangladesh. *Glob Eng Tech Rev* 2(3), 1-8.
- Dagnelie P. (1975). Analyse statistique à plusieurs variables.
- 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 Seybouse Nord-Est algérien*. Université de Franche-Comté.
- Djerafi N. K. K. (2012). Etude du transport de soluté réactif dans un milieu poreux chimiquement hétérogène.
- Dunnette D. (1979). A geographically variable water quality index used in Oregon. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 53-61.
- Dwivedi S., Tiwari I. and Bhargava D. (1997). Water quality of the river Ganga at Varanasi. *JOURNAL-INSTITUTION OF ENGINEERS INDIA PART EN ENVIRONMENTAL ENGINEERING DIVISION*, 1-4.
- Fernández N., Ramírez A. and Solano F. (2004). PHYSICO-CHEMICAL WATER QUALITY INDICES-A COMPARATIVE REVIEW-. *Bistua Revista de la Facultad de Ciencias Basicas* 2(1).
- Fryar A. E., Macko S. A., Mullican III W. F., Romanak K. D. and Bennett P. C. (2000). Nitrate reduction during ground-water recharge, Southern High Plains, Texas. *Journal of contaminant hydrology* 40(4), 335-63.
- Galvez-Cloutier R., Ize S. and Arsenault S. (2002). Manifestations et moyens de lutte contre l'eutrophication. *Vecteur environnement* 35(6), 18.
- Hiscock K., Lloyd J. and Lerner D. (1991). Review of natural and artificial denitrification of groundwater. *Water Research* 25(9), 1099-111.
- Horton R. K. (1965). An index number system for rating water quality. *Journal of Water Pollution Control Federation* 37(3), 300-6.
- JORA (2011). Décret exécutif n° 11-125 du 17 Rabie Ethani 1432 correspondant au 22 mars 2011 relatif à la qualité de l'eau de consommation humaine, JO N°18. *journal officiel*.
- Kaiser H. F. (1960). The application of electronic computers to factor analysis. *Educational and psychological measurement* 20(1), 141-51.
- Kanade S. and Gaikwad V. (2011). A multivariate statistical analysis of bore well chemistry data: Nashik and Niphad Taluka of Maharashtra, India. *Universal Journal of Environmental Research and Technology* 1(2), 193-202.
- Kempe S. (1982). Long-term records of CO<sub>2</sub> pressure fluctuations in fresh waters. *SCOPE/UNEP Sonderband* 52, 91-332.
- Lacroix A. (1995). Les solutions agronomiques à la pollution azotée. *Le Courrier de l'environnement de l'INRA* 24(24), 29-42.
- Le Guen M. (2001). La boîte à moustaches de TUKEY, un outil pour initier à la statistique. *Statistiquement votre-SFDS*(4), 1-3.

- Lhadi E., Mountadar M. and Tounsi A. (1996). Pollution par les nitrates des eaux souterraines de la zone littorale de la province d'el Jadida.(Maroc). *Hydrogéologie* 3, 21-3.
- Lumb A., Halliwell D. and Sharma T. (2002). Canadian Water Quality Index (CWQI) to monitor the changes in water quality in the Mackenzie River–Great Bear. In: *Proceedings of the 29th Annual aquatic toxicity workshop, Oct*, pp. 21-3.
- Lyamine M. (2008). *Modélisation de l'Impact de la Pollution Industrielle Hydrique dans le Golfe de Skikda (Littoral Est algérien)*. Université Badji Mokhtar de Annaba.
- Mariotti A. (1994). Dénitrification in situ dans les eaux souterraines, processus naturels ou provoqués: une revue. *Hydrogéologie* 3, 43-68.
- Mc Kinney M. (2002). Urbanization, Conservation and Biodiversity.
- Molla M. M. A., Saha N., Salam S. M. A. and Rakib-uz-Zaman M. (2015). Surface and groundwater quality assessment based on multivariate statistical techniques in the vicinity of Mohanpur, Bangladesh. *International Journal of Environmental Health Engineering* 4(1), 18.
- Mulliss R., Revitt D. and Shutes R. (1997). The impacts of discharges from two combined sewer overflows on the water quality of an urban watercourse. *Water Science and Technology* 36(8-9), 195-9.
- Rao C. S., Rao B. S., Hariharan A. and Bharathi N. M. (2010). Determination of water quality index of some areas in Guntur district Andhra Pradesh. *International Journal of Applied Biology and Pharmaceutical Technology* 1(1), 79-86.
- Rodier J., Legube B., Merlet N. and Brunet R. (2009). *L'analyse de l'eau-9e éd.: Eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer*. Dunod.
- WHO (2011). Guidelines for drinking-water quality. *WHO chronicle* 38, 104-8.
- Yogendra K. and Puttaiah E. (2008). Determination of water quality index and suitability of an urban waterbody in Shimoga Town, Karnataka. In: *Proceedings of Taal2007: The 12th world lake conference*, p. 346.

## *CHAPITRE VI*

*Hydrochimie des eaux de  
barrages & les eaux de fuites.*

*« Ain Dalia, Hammam*

*Debagh et Zit Emba »*

## VI.1. INTRODUCTION

La qualité de l'eau de surface est affectée par l'activité anthropique et les processus naturels.

Les processus naturels qui influent sur la qualité de l'eau comprennent le taux des précipitations, les processus d'altération et le transport des sédiments, tandis que les activités anthropiques comprennent le développement urbain, l'expansion industrielle et les pratiques agricoles. Par conséquent, une gestion efficace à long terme de l'eau du barrage nécessite une compréhension fondamentale des caractéristiques chimiques et biologiques. Cependant, en raison de variations temporelles de la qualité de l'eau (qui sont souvent difficiles à interpréter), un programme de surveillance, fournissant une estimation fiable et représentative de la qualité des eaux de surface, est nécessaire (Shrestha & Kazama 2007). Plusieurs études (Bouguerne *et al.* 2017) ont signalé les effets des effluents agricoles, industriels et urbains sur la qualité des eaux de surface.

Pour cette partie de la thèse notre choix s'est porté sur trois barrages de la liste étudiés dans le chapitre précédent pour voir les caractéristiques des eaux de la cuvette et ceux des fuites afin de déduire l'effet de la digue comme filtre sur la qualité et par la suite étudier l'aptitude de ces eaux en fonction de leurs débits.

L'évaluation de la qualité des eaux des trois barrages d'amont en aval a nécessité la réalisation de plusieurs campagnes de prélèvement (basse et haute eaux de l'année hydrologique 2016/2017). Les eaux prélevées ont fait l'objet de plusieurs analyses in situ et au niveau du laboratoire. Ici on décrit les principes de base pour les techniques de prélèvement, ainsi que les analyses physicochimiques de l'eau et leurs résultats. Etude de la qualité des eaux et l'aptitude.

## VI.2. ÉCHANTILLONNAGES ET TECHNIQUES D'ANALYSES

La composition chimique d'une eau joue un rôle important dans la détermination de sa qualité (Schuiling *et al.* 2005), par conséquent, son attribution pour l'alimentation en eau potable ou d'autres usages (irrigation, industrie...etc.) (Debieche 2002).

Afin d'avoir des analyses représentatives et fiables, la méthode d'échantillonnage exige une réflexion préalable et une précaution attentive de prélèvement, ainsi on a essayé de répondre aux critères suivants :

- Périodes d'échantillonnage (hautes eaux et basses eaux) ;
- Lieux d'échantillonnage (cuvettes et drains) ;
- Paramètres analysés sur terrain ;
- Paramètres analysés au laboratoire.

Pour suivre l'évolution des paramètres chimiques dans la région d'étude, on s'est intéressé uniquement aux eaux de surface prélevées de la cuvette et ceux des drains (nommées les eaux avales).

Des étapes doivent être respectées pour le prélèvement des échantillons et qui sont :

- Rincer la bouteille et le bouchon avec l'eau prélevée (jamais de la surface) ;
- Egoutter la bouteille le col vers le bas plonger la bouteille dans l'eau le col vers le bas ;
- Mettre la bouteille inclinée avec un angle de  $45^\circ$ , le col vers le haut face au courant ;
- Remplir la bouteille lentement sans barbotage ;
- Quand la bouteille est pleine faire bouger la bouteille dans tous les sens pour éliminer toutes les bulles en contact avec les parois ;
- Fermer la bouteille en faisant attention à ne pas prisonnier des bulles d'air ;

Pour les prélèvements où on utilise des seaux il faut s'assurer de rincer la corde et le seau par l'eau de la cuvette, il faut aussi s'assurer que la hauteur d'eau est suffisante ne jamais toucher le fond, et il faut homogénéiser l'eau prélevé avant de remplir les flacons déjà rincés.

Le travail a consisté à effectuer des prélèvements, dans six points trois points en amonts dans les trois cuvettes et trois points en aval dans les drains.

### VI.3. ANALYSE STATISTIQUE DES DONNEES PHYSICO-CHIMIQUES.

Cette analyse concerne les résultats des analyses chimiques des eaux amonts et avales des trois barrages. Elle nous permettra d'avoir une vision globale des relations qui peuvent exister entre différents paramètres mesurés ainsi que les tendances que présentent les observations. Ces relations vont être interprétées au fur et à mesure.

Nous commençons en premier lieu par une étude statistique simple, une matrice de corrélation entre les variables. Les paramètres analysés sont : température de l'eau T, CE, pH,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $NO_2^-$ ,  $PO_4^{3-}$ ,  $NH_4^+$ , demande chimique en oxygène (DCO), oxygène dissout (OD), dureté, aluminium,  $Pb^+$ ,  $Cu^{2+}$  et  $Zn^{2+}$ , (Tableau VI. 1).

Tableau VI. 1 : Statistiques descriptives

Paramètres	unités	Min	Moy	Max	Normes OMS	Normes Algérienne
T	°C	13.3	18.17	22.80	25	/
pH	-	5.71	6.74	8.57	6,5 à 8,5	6,5 à 8,5
CE	µs/cm	334.00	783.75	1559.00	1500	2800 à 20°C
$Ca^{++}$	mg/l	40.08	76.82	107.82	200	75 à 200
$Mg^{++}$	mg/l	5.19	11.69	28.10	150	150
$Na^+$	mg/l	22.00	107.25	302.00	200	200
$K^+$	mg/l	0.81	3.35	7.94	12	20
$Cl^-$	mg/l	0.41	1.49	2.78	≤ 250	200 à 500
$NO_3^-$	mg/l	0.69	1.16	1.75	≤ 50	≤ 50
$NO_2^-$	mg/l	0	0.1	0.23	≤ 0,1	≤ 0,1
$NH_4^+$	mg/l	0.01	0.24	0.37	≤ 0,5	≤ 0,5
$PO_4^{3-}$	mg/l	0.01	0.17	0.55	≤ 0,5	/
DCO	mg O <sub>2</sub> /l	10.56	38.57	81.10	30	/
O <sub>2</sub> dis	mg O <sub>2</sub> /l	2.03	7.18	9.46	5 ≤ O <sub>2</sub> ≤ 8	/
Al	mg/l	0.00	0.11	0.37	0.1	0.2
Pb <sup>+</sup>	mg/l	0.01	0.06	0.12	0,01	10 µg/l
$Cu^{2+}$	mg/l	0.10	0.22	0.36	2	2
$Zn^{2+}$	mg/l	0.00	0.01	0.04	3	5
Dureté	mg/l	2.33	11.96	29.40	< 100	/

### **VI.3.1. Corrélation entre les paramètres physico-chimiques**

On remarque une dépendance étroite entre quelques paramètres (pH, Ca, Mg, Na, CE, DCO, NO<sub>2</sub>, Cl, O<sub>2</sub>, K, Al, PO<sub>4</sub>, NH<sub>4</sub> et dureté) pour les hautes eaux et (T, Ca, Mg, CE, NO<sub>2</sub>, Cl, O<sub>2</sub>, K, PO<sub>4</sub>, NH<sub>4</sub> et dureté) pour les basses eaux. Cette relation se traduit par les coefficients de corrélation se rapprochant de "1" (Annexe 4). Les liens significatifs peuvent être probablement attribués à des origines communes de ces éléments.

## **VI.4. ANALYSE DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES**

### **VI.4.1. Les mesures in situ**

Les mesures réalisées sur le terrain (in situ) sont réservées aux éléments très sensibles au changement du milieu ambiant tel que : la température, l'oxygène dissous, la conductivité, le pH,.....etc. Les mesures doivent être effectuées juste après le prélèvement de l'eau pour qu'elle soit représentative.

Tout instrument avant d'être utilisé doit passer par le calibrage et l'étalonnage au laboratoire.

#### **VI.4.1.1. Température**

La mesure de la température sur site est impérative, pour plusieurs raisons, vu qu'elle change facilement surtout c'est l'écart avec la température de l'air est grand, et l'heure du transport on utilise des instruments pour baisser la température. La température de l'eau joue un rôle important par exemple en ce qui concerne la solubilité des sels et des gaz dont, entre autres, l'oxygène nécessaire à l'équilibre de la vie aquatique. Par ailleurs, la température accroît les vitesses des réactions chimiques et biochimiques d'un facteur 2 à 3 pour une augmentation de température de 10 degrés Celsius (°C) (Leynaud 1968).

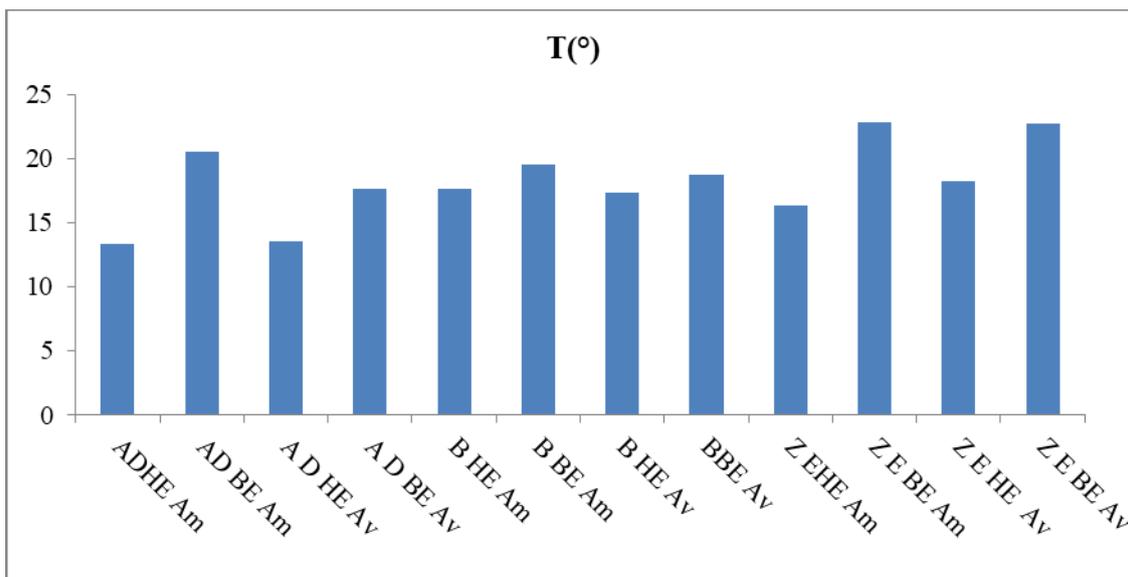


Figure VI. 1 : Variation de la température

Les eaux des trois barrages montrent des températures saisonnières qui oscillent entre 13 à 20°C pour Ain Dalia de 17 à 19 °C pour le Hammam Debagh et de 16 à 22 pour Zit Emba (Figure VI. 1). Ces valeurs sont en parfaite concordance avec le climat et les saisons.

#### VI.4.1.2. Oxygène dissous

L'oxygène représente environ 35 % des gaz dissous dans l'eau. Sa forme dissoute est d'une importance primordiale dans les eaux de surface puisqu'elle conditionne les processus d'auto-épuration et de préservation de la vie aquatique (Gaujous 1995).

La saturation en oxygène de l'eau à la température considérée est assurée par les échanges gazeux entre l'eau et l'atmosphère à travers l'interface air- eau. Ainsi,

Le pourcentage de saturation diminue avec la température. Plus la température de l'eau est faible, plus la solubilité de l'oxygène est importante et plus la résistance physiologique des organismes aquatiques est élevée.

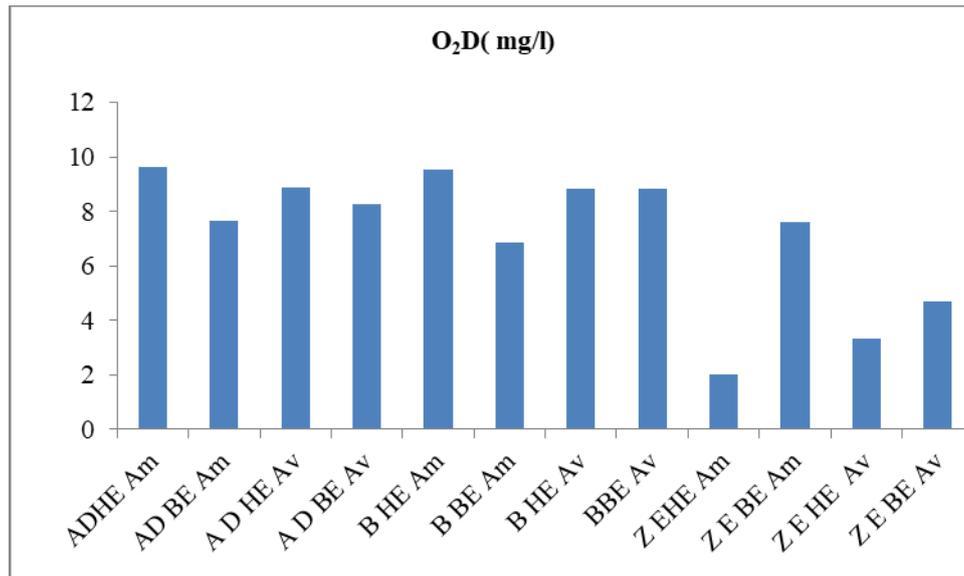


Figure VI. 2:Variation de l'oxygène dissous

A l'échelle saisonnière, la teneur en oxygène dissous est plus importante en période pluvieuse qu'en période sèche pour les trois barrages. (Figure VI. 2). Le grand volume d'eau permet de dissoudre une grande quantité d'oxygène.

#### VI.4.1.3. Conductivité

La conductivité électrique désigne la capacité de l'eau à conduire un courant électrique et elle est déterminée par la teneur en substances dissoutes, la charge ionique, la capacité d'ionisation, la mobilité et la température de l'eau. Par conséquent, elle renseigne sur le degré de minéralisation d'une eau (Schuiling *et al.* 2005).

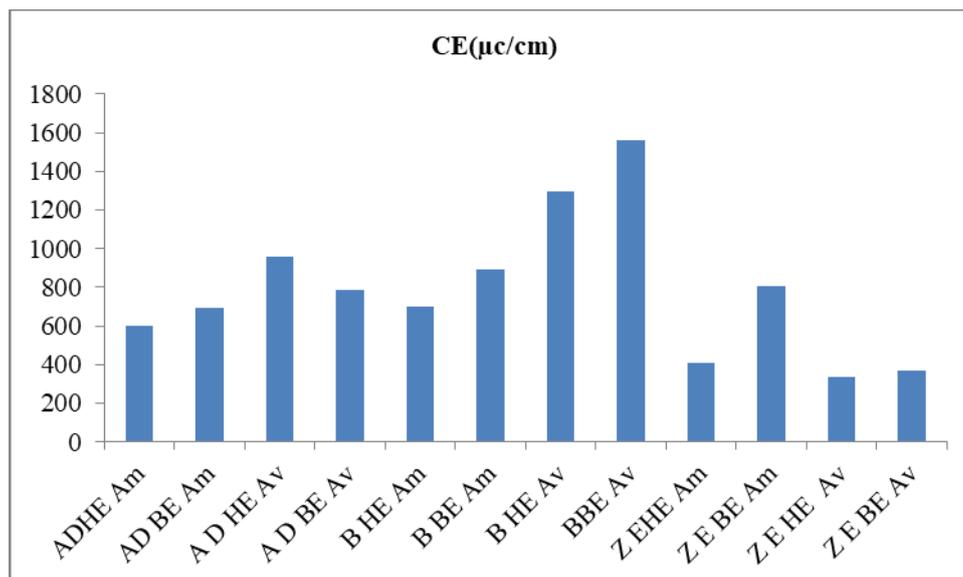


Figure VI. 3: Variation de la conductivité électrique

Les eaux amont des trois barrages sont marquées par une charge ionique moins que les eaux d'aval. La charge ionique des eaux Zit Emba ne semble pas suivre cette logique à cause des rejets industriels à l'aval.

Les eaux sont moins chargées en aval (Ain Dalia et Hammam Debagh) qu'en aval. Au fur et à mesure de l'écoulement la dissolution des minéraux, s'accroît et l'Oued a tendance à se charger en sels dissous.

Le maximum a été enregistré au cours de la période estivale, cette valeur maximale est expliquée par l'évaporation de l'eau, celle-ci induisant une augmentation de la concentration des sels dissous. Les valeurs minimales sont enregistrées à la période d'hiver presque pour tous les barrages, ce qui est probablement liée à la dilution des eaux par les précipitations, et aussi la diminution de la solubilité des sels et de la mobilité des ions avec la diminution de la température des eaux. Les résultats ont montré aussi que les eaux du barrage sont moyennement minéralisées, et que la conductivité de l'eau respecte toujours les normes de l'eau.

#### VI.4.1.4. Potentiel d'hydrogène

Le pH définit le caractère de l'eau si il est acide ou base à l'aide de la concentration des ions d'hydrogène  $H^+$ , il conditionne plusieurs phénomènes ou processus chimique tel que la dissociation ammoniacal de l'azote, et plusieurs phénomènes biologiques plus particulièrement la photosynthèse. La mesure doit être effectuée in situ pour éviter tout changement de la composition ionique due au transport ou stockage.

Le pH d'une eau naturelle dépend de l'origine de celle-ci et de la nature des terrains traversés. Des eaux issues de massifs cristallins auront un pH plutôt acide. A l'inverse, des eaux provenant de régions calcaires auront un pH plutôt basique.

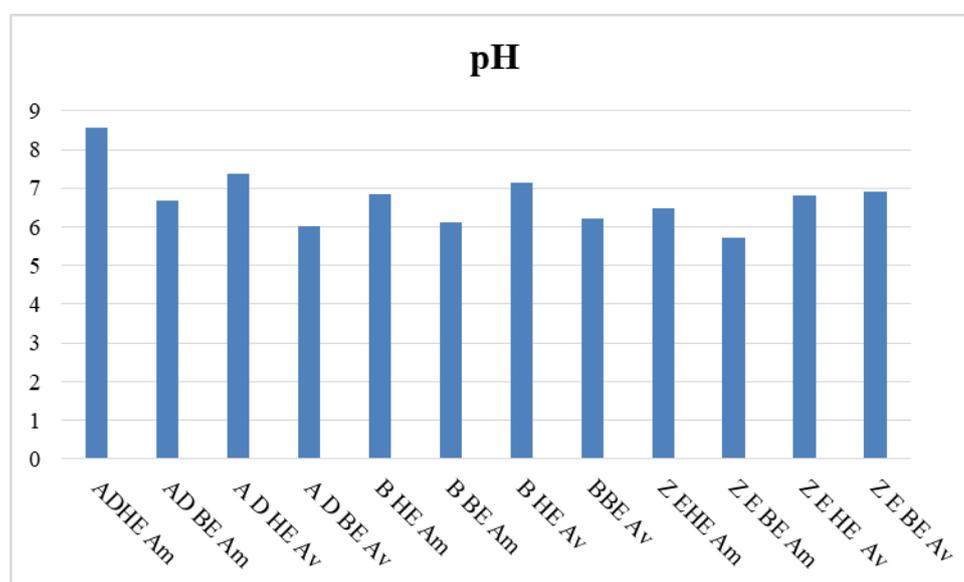


Figure VI. 4:Variation du potentiel d'hydrogène

Le pH influence la plupart des mécanismes chimiques et biologiques dans les eaux. Habituellement, les valeurs du pH se situent entre 6 et 8,5 dans les eaux naturelles (Chapman & Kimstach 1996). Il diminue en présence des teneurs élevées en matière organique et augmente en période d'étiage, lorsque l'évaporation est importante (Chapman & Kimstach 1996).

