

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ DE OUARGLA

FACULTÉ DES HYDROCARBURES, ENERGIES RENOUVELABLES ET

DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

DÉPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

LABORATOIRE DE GEOLOGIE DU SAHARA N° 04

THESE

PRÉSENTÉE POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE DOCTORAT ES SCIENCES

Spécialité : Géologie.

Option : Hydrogéologie.

Présentée par :

M^{me} GUETTAIA Sabrina ,épouse BOUDJEMA

THÈME

*« Etude de la relation Chott Merouane /Nappe du
Mio-Plio-Quaternaire
et son impact sur la qualité des eaux souterraines ».*

Soutenue publiquement le : 08 /10 /2017.

Devant le jury d'examen :

M ^r . DJIDEL Mohamed	Professeur U.K.M/Ouargla	Président.
M ^r . HACINI Messaoud	Professeur U.K.M/Ouargla	Directeur de thèse.
M ^r ZEDDOURI Aziez	Professeur U.K.M/Ouargla	Examineur.
M ^r CHETTIH Mohamed	Professeur U.A.T/Laghouat	Examineur.
M ^r BRINIS Nafaâ	M.C.A U.H.L. Batna	Examineur.
M ^r DJAIZ Fouad	M.C.A U.H.L. Batna	Examineur.
M ^r ZAHROUNA Abderrezak	Directeur Régional de l'ANRH/Ouargla Membre du comité de pilotage du projet SASS à l'OSS.	Invité.

Année Universitaire : 2016/2017

REMERCIEMENTS

Ce travail a pu être mené avec le soutien logistique précieux de Monsieur **ZAHROUNA Abdelrezak**, directeur régional de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques d'Ouargla et membre du comité de pilotage du projet SASS à l'OSS et de l'ensemble du personnel de l'ANRH/Ouargla qui n'ont ménagé aucun effort pour m'aider à mener ce travail à terme. Il est donc pour moi, un grand honneur et un réel plaisir de rendre hommage, d'exprimer ma profonde reconnaissance et de formuler mes sincères remerciements aux personnes qui, d'une manière ou d'une autre, ont apporté leur soutien et contribué à finaliser ce travail.

Monsieur **HACINI Messaoud**, Professeur à la faculté des Hydrocarbures, Energies renouvelables et des Sciences de la Terre et de l'Univers/Ouargla, m'a fait l'honneur de me compter parmi les chercheurs déjà nombreux qu'il dirigeait dans l'élaboration de leurs thèses. Je demeure fascinée par ses qualités scientifiques et humaines qui font qu'il m'inspire grand respect. Il m'a offert l'opportunité de réaliser ce travail de recherche et a bien accepté de le diriger. C'est toujours avec beaucoup d'intérêt et de rigueur que le Professeur **HACINI Messaoud** a dirigé ce travail. Ses nombreux conseils me furent extrêmement précieux. Je lui dois beaucoup. Je tiens à lui exprimer, ici, ma profonde reconnaissance et mes sincères remerciements.

Je remercie particulièrement Monsieur **DJIDEL Mohamed** professeur à l'université Kasdi Merbah/Ouargla d'avoir accepté de présider mon Jury de soutenance.

Mes remerciements les plus sincères vont également à Monsieur **ZEDDOURI Aziez**, Professeur à l'université Kasdi Merbah/ Ouargla d'avoir accepté de juger ce travail.

Mes vifs remerciements et mes respects les plus distingués vont à :

- M^r **CHETTIH Mohamed**, professeur à l'université Amar Telidji/Laghouat,
- M^r **BRJNIS Nafaâ**, Maître de Conférences à l'université Hadj Lakhdar/Batna,
- M^r **DJAIZ Fouad**, Maître de Conférences à l'université Hadj Lakhdar/Batna, d'avoir accepté d'examiner mon travail de thèse et de s'être déplacé, pour assister à sa présentation et faire partie du Jury.

*Je tiens à remercier très vivement Monsieur **OUELD BABA SY Mouhamadou**, Docteur et membre de l'équipe de l'Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS) / Tunis pour son soutien, sa sympathie, ses encouragements et pour l'intérêt qu'il a toujours montré pour mon sujet d'études. Sa disponibilité aux discussions que nous avons eu à mener et ses conseils précieux m'ont été d'un grand intérêt.*

*Toute ma gratitude va à Monsieur le Professeur **Antonio Pulido BOSCH** de l'université d'Almería (Espagne) pour ses conseils, ses encouragements et son aide scientifique précieuse.*

*J'adresse ma profonde reconnaissance à Monsieur **BENHAMIDA Slimane**, ingénieur à l'ANRH/Ouargla pour son aide précieuse. Ses remarques et suggestions intéressantes m'ont été très utiles.*

*Je tiens également à remercier Monsieur **BOUDOUKHA Abderrahmane**, Professeur à l'université Hadj Lakhdar/Batna pour ses conseils et ses encouragements.*

*Je remercie particulièrement Monsieur **LAFFA Boucif Farid**, Doyen de la faculté SNV/STU Tlemcen.*

Je suis redevable à mes très chers parents, pour leur soutien, leur amour et leurs encouragements, ainsi qu'à mes frères et sœurs, que chacun se sente ici vivement remercié.

Je ne voudrai pas finir ces remerciements sans évoquer une personne importante dans mon parcours : Mon mari qui est caché derrière chaque page. Sans lui, ce travail aurait quand même vu le jour mais, je n'aurai sûrement pas eu le même plaisir à le réaliser....

Mes remerciements les plus sincères vont aux responsables et enseignants de la faculté des Hydrocarbures, Energies renouvelables et des Sciences de la Terre et de l'Univers/Ouargla, pour leurs encouragements et leur accueil.

Je tiens aussi à remercier tous mes collègues, enseignants au département des sciences de la terre et de l'univers/Tlemcen, pour leurs encouragements.

Par crainte d'avoir oublié quelqu'un, que tous ceux et toutes celles dont je suis redevable, se voient ici vivement remerciés.

DEDICACES

A MES TRÈS CHERS PARENTS,

A MON MARI ET MES ENFANTS,

A MES FRÈRES ET SŒURS,

A MA FAMILLE ET A MA BELLE FAMILLE,

A MES AMIES.

دراسة العلاقة شط مروان/ طبقة المياه الجوفية للميو بليو كواترنار وتأثيرها على نوعية المياه الجوفية.

ملخص

تهتم هذه الدراسة بطبقة المياه الجوفية للميو بليو كواترنار في منخفض وادي ريغ. هذه المنطقة الصحراوية الجزائرية المنخفضة تمتد من جنوب واحات القوق إلى غاية شط مروان، بين ولايتي الواد وورقلة. طبقة المياه الجوفية للميو بليو كواترنار تعتبر منبعاً هاماً للسقي وللتزويد بمياه الشرب في المنخفض.

لدراسة العلاقة بين طبقة المياه الجوفية للميو بليو كواترنار وشط مروان في الجزائر تمثل لنا من الضروري تقديم سيناريوهات استناداً إلى نموذج رياضي وذلك باستخدام المفتاح "Visual Mod Flow" وتقييم ورسم خرائط القابلية للتلوث باستعمال الطريقتين: Drastic و GOD.

مطابقة النموذج في الحالة الثابتة والحالة المتغيرة سهلت لنا معرفة مدى صلاحية النتائج، فيما يخص هندسة وامتداد طبقة المياه الجوفية وكذا خصائصها الهيدروديناميكية. أظهرت سيناريوهات التنقيب أن الجهة الشمالية، قرب شط مروان لها قابلية معتبرة.

بينت الدراسة المقارنة، اعتماداً على اختبار Kendall أن طريقتي Drastic و God لهما نفس الاتفاق ($W=0,703$). كشف التحليل الإحصائي لمختلف أقسام القابلية للتلوث أن القابلية باستعمال طريقة Drastic ممثلة بأربع أقسام: "ضعيفة جداً"، "ضعيفة"، "متوسطة"، و"قوية" مع هيمنة القسم "المتوسط" (74,30%).

أظهرت طريقة God قابلية مركزة على قسمين: "ضعيف" و"متوسط"، أين لاحظنا الأغلبية للقسم "الضعيف" (70%). مقارنة خريطتي القابلية للتلوث الناتجتين عن طريقتي Drastic و God بينت أن الطريقة الأولى (طريقة Drastic) مثلت الأحسن توزيع قيم القابلية للتلوث لطبقة المياه الجوفية للميو بليو كواترنار.

لتفادي أي تلاقي بين طبقة المياه الجوفية للميو بليو كواترنار والمياه المالحة والملوثة الملقاة في الشط، يلزم أخذ التدابير اللازمة، والأهم وضع برنامج لإعادة تسطير التنمية المائية الزراعية، وكذا منهاج لتسيير المياه القذرة.

الكلمات المفتاحية: منخفض وادي ريغ، طبقة المياه الجوفية للميو بليو كواترنار، شط مروان، نموذج، قابلية التلوث، Drastic، God، العلاقة طبقة المياه الجوفية/ شط، تسيير.

« ETUDE DE LA RELATION CHOTT MEROUANE/NAPPE DU MIO-PLIO-QUATERNAIRE ET SON IMPACT SUR LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES ».