La norme internationale du pH pour l'eau potable varie entre 6.5 et 8.5 (WHO 2011) donc ces eaux sont conformes à ces normes et également aux normes Algériennes. Pour les trois barrages, l'eau est nettement alcaline ce qui traduit la présence d'une eau calcaire.

#### VI.4.1.5. La dureté totale

Ce paramètre représente la teneur de l'eau en sels de métaux alcalino-terreux (sels de calcium, magnésium, strontium et baryum). Etant donné que le strontium et le baryum sont souvent présents dans l'eau sous forme de traces, la dureté totale se réduit à sa concentration en ions calcium et magnésium, exprimés en milli moles par litre ou en milligrammes par litre (mmol/l ou mg/l) ou en degré français (°F) (McNeely *et al.* 1979).

La présence des ions  $Ca_2^+$  et  $Mg_2^+$  dans l'eau est liée principalement à deux origines naturelles soit la dissolution des formations carbonatées ( $CaCO_3$ ,  $MgCO_3$ ,  $CaMg(CO_3)_2$ ), soit la dissolution des formations gypseuses ( $CaSO_4$ ) ou de la magnésite ( $MgCO_3$ ) (Desjardins 1997).

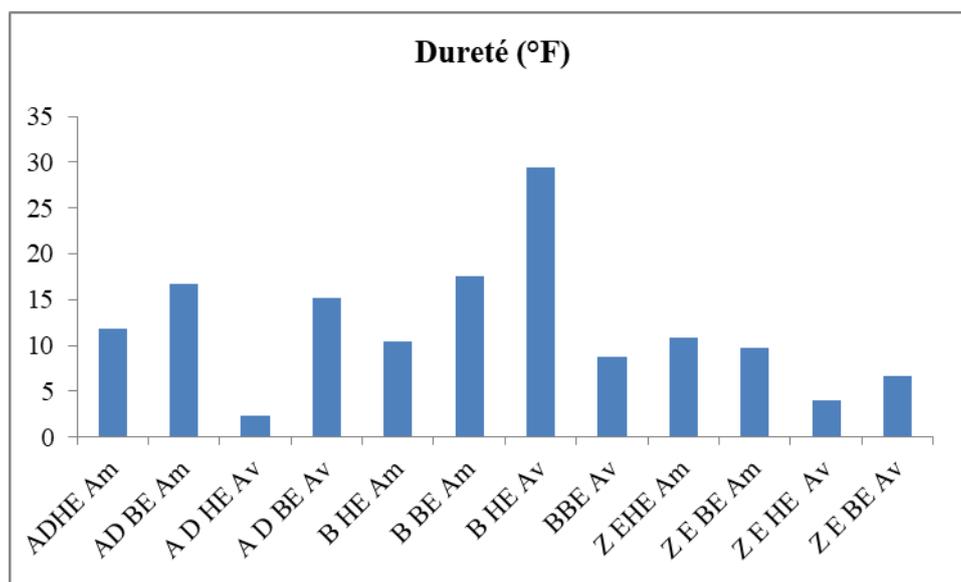


Figure VI. 5:Variation de la dureté totale

## Chapitre 6 : HYDROCHIMIE DES EAUX DES BARRAGES ET LES EAUX DE FUTTES.

### « Ain Dalia ; Hammam Debagh & Zit Emba »

Tableau VI. 2 : Classification de l'eau selon la dureté totale.

D.T (en °F)	0-7	7-15	15-25	25-42	>42
	Très douce	Douce	Moyennement dure	Dure	Très dure
Ain Dalia HE Amont		*			
Ain Dalia BE Amont		*			
Ain Dalia HE Aval	*				
Ain Dalia BE Aval		*			
H-Debagh HE Amont		*			
H-Debagh BE Amont			*		
H-Debagh HE Aval				*	
H-Debagh BE Aval		*			
Zit Emba HE Amont		*			
Zit Emba BE Amont		*			
Zit Emba HE Aval	*				
Zit Emba HE Aval	*				

Les eaux de Ain Dalia, Hammam Debagh et Zit Emba sont très douces à douce celle de Hammam Debagh amont est moyennement dure et ceux d'aval dure (Tableau VI. 2). On s'aperçoit que les eaux de barrage Zit Emba sont de qualité meilleure par rapport à ceux des deux autres.

**VI.4.2. Eléments minéraux majeurs**

**VI.4.2.1. Cations**

VI.3.2.1.1. Calcium, magnésium, sodium et potassium

Le dosage de ces 4 éléments est effectué par spectrophotométrie UV. Au laboratoire les éléments mesurés en utilisant un spectrophotomètre (DR 2800, DR 3900).

Les teneurs en Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup>, Na<sup>+</sup> et K<sup>+</sup> sont exprimées en mg/l. Les résultats sont résumés dans Figure VI. 6.

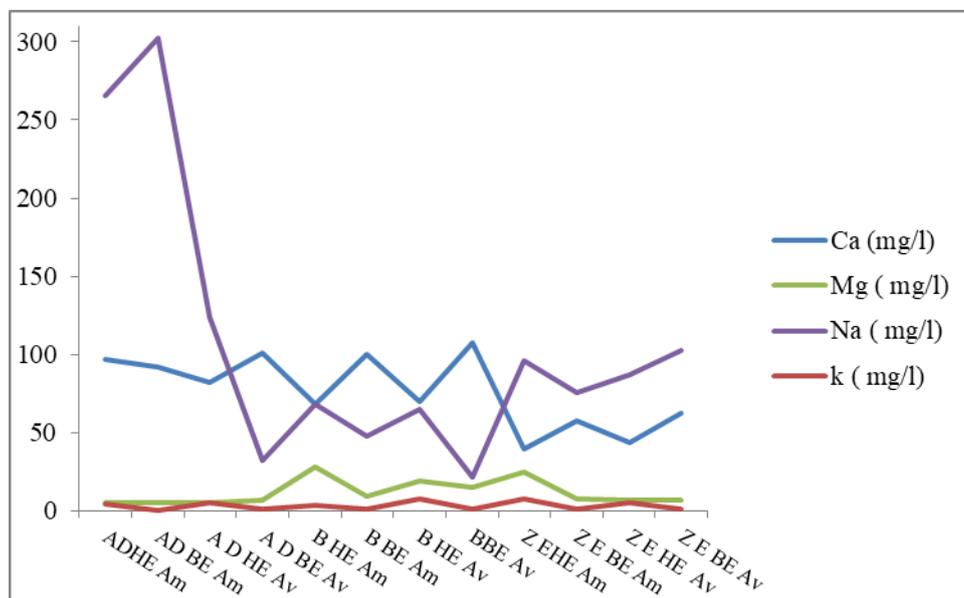


Figure VI. 6: Variation de calcium, magnésium, sodium et potassium

Pendant la saison humide, les concentrations de ces éléments sont les plus élevés au niveau amont des barrages, pour la saison sèche, les concentrations les plus élevées est le calcium.

**VI.4.2.2. Anions**

a. Chlorures ( $\text{Cl}^-$ )

Très répandus dans la nature, généralement sous forme de sels de sodium ( $\text{NaCl}$ ), de potassium ( $\text{KCl}$ ) et de calcium ( $\text{CaCl}_2$ ), les ions chlorures ( $\text{Cl}^-$ ), dans la plus grande partie se trouvent dans les océans, constituent environ 0.05 % de la lithosphère (partie solide de la sphère terrestre). De façon générale,  $\text{Cl}^-$  est présent dans toutes les eaux à des concentrations variables. Le dosage des chlorures se fait selon la méthode spectrophotométrie. Cette petite variation entre l'amont et l'aval est probablement due au parcours de ces eaux à travers la digue et l'apport des eaux de ruissèlement.

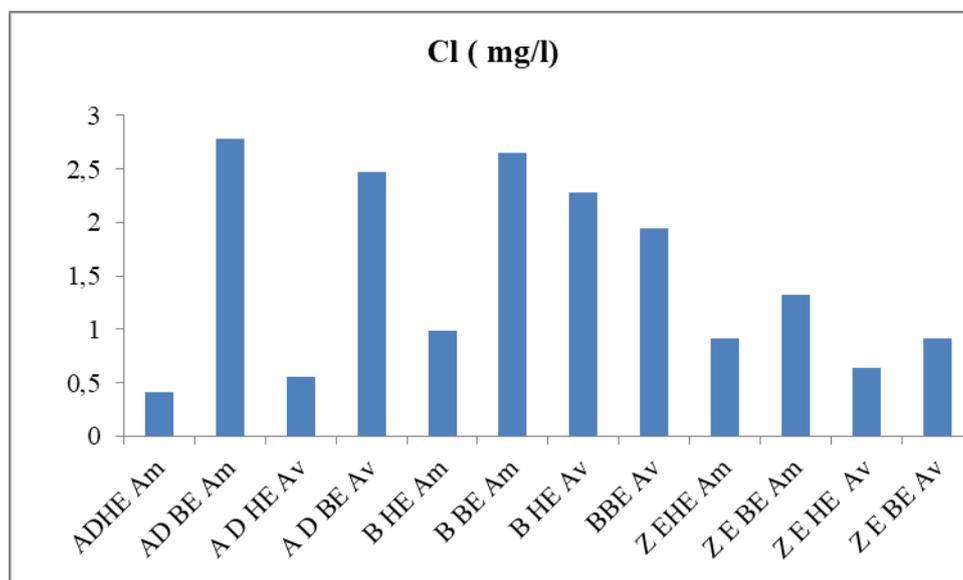


Figure VI. 7:Variation de chlorures

La variation des chlorures est des trois barrages n'est pas identique. Les valeurs des chlorures amont sont plus élevées qu'en aval pour les trois cas.

### VI.4.2.3. Paramètres de pollution

#### a. Demande chimique en oxygène (DCO)

La demande chimique en oxygène est la quantité d'oxygène nécessaire pour obtenir une oxydation complète des matières organiques et minérales présentes dans l'eau. Certaines matières contenues dans l'eau dans l'eau sont oxydées par un excès de dichromate de potassium, en milieu acide en présence de sulfate d'argent et de sulfate de mercure. L'excès de dichromate de potassium est dosé par le sulfate de fer et d'ammonium (Rodier *et al.* 2009). La DCO est exprimée en mg/l d'O<sub>2</sub> consommé par les matières oxydables dans un litre d'eau. La variation de DCO montre une certaine corrélation avec l'O<sub>2</sub> dissous et la température; globalement la DCO diminue de l'hiver vers l'été montrant une activité de biodégradation au fur et à mesure que la température augmente; ceci s'accompagnant par une consommation de l'oxygène.

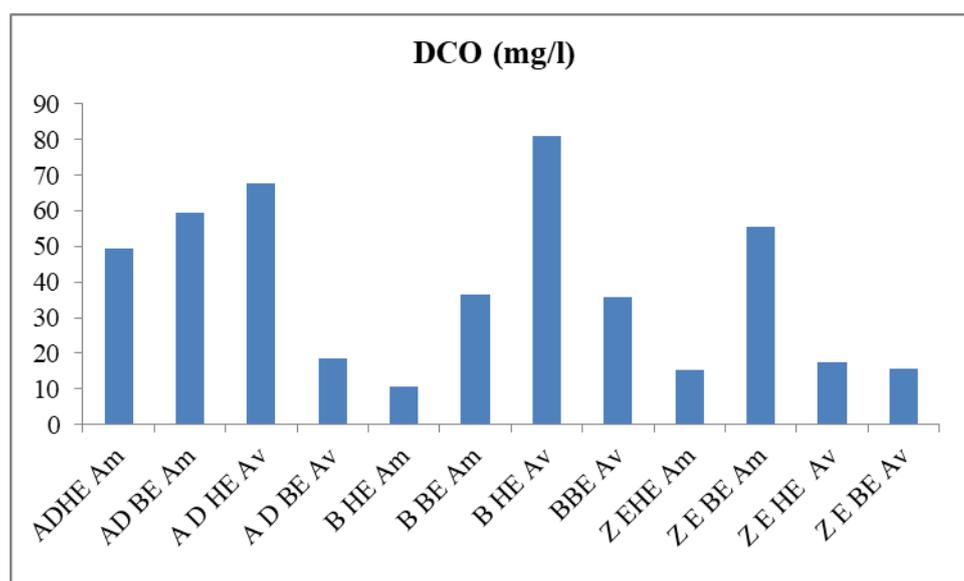


Figure VI. 8:Variation de la demande chimique en oxygène

Les valeurs de la demande chimique en oxygène obtenues présentent des variations moins fluctuantes à l'exception celle du barrage Hammam Debagh où un grand pic est enregistré en aval (Figure VI. 8).

#### VI.4.2.4. Composés azotés

##### a. Ammonium ( $NH_4^+$ )

Les résultats de la teneur en ion ammonium sont exprimés en mg/l de  $NH_4$ . Les valeurs de l'azote ammoniacal présentent des fluctuations importantes dans l'espace et dans le temps dépendant essentiellement du lieu de prélèvement et de la période pluvieuse (Figure VI. 9). Au niveau des basses eaux les valeurs enregistrées en aval est plus important qu'en amont.

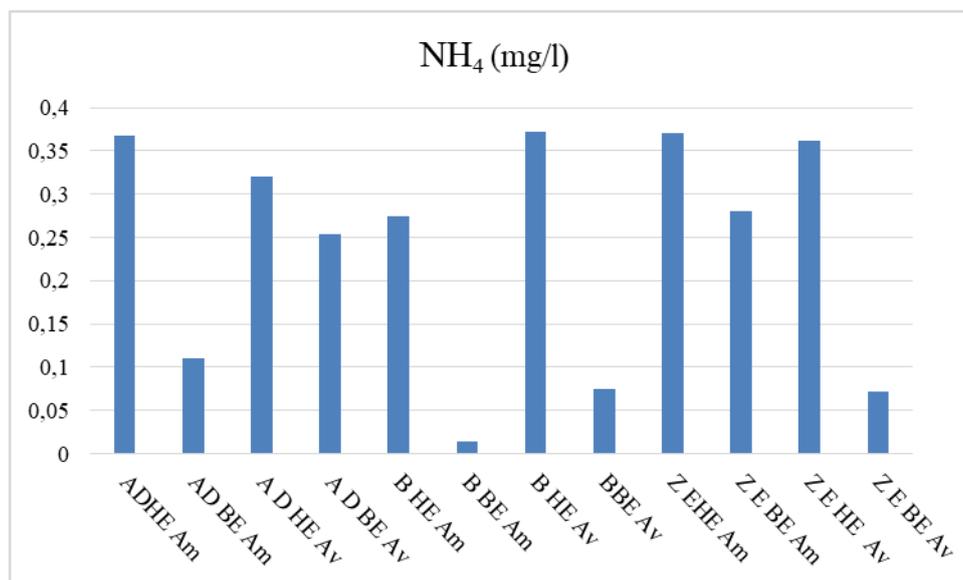


Figure VI. 9: Variation de l'ammonium

##### b. Nitrites ( $NO_2^-$ )

Les teneurs en nitrites montrent des variations importantes s'observant d'une station à l'autre et d'un prélèvement à l'autre (Figure VI. 10). La teneur la plus faible est relevée en basses eaux pour les eaux de cuvettes et l'aval des barrages.

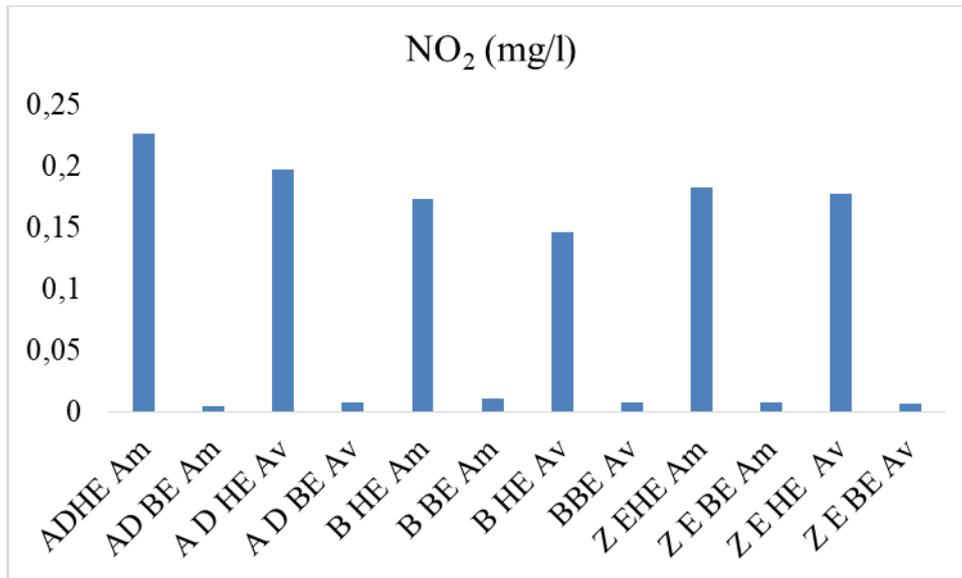


Figure VI. 10: Variation des nitrites

c. Nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)

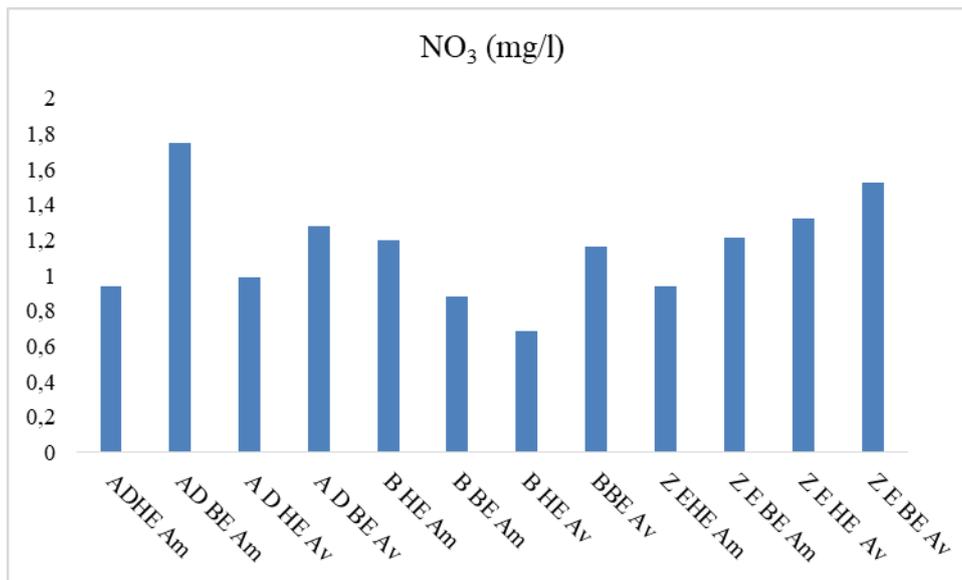


Figure VI. 11: Variation des nitrates

*d. Phosphates ( $PO_4^{-2}$ )*

Les teneurs en phosphates présentent des fluctuations importantes variant surtout durant la période pluvieuse.

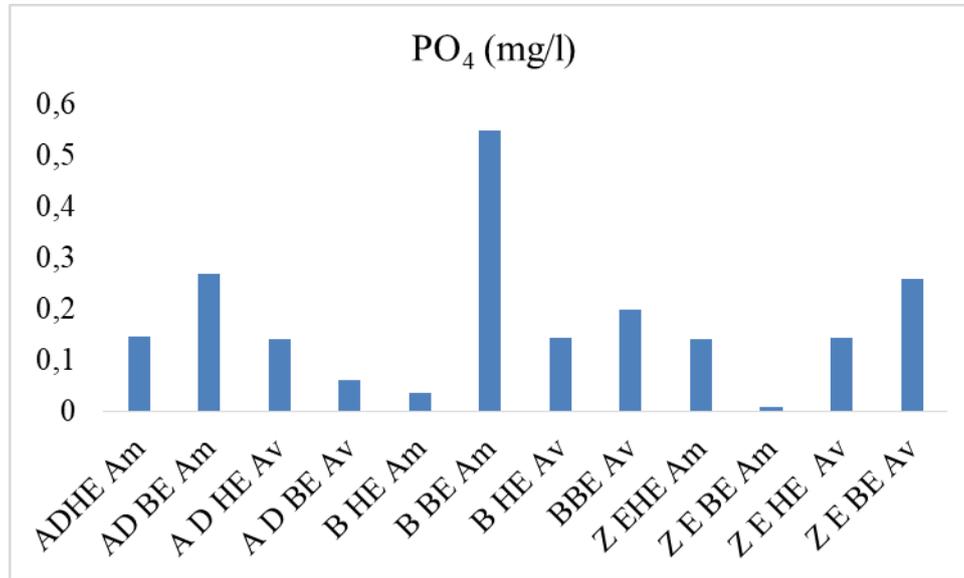


Figure VI. 12: Variation des phosphates

**VI.4.2.5. Eléments traces métalliques**

Les teneurs des métaux lourds (Cr, Cu, Pb et Zn) sont déterminées dans l'eau par spectrophotométrie.

La variation des métaux lourds diminue d'amont en aval pour les trois barrages. Sauf pour le barrage de Hammam Debagh ou la concentration du plomb des eaux avales est plus élevées qu'amont (Figure VI. 13).

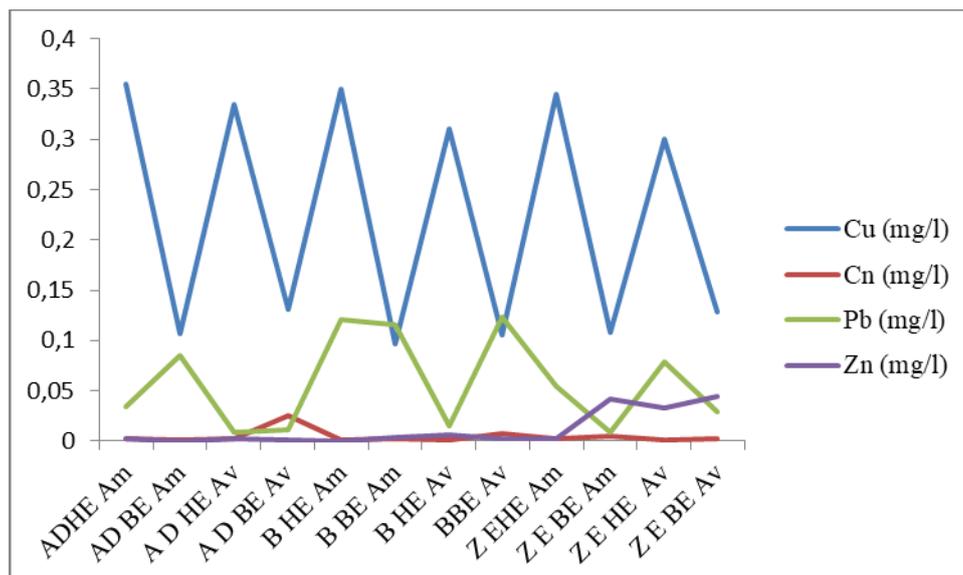


Figure VI. 13: Variation des éléments traces métalliques

## VI.5. QUALITE DES EAUX DE BARRAGES AMONT

### VI.5.1. Facies chimiques des eaux

Nombreuses sont les méthodes qui permettent la représentation graphique des caractéristiques physico-chimiques de l'eau. Nous nous limiterons ici au diagramme de PIPER, il est couramment utilisé dans la littérature. Ce diagramme est établi par le logiciel mis au point par Simler (2004) affilié au laboratoire d'hydrogéologie d'Avignon. Le diagramme de piper permet la visualisation d'un grand nombre d'analyse et de suivre l'évolution de chimisme des eaux superficielles.

Un avantage de ce diagramme est qu'il permet de représenter sur un même graphique de nombreuses analyses autorisant des regroupements par famille présentant des faciès similaires. Ce point peut s'avérer particulièrement intéressant dans le cadre du suivi de la qualité d'une eau dans le temps, pour laquelle on dispose de plusieurs analyses physico-chimiques, ou dans le cadre d'études régionales de comparaison de divers points.

Les analyses d'eau de la région d'étude représentées sur le diagramme de piper en utilisant le logiciel **Diagrammes** (Logiciel d'hydrochimie en distribution libre par Roland SIMLER' Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon') a permis de donner une idée sur le faciès chimique des eaux des barrages Ain Dalia, Hammam Debagh & Zit Emba et de mettre, ainsi, en évidence l'incidence de la géologie sur la qualité des eaux.

L'interprétation du diagramme diagramme de Piper pour les campagnes hautes eaux et basses eaux des figures VI.14 et VI.15, a permis de mettre en évidence une concentration très nette du nuage des points localisés dans la partie supérieure. Il montre donc un enrichissement en chlorures et en sulfates. Un faciès dominant regroupant une famille Chlorurée-Sulfatée-Sodique et un faciès secondaire sulfato-sodique mettant en évidence des terrains riches en sulfates et en chlorures.

Notons que les cations calciques et sodium et potassium marquent la totalité des points représentés sur le triangle des cations, donnant des indications sur l'origine de ces eaux.

Ainsi, le calcium provient du lessivage des calcaires, alors que le magnésium et le sodium tirent leur origine des argiles.

Bien que les eaux se regroupent dans trois familles chimiques d'apparence différentes, mais on peut penser qu'elles ont la même origine et sont interdépendantes.

Elles sont toutes le résultat de la dissolution des roches évaporitiques. Ce caractère mixte des eaux étudiées nous amène à définir la relation entre les familles chimiques caractérisant ces eaux.

Les résultats d'analyse portés sur le diagramme de Piper confirment l'origine commune de ces eaux. Elles se regroupent en un seul pôle influencé par la dissolution des minéraux évaporitiques. Cette dissolution a générée plusieurs éléments chimiques, notamment les sulfates, les chlorures, le magnésium, le calcium et le sodium.

Cette concentration au centre des observations n'est pas assez marquée pour le triangle des anions. Ces dernières ont tendance à s'aligner vers les chlorures.

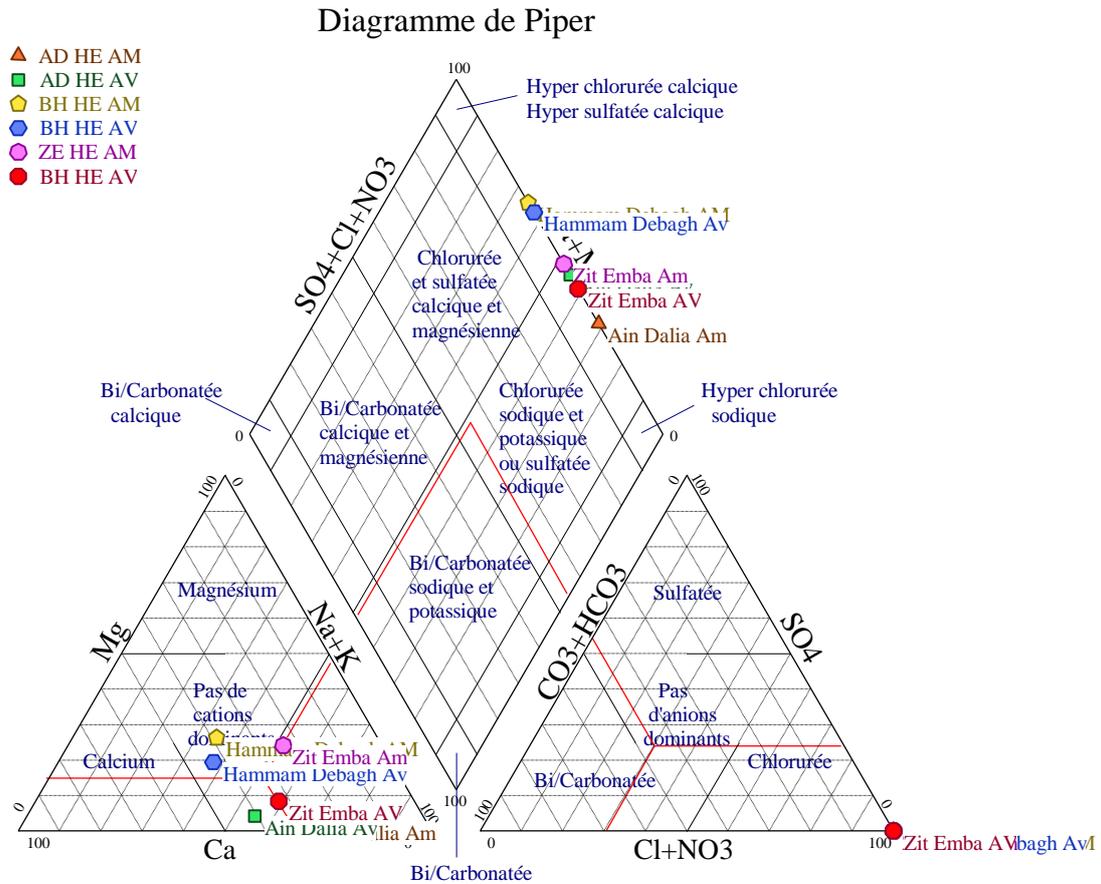


Figure VI. 14 : Faciès chimiques des hautes eaux des 03 barrages

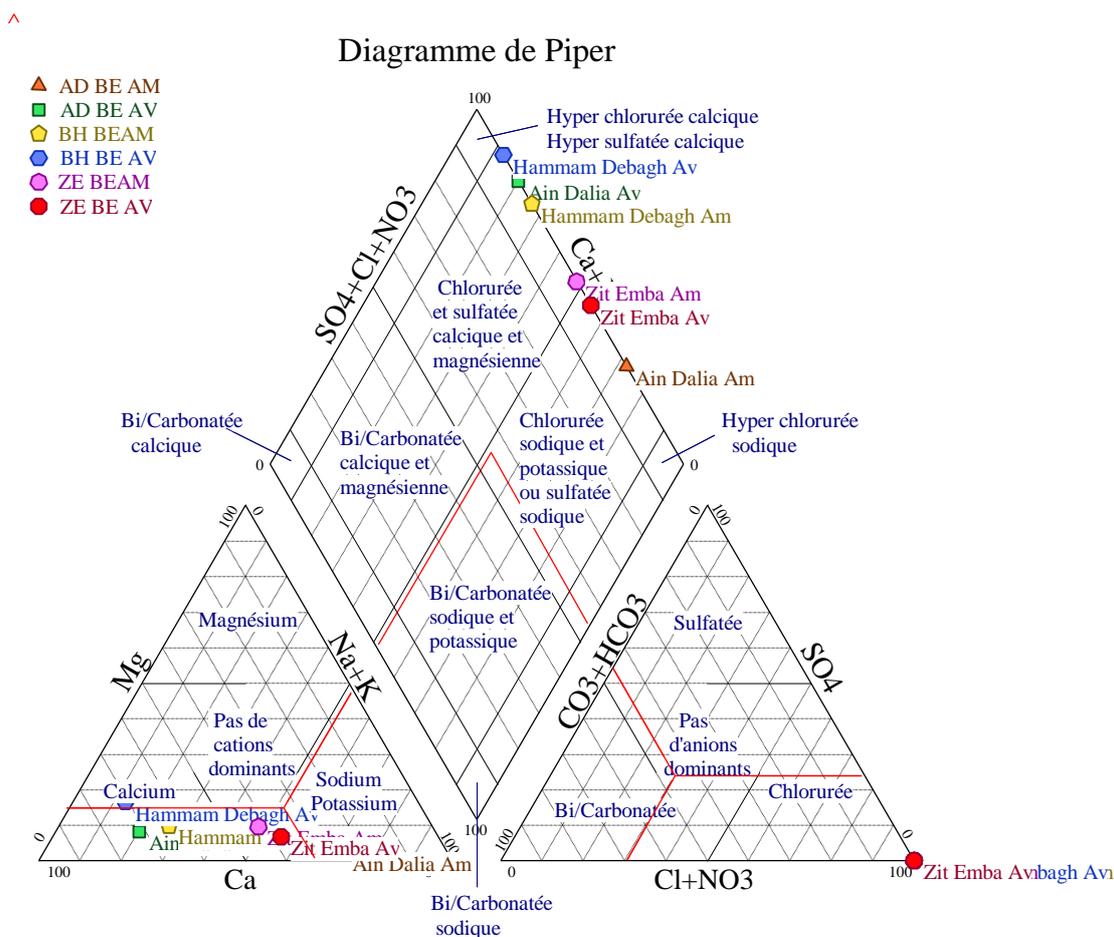


Figure VI. 15: Faciès chimiques des basses eaux des 03 barrages

Le ruissellement des eaux de précipitation sur les calcaires et les dolomies, induit un enrichissement de l'eau en  $Ca^{2+}$  et  $Mg^{2+}$ . Les rejets urbains et industriels sont riches en sulfates et en sodium ce qui aboutit à un enrichissement en ces éléments.

La partie supérieure du diagramme confirme l'enrichissement en chlorures et en sulfates. L'enrichissement en sulfates est lié à l'activité anthropique en période sèche de l'année (période estivale). Pour les chlorures, leur présence est due à la contamination des eaux de l'oued par les eaux usées déversées dans le cours d'eau en plus de la dissolution des formations salifères (évaaporites). En ce qui concerne les cations, on relève que le calcium domine.

### VI.5.2. Aptitude des eaux en AEP

Dans le but de voir l'aptitude des eaux du barrage de Hammam Debagh dans le domaine d'alimentation en eau potable, en utilisant les normes d'organisation mondiale de la santé OMS pour calculer l'indice de qualité de l'eau arithmétique pondérée.

Le **Tableau VI. 3** résume les résultats de calcul de l'indice de qualité des eaux amont et aval pour les trois barrages.

Tableau VI. 3: Résultats de l'IQE Arithmétique Pondéré pour les trois barrages

Mois	WQI (OMS)	Qualité
ADHE Am	303,56	Inadaptée
AD BE Am	708,61	Inadaptée
A D HE Av	93,19	Très mauvaise
A D BE Av	93,48	Très mauvaise
B HE Am	1021,74	Inadaptée
B BE Am	974,63	Inadaptée
B HE Av	139,23	Inadaptée
BBE Av	1031,8	Inadaptée
Z EHE Am	466,46	Inadaptée
Z E BE Am	81,38	Très mauvaise
Z E HE Av	673,89	Inadaptée
Z E BE Av	250,61	Inadaptée

On constate d'après Tableau VI. 3 que les eaux aval des barrages Ain Dalia et Bouhamdane ont d'une qualité meilleure que pour ceux d'amont suite au passage par la digue qui joue le rôle d'un filtre. Tandis que les eaux avales de Zit Emba ont une mauvaise qualité par rapport à celles amont cette variation est due aux rejets industrielles à l'aval.

### **VI.5.3. Qualité des eaux pour l'irrigation**

#### **VI.5.3.1. Introduction**

La région d'étude est à vocation agricole, ce qui lui nécessite une grande quantité d'eau pour l'irrigation des cultures maraîchères et en particulier la pomme de terre, la tomate, céréales, viticultures et arboricultures. Raison pour laquelle la qualité des eaux utilisées dans ce domaine vital de la région doit présenter des paramètres physico-chimiques tolérables par les plantes.

Les eaux chargées en sels minéraux posent des problèmes pédologiques et agronomiques entraînant une perturbation de la croissance des plantes. Parmi ces sels, on peut citer le cas du sodium où les fortes teneurs en cet élément entraînent un changement de la structure physique du sol à cause du gonflement des particules d'argiles, provoquant une circulation plus lente de l'eau dans le sol. Cette détérioration de la qualité du sol va se traduire par une baisse de sa perméabilité, son aération et son rendement.

#### **VI.5.3.2. Aptitude des eaux des barrages Ain Dalia, Hammam Debagh et Zit Emba à l'irrigation**

Il est connu que les sels minéraux contenus dans l'eau ont des effets sur le sol, les plantes et les êtres humains. Ces sels peuvent perturber le développement physique des plantes par l'absorption de l'eau qui agit sur le processus osmotique, ou chimiquement par les réactions métaboliques telles que celles causées par les constituants toxiques. En plus, (Person 1978) les sels causent des changements dans la structure du sol, sur sa perméabilité et sur son aération, affectant directement le développement de la plante. Par conséquent, la consommation de cette dernière peut être à l'origine de maladies chroniques.

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.

Lorsque la concentration des ions  $\text{Na}^+$  à l'état soluble dans le sol est importante, ces ions remplacent dans le complexe absorbant, les cations  $\text{Ca}^{2+}$  le plus fréquemment. Une eau chargée en sel, peut provoquer cette action. Le risque est déterminé à partir de la valeur du sodium absorbable, « sodium Absorption Ration » S.A.R. qui s'exprime par la relation suivante :

$$\text{S.A.R} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{ca}^{++} + \text{mg}^{++}}{2}}}$$

Avec :

$\text{Na}^+$  : concentration de l'eau en ions sodium en méq/l

$\text{Ca}^{2+}$  : concentration de l'eau en ions de calcium en méq/l

$\text{Mg}^{2+}$  : concentration de l'eau en ions magnésium en méq/l

Pour une conductivité donnée, le risque sera d'autant plus important que le S.A.R. sera élevé. On utilisera dans ce qui suit un diagramme de classification en fonction du S.A.R. et de la conductivité électrique de l'eau.

Pour cela on a utilisé des résultats d'un «calcul automatique des activités ioniques dans une solution aqueuse», effectué à l'aide d'un logiciel d'hydrochimie multi langage établi par Simler au Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon en 2004, Version 2.00. Ces calculs ont donné naissance aux graphes de Riverside et de Wilcox.

*a. Classification des d'après Richards*

$\text{S.A.R} \leq 10$  :  Eau excellente ;

$10 < \text{S.A.R} \leq 18$  :  Eau bonne ;

$18 < \text{S.A.R} < 26$  :  Eau convenable ;

$\text{S.A.R} > 26$  :  Eau médiocre.

## Chapitre 6 : HYDROCHIMIE DES EAUX DES BARRAGES ET LES EAUX DE FUTTES.

### « Ain Dalia ; Hammam Debagh & Zit Emba »

Une classification plus détaillée des eaux destinées à l'irrigation a été établie par M. Louvier, (1976).

Tableau VI. 4: Classification des eaux par degré d'aptitude à l'irrigation par la méthode du S.A.R (M. Louvier, 1976- B.R.G.M).

Degré	Qualité	Classe	Possibilité d'utilisation
1	Excellente	C <sub>1</sub> S <sub>1</sub>	Eau utilisable sans danger pour l'irrigation de la plupart des cultures.
2	Bonne	C <sub>2</sub> S <sub>1</sub>	En général, eau pouvant être utilisée sans contrôle particulier pour l'irrigation des plantes moyennement tolérantes aux sels, sur sols ayant une bonne perméabilité.
		C <sub>2</sub> S <sub>2</sub>	
3	Admissible	C <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	En général, eau convenant à l'irrigation de cultures tolérantes aux sels sur les sols drainés. L'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée.
		C <sub>3</sub> S <sub>1</sub>	
		C <sub>3</sub> S <sub>2</sub>	
4	Médiocre	C <sub>3</sub> S <sub>3</sub>	En général, eau fortement minéralisée pouvant convenir à certaines espèces bien tolérantes aux sels sur des sols bien drainés et lessivés.
		C <sub>4</sub> S <sub>1</sub>	
		C <sub>4</sub> S <sub>2</sub>	
5	Mauvaise	C <sub>4</sub> S <sub>3</sub>	Eau ne convenant pas à l'irrigation mais pouvant être utilisée sous certaines conditions.
		C <sub>4</sub> S <sub>4</sub>	
		C <sub>3</sub> S <sub>4</sub>	

#### b. Classification de Wilcox

Généralement, les plantes supportent mal les sols saturés en sodium. La classification de Wilcox fondée sur la conductivité électrique et la teneur du sodium dans l'eau, généralement connue en pourcentage du sodium, est définie par la relation:

$$\text{Na}^+\% = \left[ \frac{\text{Na}^+}{(\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++} + \text{Na}^+ + \text{K}^+)} \right] * 100$$

Avec : Les concentrations du Na, Ca, Mg, Na et K sont en mg/L.

Cette classification définit cinq classes d'eau : Excellente, Bonne, Admissible, Médiocre et Mauvaise (Wilcox, 1948).

S1 risque faible  $\Rightarrow$  S.A.R  $\leq 10$  :  $\Rightarrow$  Eau excellente ;

S2 risque moyen  $\Rightarrow$   $10 < \text{S.A.R} \leq 18$  :  $\Rightarrow$  Eau bonne ;

S3 risque élevé  $\Rightarrow$   $18 < \text{S.A.R} < 26$  :  $\Rightarrow$  Eau convenable ;

S4 risque très élevé  $\Rightarrow$  S.A.R.  $> 26$  :  $\Rightarrow$  Eau médiocre.

### c. Interprétation des résultats

Pour l'aptitude de l'eau à l'irrigation, d'après le diagramme de Wilcox elle est admissible à mauvaise selon les années. Elle peut être utilisée sous certaines conditions où le sol est très perméable et bien drainé. Les cultures doivent tolérer le sel.

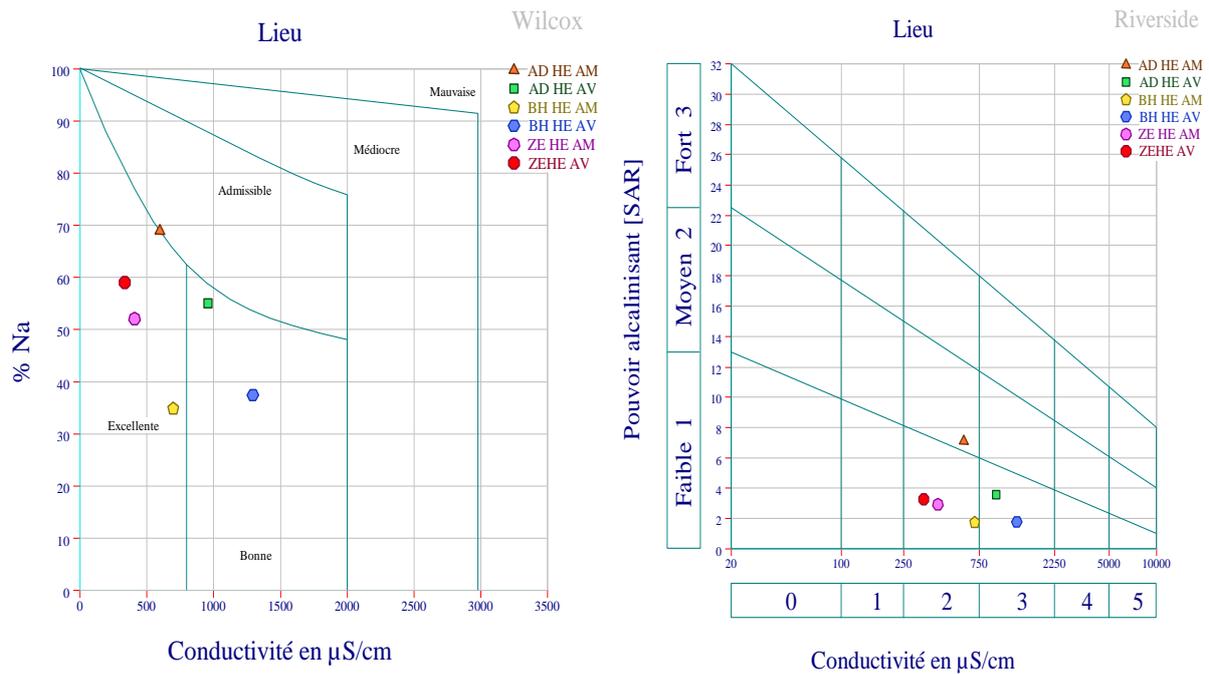


Figure VI. 16 : Classification des hautes eaux des 03 barrages :

a) diagramme de Wilcox, b) diagramme de Riverside.

D'après le diagramme de Wilcox Figure VI. 16 a, on constate que les eaux de Zit Emba amont et aval et ceux de Hammam Debagh (hautes eaux) sont de qualité excellente pour l'irrigation, avec un pourcentage de sodium compris entre 30 et 60 % pour toute la période d'observation.

Et de bonne qualité pour les eaux de Hammam Debagh aval et Ain Dalia aval avec des valeurs de conductivité qui ne dépassent pas les 1500  $\mu\text{S/cm}$ . Seules les eaux de Ain Dalia amont sont entre les limites entre des eaux excellente et admissible.

On constate donc que les résultats obtenus à l'aide des deux méthodes sont très proches. On peut dire que l'eau est utilisable sans danger pour l'irrigation de la plupart des cultures sur l'ensemble des sols de la zone étude.

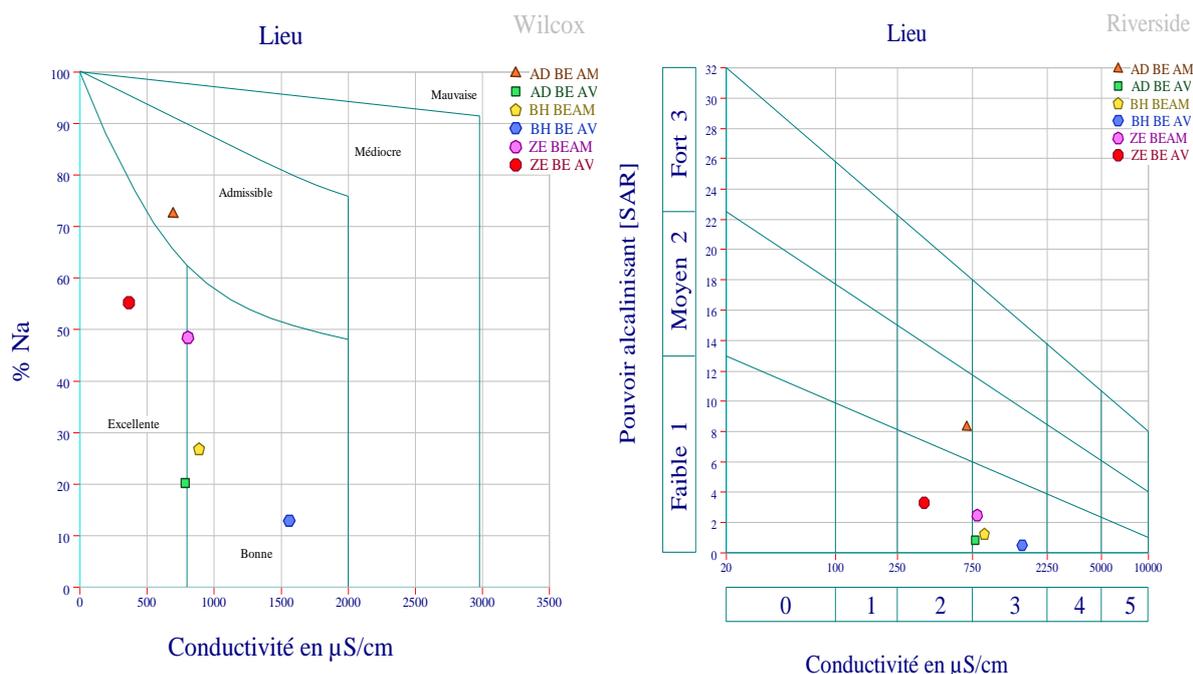


Figure VI. 17 : Classification des basses eaux des 03 barrages :

a) diagramme de Wilcox, b) diagramme de Riverside.

Une dégradation de la qualité des eaux est remarquée en basse eaux, la dégradation observée traduit un changement dans la qualité de l'eau.

Les eaux de la région d'étude appartiennent aux classes "excellente, et "admissible" de la classification de WILCOX

## VI.6. CONCLUSION

Les données chimiques montrent que les eaux des barrages ont une forte salinité. L'examen de la variation de ce chimisme à long terme a permis de voir que les différents éléments chimiques aussi bien les éléments majeurs, mineurs ou de pollution ont une tendance positive suite à une pollution croissante de l'environnement aquatique.

On a constatés que la qualité des eaux avales est meilleure qu'amont et que la digue joue un rôle de filtre sauf dans le cas où une source de pollution aval intervienne pour changer la qualité de ces eaux.