RESUME

La présente étude a intéressé la nappe du Mio- Plio-Quaternaire, dans la vallée d'Oued Righ. Cette région du bas Sahara algérien s'étend du Sud de la palmeraie d'El Goug, jusqu'au Chott Merouane, entre les wilayas d'El Oued et d'Ouargla. L'aquifère du Mio-Plio-Quaternaire constitue une ressource importante pour l'irrigation et l'alimentation en eau potable de la vallée. Pour étudier la relation entre la nappe du Mio-Plio-Quaternaire et Chott Merouane en Algérie, il nous a paru nécessaire, de présenter des scénarios, basés sur un modèle mathématique, à l'aide du code « Visual Mod- Flow » et d'évaluer et de cartographier sa vulnérabilité à la pollution, en appliquant les méthodes DRASTIC et GOD.

Le calage du modèle, en régime permanent puis en régime transitoire a permis de vérifier la fiabilité des résultats, concernant la géométrie et les limites de l'aquifère, ainsi que ses paramètres hydrodynamiques. Les scénarios d'exploitation indiquent que la partie nord, près du Chott Merouane présente une vulnérabilité assez prononcée.

L'étude comparative, fondée sur le test de Kendall a montré que les méthodes DRASTIC et GOD ont un accord modéré ($W = 0.703$). L'analyse statistique des différentes classes de vulnérabilité a révélé que la vulnérabilité par la méthode DRASTIC est représentée par quatre classes : «très faible », «faible », «moyenne » et « forte » avec une domination de la classe «moyenne » (74.30%). La méthode GOD a abouti à une vulnérabilité concentrée entre deux classes «faible » et « moyenne », où nous remarquons la domination de la classe «faible» (70%). La comparaison des deux cartes de vulnérabilité, obtenues à partir des méthodes DRASTIC et GOD nous a montré que la première méthode (DRASTIC) représente mieux la répartition des degrés de vulnérabilité à la pollution, au niveau de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire.

Pour éviter tout contact entre la nappe du Mio-Plio-Quaternaire et les eaux usées déversées dans le Chott, des mesures doivent s'imposer, d'où la nécessité de la mise en place d'un plan d'aménagement hydro-agricole et d'une stratégie de gestion des eaux.

MOTS CLES : Vallée d'Oued Righ- Nappe du Mio-Plio-Quaternaire- Chott Merouane- Modélisation- Vulnérabilité à la pollution – DRASTIC- GOD- Relation nappe/Chott- Gestion.

«STUDY OF THE RELATIONSHIP CHOTT MEROUANE/MIO-PLIO-QUATERNARY AQUIFER AND ITS IMPACT ON THE QUALITY OF GROUNDWATER».

ABSTRACT

In order to study the relationship between the groundwater of the Mio-Plio-Quaternary and Chott Merouane in Algeria, it seemed to us necessary to present scenarios, based on a mathematical model, using the code "Visual Mod flow", and to assess and map its vulnerability to pollution, by applying the DRASTIC and GOD methods.

The calibration of the model, in steady state and then transient state, allowed checking the reliability of the results related to the geometry and the limits of the aquifer, as well as its hydrodynamic parameters. The exploitation scenarios indicate that the northern part, near Chott Merouane, has a fairly significant vulnerability.

The comparative study, based on Kendall test, showed that the two methods have a moderate agreement ($W = 0.703$). The statistical analysis of different vulnerability classes revealed that vulnerability assessment, using the DRASTIC method, may be represented by four classes: "Very low", "Low", "Medium" and "High", with a dominance of class "Medium" (74.30%). The GOD method resulted in a vulnerability that sits between two classes, 'Low' and 'Medium', with a noted domination of class "Low" (70%). Comparison of the two vulnerability maps obtained from the DRASTIC and GOD methods shows that the DRASTIC method better represents the distribution of degrees of vulnerability to pollution in the aquifer of the Mio-Plio- Quaternary.

To prevent any contact between the groundwater of the Mio-Plio-Quaternary and the wastewater discharged into the Chott, drastic measures must be taken, hence the need for establishing a hydro-agricultural development plan and a wastewater management strategy.

KEYWORDS: Valley of Oued Righ – Groundwater of Mio-Plio-Quaternary - Chott Merouane - Modeling - Vulnerability to pollution- DRASTIC- GOD -Relationship groundwater /Chott - Management.

ملخص

Résumé.

Abstract.

Liste des abréviations.

Liste des figures.

Liste des cartes.

Liste des tableaux.

Liste des photos.

Introduction Générale.....	01
----------------------------	----

Première partie « Présentation de la vallée d'Oued Righ »:

Chapitre I : Généralités.

I.1. Situation géographique.....	05
I.2. Aperçu socio-économique	06
I.3. Les paysages de la vallée de l'Oued Righ	08
I.3.1 Les sols de la vallée de l'Oued Righ.....	08
1.3.1.1 Salinisation des sols.....	08
1.3.2 Topographie et géomorphologie.....	09
A. Les versants.....	09
B. Les glaciers.....	09
C. Les Chotts.....	10
D. Les lacs.....	11
E. Le canal d'Oued Righ.....	11
1. Historique du canal d'Oued Righ.....	12
1.1 Réalisation du canal, pendant la colonisation.....	12
1.2 Réalisation du canal, après l'indépendance.....	13
2. Caractéristiques du canal.....	14

Chapitre II : Etude Climatologique.

A) II.1. Introduction	16
II.2. Analyse des paramètres	17
II.2.1. Etude des températures.....	17
II.2.1.1. Températures moyennes annuelles.....	17
II.2.1.2. Températures moyennes mensuelles.....	18
II.2.2 Etude des précipitations	19
II.2.2.1. Précipitations moyennes annuelles.....	19
❖ Coefficient d'irrégularité du régime des précipitations	21
❖ Coefficient pluviométrique	21
II.2.2.2. Précipitations moyennes mensuelles	22
II.2.2.3. Précipitations Saisonnières	23
II.2.3. Vitesse du vent	24
II.2.4. L'humidité relative	25
II.3. Synthèse climatique	26
II.3.1. Méthode graphique	27
❖ Diagramme pluviothermique de BAGNOULS et GAUSSEN	27
III.3.2. Méthode des indices climatiques	28

1. L'indice d'aridité de De Martonne	28
2. Indice de Moral (Ia)	32
3. Indice climatique d'EMBERGER	33
II.3.3. Evapotranspiration et déficit d'écoulement	34
II.3.3.1. L'évapotranspiration	35
❖ L'évapotranspiration potentielle (ETP)	35
❖ Evapotranspiration réelle (ETR)	36
B) II-4. Aperçu sur l'évolution du débit du canal d'Oued Righ au niveau des stations hydrométriques.....	38
II.5.Conclusion	41

Chapitre III : Etude Géologique.

III.1. Introduction	42
III.2. Géologie régionale	42
III.2.1 Synthèse des travaux antérieurs sur le bassin du bas Sahara	44
III.3. Cadre géologique local « Oued Righ ».....	45
III.3.1. Analyse litho- stratigraphique.....	45
III.4. Tectonique.....	49
III.5. Paléogéographie.....	49
III.6. Conclusion.....	50

Chapitre IV : Etude Hydrogéologique.

IV.1.Introduction	53
IV.1.1 Le Continental Intercalaire	53
IV.1.2 Le Complexe Terminal.	54
IV.2 Les formations aquifères dans la vallée d'Oued Righ	55
IV.3Aperçu sur l'état des ressources en eau dans la vallée d'Oued Righ	56
IV.4 Les causes principales de cette problématique	59
IV.5 La piézométrie.....	60
IV.5.1 Interprétation des cartes piézométriques de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire.....	61
IV.5 Caractéristiques hydrodynamiques.....	62
IV.6.Conclusion	62

Chapitre V : Etude qualitative des eaux et vulnérabilité à la pollution.

A) Les eaux souterraines.....	64
V.1. Introduction	64
V.2. Contrôle des analyses chimiques, par la balance ionique	64
V.3.Interprétation des résultats des analyses physico-chimiques	65
V.3.1. Normes de potabilité	65
V.3.2. Paramètres physiques	66
V.3.3. Paramètres chimiques	71
V.4.1.Représentation graphique des analyses de l'eau	75
V.4.1.Faciès chimiques et formules caractéristiques	75
V.4.1.1.Diagramme de SCHOELLER–BERKALOFF	75
V.4.1.2 Diagramme de PIPER	79
V.4.2.Aptitudes des eaux à l'irrigation	79

V.4.2.3.Sodium adsorption ratio (S.A.R).....	80
V.5. Cartes de vulnérabilité à la pollution.....	83
V.5.1.Introduction.....	83
V.5.2 Description de la méthode DRASTIC.....	84
V.5.3 Description de la méthode GOD.....	86
V.5.4. Résultats et discussion.....	87
V.5.4.1 Carte de vulnérabilité, par la méthode DRASTIC.....	87
V.5.4.2 Carte de vulnérabilité, par la méthode GOD.....	88
V.5.5 Comparaison des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité a la pollution.....	89
❖ Test de Kendall.....	89
❖ Analyse statistique des surfaces, par classes.....	90
B- Les eaux du canal, du lac et du Chott.....	91
V.6 Le canal.....	92
V.6.1 paramètres physico-chimiques du canal, en 2006.....	92
V.4.2.1 Interprétations des paramètres physico-chimiques du canal	92
V.7.Les lacs et le Chott	94
V.7.1. Présentation et caractérisation des sites d'étude	94
V.7.1.1. Lac Ayata	94
V.7.1.2. Lac d'Oued Kherouf	94
V.7.1.3. Chott Merouane	94
V.7.2.Qualité physico-chimique des eaux	95
V.8. Conclusion	104

Deuxième partie : « Etude de la relation Chott Merouane/Nappe du Mio-Plio-Quaternaire ».

Chapitre VI : Modélisation mathématique.

VI.1 Introduction.....	105
VI.2. Généralités sur les modèles.....	105
1. Etapes de la modélisation.....	107
1.1 Modèle conceptuel	107
1.2 Modèle mathématique.....	107
1.3 Modèle numérique.....	107
1.4 Vérification du code.....	107
1.5 Validation du modèle.....	108
1.6 Estimation des paramètres «calibration».....	108
1.7 Exploitation du modèle et simulation.....	108
1.8 Limites de la modélisation.....	108
2. Organigramme récapitulant les étapes de la modélisation.....	110
3. Formulation mathématique.....	111
4. Techniques de modélisation.....	112
5. Conditions initiales et conditions aux limites	114
VI.3 Modélisation de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire de la vallée d'Oued Righ.....	116
VI.3.1 Logiciel utilisé	116

VI.3.2 Construction du modèle	117
VI.3.3 Calage du modèle.....	119
VI.3.4 Résultats et discussions	120
VI.3.4.1 Le régime permanent.....	120
1. <i>Potentiels mesurés et potentiels calculés</i>	120
2. <i>Bilan en eau, en régime permanent</i>	121
3. <i>Test de cohérence</i>	121
VI.3.4.2 Le régime transitoire.....	123
1. <i>Potentiels mesurés et potentiels calculés</i>	123
2. <i>Bilan en eau, en régime transitoire</i>	124
3. <i>Test de cohérence</i>	124
VI.3.4.3 Validation du modèle : « Campagne 2013 ».....	126
<i>Test de cohérence</i>	126
VI.3.4.4 Scénario d’exploitation.....	128
VI.3.5 Conclusions et recommandations	129

Conclusion Générale et Recommandations.	131
Références Bibliographiques.	136
Annexes.	140

ACRONYMES

- A.B.H.S** : Agence de Bassin Hydrographique du Sahara.
- A.N.R.H** : Agence National des Ressources Hydrauliques.
- ERESS** : Etude des Ressources en Eau du Sahara Septentrional.
- O.S.S**: Observatoire du Sahara et du Sahel.
- P.D.G.D.R.S** : Plan Directeur Général de Développement des Régions Sahariennes.
- S.A.S.S** : Système Aquifère du Sahara Septentrional.
- O.M.S** : l'Organisation Mondiale de la Santé.
- GIRE** : Gestion Intégrée des Ressources en Eau.
- CT** : Complexe Terminal.
- CI** : Continental Intercalaire.
- AEP** : Alimentation en Eau Potable.
- F** : Forage.
- NE** : Nord-Est.
- SW** : Sud –Ouest.
- ETP** : Evapotranspiration Potentielle.
- ETR** : Evapotranspiration Réelle.
- P** : Précipitations.
- PM**: précipitations maximales.
- Pm**: précipitations minimales.
- D** : Déficit d'écoulement.
- R** : Ruissellement.
- I** : Infiltration.
- k**: Coefficient de perméabilité.
- S** : Coefficient d'emménagement.
- H** : Charge hydraulique.
- $\bar{\mathbf{K}}$: Tenseur de perméabilité.
- Q** : Débit.
- q**: Débit volumique spécifique.
- T** : Transmissivité.
- t**: Temps.

Ca²⁺ : Ion Calcium.

Cl⁻ : Ions Chlorure.

HCO₃⁻ : Ion Bicarbonate.

K⁺ : Ion Potassium.

Mg²⁺ : Ion Magnésium.

Na⁺ : Ion Sodium.

pH : Potentiel d'Hydrogène.

DBO₅ : Demande biologique en oxygène (période d'incubation de 5jours).

DCO : Demande chimique en oxygène.

MES : Matières en suspension.

OD : Oxygène dissous.

L : Litre.

m: mètre.

mm: millimètre.

µS/cm : Micro- siemens par centimètre.

ms/cm : milli-siemens par centimètre.

Liste des figures.

Figure I.1 : Situation géographique de la vallée de l'Oued Righ.....	05
Figure I.2 : Répartition des oasis, dans la vallée de l'Oued Righ.....	07
Figure II.3 : Les sous bassins versants du Sahara algérien et les stations météorologiques, d'après Cahiers de Sécheresse.....	16
Figure II.4 : Variation des températures moyennes annuelles, à la station de Touggourt (1975-2015).....	18
Figure II.5 : Variation des températures moyennes mensuelles, à la station de Touggourt	20
Figure II.9 : Variation interannuelles des précipitations, à la station de Touggourt (1975 – 2015).....	20
Figure II.6 : Répartition moyenne mensuelle des précipitations (1975-2015).....	23
Figure II.7 : Histogramme des précipitations saisonnières, à la station de Touggourt	24
Figure II.8 : Histogramme de distribution de la vitesse moyenne mensuelle du vent (1975-2015).....	25
Figure II.9 : Histogramme des variations d'humidités moyennes mensuelles (1975-2015).....	26
Figure II.10 : Diagramme ombrothermique de la station de Touggourt.....	28
Figure II.11.a : Abaque de l'indice d'aridité annuel de De Martonne.....	30
Figure II.11.b : Abaque de l'indice d'aridité mensuel de De Martonne.....	31
Figure II.12 : Climagramme d'Emberger (modifié par Stewart).....	34
Figure II.13 : Localisation des stations hydrométriques.....	38
Figure II.14 : Histogramme d'évolution des débits, en fonction du temps, au niveau de toutes les stations.....	39
Figure II.15 : Variation du débit en fonction de la longueur du canal	40
Figure III.16 : Les grandes unités géologiques au Sahara.....	43
Figure IV.17 : Aquifères du Sahara algérien : Continental Intercalaire et Complexe Terminal.....	53
Figure IV.18 : Impact de la croissance démographique et du développement agricole sur l'eau et le sol au niveau de la vallée d'oued Righ	60

Figure V.19 : Histogramme du pH (2007-2015)	66
Figure V.20 : Histogramme du résidu sec (2007-2015)	67
Figure V.21 : Histogramme de la conductivité électrique (2007-2015)	67
Figure V.22 : Histogramme de la minéralisation (2007-2015).....	70
Figure V.23 : Histogrammes des éléments chimiques majeurs (2007).....	73
Figure V.24 : Histogrammes des éléments chimiques majeurs (2015).....	74
Figure V.25 : Diagramme de Schoeller –Berkaloff (2007).....	77
Figure V.26 : Diagramme de Schoeller –Berkaloff (2015).....	78
Figure V.27 : Diagramme de Piper (2007).....	79
Figure V.28 : Diagramme de Piper (2015).....	79
Figure V.29 : Qualité des eaux d’irrigation calculée par le S.A.R (Diagramme de Riverside).....	82
Figure V.30 : Représentation graphique des pourcentages des degrés de vulnérabilité de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire de la vallée d’Oued Righ, selon les méthodes utilisées.....	90
Figure V.31 : Courbes des paramètres physico-chimiques du canal (2006).....	93
Figure V.32 : Localisation des sites.....	94
Figure V.33 : Variations des températures des eaux des stations étudiées.....	96
Figure V.34 : Variations du pH des eaux des stations étudiées.....	96
Figure V.35 : Variations de la conductivité électrique des eaux des stations étudiées.....	97
Figure V.36 : Variations de la salinité des eaux des stations étudiées.....	97
Figure V.37 : Variations des matières en suspension des eaux des stations étudiées.....	98
Figure V.38 : Variations de l’Oxygène dissous des eaux des stations étudiées.....	99
Figure V.39 : Variations de DCO (mg/l) des eaux des stations étudiées.....	99
Figure V.40 : Variations de DBO ₅ de l’eau des stations étudiées.....	100
Figure V.41 : Concentrations des chlorures dans les eaux étudiées.....	101
Figure V.42 : Variations des bicarbonates des eaux des stations étudiées.....	101
Figure V.43 : Variations des Sulfates des eaux des stations étudiées.....	102
Figure V.44 : Variations des valeurs du potassium des eaux des stations étudiées.....	102
Figure V.45 : Variations du sodium des eaux des stations étudiées.....	103
<hr/>	
Figure VI.46 : Etapes d’une modélisation, par un code de calcul.....	110
Figure VI.47 : Discrétisation en mailles carrées.....	112
Figure VI.48 : Bilan des flux entrants sur la maille i.....	113
Figure VI.49 : Répartition des perméabilités, après calage.....	121
Figure VI.50 : Corrélation entre les niveaux piézométriques mesurées et simulées, année 2008.....	122
Figure VI.51 : Répartition des porosités efficaces, après calage.....	124
Figure VI.52 : Corrélation entre les niveaux piézométriques mesurées et simulées, année 2015.....	125
Figure VI.53 : Corrélation entre les niveaux piézométriques mesurées et simulées, année 2013.....	127
Figure VI.54 : Schéma représentatif des différentes nappes dans la vallée d’Oued Righ	128

Liste des cartes.