Malgré la présence des éléments qui sont parfois toxiques, les eaux sont de bonne qualité chimique pour l'irrigation mais qui restent à surveiller et le cas échéant à traiter pour l'alimentation en eau potable.

## BIBLIOGRAPHIE

- Bouguerne A., Boudoukha A., Benkhaled A. and Mebarkia A.-H. (2017). Assessment of surface water quality of Ain Zada dam (Algeria) using multivariate statistical techniques. *International Journal of River Basin Management* 15(2), 133-43.
- Chapman D. and Kimstach V. (1996). *Chapter 3. Selection of Water Quality Variables. Water Quality and Assesments-A Guide to Use of Biota, Sediments and Water in Enviromental Monitoring*, Chapman. D.(ed).
- 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 Seybouse Nord-Est algérien*. Université de Franche-Comté.
- Desjardins R. (1997). *Le traitement des eaux*. Presses inter Polytechnique.
- Fryar A. E., Macko S. A., Mullican III W. F., Romanak K. D. and Bennett P. C. (2000). Nitrate reduction during ground-water recharge, Southern High Plains, Texas. *Journal of contaminant hydrology* 40(4), 335-63.
- Gaujous D. (1995). La pollution des milieux aquatiques Aide-mémoire, 2 eme Ed Lavoisier. In, ISBN.
- Leynaud G. (1968). Les pollutions thermiques, influence de la température sur la vie aquatique. *BTI Ministère de l'agriculture*, 224-881.
- McNeely R. N., Neimanis V. P. and Dwyer L. (1979). Water quality sourcebook: a guide to water quality parameters. In: *Water Quality Sourcebook: A guide to water quality parameters*, Environment Canada.
- Person J. (1978). Irrigation et drainage en Tunisie problème posé par la salinité des sols et des eaux. *Bull. BRGM (2ème série) section III(2)*, 143-51.

## Chapitre 6 : HYDROCHIMIE DES EAUX DES BARRAGES ET LES EAUX DE FUTTES.

### « Ain Dalia ; Hammam Debagh & Zit Emba »

Rodier J., Legube B., Merlet N. and Brunet R. (2009). *L'analyse de l'eau-9e éd.: Eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer*. Dunod.

Schuiling R. D., Badescu V., Cathcart R. B. and Van Overveld P. A. (2005). The Hormuz Strait Dam macroproject—21st century electricity development infrastructure node (EDIN)? *Marine Georesources and Geotechnology* 23(1-2), 25-37.

Shrestha S. and Kazama F. (2007). Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: A case study of the Fuji river basin, Japan. *Environmental Modelling & Software* 22(4), 464-75.

WHO (2011). Guidelines for drinking-water quality. *WHO chronicle* 38, 104-8.

*Troisième partie*

*Infiltrations et transfert des  
ions*

# *CHAPITRE VII*

## *Les débits de fuites*

*(Les infiltrations à travers la  
digue)*

## VII.1. INTRODUCTION

Les infiltrations qui se produisent à travers le corps du barrage et ses fondations, doivent être considérées sous deux aspects (Laurin, 2003) :

- le premier : est la perte d'eau qui réduit le volume emmagasiné,
- le deuxième : est que ces pertes d'eau peuvent compromettre la stabilité de l'ouvrage sous l'influence du phénomène de renard et des pressions de l'infiltration (MESSAID, 2009 & MALFI, 2012).

Les infiltrations dans les barrages en terre doivent être abordées sous trois angles différents où on devait aboutir à :

- La détermination de la ligne de saturation ;
- La détermination des pressions interstitielles ;
- Le calcul du débit de fuite ;

L'étude des infiltrations consiste essentiellement en la détermination des équipotentiels et des lignes de courant qui permettent ensuite de trouver les éléments suivants :

*La ligne de saturation du massif du barrage*, qui est en pratique confondue avec la ligne le long de laquelle la pression hydrostatique de l'eau au sein du massif est nulle. Cette dernière est appelée ligne phréatique et représente le niveau de la surface libre dans le corps du barrage ou plus exactement elle représente la limite entre la partie sèche/humide et la partie saturée d'eau du barrage. La bonne connaissance de cette ligne est capitale pour pouvoir effectuer les calculs de stabilité de la digue.

*La pression de l'eau interstitielle dans le massif*, qui peut être déterminée à partir d'un réseau de lignes équipotentiels, c'est-à-dire de lignes reliant les points d'égal potentiel hydraulique au sein du barrage et des fondations. Une augmentation de cette pression peut être dangereuse pour la stabilité, elle peut être notamment la cause d'apparition de renards dans la partie amont du barrage.

*Le débit de fuite dû aux infiltrations*, qui peut s'obtenir à partir du réseau de lignes de courant, orthogonales aux équipotentielles. Ces lignes de courant représentent théoriquement la trajectoire de l'eau à travers le barrage. Si ce débit est trop important, le barrage ne fait pas son office, il faut alors augmenter la taille des parties imperméables du corps de digue.

La détermination de ces trois paramètres se fait de diverses manières plus ou moins compliquées selon le besoin. On peut soit faire des résolutions analytiques complètes, soit des simulations numériques, ou soit utiliser des méthodes simplifiées telles que la méthode de Kozeny qui utilise des approximations et des propriétés graphiques du réseau d'écoulement.

Nous avons choisi de travailler avec la méthode de Kozeny pour déterminer la ligne de saturation du barrage et le calcul de débit de fuite. Nous avons par ailleurs ajouté une simulation numérique pour améliorer les résultats des débits de fuites. Notre choix s'y porté sur le logiciel GEOSTUDIO en éléments fini. En ce qui concerne le débit de fuite pratique sur terrain nous avons utilisé le déversoir rectangulaire en mince paroi et à contraction latérale.

### **VII.2. ESTIMATION DES DEBITS DE FUTES**

Dans cette étude nous avons calculé le débit des fuites par la méthode théorique nommée Kozeny afin de calibrer et valider le model numérique en éléments finis par logiciel Geostudio 2007.

#### **VII.2.1. Méthode théorique de Kozeny**

Le gros avantage de la méthode de Kozeny, c'est qu'elle permet de trouver les trois (03) paramètres que nous avons cités dans l'introduction, sans être réellement obligé de connaître la répartition de toutes les lignes de courant. Il est juste important de respecter quelques règles de distribution des lignes :

- le parement amont est une équipotentielle
- la ligne de saturation est une ligne de courant
- la fondation est une ligne de courant (cas fondation imperméable)
- la pression hydraulique étant nulle sur la courbe de saturation, le potentiel en un point de cette ligne est due uniquement à la côte de ce point.

- les équipotentiels sont perpendiculaires aux lignes de courant.

### VII.2.1.1. La ligne de saturation

La méthode pour tracer de cette ligne a été proposée par Kozeny qui a montré que pour un barrage en terre non homogène, la ligne de saturation est assimilable à une parabole dans sa partie médiane (Degoutte, 1997).

#### a. Equation de la ligne de saturation barrage homogène

On parle d'une ligne de saturation dans une coupe transversale car dans la réalité c'est une surface suivant laquelle la pression est égale à la pression atmosphérique.

La méthode pour le tracé de cette ligne a été proposée par Kozeny qui a montré que pour un barrage en terre homogène, la ligne de saturation est assimilable à une parabole dans sa partie médiane (Durand, 1999).

L'équation de la ligne de saturation s'écrit de la manière suivante :

$$y^2 - y_0^2 - 2xy_0 = 0 \quad (\text{VII.1})$$

Avec :

$$y_0 = \sqrt{H_1^2 + L^2} - L \quad (\text{VII.2})$$

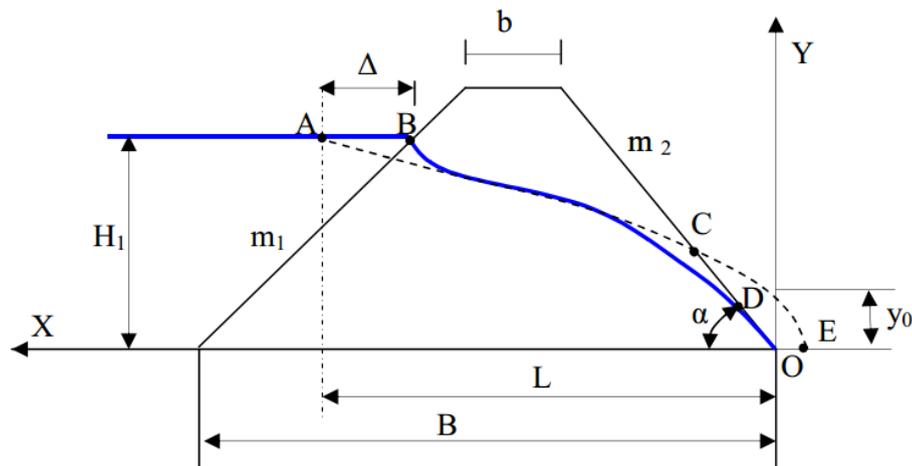


Figure VII. 1: Ligne de saturation dans barrage en terre non drainé d'après Kozeny

**b. Distance entre les deux points d'intersection du plan d'eau avec la parabole théorique et le talus amont**

En traçant la parabole de Kozeny celle-ci coupe le plan d'eau à une distance qui ne coïncide pas avec le passage réel. Elle doit être corrigée par une courbe normale au talus amont et tangente à la parabole théorique à l'aval. Pour calculer la distance séparant les deux Points nous disposons de deux méthodes :

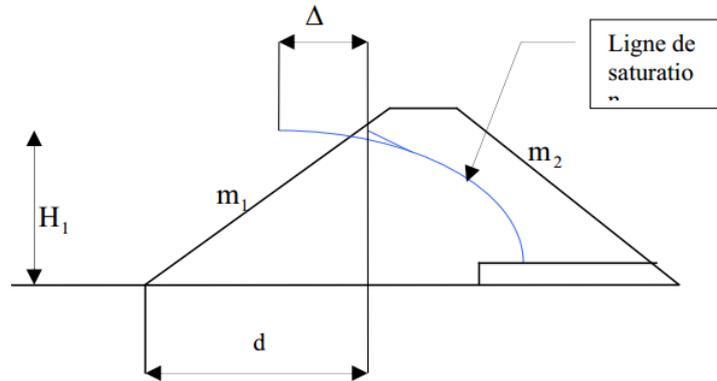


Figure VII. 2: Détermination de la grandeur pour la correction de la ligne de saturation à l'amont

**c. Détermination du point d'intersection de la ligne de saturation avec le talus aval**

La ligne de saturation coupe le parement aval en un point qui ne coïncide pas avec le point de passage de la parabole théorique de Kozeny. Généralement la ligne de saturation passe à deux tiers de la distance séparant le point de passage de la parabole théorique en partant du pied aval du barrage (MESSAID, 2009).

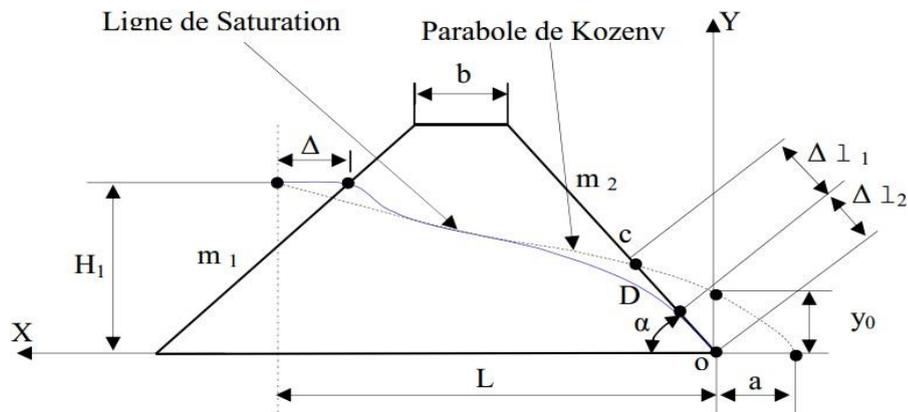


Figure VII. 3: Correction de la ligne de saturation avec le parement aval

La méthode de Casagrande où il a démontré que  $\Delta l_2$  ne dépend que de la distance focale de la parabole de base de Kozeny et de l'angle du talus aval du barrage ce qui lui a permis de dresser une courbe de variation. La Figure VII. 4 donne les valeurs de paramètre  $a$  en fonction de l'angle  $\alpha$

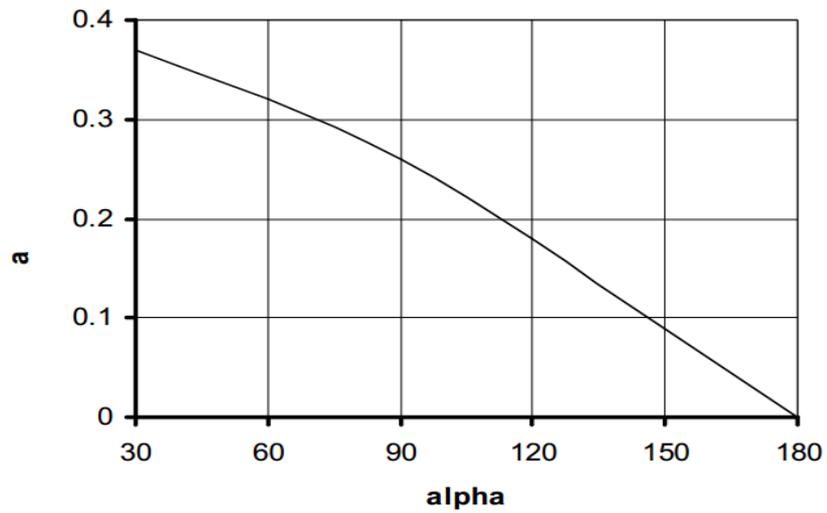


Figure VII. 4: Courbe de Casagrande pour la détermination du paramètre alpha

On signale que pour les barrages dotés de drainage, la ligne de saturation est rabattue pour passer dans le drain (CCI Grands Barrages, 2015).

**d. Digue non homogène**

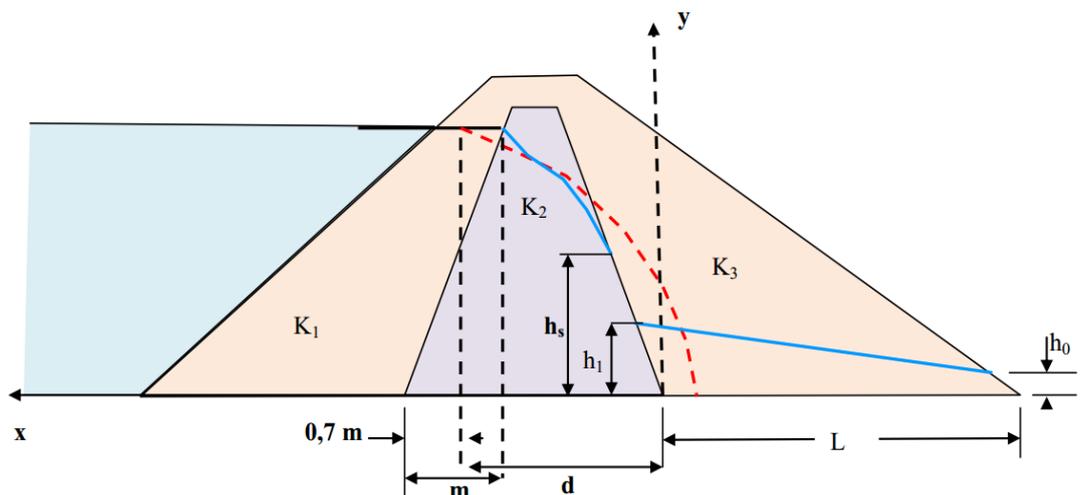


Figure VII. 5: Ligne de saturation pour une digue non homogène.

Dans la recharge de perméabilité  $K_3$  l'écoulement peut être assimilé à un écoulement dans un massif rectangulaire de longueur  $L$ .

$$q = k_3 \frac{h_1^2 - h_0^2}{2L} \quad (\text{VII.3})$$

Ce débit doit être égal à celui qui traverse le noyau c'est-à-dire  $q = k_2 \cdot e$

$$\text{Donc : } h_1 = \sqrt{2L \cdot e \cdot \frac{k_2}{k_3} + h_0^2}$$

Avec :

$$x^2 + y^2 = (x+e)^2, \quad y^2 = 2ex + e^2 \quad \text{et} \quad e = \sqrt{H^2 + d^2} - d$$

#### e. Détermination des pressions interstitielles

Dans un sol homogène et isotrope soumis à un écoulement d'eau permanent et sans variation de volume du sol (l'arrangement du squelette du solide ne se modifie pas), les deux équations qui régissent l'écoulement sont :

- La condition de continuité de la phase liquide :  $\text{div } \vec{v} = 0$
- La loi de Darcy :  $\vec{v} = -k \text{ grad } h$

De ces deux équations nous pourrions avoir le système suivant :

$$\begin{cases} \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \\ V_x = -k \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \\ V_z = -k \cdot \frac{\partial h}{\partial z} \end{cases}$$

En pratiques, comme les écoulements dans les barrages en terre, la résolution de l'équation de Laplace consiste à rechercher:

- ✓ Les lignes équipotentielles
- ✓ les lignes de courant.

En général l'équation de Laplace n'est pas intégrable et on a recours aux méthodes suivantes pour la détermination des réseaux d'écoulement :

- ✓ Recherche de solution analytique à partir du potentiel complexe dans les cas géométriquement simples.
- ✓ Méthodes numériques.
- ✓ Méthodes analogiques
- ✓ manuellement par approximations successives.

### VII.2.2. Méthode des éléments finis

Geostudio c'est un logiciel de calcul géotechnique qui permet de traiter les différents problèmes du sol comme le glissement des terrains, le tassement, la consolidation, les infiltrations des eaux dans le corps de la digue d'un barrage et d'autres problèmes liés à la géotechnique. Plusieurs programmes sont intégrés dans la fenêtre générale du logiciel et apparaissent à son lancement:

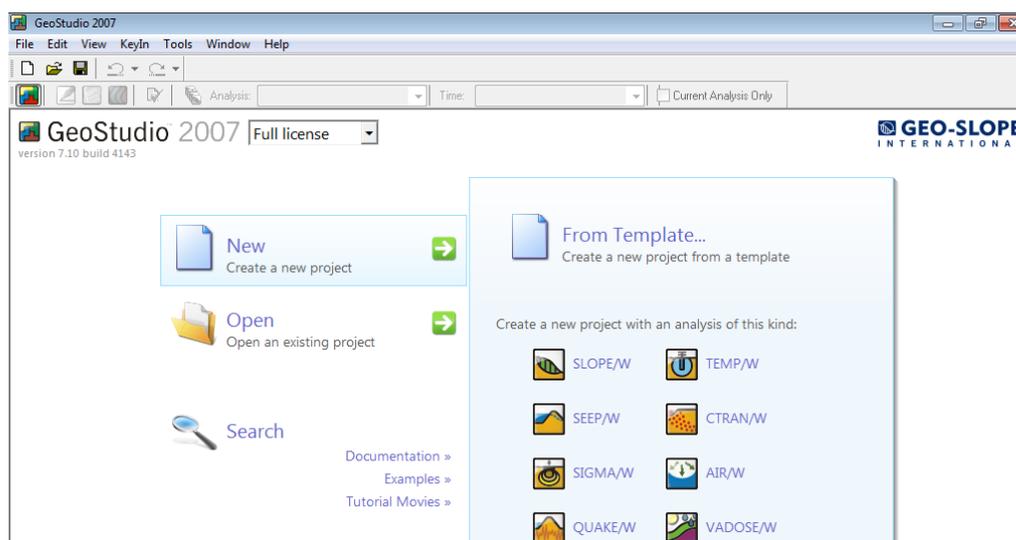


Figure VII. 6 : Fenêtre de lancement

- **S L O P E / W** : Permet de calculer le coefficient de sécurité d'un talus naturel ou artificiel par les méthodes d'analyses classiques.
- **S E E P / W** : Permet de calculer les infiltrations des eaux (Par la méthode des éléments finis).
- **S I G M A / W** : Permet d'analyser les problèmes de la relation contraintes / déformations (Par la méthode des éléments finis).
- **Q U A K E / W** : Permet de définir le comportement d'un terrain sous l'effet d'un séisme (Par la méthode des éléments finis).
- **T E M P / W** : Permet d'analyser les problèmes Géothermique du sol (Par la méthode des éléments finis)... et autres logiciels.
- **CTRAN / W** : Permet en utilisant les éléments finis de modéliser la circulation des contaminants à travers des matériaux poreux tels que le sol et la roche. La formulation complète de CTRAN / W permet d'analyser des problèmes simples de suivi des particules en fonction du mouvement de l'eau, ou des processus complexes impliquant la diffusion, la dispersion, l'adsorption, la décroissance radioactive.
- **AIR / W** : En utilisant la méthode des éléments finis, il permet l'analyse des problèmes d'interaction des eaux souterraines et l'air dans les matériaux poreux tels que le sol et la roche. Sa formulation complète vous permet d'envisager des analyses de problèmes simples allant de l'état d'équilibre saturé, au plus sophistiqués problèmes, d'un état saturé / insaturé dépendant du temps.

- **VADOSE / W** : Sert à analyser le flux à partir de l'environnement, à travers la surface du sol (zone saturée et non saturée). Sa formulation complète permet l'analyse des deux problèmes, simple à partir d'une simple analyse de l'infiltration dans le sol causée par des précipitations ou, complexe, à l'aide d'un modèle sophistiqué considérant la fonte des neiges, la transpiration des racines, l'évaporation de surface, etc...

### a. Saisie des données

Au lancement du logiciel, la fenêtre de la Figure VII. 6 permet de choisir l'ouverture d'un projet déjà existant ou de lancer un nouveau tout en sélectionnant le programme souhaité. Par exemple ici SEEP/W.

SEEP / W est un programme largement utilisé dans les modélisations numériques. Il simule le régime des eaux souterraines en utilisant une géométrie matérielle utilisant les conditions aux limites et les propriétés des matériaux comme entrées. Ce logiciel de modélisation des écoulements internes utilise la généralisation de la loi de Darcy. Il permet de faire des calculs d'écoulements dans des terrains saturés ou non, en régime permanent ou en régime transitoire.

Utilité : SEEP/W fonctionne grâce à des éléments finis. Les éléments finis, malgré un background mathématique complexe, sont relativement faciles à utiliser, puisque tout fonctionne en interface graphique. La première étape consiste à dessiner en 2D une section ou un plan que nous souhaitons modéliser (grâce à un maillage), puis entrer les paramètres des matériaux, et indiquer les conditions que nous désirons imposer au modèle (un débit ou des charges de pression). Évidemment, il y a quelques subtilités à considérer lorsque le problème se complexifie.

**Fenêtre Key In Analyses** : Cette fenêtre permet la saisie du nom du projet, le projet Parent, le type d'analyse (Steady-State, Transient...), Settings, Control, Convergence et Time.

**L'onglet Analysis Type** : sert à indiquer si notre problème sera analysé en régime permanent ou transitoire (dépendamment du temps, on indique alors les paramètres temporels dans l'onglet Time). C'est l'onglet Convergence qui nous intéresse le plus. Il s'agit d'ajuster les paramètres de convergence. Ces paramètres dépendent des gradients de pression, du maillage et des propriétés des sols. En gros, voici ce que signifie chaque paramètre de convergence.

- **Max # of itérations** : Nombre maximal d'itération pour les calculs. Plus il y en a, plus le calcul est long, mais plus la solution peut être précise.
- **Tolérance** : Différence entre deux itérations successives après laquelle la simulation se termine. Plus la tolérance est petite, plus le calcul est long, mais plus la solution peut être précise.
- **Maximum change** : Changement maximum entre les itérations. Plus il est petit, plus le calcul est long, mais plus la solution peut être précise.
- **Minimum change** : Changement minimum entre les itérations. Plus il est petit, plus le calcul est long, mais plus la solution peut être précise. Le changement minimum doit être environ de deux ordres de grandeur plus petit que la tolérance pour permettre la convergence.
- **Rate of Change** : Taux de changement entre chaque itération. Il est toujours supérieur à 1, mais plus il est petit, plus le calcul est long, mais plus la solution peut être précise.
- **Equation Solver** : permet de choisir le type d'équation utilisée.