Carte III.1 : Géologie de la vallée d'Oued Righ.....	48
<hr/>	
Carte IV.2 : Piézométrie de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire (2008).....	61
Carte IV.3 : Piézométrie de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire (2013).....	61
Carte IV.4 : Piézométrie de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire (2015).....	61
<hr/>	
Carte V.5 : Répartition des points d'eau (2007).....	65
Carte V.6 : Répartition des points d'eau (2015).....	65
Carte V.7 : Vulnérabilité à la pollution, selon la méthode DRASTIC	88
Carte V.8 : Vulnérabilité à la pollution, selon la méthode GOD.....	89
<hr/>	
Carte VI.9 : Conditions aux limites.....	118
Carte VI.10 : Localisation des forages et piézomètres.....	119
Carte VI.11 : Calage en régime permanent (année 2008).....	120
Carte VI.12 : Calage en régime transitoire (année 2015).....	123
Carte VI.13 : Validation du modèle (année 2013).....	126
Carte VI.14 : Zone de remontée des eaux du Mio-Plio-Quaternaire, après une année de réduction du débit d'exploitation à la moitié.....	128
Carte VI.15 : Zone de remontée des eaux du Mio-Plio-Quaternaire, après cinq ans de réduction du débit d'exploitation à la moitié.....	129

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Caractéristiques du Canal d’oued Righ.....	14
<hr/>	
Tableau II.2 : Caractéristiques de la station de Touggourt.	16
Tableau II.3 : Valeurs des températures moyennes annuelles de la station de Touggourt (1975-2015).....	17
Tableau II.4 : Valeurs des Températures moyennes mensuelles (°C) pour la station de Touggourt, période (1975 – 2015).....	18
Tableau II.5 : Variation des précipitations moyennes annuelles (mm) à la station de Touggourt (1975 – 2015).....	20
Tableau II.6 : Coefficients pluviométriques de la station de Touggourt (1975 – 2015).....	22
Tableau II.7 : Valeurs des précipitations moyennes mensuelles, à la station de Touggourt (1975 – 2015).....	23
Tableau II.8 : Valeurs des précipitations saisonnières à la station de Touggourt.....	24
Tableau II.9 : Vitesses moyennes mensuelles (km/h) du vent, enregistrées à la station de Touggourt.....	25
Tableau II.10 : Valeurs moyennes mensuelles (%) d’humidité relative, enregistrées à la station de Touggourt.....	26
Tableau II.11 : Valeurs moyennes mensuelles des précipitations et des températures.....	27
Tableau II.12 : Classification des climats, en fonction des indices d’aridité annuelle(I)	29
Tableau II.13 : Indices d’aridité mensuels de De Martonne.....	31
Tableau II.14 : Valeurs des indices mensuels de Moral.....	32
Tableau II.15 : Types des climats, selon Moral.....	33
Tableau II.16 : Les résultats des calculs de l’ETP, selon Thornthwaite.....	35
Tableau II.17 : Les résultats des calculs de l’ETP, selon SERRA.....	36
Tableau II.18 : Valeurs de l’ETP et de l’ETR obtenues par différentes méthodes.....	37
Tableau II.19 : Débits relevés au niveau des stations choisies.....	40

Tableau IV.20: Intérêt hydrogéologique des formations géologiques (Les épaisseurs sont variables, d'une zone à l'autre).....	63
<hr/>	
Tableau V.21 : Calcul de la minéralisation, à partir de la conductivité.....	68
Tableau V.22: Résultats du calcul de la minéralisation, à partir de la conductivité (2007)...	69
Tableau V.23: Résultats du calcul de la minéralisation, à partir de la conductivité (2015)...	69
Tableau V.24 : Classification des eaux d'irrigation d'après J.Servant, 1975.....	81
Tableau V.25: Différents paramètres utilisés, par les deux méthodes.....	83
Tableau V.26 : Poids des paramètres DRASTIC.....	84
Tableau V. 27 : Notes attribuées à chaque paramètre.....	85
Tableau V.28: Notes du type d'aquifère.....	86
Tableau V.29 : Notes de la lithologie de la zone non saturée.....	86
Tableau V. 30: Notes de la profondeur de la nappe/sol.....	86
Tableau V. 31 : Intervalles des indices de vulnérabilité et classes correspondantes.....	87
Tableau V.32: Répartition, par mailles des classes d'indice de vulnérabilité, obtenues par la méthode DRASTIC.....	90
Tableau V.33 : Répartition, par mailles des classes d'indice de vulnérabilité, obtenues par la méthode GOD.....	91
Tableau V.34: Paramètres physico-chimiques des eaux du canal (ANRH, 2006).....	92
Tableau V.35: Paramètres physiques et chimiques des eaux des stations étudiées.....	95
<hr/>	
Tableau VI.36: Bilan en eau calculé de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire pour le régime permanent 2008 (m ³ /jour).....	121
Tableau VI.37 : Bilan en eau calculé de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire pour l'année 2015(m ³ /jour).....	124

Liste des photos.

Photo I.1 : Remontée des sels par capillarité dans une palmeraie.....	09
Photo I.2 : Palmeraie dégradée par l'excès d'eau et de sels.....	09
Photo I.3 : Les eaux de saumure, Chott Merouane.....	10
Photo I.4 : Lac de Tamacine.....	11
Photo I.5 : Lac de Mégarine.....	11
Photo I.6 : Canal d'Oued Righ.....	15
Photo I.7 : Rejets des eaux usées dans le canal d'Oued Righ.....	15
Photo I.8 : Rejets des eaux usées dans le canal d'Oued Righ.....	15

Photo IV.9 : Un forage du Mio-Plio-Quaternaire bouché à Ranou.....	57
Photo IV.10 : Un forage du CI bouché à Sidi Slimane.....	57
Photo IV.11 : Destruction des berges en sable, à cause des turbulents à Boufeggoussa	58
Photo IV.12 : Les rejets des eaux usées dans le canal d'Oued Righ.....	59

INTRODUCTION GENERALE :

Ces dernières années, on assiste à une diversification considérable des problèmes hydrogéologiques, surtout dans les pays industrialisés. La surexploitation des aquifères, l'enfouissement des déchets dans le sous sol, la pollution accidentelle, la remontée des eaux, la salinité.....altèrent, de plus en plus, la quantité et la qualité de l'eau souterraine.

La gestion et la protection de l'eau souterraine deviennent fondamentales. Or, gérer les ressources en eau, c'est comprendre le fonctionnement de l'aquifère dans les conditions naturelles et prévoir l'influence de l'intervention humaine sur la quantité et la qualité de cette eau.

Le Sahara algérien renferme d'importantes réserves d'eaux souterraines qui ne peuvent être expliquées par le climat actuel et qui sont à la base du développement agricole et urbain dans cette zone. Il est constitué de deux principales couches aquifères qui sont peu renouvelables et ne sont pas exploitables en totalité : le Continental Intercalaire et le Complexe Terminal. Certains auteurs pensent que les eaux des nappes du Sahara sont fossiles(MARGAT.J & SAAD.KF,1984), c'est-à-dire qu'elles se sont infiltrées et accumulées au cours des temps géologiques, leur alimentation s'est poursuivie au cours des périodes pluvieuses du Quaternaire, par infiltration sur les affleurements des couches perméables, jusqu'à débordement de ces derniers et que le niveau actuel des nappes traduit le résultat d'un tarissement pur ,depuis l'Holocène (OUELD BABA SY.M, 2005). Pour d'autres, par contre, il existe une recharge actuelle des nappes sahariennes. Cette alimentation se manifeste lorsque certaines conditions climatiques, topographiques et géologiques sont réunies (DUBIEF.J, 1953) et d'autres sont allés à modéliser ces nappes (BESBES.M & ZAMMOURI.M,1988),(OUELD BABASY,2005) afin d'identifier leurs caractéristiques et comportements hydrodynamiques, vis- à- vis leur exploitation, afin d'assurer une meilleure gestion.

Devant le développement agricole et industriel d'une part, la croissance et l'explosion démographique d'autre part, les besoins en eau au Sahara algérien ont augmenté d'une manière très rapide. Ceci a conduit les gestionnaires des ressources en eau à prospecter et réaliser plus d'ouvrages hydrauliques. La problématique de la surexploitation des ressources hydriques dans le Sahara algérien est plus que jamais d'actualité, plusieurs modèles de dimensions différentes et en utilisant des techniques différentes (méthode analogique, éléments finis ou différences finies) ont été élaborés : GEOPETROLE (1964), l'ERESS(1972b,c) , BESBES.M

&ZAMMOURI.M (1988), BRL (1998b,c), OSS (2003), OUELD BABA SY.M (2005),BOUDJEMA.A et al (2014)...etc.

Les problèmes liés à la pollution des eaux souterraines constituent actuellement une source d'inquiétude qui requiert un intérêt universel. Cette pollution, générée par les activités anthropiques peut, en atteignant des niveaux critiques, présenter un danger grave pour la santé publique et l'environnement. Pour protéger ces ressources, il est nécessaire de prévoir des moyens de protection, face aux difficultés liées aux techniques de dépollution et au coût de celles-ci. Cette protection peut être assurée par la délimitation des zones, dites vulnérables ou à haut risque de pollution.

La vallée d'Oued Righ est l'une des régions les plus anciennement cultivée et les mieux connues du Sahara septentrional algérien, elle est constituée d'une cinquantaine d'oasis qui produisent des dattes d'excellente qualité. Les besoins en eau de cette région sont assurés à partir des ressources souterraines fossiles, faiblement réalimentées (OUELD BABA SY.M, 2005), contenues dans les nappes du Continental Intercalaire et du Complexe Terminal, surmontées par la nappe phréatique. Malheureusement, ces ressources sont de plus en plus sujettes à la surexploitation, à la mauvaise gestion et à la pollution.

Cette étude constitue une contribution à la détermination du comportement de l'un des aquifères du Sahara septentrional, d'âge mio-plio-quaternaire, dans la vallée d'Oued Righ (Sud-Est algérien). Malheureusement, la richesse en eau dans cette cuvette du bas Sahara est accompagnée par différents problèmes, dont la plupart sont liés directement à la mauvaise gestion de cette ressource. Cette situation peut engendrer des risques de contamination de la nappe par les eaux salées et polluées du Chott Merouane, qui reçoit annuellement environ 150 millions de m³ d'eaux usées des agglomérations limitrophes et de drainage des palmeraies de la vallée qui se déversent dans le canal.(ANRH,2010).

Afin de préserver la qualité des eaux de cette nappe, ce travail consiste à étudier par modèle mathématique hydrodynamique et à cartographier les zones vulnérables à la pollution de cette région, par l'application des méthodes DRASTIC et GOD et à déterminer la méthode qui permet le mieux évaluer cette vulnérabilité.

Cette thèse s'articule en plusieurs chapitres, regroupés en deux parties:

La première partie « Présentation de la vallée d'Oued Righ »:

Cette partie concerne la présentation du site étudié. Elle traite les aspects suivants :

❖ ***Chapitre (I) Généralités:*** localisation de la vallée d'Oued Righ, ainsi que les différentes activités pratiquées dans cette région.

❖ ***Chapitre (II) Etude Climatologique:*** pour déterminer le type du climat qui règne dans la région et analyser les paramètres climatiques caractéristiques. Un aperçu global sur l'évolution des débits du canal d'Oued Righ est donné aussi dans ce chapitre.

❖ ***Chapitre (III) Etude Géologique:*** décrira la géologie régionale et locale ainsi que l'aspect tectonique de la zone d'étude et déterminera les différentes formations qui peuvent être des aquifères. Aussi, l'étude de cette partie aidera à l'identification de la géométrie de l'aquifère du Mio-Plio-Quaternaire, indispensable à l'élaboration du modèle mathématique.

❖ ***Chapitre (IV) Etude Hydrogéologique:*** a pour but de déterminer les caractéristiques hydrogéologiques de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire et de présenter la piézométrie du secteur étudié et voir le sens d'écoulement des eaux souterraines.

❖ ***Chapitre (V) Etude qualitative des eaux et vulnérabilité à la pollution :*** Ce chapitre est consacré à l'interprétation des paramètres physico-chimiques : les types des faciès, l'aptitude des eaux à l'alimentation en eau potable et à l'irrigation, ainsi que les cartes de vulnérabilité à la pollution, établies par les méthodes DRASTIC et GOD et la comparaison entre ces deux méthodes, afin de voir quelle est la mieux adaptée à la zone d'étude.

La Deuxième partie: « Etude de la relation nappe du Mio-Plio-Quaternaire /Chott Merouane » :

❖ ***Chapitre (VI) Modélisation mathématique:***

Par l'élaboration du modèle hydrodynamique de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire.

Cette partie traite les étapes suivantes :

- Discrétisation de la zone étudiée, en mailles.
- Détermination de la répartition spatiale de la perméabilité dans la zone d'étude, par le calage de la carte simulée à la carte mesurée, en régime permanent (Année 2008).
- Détermination de la répartition spatiale de la porosité dans la vallée, par le calage de la carte simulée à la carte mesurée, en régime transitoire (année 2015) et validation du modèle (année 2013, avec un pas de temps de six mois).
- Réaliser des simulations, pour voir le comportement de la nappe, vis-à-vis de la réduction du débit d'exploitation à la moitié de l'actuel, afin de cerner les zones de remontée des eaux.

Enfin, nous essayerons de conclure par un récapitulatif des principaux résultats obtenus et de voir l'état de la ressource du point de vue quantitatif et qualitatif. Les conclusions obtenues seront évoquées, en liaison avec la démarche utilisée et les données disponibles, prises en considération.

1^{ère} PARTIE :

« PRESENTATION DE LA VALLEE D'OUED RIGH ».

- ***CHAPITRE I : GENERALITES.***
- ***CHAPITRE II: ETUDE CLIMATOLOGIQUE.***
- ***CHAPITRE III : ETUDE GEOLOGIQUE.***
- ***CHAPITRE IV: ETUDE HYDROGEOLOGIQUE.***
- ***CHAPITRE VI : ETUDE QUALITATIVE DES EAUX ET VULNERABILITE A LA POLLUTION.***

Chapitre I.

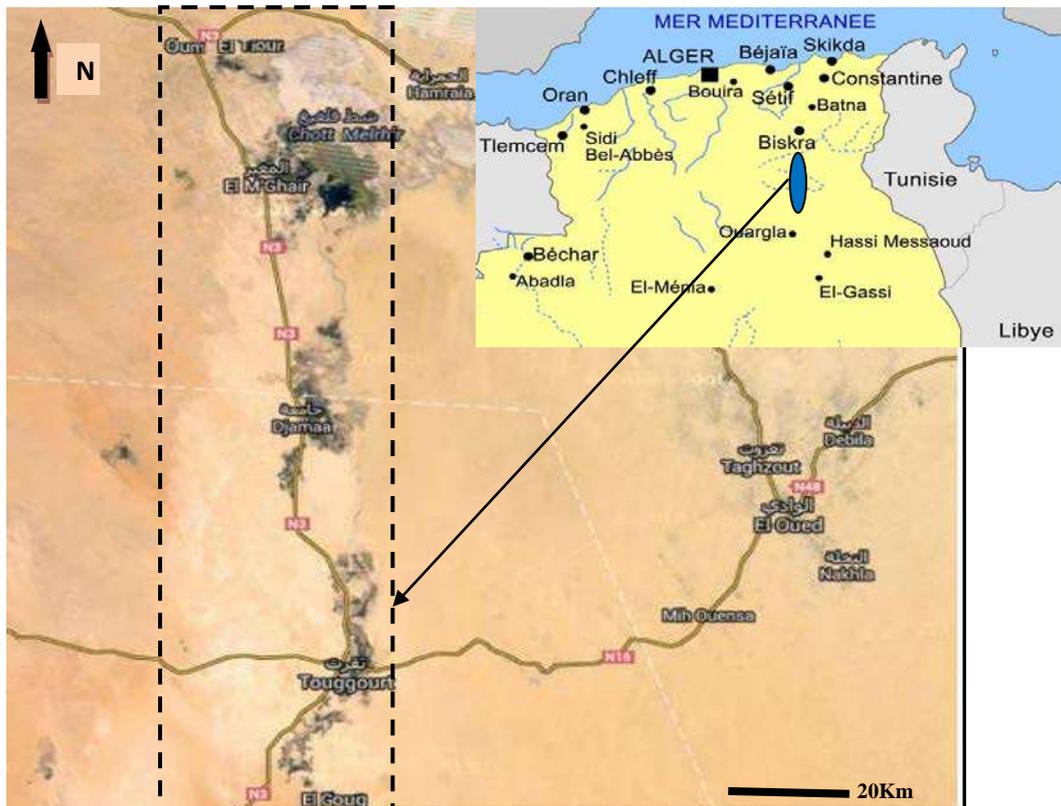
Généralités

I.1 SITUATION GEOGRAPHIQUE :

La vallée d'Oued-Righ se situe dans le Sud-Est du Sahara algérien, dans une dépression de forme allongée. Elle s'étire du Sud au Nord, entre El Goug et Oum El-Thiour, sur 150 Km de longueur et débouchant sur le Chott Merouane. Ce lac salé, fait partie du bassin de Melghir, il s'étend sur une superficie de 333.700ha et se regroupe avec l'ensemble des Chotts tunisiens, sous forme d'étendues lagunaires. Avec son altitude qui est moins de 31 m au dessous du niveau de la mer, il représente la région la plus basse de l'Afrique du Nord (HACINI.M, 2006).

Administrativement, la vallée d'Oued-Righ fait partie de deux wilayas : La partie sud, entre El- Goug et Sidi- Slimane (wilaya d'Ouargla) et la partie nord, entre Ain-Echoucha et Oum El-Thiour (wilaya d'El-Oued). Elle est limitée (Figure 01) :

- Au Nord, par la wilaya de Biskra,
- Au Sud- Ouest, par les oasis d'Ouargla,
- A l'Est, par la vallée d'Oued Souf.



Légende :

 Zone d'étude

Figure.1 : Situation géographique de la vallée d'Oued Righ (Google Earth).