Il s'agit d'abord de donner l'étendu de la plage et son échelle.

La géométrie peut être dessinée en utilisant le bouton **Sketch** et **Polylines** et ensuite dessiner les différentes régions en utilisant le bouton **Draw**.

- Saisie des Coordonnées des points
- Saisie des segments
- Saisie des régions

### Saisie des propriétés géotechniques

Nous créons à l'aide du bouton **Key In ⇒ Hydraulic Functions** les fonctions de conductivité hydraulique et les courbes de rétention d'eau.

SEEP/W permet d'estimer la courbe de rétention d'eau à partir d'une courbe granulométrique. SEEP/W permet aussi d'estimer la fonction de conductivité hydraulique à partir de la courbe de rétention d'eau.

- **Fonction Courbe de rétention** : Elle sera créée à partir de la courbe granulométrique du matériau et de sa teneur en eau à saturation. Elle peut également être créée comme simple

fonction du type de matériau ou suivant les différentes méthodes proposées par Van Genuchten, Fredlund -Xing.....

**Conditions aux limites :** Différentes conditions aux limites peuvent être créées dans la boîte de dialogue : Nous pouvons imposer des débits, des charges, un gradient hydraulique unitaire.....

### VII.3. BARRAGE AIN DALIA

#### VII.3.1. La méthode Kozeny

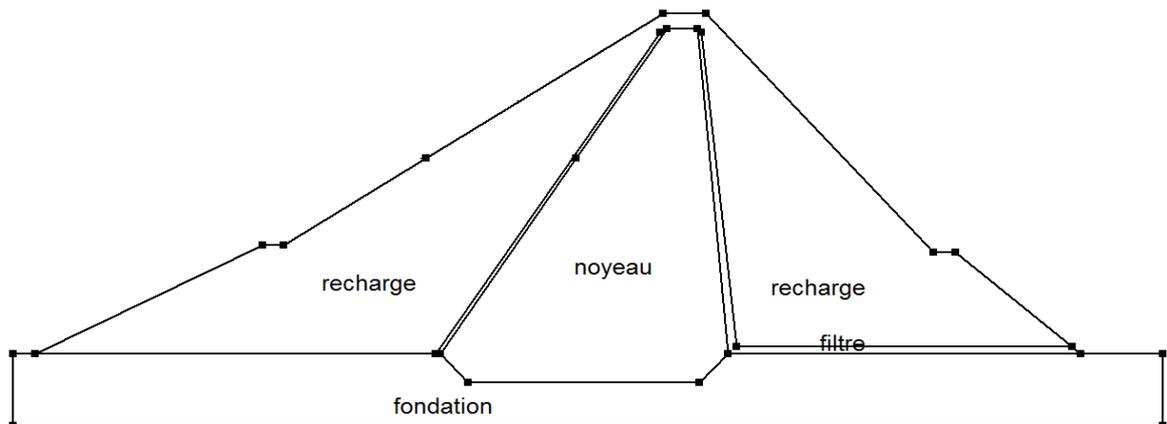


Figure VII. 7: Coupe transversale de la digue

Dans le cas d'une digue non homogène drainée, reposant sur une assise imperméable, KOSENY a montré que la ligne de saturation (ligne phréatique) est une parabole d'axe horizontal, dont le foyer est l'extrémité amont du drain, auquel se raccorde la ligne phréatique.

L'équation de cette parabole s'écrit :

$$Y_0 = \sqrt{H^2 + d^2} - d$$

**d** : étant la largeur en base du barrage diminuée de  $0,7b$ . Et **b** étant la projection horizontale de la partie mouillée du parement amont. La parabole coupe le plan d'eau amont en A situé à une distance horizontale de ce parement  $BA = 0,3b$

$$\frac{h'_s}{y_0} = \frac{\sin\alpha}{1 - \cos\alpha}$$

Avec :

$$h'_s = y_0 \frac{\sin \alpha}{1 - \cos \alpha} \quad (\text{VII.4})$$

$$h_s = (1 - C) * h'_s \quad (\text{VII.5})$$

**C**: coefficient déterminé d'après l'abaque de «casa grande»

$$L = \lambda HB + \frac{bc}{2} - \frac{bn}{2} + 5$$

**L** : la longueur de la base du noyau à l'aval jusqu'au pied du barrage à l'aval

**b<sub>c</sub>** : la largeur de la crête

**b<sub>n</sub>**: la basse de noyau

$$h_1 = \sqrt{2 \cdot l y_0 \frac{k_1}{k_n} + h_0^2}$$

Avec :

**K<sub>1</sub>** : perméabilité de recharge **K<sub>1</sub> = 10<sup>-3</sup> (m/s)**

**K<sub>n</sub>** : perméabilité du noyau **K<sub>n</sub> = 2.8 \* 10<sup>-8</sup> (m/s)**

**h<sub>0</sub>** : hauteur d'eau à l'aval **h<sub>0</sub> = 0 m**

Calcul du débit de fuite **q<sub>b</sub>** à travers la digue proprement

$$q_b = k \frac{h_1^2 - h_0^2}{2 * L}$$

Avec :

$$Q_b = q_b * L$$

**L**: la largeur du pied amont vers le pied aval

Calcul du débit de fuite **q<sub>n</sub>** à travers le noyau

$$q_n = k_2 * Y_0$$

$$Q_n = q_n * L$$

Les résultats sont regroupés dans le tableau

Tableau VII. 1 : Les résultats du débit de fuite à travers la digue et le noyau du barrage Ain Dalia

$\lambda$	$\alpha(\text{rd})$	$\alpha(^{\circ})$	m(m)	d (m)	$Y_0$ (m)	$h'_s(\text{m})$	C	$h_s$	$h_1$	Q (m <sup>3</sup> /j)	$Q_n(\text{m}^3/\text{j})$
0.661	0.987	56.54	17.85	54.01	6.37	11.8	0.32	8.05	0.106	1.2565	3.7235

### VII.3.2. La méthode des éléments finis (Géo studio)

Les données du barrage

$$K_{\text{recharge}} = 0.003\text{m/s}$$

$$\text{vwc} = 0.2\text{m}^3/\text{m}^3$$

$$K_{\text{noyau}} = 2\text{e}^{-008}\text{m/s}$$

$$\text{vwc} = 0.15\text{m}^3/\text{m}^3$$

$$K_{\text{foundation}} = 1\text{e}^{-010}\text{m/s}$$

$$\text{vwc} = 0\text{m}^3/\text{m}^3$$

$$K_{\text{filtre}} = 0.0001\text{m/s}$$

$$\text{vwc} = 0.1\text{m}^3/\text{m}^3$$

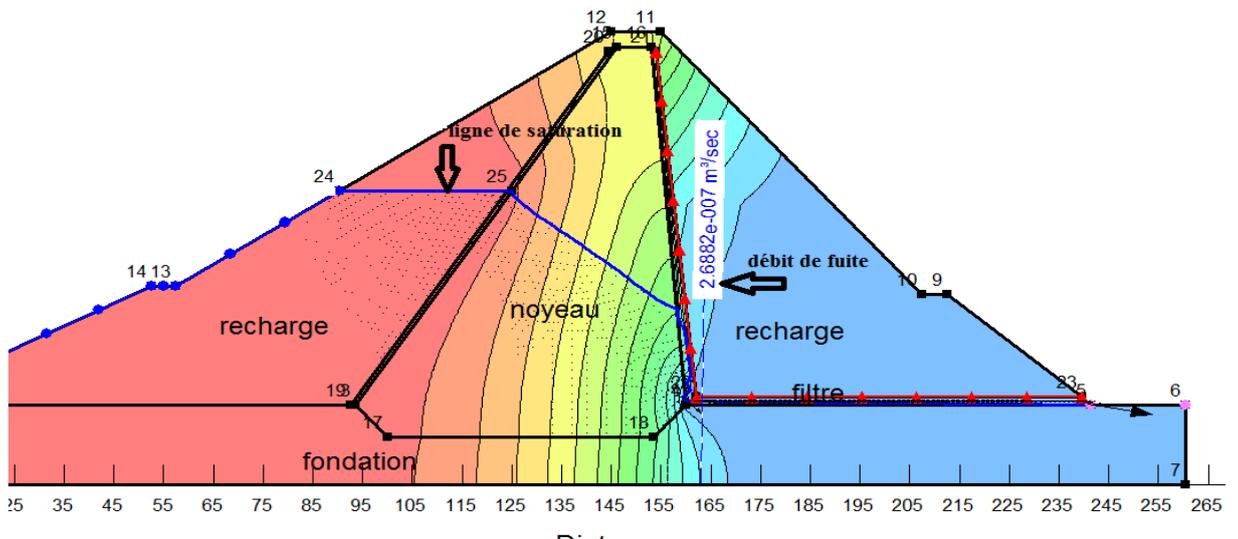


Figure VII. 8: Ligne de saturation par SEEP/W

Le débit de fuite calculé par Géo Studio au niveau du noyau  $Q_n= 2.55m^3/j$ .

### VII.3.3. Etude comparative

Pour compléter notre étude nous avons opté pour une étude comparative des résultats obtenues lors des sections précédentes. La ligne de saturation calculée par Kozeny, Geostudio afin de valider les résultats de la modélisation numérique par la méthode des éléments finis.

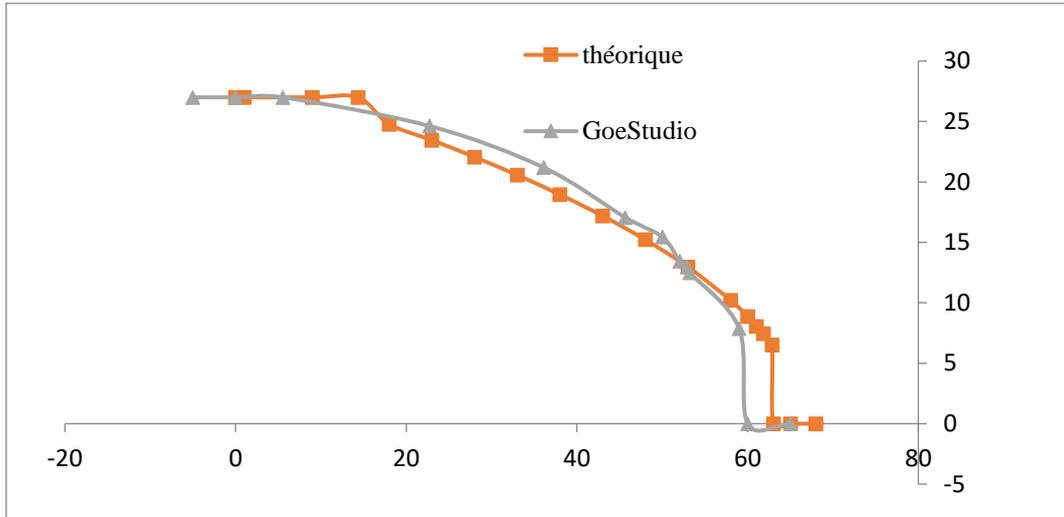


Figure VII. 9:Les lignes de saturation théorique et SEEP

D'après la Figure VII. 9 et la comparaison des débits calculés on constate que le logiciel Geostudio donne des résultats rapprochés. En se basant sur cette convergence on va calculer le débit des fuites uniquement par Geostudio pour les deux autres barrages Hammam Debagh et Zit Emba.

### VII.4. BARRAGES HAMMAM DEBAGH ET ZITEMBA

Une deuxième vérification de la performance de logiciel par la comparaison au débit calculé sur terrain par le biais d'un déversoir à mince paroi rectangulaire et à contraction latérale sans hauteur de pelle.

Calcul du débit volume  $Q$  par application de la relation (VII.6) d'un déversoir rectangulaire à mince paroi, avec contraction latérale et sans hauteur de pelle (Hachemi Rachedi, 2006) :

$$Q = 0,794B\sqrt{2g}\beta(1 + 0,16496\beta^{2,0716})^{3/2}h_{dev}^{3/2} \quad (VII. 6)$$

Avec :  $\beta = b/B$

## Chapitre VII : LES DEBITS DE FUTES (LES INFILTRATIONS A TRAVERS LA DIGUE)

$Q$  : le débit en (m<sup>3</sup>/s).

$B$  : la largeur du canal en (m).

$g$  : l'accélération de la pesanteur (m/s<sup>2</sup>).

$\beta$  : le rapport de forme.

$b$  : la largeur de l'échancrure en (m).

$h_{dev}$  : La hauteur de la lame d'eau déversante en (m).

La condition d'application de cette relation est:

$$\beta = b/B < 0,45.$$

Pour le barrage de Hammam Debagh nous avons testé 3 valeurs de  $\beta$  (0.375, 0.3 et 0.25).

Les résultats des débits sont regroupés dans le Tableau VII. 2

Tableau VII. 2 : Débits de fuites du barrage Hammam Debagh (Formule VII.6)

$\beta$	$h_{dév}$ (cm)	$Q$ (m <sup>3</sup> /j)
0.375	2.5	67.8822
0.3	2.7	165.0605
0.25	2.8	190.5034

Il en ressort du tableau VII.2 que l'augmentation du débit  $Q$  est proportionnelle à la profondeur déversée  $h_{dév}$ . Vu les faibles valeurs de  $h_{dév}$  qui influent sur les valeurs de débit on maintient ceux de Géo studio

Avec le logiciel Geostudio nous avons calculé le débit de fuite pour trois différents niveaux NPHE, NNR et un niveau minimal pour voir l'effet de la fluctuation du niveau d'eau amont sur le débit de fuite final.

Tableau VII. 3 : Débits de fuites du barrage Hammam Debagh Geostudio

	NNR	NPHE	MIN
$Q$ (m <sup>3</sup> /j)	3.9965	6.8827	1.5540

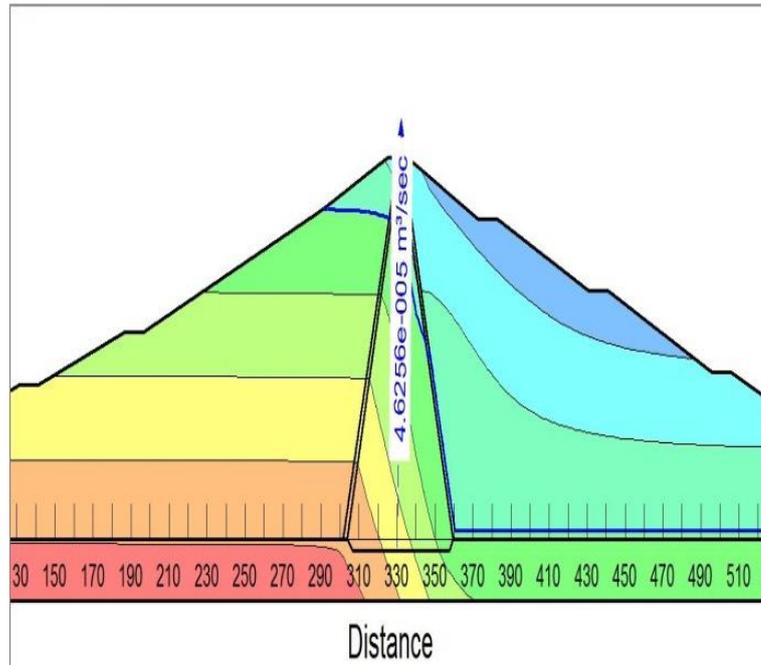


Figure VII. 10:Ligne de saturation par SEEP/W et le débit de fuite

Barrage Hammam Debagh

Pareil pour le barrage de Zit Emba nous avons utilisé Geostudio pour estimer le débit de fuite à travers la digue. La Figure VII. 11 illustre la ligne de saturation et le débit de fuite à travers le corps du barrage de Skikda. Le débit est estimé à 2.32 m³/j.

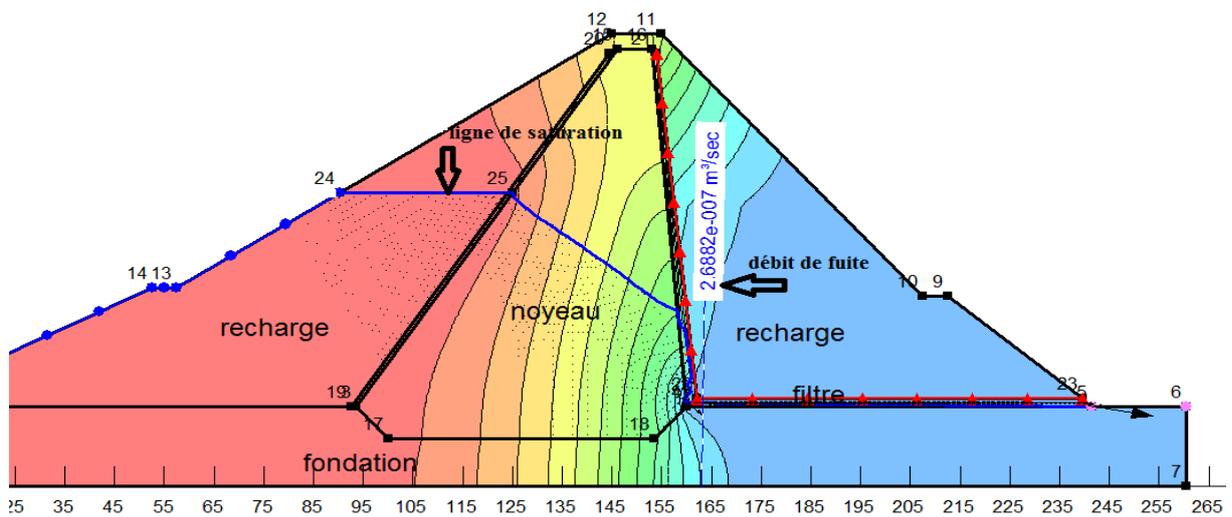


Figure VII. 11:Ligne de saturation par SEEP/W et le débit de fuite

Barrage Zit Emba

D'après l'étude des débits on constate que pour la période d'étude les débits de fuite des trois barrages est de l'ordre de  $3\text{m}^3/\text{j}$  qui n'est pas fixe sur toute l'année et influencé par le niveau d'eau amont et l'état de la digue. Cette quantité nécessite une étude approfondie pour chaque barrage par un réseau de suivi et d'autre technique plus poussées pour une estimation exacte afin de mieux gérer et exploiter ces eaux au lieu de les rejeter dans le cours d'eau en aval pour Hammam Debagh et Zit Emba et économiser l'énergie électrique à Ain Dalia qui pompes ces eaux des drains vers la cuvette.

### VII.5. CONCLUSION

Le chapitre résume les méthodes calcul de utilisées pour l'estimation des débits de fuites et la comparaisant entre les débits calculés et estimé par éléments finis (SEEP/W).

La déférence entre débit par logiciel et théorique de Kozeny n'est pas grande.

Quel que soit le type de barrage, sa fondation et ses appuis subissent des pressions dues à l'écoulement de l'eau à travers la digue, elles peuvent être quantifiées localement à l'aide de piézomètre. L'étude de la variation du débit de fuite au corps du barrage montre clairement que les pertes en eau augmentent fortement avec la charge d'eau en amont.

### BIBLIOGRAPHIE

Côté A., Carrier B., Gervais R., Noël P., I Paquette L.-G. (2008). Water seepage detection and localization at the Peribonka dam using optical fiber. Paper presented at the CDA 2008 Annual Conference.

Degoutte G., Poupart M., Alonso E., Bonelli S., Poulain D., Brodin J.-L., Brunel P. and Tisserand C. (1997). Retour d'expérience sur l'évolution des pressions interstitielles dans les barrages en terre. In: TRANSACTIONS OF THE INTERNATIONAL CONGRESS ON LARGE DAMS, pp. 769-96.

Des Grands Barrages C. C. I. (2015). Comité International des Grands Barrages. In, Site internet (<http://www.icold-cigb.org>) consulté en ligne.

Durand J.-M., Royet P. and Mériaux P. (1999). Technique des petits barrages en Afrique sahélienne et équatoriale. Editions Quae.

Fauchard C., et Mériaux P. (2007). Geophysical and geotechnical methods for diagnosing flood protection dikes, Guide for implementation and interpretation

Johansson S. (1997). Seepage Monitoring in Embankment Dams. Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

Lepetit, L. (2002). Etude d'une méthode de diagnostic de digues avec prise en compte du risque de liquéfaction. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal, 287 pages, Clermont Ferrand.

Lautrin D. (2003). Vieillissement et réhabilitation des petits barrages en terre. Editions Quae.

MALFI A. and KOLLI A. (2012). Infiltration dans les barrages en terre et influence de disposition de drainage de l'université Abou Baker Belkaid.

Messaid B. (2009). Etude de la position efficace des drains dans les barrages en terre. Université de Batna 2.

Singh V. P., Scarlatos P. D., Collins J. G., et Jourdan M. (1988). Breach Erosion of Earth fill Dams (BEED) Model. Natural Hazards, 1, pp 161-180.

Stark, A. (2008). Seismic methods and applications: a guide for the detection of geologic structures, earthquake zones and hazards, resource exploration, and geotechnical engineering.

# *CHAPITRE VIII*

*Modélisation numérique :*

*Transfert des ions*

### VIII.1. INTRODUCTION

Les études de pollutions des milieux poreux naturels ainsi que les transferts hydriques dans les sols non saturés ont retenu l'attention de nombreux chercheurs. Ces études se sont intensifiées depuis qu'on a constaté que la contamination des sols pouvait avoir de graves influences sur l'environnement, la flore et la faune. Le dépôt des déchets industriels et ménagers est devenu un des principaux facteurs de la contamination du sol par des métaux. Ce dépôt aéroporté représente dans une échelle globale, la source principale de pollution du sol.

De nos jours, la protection de l'environnement est une priorité. La pollution industrielle, en particulier, devient une véritable préoccupation. Une des conséquences de cette pollution est son impact sur la qualité des sols et par la suite sur la qualité des eaux souterraines. Bon nombre d'entreprises se spécialisent aujourd'hui dans un créneau porteur : la dépollution des sols.

Les processus régissant le transport de contaminant dans les sols saturés sont également valides pour les sols non saturés ; cependant, les paramètres de transport peuvent être tout à fait différents. Généralement les paramètres de transport tels que la conductivité hydraulique, les coefficients de diffusion et d'adsorption sont constants pour les sols saturés. Dans les sols non saturés, il faut connaître les relations entre ces paramètres et la teneur en eau volumique.

Lorsqu'il pleut sur une zone de stockage, l'eau se mélange avec des polluants des déchets et s'infiltre dans le sol. La détermination des paramètres de la migration de ces eaux chargées se fait grâce à des méthodes expérimentales et de modèles numériques : toute interprétation des résultats doit tenir compte des hypothèses simplificatrices admises pour les caractéristiques et les conditions initiales du sol ainsi que les conditions aux limites de l'essai.

La mesure de la teneur en eau et de la conductivité électrique des sols est nécessaire pour définir le taux d'infiltration, le flux d'eau dans le sol, les taux de transfert des polluants, et pour évaluer le potentiel de fuite d'un site ou d'une barrière étanche.

L'écoulement de l'eau dans les sols est un des plus importants aspects en géotechnique et géo-environnement. La complexité des systèmes hydrogéologiques et l'intervention de plusieurs paramètres et données font que la résolution des problèmes liés aux écoulements nécessite l'utilisation d'outils informatiques et mathématiques et de logiciels de modélisation numérique.

Par définition, un modèle est une représentation simplifiée de la réalité qui a pour objectif de décrire le comportement des systèmes naturels. Cela peut aller du modèle conceptuel au modèle numérique en passant par les modèles géologiques, hydrogéologiques, mathématiques et physiques.

Dans notre cas le choix a été, porté sur Seep /W et CTRAN. La géométrie du système à modéliser est ensuite définie (notre choix s'y porté sur le barrage de Hammam Debagh wilaya de Guelma). On détermine après les paramètres représentatifs décrivant les variations spatiales du système d'écoulement à travers le corps du barrage, les conditions aux limites et leurs variations dans le temps, les conditions initiales, le maillage et on effectue enfin les vérifications élémentaires. Après cette étape de conception du modèle.