I.2 APERÇU SOCIO-ECONOMIQUE :

La vallée d'Oued Righ est une entité économique très importante, qui regroupe près de 50 Oasis, situées au Nord – Est du Sahara (Figure.02). Elle couvre près de 16.000 hectares de palmeraies (SAYEH LEMBAREK.M ,2008). Etant donné sa situation géographique, la région est considérée comme une zone transitaire, pour toutes activités socio-économiques.

Une des caractéristiques majeures de l'agriculture saharienne, est la culture du palmier dattier, centrée autour de la micro société que représente l'oasis. La culture phoenicicole, représente l'activité la plus importante du Sahara algérien. Sa diffusion à la quasi-totalité des oasis, en a fait un élément structurant du paysage saharien. Cette diffusion est liée aux atouts qui caractérisent ce type de culture. Le premier de ces atouts, est la formidable adaptation aux climats et aux milieux arides, voir hyper-arides des palmiers dattiers. En effet, cet arbre s'accommode aisément des fortes températures ainsi que du faible bilan pluviométrique qui définit l'espace saharien. Parmi les espèces cultivées, la variété de Deglat Nour prédomine, suivie par El Ghars , Degla Bayda ...etc. On note aussi l'existence d'élevage de quelques espèces animales typiques (généralement Ovins et Caprins), les chèvres sont élevées pour leur lait et les brebis pour leur chair.

Le domaine agricole qui était la principale activité de la population de la vallée est un peu délaissé actuellement, à cause du faible rendement des palmiers, dû aux effets néfastes de la salinisation des eaux et des sols, des phénomènes de la remontée de la nappe phréatique, le vieillissement des palmiers...etc, de plus les sociétés pétrolières offrent des emplois plus rémunérés que l'agriculture.

Le tourisme existe aussi, par la présence de quelques repères touristiques, comme les oasis, le lac de Tamacine, les anciennes Medinas, les tombeaux des rois...etc. Et surtout la Zaouïa Tidjania qui accueille de nombreux visiteurs, chaque année.

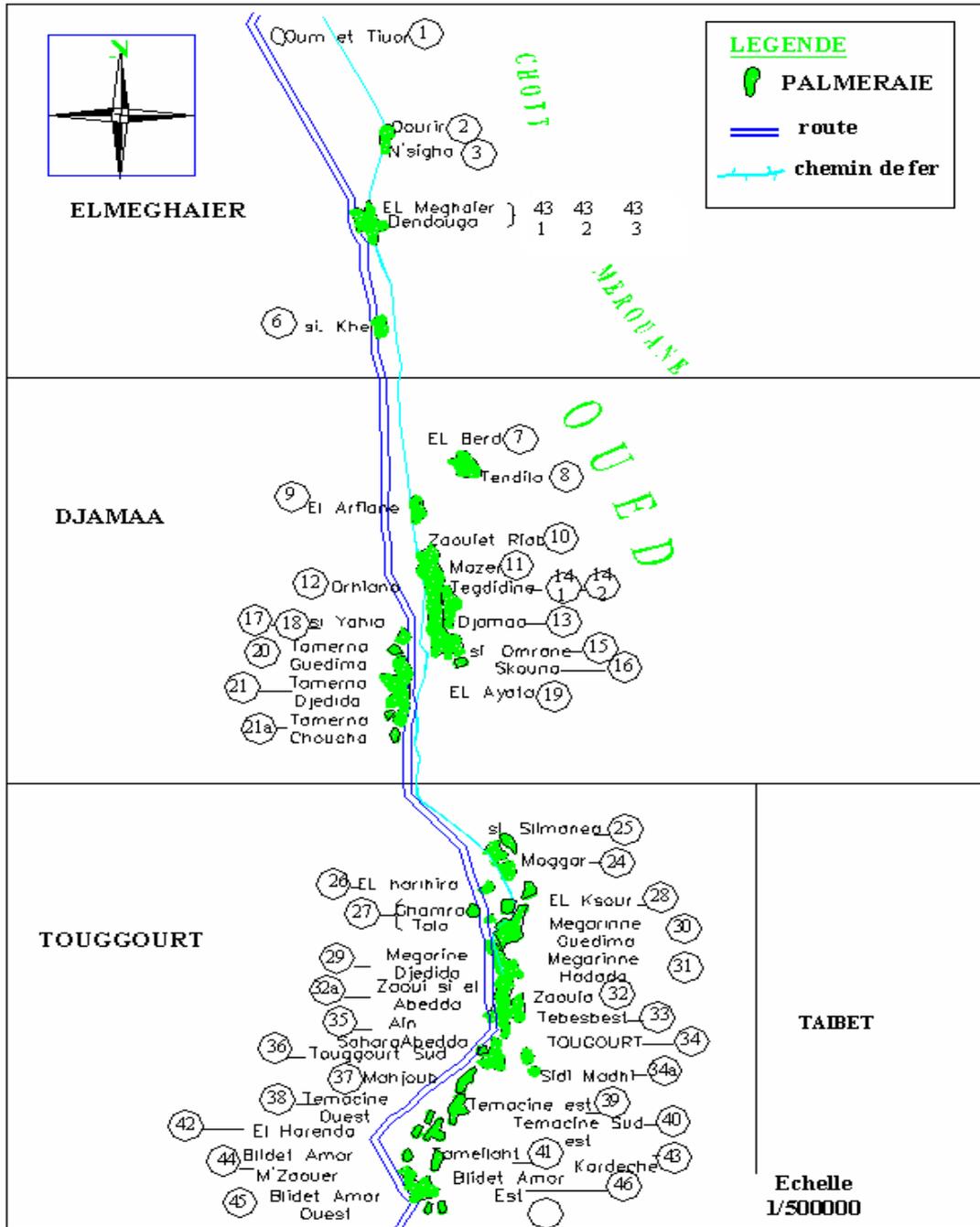


Figure.02 : Répartition des oasis, dans la vallée de l'Oued Righ.
(DUBOST.D, 2002)

I.3 LES PAYSAGES DE LA VALLEE DE L'OUED RIGH :

I.3.1 Les sols de la vallée de l'Oued Righ :

Les régions d'un climat désertique sont idéales pour l'extension des caractères de salinité des sols. Ainsi, les sols de la zone saharienne d'Algérie contiennent des quantités importantes de sels solubles. Leur accumulation est due à la rareté des pluies qui ne pénètrent pas profondément dans les sols pour provoquer une infiltration appréciable.

Le paysage saharien est composé généralement, en partie amont, de sols sableux éoliens peu profonds, à croûte gypseuse et en partie avale, de sols sableux éoliens, plus profonds à encroûtement gypseux plus récent (DUBOST.D,2002).

Sogreah, en 1971 définissent l'origine des sols dans la vallée de l'Oued Righ comme un système alluvionnaire, colluvial et éolien, cela est dû à l'érosion du niveau encroûté, datant du Quaternaire ancien ou du Mio-Pliocène.

Les phases successives de l'érosion et du comblement du fond de la vallée, sont responsables de l'hétérogénéité texturale, constatée dans les horizons profonds, contrairement aux horizons supérieurs qui ont une origine éolienne (plages sableuses plus ou moins remaniées et récentes).

Les sols de la vallée d'Oued Righ contiennent de fortes proportions de gypse. La raison principale de cette accumulation dans les sols est due à la précipitation du gypse, provenant des sels, contenus dans la nappe aquifère et dans les eaux du ruissellement.

1.3.1.1 Salinisation des sols:

L'accumulation des sels dans les sols s'est effectuée grâce à plusieurs facteurs, dont les principaux sont: les eaux d'irrigation salées, la nature géologique des terrains, la très forte évaporation et la concentration des sels dans le temps. La conductivité électrique des sols peut atteindre les 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, principalement dans les horizons de surface (BOUZNAD.I.E,2009). Cette concentration des sels s'explique par la remontée capillaire de la nappe phréatique salée, avec un dépôt ascensionnel.

Le phénomène d'halomorphisme dans les milieux saturés en eau, connu par ses fluctuations à grandes amplitudes, confirme la relation très étroite entre la nappe phréatique - le sol - la salinité et l'évaporation, ce qui a aggravé encore plus le problème de

salinité des sols dans ces régions provoqué en grande partie, par l'utilisation des eaux salées pour l'irrigation, avec un drainage défectueux (photos 01 et 02).



Photo01: Remontée des sels, par capillarité dans une palmeraie. BOUZNAD.IE(2009).

Photo02 : Palmeraie dégradée, par l'excès d'eau et de sels. BOUZNAD.IE(2009).

1.3.2 Topographie et géomorphologie :

La région d'Oued Righ est topographiquement plus ou moins aplatée. Le point le plus élevé (105m) est situé à Touggourt et le point le plus bas (-31m) au Chott Merouane, la pente est de 1‰. La vallée d'Oued Righ est connue sous le nom du « Bas Sahara », à cause de sa basse altitude, notamment dans la zone des Chotts, au Nord, où les altitudes sont inférieures au niveau de la mer (BALLAIS.J.L, 2005).

Dans la partie nord de la vallée d'Oued Righ, la succession des niveaux de glaciaires est bien observable. Par contre à l'Est, ce sont les dunes du Grand Erg oriental qui envahissent la jonction entre les Chotts Merouane et Melhrir (BALLAIS.J.L, 2005).

A. Les versants :

Ce terme serait valable pour l'ensemble des formations tertiaires continentales et serait justifié par l'existence d'un âge attribué au Pliocène à des dépôts situés au-dessus des formations fluvio-lacustres miocènes (BALLAIS.J.L, 2005).