## **VIII.2. ÉCOULEMENT ET TRANSPORT DES IONS**

L'écoulement de l'eau dans les sols est un des plus importants aspects en géotechnique et géo-environnement. La complexité des systèmes hydrogéologiques et l'intervention de plusieurs paramètres et données font que la résolution des problèmes liés aux écoulements nécessite l'utilisation d'outils informatiques et mathématiques et de logiciels de modélisation numérique. Par définition, un modèle est une représentation simplifiée de la réalité qui a pour objectif de décrire le comportement des systèmes naturels. Cela peut aller du modèle conceptuel au modèle numérique en passant par les modèles géologiques, hydrogéologiques, mathématiques et physiques.

### **VIII.2. 1.Modélisation de l'écoulement de l'eau souterraine avec Seep/W**

Le code numérique est une simulation mathématique de processus physiques réels. Seep/W est un modèle numérique qui peut simuler mathématiquement le processus physique réel d'écoulement d'eau à travers un milieu particulier.

Comme expliqué précédemment, plusieurs étapes indispensables sont nécessaires pour modéliser un système d'écoulement en régime permanent: La création d'une géométrie de base, la génération d'un maillage en éléments finis, la définition du type de problème, la définition

des conditions aux limites, la définition des paramètres d'écoulement, le lancement de la simulation, la visualisation des résultats et le calcul des flux et bilan hydrologiques.

### **VIII.2. 1.1. Définition du type de problème**

La modélisation de l'écoulement est faite en 2-D en régime permanent. En ce qui concerne les critères de convergence, on a utilisé la méthode du point de Gauss (Gauss point conductivity) avec un nombre maximal d'itérations de 500 et une tolérance de  $1e^{-6}$ . Les équations d'écoulement sont résolues par la méthode dite directe parallèle (Parallel Direct Equation Solver).

La modélisation de l'écoulement des eaux est basée sur la géométrie simplifiée de la digue. Cela permet de comprendre les phénomènes d'écoulement dans la zone d'étude. Mais, un des objectifs de ce chapitre est d'essayer de comprendre les mouvements des eaux et des ions dans le corps du barrage pour expliquer l'origine des ions et la qualité des eaux avale.

La modélisation est faite sur la coupe type simplifiée du barrage de Guelma.

### **VIII.2. 2. Modélisation de la migration des chlorures avec Ctran/W**

Au début, la question suivante se posait : quel ion, parmi tous les ions majeurs analysés lors du chapitre 6 va-t-on modéliser? Au fur et à mesure de l'avancement, il a été décidé, au vu des informations obtenues dans la littérature scientifique, que la modélisation des chlorures serait le meilleur choix. En effet, une fois dissoutes dans les eaux, les chlorures ( $Cl^-$ ) restent en solution. Ils ne font pas partie des réactions d'oxydoréduction, ne forment pas d'importants complexes avec d'autres ions (sauf si leur concentration est élevée), ne forment pas de sels de faible solubilité, ne sont pas facilement adsorbés sur la surface des minéraux et ne prennent pas part à la plupart des réactions biochimiques (Kresic 2007). Pour toutes ces raisons, les chlorures sont dits non réactifs. Kauffman et Orlob (1956) ont conclu que, parmi tous les ions et isotopes (tritium) testés, les chlorures se déplacent avec l'eau souterraine dans la plupart des sols testés avec le minimum de retard.

La deuxième partie de la modélisation numérique a pour objectif de modéliser le mouvement des chlorures dans la zone étudiée. Pour cela, on utilise le logiciel CTRAN/W. Comme

SEEP/W, CTRAN/W est un logiciel d'éléments finis qui est utilisé pour modéliser le mouvement des contaminants à travers des milieux poreux. Ce logiciel permet d'analyser divers problèmes allant du simple transport par advection (particle tracking analysis) à de plus complexes cas prenant en compte la diffusion, la dispersion et l'adsorption (dispersion-diffusion). L'avantage de CTRAN/W est son intégration avec SEEP/W. Les deux logiciels sont utilisés en tandem pour analyser les problèmes reliés au transport des contaminants.

### VIII.2. 2.1. Propriétés des matériaux

Dans ce chapitre, on exposera les différentes propriétés des matériaux (argile, calcaire et gravier) nécessaires pour effectuer la modélisation avec CTRAN/W.

Comme on l'a présenté au chapitre 3, la dispersion hydrodynamique  $D$  pour un écoulement en 1-D est définie de la manière suivante :

$$D = \alpha \cdot v + D^* \quad (\text{VIII.1})$$

$\alpha$ ,  $v$  et  $D^*$  étant la dispersivité (m), la vitesse d'écoulement ( $v$  (m/s) =  $v D/n$ ) et le coefficient de la diffusion moléculaire.

Pour le coefficient de diffusion moléculaire, on utilisera les valeurs trouvées dans la littérature et notamment dans Desaulniers et Cherry (1989), Olkers (2003) et Montgrain (1997). Un coefficient de diffusion de  $\text{Cl}^-$  de  $2.10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  est retenu.

### VIII.2. 2.2. Conditions aux frontières

La solution des problèmes numériques est une réponse directe aux conditions aux frontières. C'est pour cela que la détermination de ces conditions est une composante clé dans toute modélisation numérique.

Pour ce problème, trois conditions aux frontières seront appliquées:

- Condition à la sortie du système (Exit review): Cette condition est préconisée dans le cas où on ne connaît ni le flux de masse ni la concentration. Il existe deux types de « exit review ». Une première qui ignore le flux dispersif à la sortie d'un système ( $Q_d = 0$ ). Dans ce cas, on considère qu'un contaminant quitte le système par advection seulement ce qui peut être simpliste comme hypothèse. Pour le deuxième cas que nous avons

d'ailleurs adopté dans cette approche, on prend en compte l'advection et la dispersion comme processus lors de la sortie du contaminant du système ( $Q_d \geq 0$ ). Cette option permet d'obtenir des résultats plus réalistes.

- Le parement aval, une concentration  $C=0$  sera appliquée.
- La concentration initiale sera prise celle mesurée sur terrain.

### VIII.2. 2.2.Type de l'analyse

Tout d'abord, il est à noter que la précision de toute solution de transport d'ion est dépendante de la précision de la solution obtenue pour l'écoulement. Comme dans la modélisation de l'écoulement, le transport des ions s'effectuera en régime permanent et en 2-D. Deux types d'analyses sont utilisés dans la modélisation de notre problème:

- Le transport par advection seulement : Avant de réaliser une étude de transport complète, il est souhaitable d'effectuer une modélisation qui ne prend en compte que le transport advectif. En isolant la composante « diffusion », on peut avoir une idée de l'influence de l'écoulement sur le transport des contaminants ainsi que les temps de transit. Le principe de ce type d'analyse « Particle Tracking Analysis » est d'introduire arbitrairement des particules dans le système, ces dernières sont considérées être attachées aux molécules d'eau. Ainsi, leur déplacement sera identique à celui des molécules d'eau souterraine. La modélisation peut être faite dans le sens de l'écoulement (Forward particle tracking) ou dans le sens contraire de l'écoulement (Backward particle tracking).
- Le transport par advection-dispersion: Dans ce type d'analyse, on prend en compte toutes les composantes du transport des contaminants. Ainsi, en insérant toutes les propriétés des matériaux (porosité, dispersivité,...) et des contaminants (coefficient de diffusion moléculaire), on arrive à inclure toutes les composantes nécessaires au transport d'ions dans un milieu poreux.

### VIII.2. 2.3.Résultats: Modélisation de la migration des chlorures

La géométrie de la digue du barrage est simplifiée pour des raisons de simplification et de faciliter la simulation.

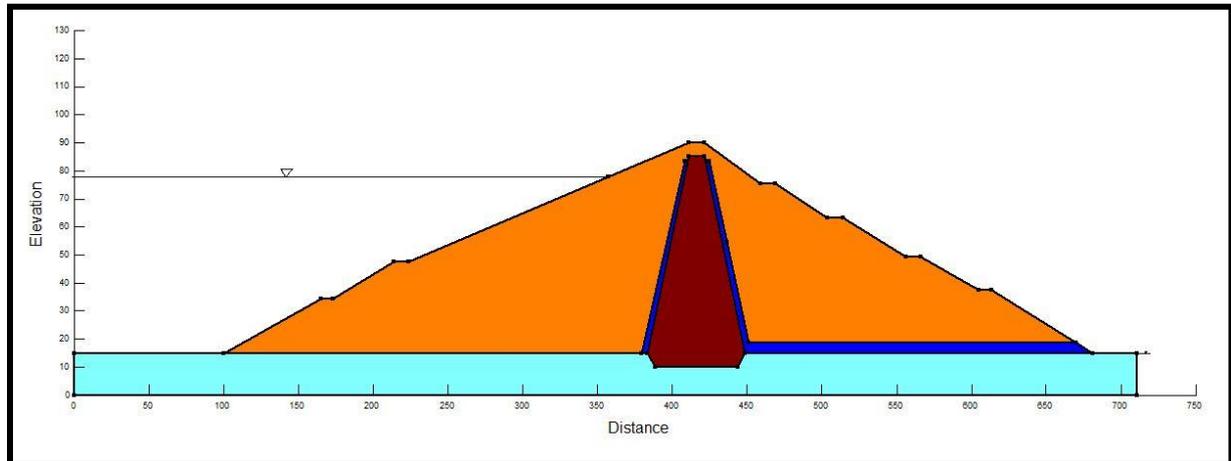


Figure VIII. 1:Schéma de la coupe type de la digue du barrage Bouhamdane.

Lignes d'écoulement et équipotentiels dans la digue de Bouhamdane. La Figure VIII. 1 montre que les lignes de courants convergent vers le pied aval du noyau du côté du filtre ou nous avons indiqués les conditions aux limites des débits nuls.

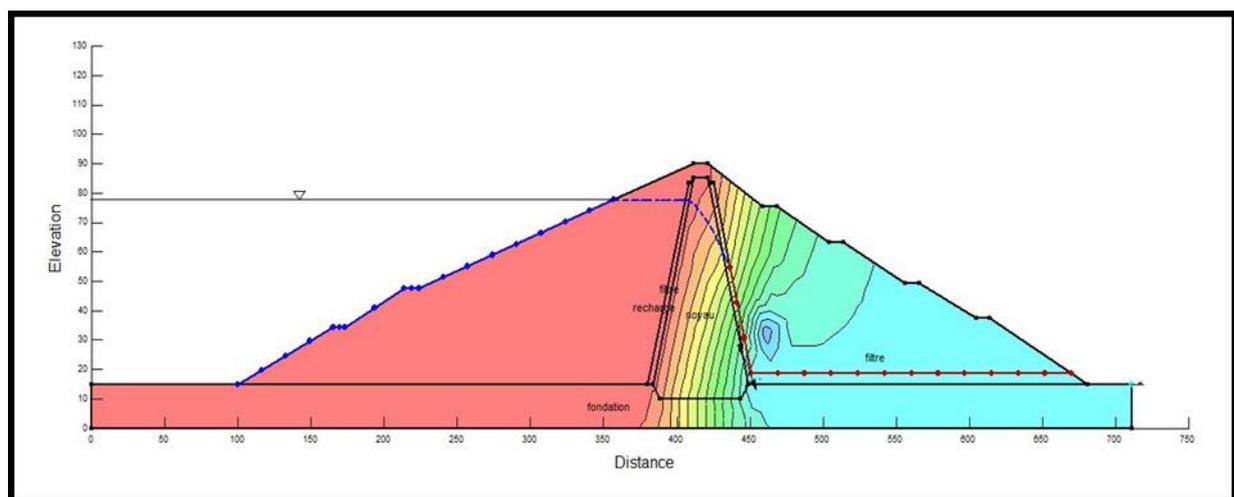


Figure VIII. 2 : Schéma des lignes de courants par géo studio.

Enfin, on a pu obtenir, grâce à Seep/W, les débits dans les différentes couches de la digue. Le débit de fuite à travers le corps du barrage diminue d'amont en aval ce qui signifie le fonctionnement du noyau comme organe d'étanchéité.

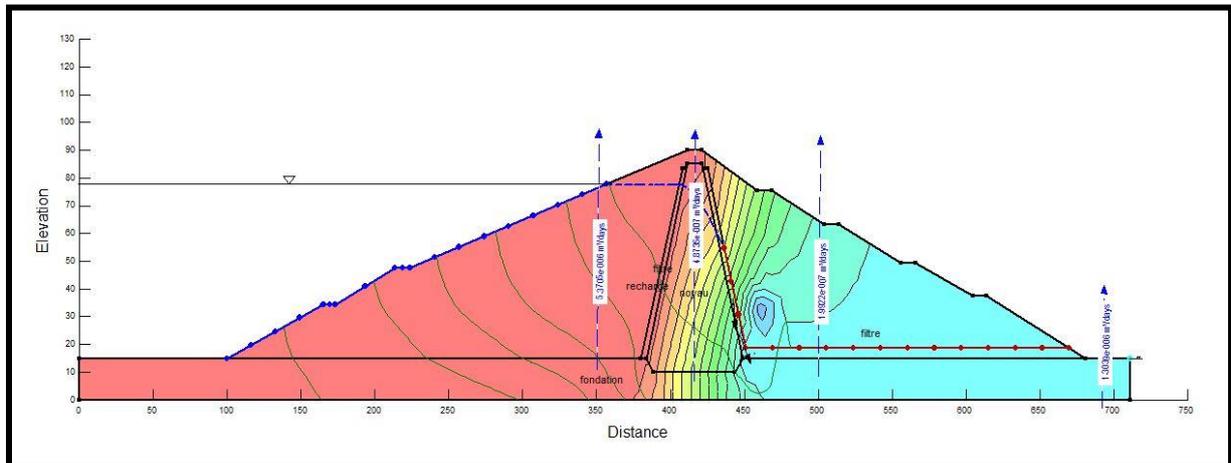


Figure VIII. 3: Schéma des débits de fuite.

La simulation de la migration des chlorures est effectuée dans un modèle simplifié de la digue. La figure illustre les résultats de la modélisation du transfert des chlorures à travers le corps du barrage. Pour notre étude nous n'avons simulé qu'un seul scénario qui est le niveau d'eau amont atteint le NNR et la concentration de la pollution et la concentration moyenne annuelle de la série de mesure.

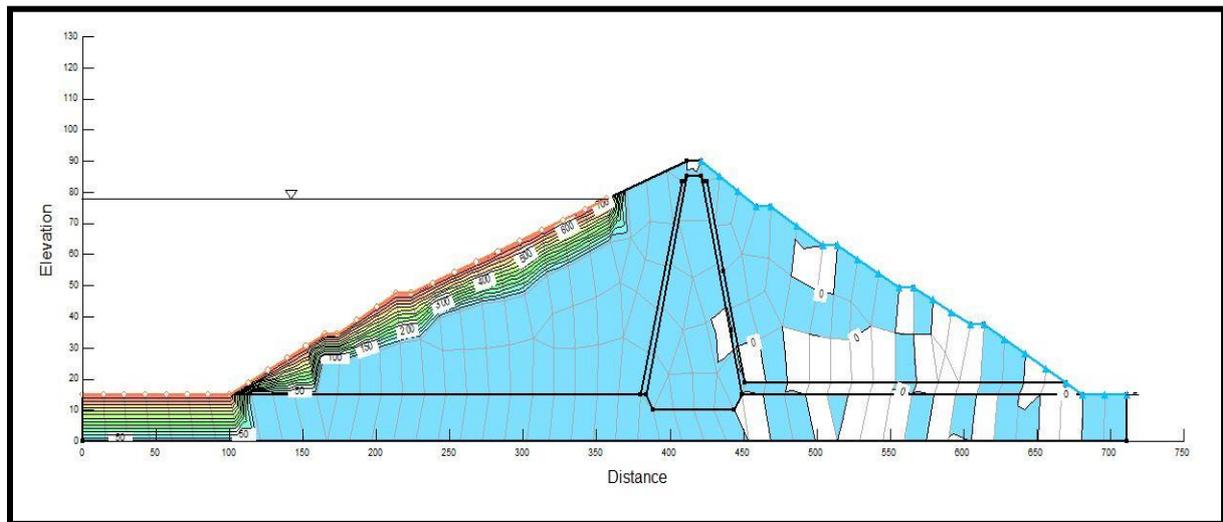


Figure VIII. 4:Schéma de la diffusion de la pollution.

Comme conditions au départ nous avons pris une dispersivité longitudinale égale à 2 et transversale égale à 1. Le temps de parcours est pris égale à sept ans et demi (2750 jours).

On a mis une concentration des chlorures  $C = 73,37 \text{ Kg/m}^3$  dans le temps initial ( $t = 0$ ), après 2750 jours ( $t = 2750$  jours) la concentration devient  $C = 5 \text{ Kg/m}^3$  à l'intérieur de la digue avant le noyau. Ce qui s'explique par que la pollution n'atteint pas l'aval.

On conclut avec cette approche que le barrage joue le rôle d'un filtre pour les particules en passant par différents matériaux de construction de tailles allant de gravier aux argiles.

### VIII.3. CONCLUSION

La modélisation de la migration des chlorures permet à partir de la compilation de plusieurs résultats d'analyses et d'essais, de dire que le processus de transport se fait par deux mécanismes: la diffusion et l'advection. Dans l'argile, on constate que même si les vitesses d'écoulement et les gradients hydrauliques y sont faibles, la composante ``advection`` contribue à la migration des chlorures dans l'argile.

Par contre, l'évolution des concentrations des chlorures en utilisant différents scénarios et hypothèses rend l'option « diffusion et advection » la plus adaptée. On a pu conclure le rôle de la digue comme filtre qui améliore la qualité de flux traversé.

## **BIBLIOGRAPHIE**

A J.Schleiss. HPougatsch, les barrages constituent l'une des réalisations les plus imposantes et les plus complexes du génie civil, et depuis toujours un facteur important de développement et de prospérité économique.

Carlsten S., Johanson S., et Worman A. (1995). Radar techniques for indicating internal erosion in embankment dams. *Journal of Applied Geophysics*, 33, pp 143-156.

Corwin, R. F. et Hoover, D. B. (1979). The self-potential method in geothermal exploration. *Geophysics*, volume 44, numéro 2, p. 226-45.

Fauchard C., et Mériaux P. (2007). Geophysical and geotechnical methods for diagnosing flood protection dikes, Guide for implementation and interpretation

Fell R., Wan C. F., Cyganiewicz J., et Foster M. (2001). The time for development and detectability of internal erosion and piping in embankment dams and their foundations: UNICIV report No. R-399, ISBN : 85841 366 3, ISSN 0077-880X.

Foster M., Fell R., et Spannagle M. (2000). A method for assessing the relative likelihood of failure of embankment dams by piping. *Can. Geotech. J.*, 37, pp 1025-1061.

Johansson S. (1997). Seepage Monitoring in Embankment Dams. Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

Kresic, N. (2007). Hydrogeology and groundwater modeling. Boca Raton, Fla., CRC Press

Massiéra M., Szostak-Chrzanowski A., Bazanowski M., Withaker C., et Vautour J. (2008). Analyse des déformations de grands barrages en remblai pendant le remplissage et l'opération du réservoir. Paper presented at the Congrès annuel 2008 de la SCGC.

Olhoeft, G. R. (1999). Ground penetrating radar: use and misuse. Dans *Subsurface Sensors and Applications*, volume 3752. SPIE-Int. Soc. Opt. Eng, USA, p. 166-73.

Stark, A. (2008). Seismic methods and applications: a guide for the detection of geologic structures, earthquake zones and hazards, resource exploration, and geotechnical engineering.

## *Conclusion Générale*

## CONCLUSION GENERALE

L'eau est une ressource de l'environnement et un bien collectif. Sa contribution au développement d'une société est si indispensable qu'on s'accorde à dire qu'il n'y a pas de vie sans eau. Donc, l'eau c'est la vie. Mais nous devons savoir quelle est cette eau qui donne la vie. Si cette eau n'est pas bonne, elle donne le contraire de la vie. C'est dans ce cadre, que ce travail de recherche a été réalisé sur la ressource superficielle du Nord Est Algérien. Le but de cette étude est d'utiliser une approche permettant d'appréhender l'état de pollution du milieu aquatique des dix-huit barrages en remblai suivi par ANBT et de faire par la suite, une appréciation de la qualité de l'eau depuis l'amont (cuvette) jusqu'au cours d'eau à l'aval de l'ouvrage hydrotechnique. Ceci a permis surtout de déterminer les facteurs qui influent sur la qualité de cette eau et les mécanismes qui les ont engendrés.

La zone d'étude concerne le Nord Est de l'Algérie qui se trouve limitée par les parallèles  $37^{\circ}$  et  $33^{\circ}$  de latitude Nord, par les longitudes  $9^{\circ}$  Est et  $5^{\circ}$  Ouest. La surface totale de cette zone est d'environ 89 616 Km<sup>2</sup> et regroupe 13 wilayas. Le climat est de type méditerranéen avec un hiver relativement doux et pluvieux et un été chaud et sec. Les précipitations moyennes varient selon un gradient Est-Ouest et Nord Sud. Les températures varient considérablement en passant du littoral aux hauts plateaux, les minimas sont enregistrés en janvier et les maximas en juillet et aout.

L'infra structure hydraulique regroupe dix-huit (18) barrages en remblai dont la qualité des eaux brutes est suivi par l'agence nationale des ressource hydrographique ANRH Constantine répartie sur l'ensemble de la zone d'étude sur la période 2010-2015 et pour l'étude de la qualité aval des barrages et le transfert de polluant nous avons étudié les trois barrages Zit Emba, Hammam Debagh et Ain Dalia pour l'année 2016/2017.

L'impact de la pollution apportée par les eaux usées déversées est ressenti au niveau des eaux des barrages pendant la période de basses eaux qu'en période de hautes eaux. Ceci se traduit par une augmentation importante de la DBO<sub>5</sub>, la DCO, les nitrites et l'ammonium accompagnée d'une diminution de l'oxygène.

Le rapport DCO/DBO<sub>5</sub> montre que la plupart des valeurs sont supérieur à 3 ce qui confirme que les effluents agro-industriels sont difficilement biodégradables.

La qualité des eaux superficielles, dépend de plusieurs paramètres physiques, chimiques et biologiques. Leur variation spatio-temporelle est due soit à la lithologie des terrains traversés (dissolution des formations géologiques), soit à des facteurs externes (déversement anarchique

des eaux urbaines ou sans aucun traitement préalable, le non respect des normes des eaux industrielles déversées et de l'activité agricole suite à l'utilisation intensive des engrais chimiques).

De fortes teneurs en nitrates, nitrites et ammonium polluent l'oued. Leur provenance est multiple car on les retrouve au niveau des rejets urbains mais plus au niveau des stations où les terres sont cultivées (activité agricole).

Les fortes teneurs en sodium, calcium, chlorure et sulfate sont dues, généralement, à la dissolution des formations évaporitiques (présence des formations gypseuses et salifères), leurs lessivages augmentent la salinité des eaux au niveau de ces endroits. Cette augmentation est traduite par une forte conductivité dépassant parfois les 30 milli siemens/cm).

Les teneurs en cations et en anions majeurs sont inférieures à la norme pour la quasi-totalité des échantillons.

L'étude la qualité des eaux d'irrigation selon la classification de Richards ou Riverside et celle de Wilson a montré que la qualité de l'eau est excellente à bonne dans les trois barrages.

La modélisation numérique a été une importante valeur ajoutée, qui a permis de vérifier plusieurs hypothèses et surtout, elle a permis de connaître l'effet de la digue sur la qualité des eaux de fuites et se projeter dans le futur pour prédire la suite de l'évolution des choses.

### **Recommandations.**

- l'implantation des stations de traitement des eaux à la sortie des agglomérations importantes est souhaitable pour épurer les eaux avant leur rejet ;
- Installation d'un réseau d'assainissement efficace des usines pour éviter la contamination des eaux souterraines par les eaux usées ;
- Il faut bien aménager les terrains et les lieux de stockage des métaux pour qu'ils ne contribuent pas à la libération des ions métalliques ( $Fe^{++}$ ,  $Cu^{++}$ ,  $Ni^{++}$ , ..)
- Une campagne prolongée de vulgarisation sur l'utilisation des engrais est à prévoir.