B. Les glaciaires :

Dans la vallée d'Oued Righ, les glaciaires sont parallèles au front montagneux et offrent l'aspect de surfaces uniformes (BALLAIS.J.L, 2005).

C. Les Chotts :

Chott Merouane est situé au Nord-Est du Sahara septentrional, qui fait partie administrativement de la Wilaya d'El-Oued et de la Daïra d'El-Maghair, situé à environ 9Km du chef lieu de la daïra, dans le village de N'sigha. Il est considéré comme la plus basse altitude du Nord de l'Afrique (31m au dessous du niveau de la mer), avec une superficie de l'ordre de 333, 700 ha (HACINI. M, 2006). Chott Merouane est classé, selon RAMSAR, comme une zone humide d'importance internationale, il s'agit d'un lac éphémère, il est alimenté par trois sources principales : celle du canal collecteur de l'Oued Righ, appelé couramment Oued Kherouf, les eaux souterraines de la nappe du Complexe Terminal et les eaux de pluies, qui sont généralement négligeables (HACINI .M, 2006).

L'origine du Chott est directement liée à l'histoire géologique des hauts plateaux algériens. Toute cette région est marquée par un substratum sédimentaire, hérité des transgressions marines du Secondaire et du Tertiaire (BALLAIS .J. L, 2005).

Le Chott Merouane représente une vaste étendue naturelle, servant d'exutoire à toutes les eaux de la région d'Oued Righ (photo 03).



Photo 03 : Les eaux de saumure, Chott Merouane. KADRI.M (2012).

La charge des eaux du Chott Merouane constitue le produit final d'altération et de lessivage des terrains sédimentaires et des sols, de différentes natures. Cette situation explique l'importance de la salinité et de la concentration des éléments en traces (lithium, bore, arsenic, cuivre.....) dans le Chott (HACINI.M, 2006).

Du point de vue socio-économique, le sel est considéré comme « l'or blanc » (en particulier dans les temps anciens), le sel brut du Chott est utilisé pour extraire plusieurs éléments minéraux, tels que le chlore, sodium, potassium, magnésium et le lithium, pour les industries modernes.

Le sel est exploité par l'entreprise ENASEL depuis 1996, la capacité de production est d'environ 120 000 tonnes/an (HACINI.M, 2006) dans les marchés nationales et même à l'exportation.

D. Les lacs :

Les lacs qui se trouvent dans la région d'étude sont classés parmi les plus beaux et prestigieux lacs salés. On distingue dans la vallée d'Oued Righ, plusieurs lacs : le lac de Tamacine (photo04), de Mégarine (photo05),..... etc. Ils se présentent en une dépression, qui est à priori, un exutoire naturel des eaux d'irrigation drainées, et ce à partir des palmeraies limitrophes.

La situation actuelle, notamment la pollution et la dégradation des palmeraies environnantes, Menacent ces lacs, du point de vue écologique. Le réaménagement des zones humides dans la vallée d'Oued Righ est devenu l'une des principales préoccupations du secteur de l'eau et de l'environnement dans la wilaya d'Ouargla.



Photo04 : Lac de Tamacine.

Photo05 : Lac de Mégarine.

E. Le canal d'Oued Righ :

L'irrigation des palmeraies de la vallée d'Oued Righ est le principe pratiqué depuis des millénaires. Les eaux d'irrigation proviennent des sources naturelles, par des puits

exploités par pompage. Avant 1910, ces eaux d'irrigation ont provoqué la remontée des eaux, en surface et l'apparition de plusieurs lacs, soit permanents ou temporaires.

Pour résoudre ces problèmes épineux, la population de la vallée de l'Oued Righ, en 1926 a créé un canal artificiel, à partir d'El Goug, jusqu'au Chott Merouane (exutoire naturel), d'une largeur de 10 m, selon les endroits, d'une profondeur de 4m et d'une pente d'environ 1‰ : c'est le canal d'Oued Righ (ANRH, 2010). Les trois premiers kilomètres du canal sont des conduites enterrées en béton armé, d'un mètre de diamètre. Le reste du canal est à ciel ouvert et de forme trapézoïdale (SAYAH LEMBAREK.M, 2008).

1- Historique du canal d'Oued Righ :

Le canal d'Oued Righ est passé par deux étapes avant d'aboutir à l'état actuel :

- 1- Réalisation pendant la colonisation.
- 2- Réalisation après l'indépendance.

1.1 Réalisation du canal, pendant la colonisation :

Initialement, l'étude du canal collecteur de l'Oued Righ a été lancée avant 1910, après l'apparition de la remontée des eaux de la nappe phréatique.

À partir du village de Tamacine, jusqu'à la zone des lacs de Sidi Slimane a été réalisé en tronçon, manuellement par les fellahs, en 1912. Les eaux de drainage de la région de Djamaa étaient versées vers le Sud, dans la zone des lacs de Sidi Slimane. Les eaux de drainage de la région d'El Meghaïer sont versées au Nord, vers le chott Merouane, et cela à travers l'Oued Khrouf (sur une longueur d'environ 12 km).

Avec la multiplication du nombre de forages, pour satisfaire l'extension des cultures irriguées, les problèmes de drainage commencent à s'aggraver:

- Remontée des eaux de la nappe phréatique, à la surface;
- Apparition des eaux stagnantes;
- Apparition des maladies;
- Accumulation des sels nuisibles dans les parcelles irriguées;
- Suffocation des palmiers dattiers.

En 1926 il a été remarqué que la région présente une dénivelée naturelle moyenne de 1‰ à partir de la commune de Blidet Amor (Daïra de Tamacine, wilaya de Ouargla) jusqu'à Dendouga (Daïra d'El Meghaïer, wilaya d'El-Oued) sur une longueur d'environ 136 km. Sur la base de cette dénivelée, des travaux manuels ont été lancés pour le creusement de l'actuel Oued Righ, représentant le début de ce canal collecteur.

Une deuxième opération de raccordement des tronçons a été entamée par la population de la région, durant cette même année (1926) avec des méthodes traditionnelles, dans le but de faire drainer les eaux, en excès d'irrigation des palmeraies, vers le Chott Merouane.

Le canal est resté dans cet état de bon fonctionnement, grâce au nettoyage périodique assuré par les autorités de cette époque, jusqu'à l'indépendance.

1.2 Réalisation du canal, après l'indépendance :

Dans cette étape, l'efficacité du canal était très faible, à cause du manque de nettoyage et curage, avec la croissance du nombre de forages créés dans les nouveaux périmètres irrigués ou même dans les anciennes palmeraies, sans oublier le débit d'assainissement provoqué par les agglomérations urbaines. C'est pour cela que l'Etat a proposé plusieurs études d'aménagement dans la région, à savoir: Le projet ERESS (Etude des Ressources en Eau du Sahara Septentrional), en 1972 concernant les nappes souterraines, l'étude de TESCO en 1980, l'OSS en 2003

Le canal de l'Oued Righ joue un rôle très important dans :

- Le rabattement de la nappe phréatique ;
- L'assèchement des sols de la vallée, par l'évacuation des eaux d'irrigation ;
- L'évacuation des eaux d'assainissement des zones urbaines qui sont situées de part et d'autre du canal (photos 06, 07, 08).

2. Caractéristiques du canal :

Tableau.1 : Caractéristiques du Canal d'Oued Righ.

Date du début de creusement du canal	1926
Longueur totale (km)	136
Largeur moyenne (m)	10
Profondeur moyenne (m)	4
Vitesse d'écoulement moyenne (m/s)	0,7
Pente d'écoulement (%)	1/1000
Débit moyen (m³/s)	4
Salinité moyenne des eaux du canal (g/l)	15
Nbre de points de rejets le long du canal	36
Débit des eaux usées rejetées (l/s)	320
Débit du canal en amont (l/s)	260
Débit du canal en aval (l/s)	5000
Volume annuel d'eau transité (m³/an)	155,52.10⁶
Quantité de sels prélevés (T/an)	577.365

Source :ANRH /Ouargla.



Photo06 : Canal d'Oued Righ



Photo07.

Photo08.

Rejets des eaux usées, dans le canal d'Oued Righ.

Chapitre II :

Etude

Climatologique

A) II. 1 INTRODUCTION :

La région d'Oued Righ fait partie du Sahara septentrional, qui se caractérise principalement par des amplitudes thermiques, une forte évaporation et une pluviométrie faible.

L'étude climatologique a permis de faire ressortir le type du climat, ainsi que les caractéristiques climatiques qui règnent dans la région d'étude.

- **Station de mesure :**

L'étude climatologique est basée sur une série de données climatiques, allant de 1975 à 2015, relevées à la station de Touggourt (tableaux A.B.C.D ,en annexes).

Tableau.02 : Caractéristiques de la station climatologique de Touggourt.

Station	Altitude	Latitude	Longitude
Touggourt	85	33°11'N	06°13'E

La station de Touggourt appartient au sous bassin N°04 (Erg Oriental), inclus dans le grand bassin saharien (Figure 03).