# *Annexes*

**Annexe 1:** Caractéristiques statistiques élémentaires des analyses physico-chimiques des eaux de barrages de l'Est Algérien pour la période 2010-2015. Tous les paramètres sont exprimés en mg/l excepté OD (%) et volume Hm<sup>3</sup>.

Volume	Ain Zada	Guénitra	Ain dalia	Cheffia	H- Debagh	Mexa	Al Agrem	Beni Zid	Zit Emba	Koudiat Mdouar	Oued Athmania	Kissir	Babar	Boussiaba	FoumEl Gueis	O- Charef	F- Gazelles	Bougous	OMS	ALG
<b>Min</b>	36,27	18,11	17,97	67,41	69,08	15,35	23,65	30,70	50,13	14,09	21,03	3,00	30,53	116,9	0,02	65,44	17,07	33,44		
<b>Max</b>	102,7	119,9	108,6	147,4	186,1	36,27	40,26	83,58	120,4	64,21	68,38	70,73	37,98	121,6	0,44	93,44	29,60	65,92		
<b>1<sup>er</sup> Quart</b>	67,73	90,05	28,90	88,17	104,5	24,77	27,76	36,67	94,68	21,05	28,32	63,24	34,63	118,6	0,30	74,23	19,09	46,34		
<b>Médiane</b>	78,82	96,09	36,00	109,4	130,0	28,42	30,40	38,51	102,7	39,16	30,98	68,13	36,34	120,2	0,42	78,60	21,03	50,99	-	-
<b>3<sup>ème</sup> Quart</b>	89,19	109,8	52,18	131,9	151,6	30,42	32,30	39,93	115,6	48,47	32,51	68,66	36,56	120,5	0,43	83,46	25,93	62,84		
<b>Moy</b>	77,28	97,84	41,93	109,9	130,8	27,86	30,15	39,86	102,6	36,17	30,80	64,67	35,61	119,6	0,34	78,11	22,26	52,11		
<b>C V</b>	0,20	0,16	0,43	0,22	0,26	0,14	0,10	0,20	0,14	0,42	0,19	0,15	0,05	0,01	0,39	0,09	0,18	0,20		
<b>Skew</b>	-0,61	-2,03	1,18	0,13	-0,08	-0,53	0,30	4,01	-1,61	0,12	4,68	-5,23	-1,47	-0,50	-1,33	-0,08	0,48	-0,24		
<b>Kurt</b>	0,12	9,59	2,01	-1,40	-1,01	0,60	0,89	18,39	4,66	-1,21	32,10	33,67	2,96	-0,82	0,86	-0,16	-1,14	-0,60		
<b>Ecart-type</b>	2,08	2,13	2,40	3,17	4,59	0,53	0,42	1,07	1,89	2,03	0,77	1,40	0,35	0,30	0,03	1,50	0,88	2,22		

Rs	Ain Zada	Guénitra	Ain dalia	Cheffia	H- Debagh	Mexa	Al Agrem	Beni Zid	Zit Emba	Koudiat Mdonar	Oued Athmania	Kissir	Babar	Boussiaba	FoumEl Gueis	O- Charef	F- Gazelles	Bougous	OMS	ALG
<b>Min</b>	550,00	41,40	308,00	210,00	342,00	224,00	156,00	108,00	382,00	586,00	656,00	120,00	260,00	244,00	198,00	173,00	1520,0	180,00		
<b>Max</b>	1020,0	622,00	486,00	464,00	840,00	508,00	306,00	280,00	566,00	826,00	834,00	356,00	954,00	362,00	890,00	1944,0	2600,0	240,00		
<b>1<sup>ier</sup> Quart</b>	790,00	358,00	378,00	240,00	420,00	304,00	236,00	130,00	440,00	630,00	728,00	158,00	736,00	258,50	357,00	1693,0	1690,5	197,50		
<b>Médiane</b>	830,00	374,00	398,00	260,00	444,00	332,00	250,00	140,00	456,00	678,00	748,00	170,00	778,00	281,00	459,00	1770,0	1792,5	204,00		
<b>3<sup>ème</sup> Quart</b>	886,00	386,00	422,00	290,00	472,00	380,00	262,00	152,00	470,00	718,00	780,00	180,00	840,50	289,50	495,00	1866,5	1980,0	212,00	1500	1500-2000
<b>Moy</b>	825,67	373,95	398,70	271,09	451,58	339,95	248,56	144,91	455,96	681,82	752,25	173,80	762,36	281,64	450,64	1582,6	1834,5	207,55		
<b>C V</b>	0,11	0,16	0,09	0,16	0,14	0,17	0,10	0,19	0,07	0,09	0,05	0,21	0,17	0,10	0,32	0,36	0,13	0,07		
<b>Skew</b>	-0,67	-1,62	0,05	1,77	3,72	0,35	-0,74	2,63	0,39	0,51	0,23	2,86	-2,35	1,02	0,92	-2,03	1,24	0,67		
<b>Kurt</b>	0,98	19,65	0,39	5,31	22,34	0,22	2,60	10,12	1,55	-0,63	0,02	13,13	9,14	1,65	2,95	3,24	3,08	0,37		
<b>Ecart-type</b>	12,11	8,11	4,55	5,90	8,64	7,58	3,29	3,66	4,53	8,37	4,98	5,18	28,77	6,15	31,12	123,07	52,88	3,37		169

	Ain Zada	Guénitra	Ain dalia	Cheffia	H-Debagh	Mexa	Al Agrem	Beni Zid	Zit Emba	Koudiat Mdouar	Oued Athmania	Kissir	Babar	Boussiaba	FoumEl Guéis	O- Charef	F- Gazelles	Bougous	OMS	ALG	
<b>O<sub>2</sub></b>																					
<b>Min</b>	31,47	71,13	73,77	53,09	61,73	50,44	65,33	70,58	11,36	60,71	53,68	71,55	66,67	74,07	64,00	70,19	75,67	86,54			
<b>Max</b>	184,34	137,18	143,02	141,49	142,04	135,78	143,42	143,42	129,35	109,57	125,88	162,06	133,33	134,02	118,87	115,74	136,58	126,00			
<b>1<sup>ier</sup> Quart</b>	73,45	83,01	82,75	94,44	83,33	88,66	86,96	86,41	87,03	80,41	76,92	87,96	91,80	90,69	70,77	82,45	91,88	94,69			
<b>Médiane</b>	87,62	92,59	91,30	102,27	91,89	99,06	97,00	96,47	92,00	88,00	84,21	97,56	97,14	97,84	80,72	90,66	102,05	103,80			
<b>3<sup>ème</sup> Quart</b>	102,56	102,36	97,30	109,45	101,23	108,49	105,66	107,00	102,43	94,44	96,55	105,66	101,55	106,70	91,21	96,80	117,71	115,96			
<b>Moy</b>	88,57	94,36	91,43	101,56	94,12	98,75	97,27	96,82	93,88	87,39	87,64	98,33	97,93	99,96	83,13	89,67	104,87	104,93	80%	60%	
<b>C V</b>	0,29	0,15	0,14	0,15	0,17	0,16	0,16	0,15	0,18	0,13	0,18	0,16	0,13	0,14	0,18	0,13	0,16	0,11			
<b>Skew</b>	0,78	0,79	1,17	-0,13	0,77	-0,28	0,61	0,53	-1,71	-0,29	0,33	1,23	0,47	0,69	0,79	0,08	0,13	0,09			
<b>Kurt</b>	2,50	0,71	2,75	1,43	0,72	0,67	1,50	0,73	9,40	-0,34	-0,10	3,69	3,43	1,08	0,22	-0,32	-0,92	-1,28			
<b>Ecart-type</b>	3,44	1,92	1,76	2,09	2,09	2,11	2,03	1,93	2,23	1,57	2,09	2,31	2,67	3,16	3,26	2,53	3,68	2,62			

NO <sub>3</sub>	Ain Zada	Guénitra	Ain dalila	Cheffia	H- Debagh	Mexa	Al Agrem	Beni Zid	Zit Emba	Koudiat Mdouar	Oued Athmania	Kissir	Babar	Boussaba	FoumEl Gueis	O- Charef	F- Gazelles	Bougous	OMS	ALG
<b>Min</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
<b>Max</b>	9,00	8,00	10,00	15,00	9,00	18,00	11,00	7,00	8,00	10,00	12,00	7,00	9,00	5,00	6,00	15,00	10,00	5,00		
<b>1<sup>er</sup> Quart</b>	0,75	1,00	2,00	1,93	1,12	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	2,00	0,00	0,25	0,00	0,00	5,00	1,00	0,00		
<b>Médiane</b>	2,00	2,00	3,00	2,45	2,00	2,00	1,00	1,00	1,21	2,00	5,00	1,00	1,00	0,50	1,00	6,00	2,50	1,00		
<b>3<sup>ème</sup> Quart</b>	4,00	3,00	5,00	4,00	5,00	4,00	2,00	2,00	2,00	4,00	6,00	1,00	2,75	1,00	2,00	7,75	5,00	3,00		
<b>Moy</b>	2,42	2,07	3,68	3,07	3,30	2,97	1,49	1,08	1,81	2,52	4,51	1,05	1,73	1,14	1,41	6,59	3,14	1,68	≤50	≤50
<b>C V</b>	0,99	0,87	0,68	0,84	0,76	1,00	1,31	1,18	1,08	0,85	0,61	1,40	1,15	1,39	1,15	0,58	0,94	1,00		
<b>Skew</b>	1,14	1,14	0,96	1,93	0,58	2,61	2,68	1,97	1,49	1,43	0,20	2,14	2,17	1,31	1,27	0,56	0,88	0,62		
<b>Kurt</b>	0,93	1,55	1,10	6,96	-0,73	10,58	9,82	6,79	2,23	2,44	-0,27	5,42	7,35	0,68	1,45	0,16	-0,03	-0,83		
<b>Ecart-type</b>	0,32	0,24	0,33	0,34	0,34	0,40	0,26	0,17	0,26	0,29	0,37	0,21	0,43	0,34	0,35	0,84	0,65	0,37		

	Ain Zada	Guénitra	Ain dalia	Cheffia	H- Debagh	Mexa	Al Agrem	Beni Zid	Zit Emba	Koudiat Mdouar	Oued Athmania	Kissir	Babar	Boussiaba	FoumEl Gueis	O- Charef	F- Gazelles	Bougous	OMS	ALG	
<b>NO<sub>2</sub></b>																					
<b>Min</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,02	0,00			
<b>Max</b>	7,32	0,46	0,27	0,20	0,47	0,20	0,44	0,98	0,38	0,22	0,24	3,05	0,28	0,05	0,60	0,14	1,12	0,08			
<b>1<sup>ier</sup> Quart</b>	0,05	0,03	0,04	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,05	0,01	0,02	0,00	0,03	0,07	0,06	0,02			
<b>Médiane</b>	0,10	0,06	0,06	0,04	0,05	0,05	0,02	0,03	0,04	0,06	0,08	0,02	0,03	0,01	0,05	0,09	0,07	0,03			
<b>3<sup>ème</sup> Quart</b>	0,30	0,09	0,08	0,08	0,08	0,09	0,04	0,06	0,10	0,09	0,12	0,04	0,05	0,02	0,08	0,10	0,12	0,05			
<b>Moy</b>	0,46	0,07	0,07	0,06	0,08	0,06	0,03	0,07	0,07	0,06	0,09	0,09	0,05	0,02	0,08	0,09	0,13	0,04	≤0.1	≤0.1	
<b>C V</b>	2,40	0,97	0,81	0,82	1,22	0,87	1,87	2,32	1,06	0,81	0,66	4,62	1,16	0,93	1,54	0,29	1,67	0,56			
<b>Skew</b>	4,69	3,50	1,99	1,20	2,63	1,19	4,63	4,55	2,06	1,06	0,66	6,55	2,80	0,99	3,67	-0,22	4,01	0,60			
<b>Kurt</b>	26,51	18,95	4,69	0,82	7,82	0,76	26,62	22,57	5,81	1,30	0,13	46,50	10,38	0,86	16,83	0,08	19,45	0,14			
<b>Ecart-type</b>	0,15	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,06	0,01	0,00	0,03	0,01	0,05	0,00			

NH <sub>4</sub>	Ain Zada	Guénitra	Ain dalia	Cheffia	H- Debagh	Mexa	Al Agrem	Beni Zid	Zit Emba	Koudiat Mdouar	Oued Athmania	Kissir	Babar	Boussiaba	FoumEl Gueis	O- Charef	F- Gazelles	Bougous	OMS	ALG
<b>Min</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00		
<b>Max</b>	2,98	0,65	0,68	0,20	0,27	0,27	0,57	0,50	0,50	0,50	0,63	0,16	0,19	0,32	0,62	0,52	0,71	0,12		
<b>1<sup>ier</sup> Quart</b>	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,02	0,10	0,06	0,00		
<b>Médiane</b>	0,10	0,03	0,03	0,04	0,02	0,03	0,01	0,02	0,05	0,05	0,04	0,00	0,08	0,01	0,06	0,14	0,17	0,02		
<b>3<sup>ème</sup> Quart</b>	0,78	0,06	0,09	0,07	0,05	0,06	0,03	0,05	0,09	0,10	0,09	0,04	0,14	0,02	0,09	0,32	0,40	0,05	≤0.5	≤0.5
<b>Moy</b>	0,56	0,06	0,07	0,04	0,03	0,05	0,03	0,04	0,07	0,07	0,08	0,03	0,09	0,05	0,10	0,20	0,24	0,03		
<b>C V</b>	1,51	1,80	1,69	1,13	1,60	1,21	2,62	1,87	1,31	1,29	1,55	1,55	0,65	1,83	1,40	0,71	0,87	1,14		
<b>Skew</b>	1,81	4,04	3,12	1,29	2,73	1,88	5,86	4,79	2,38	2,20	2,57	1,81	0,26	1,82	2,77	0,79	0,64	1,07		
<b>Kurt</b>	2,45	19,86	12,29	1,74	9,06	4,49	40,82	29,67	7,87	6,87	7,99	3,35	-1,03	2,38	10,24	-0,33	-0,72	0,89		
<b>Ecart-type</b>	0,11	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,03	0,03	0,05	0,01		

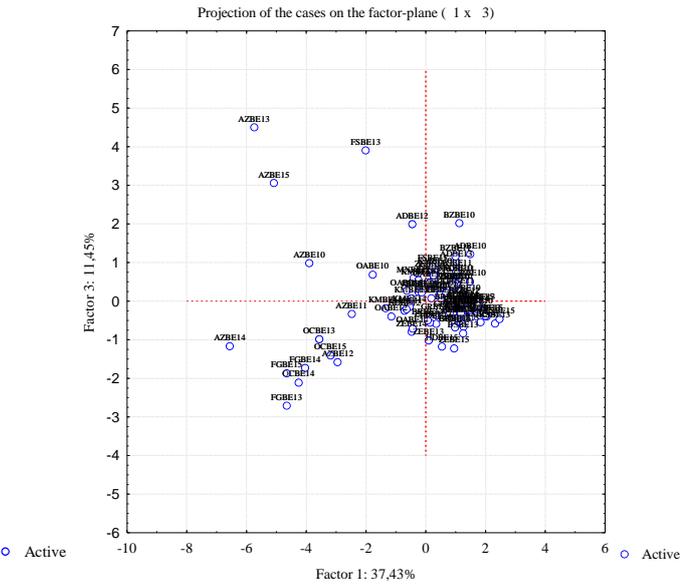
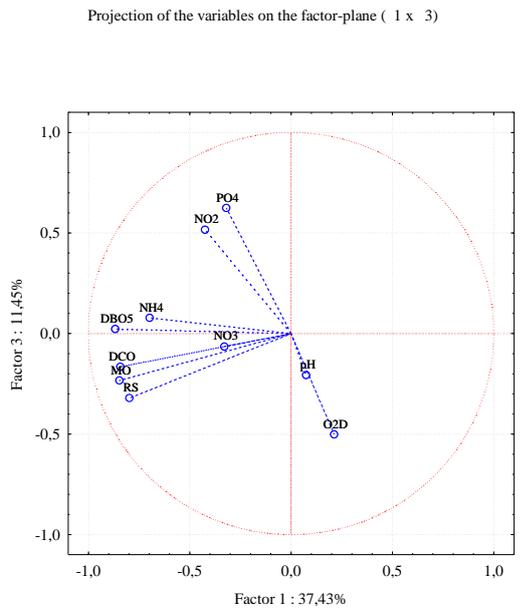
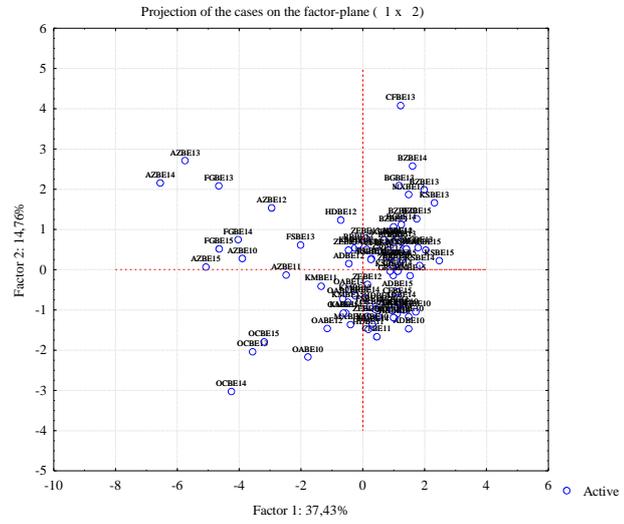
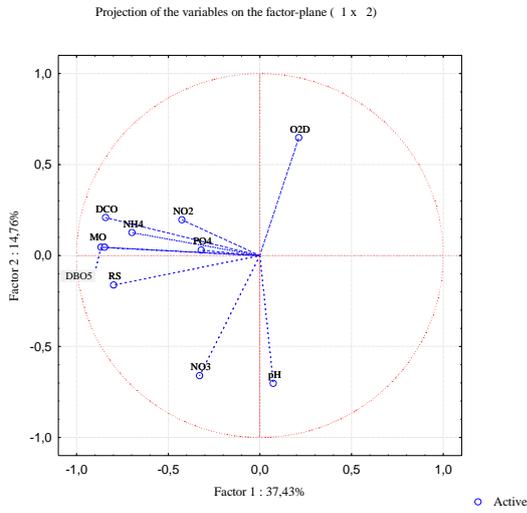
	Ain Zada	Guénitra	Ain dalia	Cheffia	H-Debagh	Mexa	Al Agrem	Beni Zid	Zit Emba	Koudiat Mdouar	Oued Athmania	Kissir	Babar	Boussiaba	FoumEl Gucis	O- Charef	F- Gazelles	Bougous	OMS	ALG	
<b>PO<sub>4</sub></b>																					
<b>Min</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
<b>Max</b>	0,40	0,40	1,44	0,60	0,50	0,96	0,50	0,70	0,30	0,30	0,67	0,20	0,08	0,12	0,73	0,20	0,17	0,20			
<b>1<sup>ier</sup> Quart</b>	0,05	0,00	0,00	0,01	0,01	0,03	0,00	0,00	0,00	0,01	0,04	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00			
<b>Médiane</b>	0,10	0,02	0,05	0,08	0,04	0,08	0,03	0,04	0,03	0,05	0,06	0,03	0,03	0,00	0,03	0,02	0,04	0,01			
<b>3<sup>ème</sup> Quart</b>	0,18	0,10	0,10	0,14	0,10	0,15	0,06	0,10	0,10	0,10	0,10	0,05	0,06	0,03	0,04	0,04	0,06	0,08			
<b>Moy</b>	0,13	0,05	0,10	0,11	0,09	0,15	0,05	0,09	0,06	0,06	0,10	0,05	0,03	0,02	0,07	0,04	0,04	0,04	≤0.5	-	
<b>C V</b>	0,71	1,37	1,99	1,15	1,32	1,46	1,55	1,57	1,25	1,12	1,10	1,22	0,92	1,54	2,12	1,57	0,94	1,28			
<b>Skew</b>	0,96	2,51	5,14	1,75	1,85	2,57	3,10	2,52	1,59	1,36	3,08	1,57	0,27	1,65	3,77	2,04	1,83	1,23			
<b>Kurt</b>	0,61	9,34	33,27	3,59	3,30	6,78	13,30	7,58	2,35	1,38	13,70	1,83	-1,51	2,79	17,45	4,40	6,24	1,52			
<b>Ecart-type</b>	0,01	0,01	0,03	0,02	0,02	0,03	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01			

DBO <sub>s</sub>	Ain Zada	Guénitra	Ain dalia	Cheffia	H- Debagh	Mexa	Al Agrem	Beni Zid	Zit Emba	Koudiat Mdouar	Oued Athmania	Kissir	Babar	Boussiaba	FoumEl Gueis	O- Charef	F- Gazelles	Bougous	OMS	ALG
<b>Min</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	3,00	3,00	1,00		
<b>Max</b>	18,00	6,00	8,00	6,00	7,00	7,00	10,00	7,00	7,00	10,00	12,00	9,00	4,00	4,00	4,00	12,00	11,00	5,00		
<b>1<sup>ier</sup> Quart</b>	4,00	1,00	1,00	1,00	2,00	1,00	1,00	1,00	1,00	2,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	4,00	5,25	1,00		
<b>Médiane</b>	5,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	3,00	3,00	3,00	1,00	2,00	2,00	2,00	5,00	6,00	2,00		
<b>3<sup>ème</sup> Quart</b>	8,00	3,00	3,00	3,00	3,00	4,00	3,00	3,00	4,00	4,00	4,00	2,00	3,00	2,75	2,75	6,00	7,00	2,00		
<b>Moy</b>	6,35	2,46	2,24	2,49	2,70	2,57	2,54	2,51	2,69	3,11	3,33	1,98	2,05	2,18	1,95	5,41	6,23	1,86	5	-
<b>C V</b>	0,60	0,52	0,68	0,59	0,61	0,68	0,70	0,69	0,60	0,56	0,74	0,79	0,48	0,51	0,50	0,38	0,27	0,49		
<b>Skew</b>	1,00	0,78	1,54	0,78	1,01	0,90	1,90	1,28	0,66	1,23	1,59	2,62	0,50	0,63	0,68	1,47	0,58	1,68		
<b>Kurt</b>	0,73	0,10	2,58	-0,39	0,13	-0,36	5,17	0,86	0,06	2,79	2,98	8,73	-0,75	-0,90	-0,47	3,92	2,11	4,98		
<b>Ecart-type</b>	0,51	0,17	0,20	0,20	0,22	0,23	0,24	0,23	0,21	0,23	0,33	0,23	0,21	0,24	0,21	0,44	0,37	0,20		

	Ain Zada	Guénitra	Ain dalia	Cheffia	H-Debagh	Mexa	Al Agrem	Beni Zid	Zit Emba	Koudiat Mdouar	Oued Athmania	Kissir	Babar	Boussiaba	FoumEl Guéis	O- Charef	F- Gazelles	Bougous	OMS	ALG	
<b>DCO</b>																					
<b>Min</b>	35,00	16,00	9,00	14,00	18,00	11,00	13,00	9,00	11,00	11,00	18,00	18,00	18,00	16,00	18,00	35,00	35,00	24,00			
<b>Max</b>	88,00	44,00	44,00	70,00	106,00	53,00	44,00	44,00	62,00	53,00	53,00	55,00	44,00	44,00	44,00	88,00	62,00	44,00			
<b>1<sup>er</sup> Quart</b>	53,00	18,00	18,00	26,00	28,00	26,00	18,00	26,00	26,00	33,00	35,00	26,00	28,25	26,00	35,00	44,00	45,00	26,00			
<b>Médiane</b>	62,00	26,00	26,00	28,00	35,00	35,00	26,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	39,50	52,50	53,00	35,00			
<b>3<sup>ème</sup> Quart</b>	70,00	35,00	35,00	35,00	44,00	35,00	35,00	35,00	44,00	44,00	44,00	35,00	35,75	35,00	44,00	53,00	53,00	35,00			
<b>Moy</b>	61,81	28,53	27,67	30,88	35,96	32,32	26,68	29,93	34,40	34,72	36,63	31,61	33,45	30,95	37,36	50,82	50,27	33,05	30	-	
<b>C V</b>	0,20	0,32	0,33	0,36	0,34	0,28	0,28	0,25	0,33	0,26	0,21	0,29	0,22	0,22	0,20	0,22	0,13	0,17			
<b>Skew</b>	0,42	0,19	0,22	0,93	3,20	-0,30	0,01	-0,34	0,07	-0,70	-0,17	0,84	-0,52	-0,70	-0,92	1,58	-0,69	0,01			
<b>Kurt</b>	0,00	-1,24	-0,96	1,70	17,19	-0,15	-0,99	-0,31	-0,63	0,25	-0,45	0,79	-0,06	0,01	0,16	4,45	0,84	-0,52			
<b>Ecart-type</b>	1,63	1,21	1,21	1,47	1,66	1,21	0,99	1,01	1,50	1,20	1,01	1,30	1,62	1,52	1,66	2,46	1,47	1,23			

MO	Ain Zada	Guénitra	Ain dalia	Cheffia	H- Debagh	Mexa	Al Agrem	Beni Zid	Zit Emba	Koudiat Mdouar	Oued Athmania	Kissir	Babar	Boussiaba	FoumEl Gueis	O- Charef	F- Gazelles	Bougous	OMS	ALG
<b>Min</b>	6,50	2,20	1,10	2,30	2,90	3,00	2,70	2,10	2,00	2,00	2,10	2,00	4,30	1,20	3,20	8,20	6,30	3,10		
<b>Max</b>	18,00	8,00	9,40	11,20	19,20	10,10	10,50	9,40	11,60	9,30	13,00	9,00	9,00	8,10	9,30	17,60	15,20	8,80		
<b>1<sup>ier</sup> Quart</b>	11,20	4,20	3,80	5,00	6,20	5,00	5,00	4,40	6,20	4,30	6,40	4,30	5,50	4,25	5,13	13,83	9,70	4,85		
<b>Médiane</b>	13,70	5,60	4,60	6,00	7,00	6,00	5,90	5,40	7,20	6,10	8,20	5,40	6,20	5,20	6,45	14,45	11,85	5,90		
<b>3<sup>ème</sup> Quart</b>	15,30	6,60	5,60	7,00	8,10	7,10	6,80	6,40	8,50	7,20	9,50	6,70	7,00	5,98	7,98	15,68	13,25	6,75		
<b>Moy</b>	13,23	5,46	4,61	6,05	7,44	6,11	5,96	5,45	7,23	5,87	8,09	5,40	6,31	5,11	6,53	14,23	11,55	6,02	-	-
<b>C V</b>	0,22	0,25	0,33	0,25	0,33	0,26	0,25	0,28	0,25	0,30	0,26	0,28	0,20	0,31	0,27	0,15	0,20	0,25		
<b>Skew</b>	-0,35	-0,04	0,48	0,79	2,70	0,58	0,34	0,34	-0,40	-0,16	-0,20	0,04	0,29	-0,35	-0,12	-1,32	-0,32	0,21		
<b>Kurt</b>	-0,64	-0,73	1,42	2,68	11,71	0,23	0,65	0,38	0,65	-0,81	0,23	0,01	-0,53	0,58	-1,14	2,17	-0,62	-0,39		
<b>Ecart-type</b>	0,39	0,18	0,20	0,21	0,33	0,22	0,20	0,20	0,25	0,24	0,28	0,22	0,27	0,34	0,38	0,47	0,51	0,33		

## Annexe 2 : Résultats de l'Analyse en Composantes Principales



### Annexe 3 : L'indice de qualité des eaux des barrages de l'Est Algérien

#### Barrage Ain Zada

Années	Saisons	WQI	Qualité
2010	Hiver	87,29	Très Mauvaise
2010	Printemps	53,07	Mauvaise
2010	Eté	38,78	Bonne
2010	Automne	54,56	Mauvaise
2011	Hiver	283,18	Inadaptée
2011	Printemps	211,58	Inadaptée
2011	Eté	23,19	Excellente
2011	Automne	141,97	Inadaptée
2012	Hiver	253,67	Inadaptée
2012	Printemps	64,1	Mauvaise
2012	Eté	47,91	Bonne
2012	Automne	70,65	Mauvaise
2013	Hiver	184,99	Inadaptée
2013	Printemps	manque de données	
2013	Eté	815,03	Inadaptée
2013	Automne	3136,33	Inadaptée
2014	Hiver	226,35	Inadaptée
2014	Printemps	133,98	Inadaptée
2014	Eté	121,71	Inadaptée
2014	Automne	112,71	Inadaptée
2015	Hiver	591,4	Inadaptée
2015	Printemps	107,43	Inadaptée
2015	Eté	manque de données	
2015	Automne	723,99	Inadaptée

#### Barrage Guénitra

Années	Saisons	WQI	Qualité
2010	Hiver	42,8	Bonne
2010	Printemps	98,19	Très Mauvaise
2010	Eté	17,11	Excellente
2010	Automne	38,69	Bonne
2011	Hiver	26,23	Bonne
2011	Printemps	73,32	Mauvaise
2011	Eté	20,07	Excellente
2011	Automne	52,76	Mauvaise
2012	Hiver	55,36	Mauvaise
2012	Printemps	97,85	Très Mauvaise
2012	Eté	152,82	Inadaptée
2012	Automne	17,07	Excellente
2013	Hiver	11,83	Excellente
2013	Printemps	27,12	Bonne
2013	Eté	manque de données	
2013	Automne	58,95	Mauvaise
2014	Hiver	64,71	Mauvaise
2014	Printemps	49,46	Bonne
2014	Eté	36,23	Bonne
2014	Automne	40,76	Bonne
2015	Hiver	23,6	Excellente
2015	Printemps	57,04	Mauvaise
2015	Eté	manque de données	
2015	Automne	52,62	Mauvaise

**Barrage Ain Dalia**

Années	Saisons	WQI	Qualité
2010	Hiver	61,06	Mauvaise
2010	Printemps	19,98	Excellente
2010	Été	79,87	Très Mauvaise
2010	Automne	46,97	Bonne
2011	Hiver	56,77	Mauvaise
2011	Printemps	49,22	Bonne
2011	Été	34,21	Bonne
2011	Automne	73,11	Mauvaise
2012	Hiver	43,3	Bonne
2012	Printemps	100,79	Inadaptée
2012	Été	170,99	Inadaptée
2012	Automne	43,63	Bonne
2013	Hiver	53,05	Mauvaise
2013	Printemps	manque de données	
2013	Été	27,44	Excellente
2013	Automne	29,02	Bonne
2014	Hiver	40,36	Bonne
2014	Printemps	22,71	Excellente
2014	Été	11,49	Excellente
2014	Automne	28,48	Bonne
2015	Hiver	53,17	Mauvaise
2015	Printemps	44,17	Bonne
2015	Été	manque de données	
2015	Automne	73,8	Mauvaise

**Barrage Chaffia**

Années	Saisons	WQI	Qualité
2010	Hiver	53,99	Mauvaise
2010	Printemps	62,9	Mauvaise
2010	Été	18,19	Excellente
2010	Automne	73,42	Mauvaise
2011	Hiver	76,52	Très Mauvaise
2011	Printemps	84,32	Très Mauvaise
2011	Été	21,25	Excellente
2011	Automne	3,8	Excellente
2012	Hiver	64,07	Mauvaise
2012	Printemps	68,4	Mauvaise
2012	Été	43,82	Bonne
2012	Automne	19,3	Excellente
2013	Hiver	22,3	Excellente
2013	Printemps	manque de données	
2013	Été	16,78	Excellente
2013	Automne	102,62	Inadaptée
2014	Hiver	33,38	Bonne
2014	Printemps	28,14	Bonne
2014	Été	11,89	Excellente
2014	Automne	30,59	Bonne
2015	Hiver	55,73	Mauvaise
2015	Printemps	44,49	Bonne
2015	Été	manque de données	
2015	Automne	34,06	Bonne

**Barrage H-Debagh**

Années	Saisons	WQI	Qualité
2010	Hiver	58,47	Mauvaise
2010	Printemps	26,01	Bonne
2010	Été	167,24	Inadaptée
2010	Automne	63,01	Mauvaise
2011	Hiver	61,68	Mauvaise
2011	Printemps	74,78	Mauvaise
2011	Été	42,13	Bonne
2011	Automne	40,32	Bonne
2012	Hiver	23,72	Excellente
2012	Printemps	127,213	Inadaptée
2012	Été	15,3	Excellente
2012	Automne	119,99	Inadaptée
2013	Hiver	60,71	Mauvaise
2013	Printemps	manque de données	
2013	Été	15,6	Excellente
2013	Automne	103,07	Inadaptée
2014	Hiver	26,05	Bonne
2014	Printemps	32,47	Bonne
2014	Été	28,02	Bonne
2014	Automne	68,75	Mauvaise
2015	Hiver	29,52	Bonne
2015	Printemps	96,42	Très Mauvaise
2015	Été	manque de données	
2015	Automne	47,8	Bonne

**Barrage Mexa**

Années	Saisons	WQI	Qualité
2010	Hiver	76,56	Mauvaise
2010	Printemps	102,74	Inadaptée
2010	Été	25,4	Bonne
2010	Automne	34,56	Bonne
2011	Hiver	102,66	Inadaptée
2011	Printemps	38,08	Bonne
2011	Été	47,17	Bonne
2011	Automne	4,58	Excellente
2012	Hiver	138,99	Inadaptée
2012	Printemps	25,1	Bonne
2012	Été	26,65	Bonne
2012	Automne	60,73	Mauvaise
2013	Hiver	55,13	Mauvaise
2013	Printemps	manque de données	
2013	Été	18,68	Excellente
2013	Automne	22,14	Excellente
2014	Hiver	59,33	Mauvaise
2014	Printemps	45,5	Bonne
2014	Été	21,41	Excellente
2014	Automne	70,7	Mauvaise
2015	Hiver	61,63	Mauvaise
2015	Printemps	27,38	Bonne
2015	Été	manque de données	
2015	Automne	37,12	Bonne

**Barrage Al Agrem**

Années	Saisons	WQI	Qualité
2010	Hiver	17,72	Excellente
2010	Printemps	12,1	Excellente
2010	Eté	15,72	Excellente
2010	Automne	19,88	Excellente
2011	Hiver	16,31	Excellente
2011	Printemps	11,34	Excellente
2011	Eté	52,83	Mauvaise
2011	Automne	11,43	Excellente
2012	Hiver	51,33	Mauvaise
2012	Printemps	17,64	Excellente
2012	Eté	21,76	Excellente
2012	Automne	109,66	Inadaptée
2013	Hiver	3,3	Excellente
2013	Printemps	manque de données	
2013	Eté	8,94	Excellente
2013	Automne	54,29	Mauvaise
2014	Hiver	26,29	Bonne
2014	Printemps	15,7	Excellente
2014	Eté	6,54	Excellente
2014	Automne	18,91	Excellente
2015	Hiver	27,26	Bonne
2015	Printemps	23,21	Excellente
2015	Eté	manque de données	
2015	Automne	20,71	Excellente

**Barrage Beni Zid**

Années	Saisons	WQI	Qualité
2010	Hiver	139,14	Inadaptée
2010	Printemps	638,21	Inadaptée
2010	Eté	26,45	Bonne
2010	Automne	24,08	Excellente
2011	Hiver	50,7	Mauvaise
2011	Printemps	78,81	Très Mauvaise
2011	Eté	10,43	Excellente
2011	Automne	23,13	Excellente
2012	Hiver	31,44	Bonne
2012	Printemps	21,19	Excellente
2012	Eté	19,68	Excellente
2012	Automne	17,9	Excellente
2013	Hiver	28,41	Excellente
2013	Printemps	14,59	Excellente
2013	Eté	manque de données	
2013	Automne	5,9	Excellente
2014	Hiver	40,45	Bonne
2014	Printemps	17,87	Excellente
2014	Eté	21,22	Excellente
2014	Automne	21,18	Excellente
2015	Hiver	17	Excellente
2015	Printemps	7,72	Excellente
2015	Eté	manque de données	
2015	Automne	15,92	Excellente

**Barrage Zit Emba**

Années	Saisons	WQI	Qualité
2010	Hiver	54,59	Mauvaise
2010	Printemps	31,67	Bonne
2010	Eté	61,71	Mauvaise
2010	Automne	140,67	Inadaptée
2011	Hiver	98,81	Très Mauvaise
2011	Printemps	76,34	Très Mauvaise
2011	Eté	18,54	Excellente
2011	Automne	68,25	Mauvaise
2012	Hiver	35,95	Bonne
2012	Printemps	60,26	Mauvaise
2012	Eté	102,96	Inadaptée
2012	Automne	63,26	Mauvaise
2013	Hiver	90,34	Très Mauvaise
2013	Printemps	manque de données	
2013	Eté	13,08	Excellente
2013	Automne	12,97	Excellente
2014	Hiver	26,25	Bonne
2014	Printemps	21,11	Excellente
2014	Eté	5,52	Excellente
2014	Automne	25,45	Bonne
2015	Hiver	32,69	Bonne
2015	Printemps	41,11	Bonne
2015	Eté	manque de données	
2015	Automne	30,23	Bonne

**Barrage Koudiat Medouar**

Années	Saisons	WQI	Qualité
2010	Hiver	66,01	Mauvaise
2010	Printemps	18,35	Excellente
2010	Eté	13,07	Excellente
2010	Automne	26,87	Bonne
2011	Hiver	24,01	Excellente
2011	Printemps	44,57	Bonne
2011	Eté	10,52	Excellente
2011	Automne	4,43	Excellente
2012	Hiver	46,89	Bonne
2012	Printemps	90,82	Très Mauvaise
2012	Eté	36,77	Bonne
2012	Automne	20,69	Excellente
2013	Hiver	34,43	Bonne
2013	Printemps	manque de données	
2013	Eté	60,28	Mauvaise
2013	Automne	102,95	Inadaptée
2014	Hiver	70,41	Mauvaise
2014	Printemps	71,24	Mauvaise
2014	Eté	72,59	Mauvaise
2014	Automne	50,28	Mauvaise
2015	Hiver	59,11	Mauvaise
2015	Printemps	58,21	Mauvaise
2015	Eté	manque de données	
2015	Automne	88,1	Très Mauvaise

**Barrage O-Althmania**

Années	Saisons	WQI	Qualité
2010	Hiver	47,26	Bonne
2010	Printemps	102,69	Inadaptée
2010	Eté	39,57	Bonne
2010	Automne	89,86	Très Mauvaise
2011	Hiver	53,54	Mauvaise
2011	Printemps	37,85	Bonne
2011	Eté	43,44	Bonne
2011	Automne	53,51	Mauvaise
2012	Hiver	28,79	Bonne
2012	Printemps	80,92	Très Mauvaise
2012	Eté	81,71	Très Mauvaise
2012	Automne	62,63	Mauvaise
2013	Hiver	60,62	Mauvaise
2013	Printemps	manque de données	
2013	Eté	123,53	Inadaptée
2013	Automne	76,92	Très Mauvaise
2014	Hiver	58,76	Mauvaise
2014	Printemps	71,98	Mauvaise
2014	Eté	57,83	Mauvaise
2014	Automne	91,27	Très Mauvaise
2015	Hiver	117,73	Inadaptée
2015	Printemps	65,06	Mauvaise
2015	Eté	manque de données	
2015	Automne	93,12	Très Mauvaise

**Barrage Kissir**

Années	Saisons	WQI	Qualité
2010	Automne	21,13	Excellente
2011	Hiver	738,78	Inadaptée
2011	Printemps	129,78	Inadaptée
2011	Eté	129,07	Inadaptée
2011	Automne	22,57	Excellente
2012	Hiver	26,38	Bonne
2012	Printemps	10,76	Excellente
2012	Eté	25,05	Bonne
2012	Automne	26,74	Bonne
2013	Hiver	3,5	Excellente
2013	Printemps	manque de données	
2013	Eté	2,8	Excellente
2013	Automne	20,27	Excellente
2014	Hiver	38,06	Bonne
2014	Printemps	10,13	Excellente
2014	Eté	6,4	Excellente
2014	Automne	17,29	Excellente
2015	Hiver	22,36	Excellente
2015	Printemps	5,15	Excellente
2015	Eté	manque de données	
2015	Automne	3,49	Excellente

### Barrage Babar

Années	Saisons	WQI	Qualité
2013	Eté	79,05	Très Mauvaise
2013	Automne	58,57	Mauvaise
2014	Hiver	12,91	Excellente
2014	Printemps	77,32	Très Mauvaise
2014	Eté	26,91	Bonne
2014	Automne	33,55	Bonne
2015	Hiver	35,5	Bonne
2015	Printemps	15,87	Excellente
2015	Eté	manque de données	
2015	Automne	28,01	Bonne

### Barrage Boussiaba

Années	Saisons	WQI	Qualité
2013	Eté	6,04	Excellente
2013	Automne	15,47	Excellente
2014	Hiver	17,75	Excellente
2014	Printemps	27,19	Bonne
2014	Eté	4,72	Excellente
2014	Automne	10,69	Excellente
2015	Hiver	19,301	Excellente
2015	Printemps	15,44	Excellente
2015	Eté	manque de données	
2015	Automne	4,72	Excellente

### Barrage Foum El Gueis

Années	Saisons	WQI	Qualité
2013	Eté	36,03	Bonne
2013	Automne	95,34	Très Mauvaise
2014	Hiver	37,22	Bonne
2014	Printemps	48,03	Bonne
2014	Eté	17,67	Excellente
2014	Automne	38,59	Bonne
2015	Hiver	221,17	Inadaptée
2015	Printemps	23,01	Excellente
2015	Eté	manque de données	
2015	Automne	35,66	Bonne

### Barrage Oued Charef

Années	Saisons	WQI	Qualité
2013	Eté	60,93	Mauvaise
2013	Automne	84,5	Très Mauvaise
2014	Hiver	86,32	Très Mauvaise
2014	Printemps	60,21	Mauvaise
2014	Eté	50,12	Mauvaise
2014	Automne	60,12	Mauvaise
2015	Hiver	63,08	Mauvaise
2015	Printemps	75,5	Très Mauvaise
2015	Eté	manque de données	
2015	Automne	87,97	Très Mauvaise

### Barrage Fontaine des Gazelles

Années	Saisons	WQI	Qualité
2013	Eté	62,82	Mauvaise
2013	Automne	68,92	Mauvaise
2014	Hiver	298,41	Inadaptée
2014	Printemps	43,15	Bonne
2014	Eté	29,03	Bonne
2014	Automne	64,08	Mauvaise
2015	Hiver	82,99	Très Mauvaise
2015	Printemps	90,2	Très Mauvaise
2015	Eté	manque de données	
2015	Automne	140,48	Inadaptée

### Barrage Bougous

Années	Saisons	WQI	Qualité
2013	Eté	51,2	Mauvaise
2013	Automne	22,23	Excellente
2014	Hiver	34,61	Bonne
2014	Printemps	29,97	Bonne
2014	Eté	11,81	Excellente
2014	Automne	34,61	Bonne
2015	Hiver	37,83	Bonne
2015	Printemps	54,41	Mauvaise
2015	Eté	manque de données	
2015	Automne	34,7	Bonne

**Annexe N° 4 : Matrice de corrélation Hautes eaux des 3 barrages**

	<b>pH</b>	<b>T</b>	<b>CE</b>	<b>O2D</b>	<b>Dureté</b>	<b>Ca</b>	<b>Mg</b>	<b>Cl</b>	<b>K</b>	<b>Na</b>	<b>PO4</b>	<b>NH4</b>	<b>NO3</b>	<b>NO2</b>	<b>CT</b>	<b>DCO</b>	<b>Al</b>
<b>pH</b>	1,00																
<b>T</b>	-0,75	1,00															
<b>CE</b>	0,18	-0,13	1,00														
<b>O2D</b>	0,64	-0,41	0,67	1,00													
<b>Dureté</b>	0,046	0,26	0,64	0,27	1,00												
<b>Ca</b>	0,89	-0,73	0,49	0,89	0,12	1,00											
<b>Mg</b>	-0,61	0,55	0,05	-0,12	0,4	-0,42	1,00										
<b>Cl</b>	-0,29	0,48	0,70	0,14	0,90	-0,12	0,48	1,00									
<b>K</b>	-0,35	0,20	0,24	-0,47	0,58	-0,43	0,22	0,62	1,00								
<b>Na</b>	0,90	-0,79	-0,19	0,31	-0,18	0,67	-0,59	-0,56	-0,30	1,00							
<b>PO4</b>	0,25	-0,35	0,01	-0,35	0,06	-0,02	-0,64	-0,02	0,58	0,34	1,00						
<b>NH4</b>	0,17	-0,08	-0,08	-0,44	0,35	-0,17	-0,33	0,19	0,73	0,29	0,87	1,00					
<b>NO3</b>	-0,27	0,33	-0,71	-0,29	-0,75	-0,35	-0,09	-0,62	-0,66	-0,13	-0,40	-0,45	1,00				
<b>NO2</b>	0,71	-0,80	-0,42	0,16	-0,56	0,52	-0,56	-0,84	-0,49	0,90	0,20	0,04	0,16	1,00			
<b>CT</b>	0,51	-0,75	0,43	0,37	-0,21	0,58	-0,75	-0,21	-0,05	0,38	0,53	0,11	-0,32	0,39	1,00		
<b>DCO</b>	0,47	-0,45	0,85	0,54	0,48	0,60	-0,41	0,44	0,31	0,18	0,48	0,29	-0,76	-0,07	0,75	1,00	
<b>Al</b>	-0,54	0,38	0,27	-0,53	0,46	-0,57	0,15	0,65	0,93	-0,55	0,54	0,60	-0,46	-0,67	-0,01	0,29	1,00

**Annexe N° 4 : Matrice de corrélation Basses eaux des 3 barrages**

	<b>pH</b>	<b>T</b>	<b>CE</b>	<b>O2D</b>	<b>Dureté</b>	<b>Ca</b>	<b>Mg</b>	<b>Cl</b>	<b>K</b>	<b>Na</b>	<b>PO4</b>	<b>NH4</b>	<b>NO3</b>	<b>NO2</b>	<b>DCO</b>	<b>Al</b>
<b>pH</b>	1,00															
<b>T</b>	0,24	1,00														
<b>CE</b>	-0,45	-0,55	1,00													
<b>O2D</b>	-0,62	-0,66	0,77	1,00												
<b>Dureté</b>	-0,15	-0,52	-0,04	0,31	1,00											
<b>Ca</b>	-0,08	-0,93	0,63	0,62	0,55	1,00										
<b>Mg</b>	-0,31	-0,35	0,91	0,46	-0,33	0,45	1,00									
<b>Cl</b>	-0,12	-0,72	0,26	0,53	0,92	0,79	-0,06	1,00								
<b>K</b>	-0,21	-0,38	0,51	0,02	-0,09	0,42	0,71	-0,01	1,00							
<b>Na</b>	0,54	0,30	-0,41	-0,14	0,31	-0,14	-0,59	0,27	-0,79	1,00						
<b>PO4</b>	0,37	-0,10	-0,02	-0,35	0,42	0,34	0,06	0,38	0,47	0,10	1,00					
<b>NH4</b>	-0,58	0,07	-0,13	0,35	-0,08	-0,35	-0,29	-0,16	-0,50	-0,10	-0,89	1,00				
<b>NO3</b>	0,67	0,31	-0,48	-0,22	-0,10	-0,28	-0,57	-0,08	-0,83	0,81	-0,28	0,11	1,00			
<b>NO2</b>	-0,48	-0,25	0,25	-0,01	0,25	0,25	0,36	0,15	0,81	-0,68	0,51	-0,28	-0,94	1,00		
<b>DCO</b>	-0,25	0,26	0,17	0,37	0,28	-0,10	-0,07	0,27	-0,48	0,56	-0,04	0,14	0,16	-0,22	1,00	
<b>Al</b>	0,05	0,32	0,23	-0,40	-0,57	-0,19	0,58	-0,55	0,72	-0,52	0,38	-0,53	-0,51	0,51	-0,26	1,00