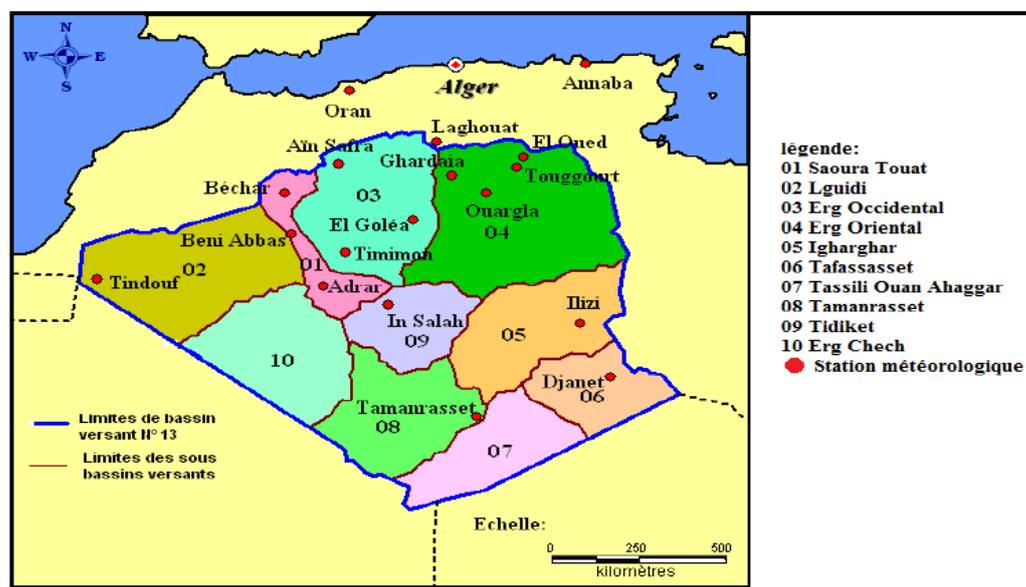


Figure.03 : Les sous bassins versants du Sahara algérien et les stations météorologiques, d'après Cahiers de Sécheresse, N°: 1/98.

II.2 ANALYSE DES PARAMETRES :

II.2.1 Etude des températures:

Les températures moyennes annuelles et mensuelles régissent directement le climat, en interaction avec les autres facteurs météorologiques, elles permettent avec les précipitations, le calcul du déficit d'écoulement et des indices climatiques.

II.2. 1.1 Températures moyennes annuelles :

Les valeurs des températures moyennes annuelles, calculées sur la période (1975-2015), sont reportées dans le tableau suivant:

Tableau.03 : Valeurs des températures moyennes annuelles de la station de Touggourt (1975-2015).

Année	T(°C)	Année	T(°C)
1975	22.02	1996	21.53
1976	21.80	1997	22.22
1977	23.38	1998	21.75
1978	22.75	1999	23.01
1979	22.71	2000	22.29
1980	22.09	2001	23.24
1981	21.91	2002	22.57
1982	23.29	2003	22.66
1983	23.07	2004	22.05
1984	22.28	2005	22.62
1985	22.57	2006	22.66
1986	22.21	2007	22.41
1987	22.18	2008	22.57
1988	22.23	2009	22.09
1989	21.88	2010	22.91
1990	21.96	2011	22.17
1991	20.64	2012	22.74
1992	20.89	2013	22.60
1993	21.56	2014	23.08
1994	22.13	2015	22.35
1995	21.73		

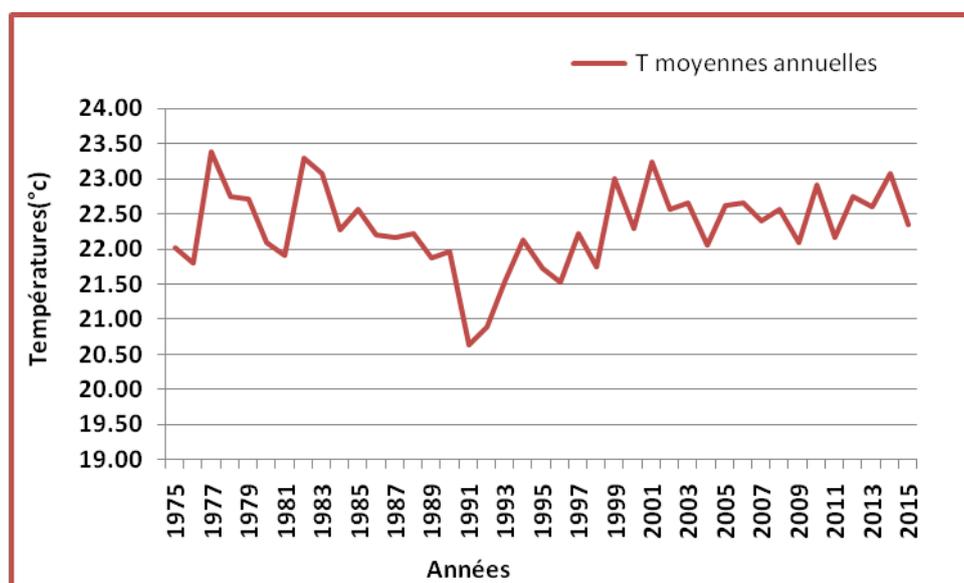


Figure.04 : Variation des températures moyennes annuelles, à la station de Touggourt (1975-2015).

La courbe des températures moyennes annuelles (Figure 04), montre que l'année la plus froide est celle de 1991, avec une moyenne de température annuelle de 20.64 °C, et l'année la plus chaude est de 1977, où la température moyenne annuelle enregistrée est de 23.38 °C.

II.2.1.2 Températures moyennes mensuelles :

Les moyennes mensuelles des températures sont représentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau.04: Valeurs des Températures moyennes mensuelles (°C) pour la station de Touggourt, période (1975 - 2015).

Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D
T (°C)	10.61	13.04	16.93	21.35	26.20	31.32	34.30	33.79	29.17	23.14	16.26	11.63

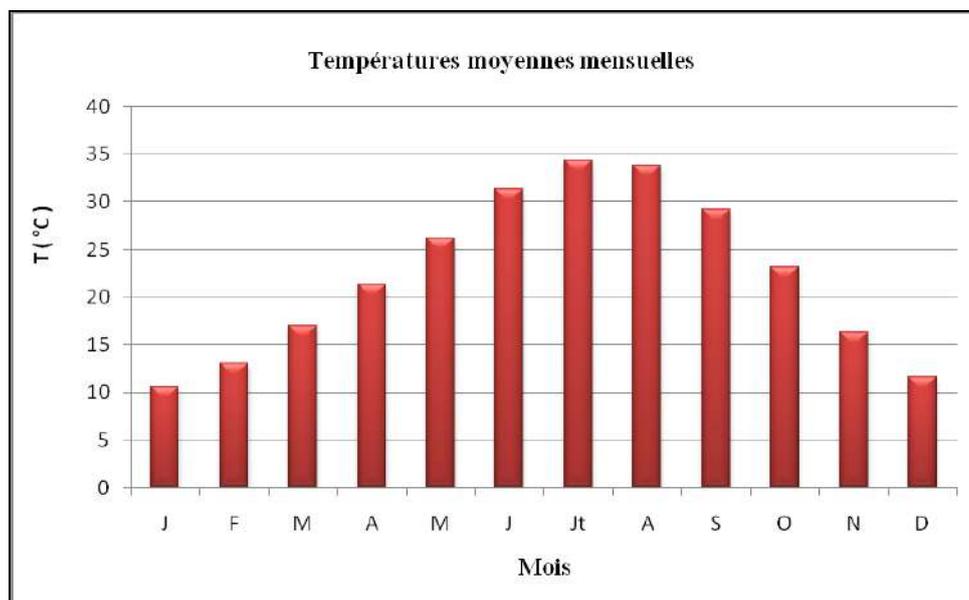


Figure.05 : Variation des températures moyennes mensuelles, à la station de Touggourt.

D'après la Figure, nous remarquons que :

*Le mois le plus chaud est Juillet, avec une valeur maximale de 34.30°C.

*Le mois le plus froid est Janvier, avec une valeur minimale de 10.61°C.

II.2.2 Etude des précipitations :

Dans notre région d'étude, les précipitations ont pratiquement lieu sous forme de pluies. Ces dernières sont caractérisées par leur faible importance quantitative. Les fluctuations annuelles et mensuelles montrent une répartition variable de la pluie.

II.2.2.1 Précipitations moyennes annuelles:

Les valeurs des précipitations calculées, sur la période allant de (1975-2015) sont reportées dans le tableau suivant :

Tableau.05: Variation des précipitations moyennes annuelles (mm) à la station de Touggourt (1975 – 2015).

Année	P(mm)	Année	P(mm)
1975	118,1	1996	75.53
1976	107	1997	54.1
1977	52,7	1998	33.27
1978	68,9	1999	36.25
1979	51,9	2000	41.39
1980	153	2001	42.34
1981	20,33	2002	41.4
1982	28,44	2003	60.7
1983	13.72	2004	147.85
1984	13.72	2005	24.65
1985	69.3	2006	61.99
1986	55.63	2007	74.18
1987	31.63	2008	34.05
1988	154.13	2009	157.99
1989	8.89	2010	28.45
1990	119.52	2011	25.66
1991	61.47	2012	18.3
1992	141.35	2013	55.39
1993	139.86	2014	20.82
1994	40.14	2015	52.33
1995	60.72		

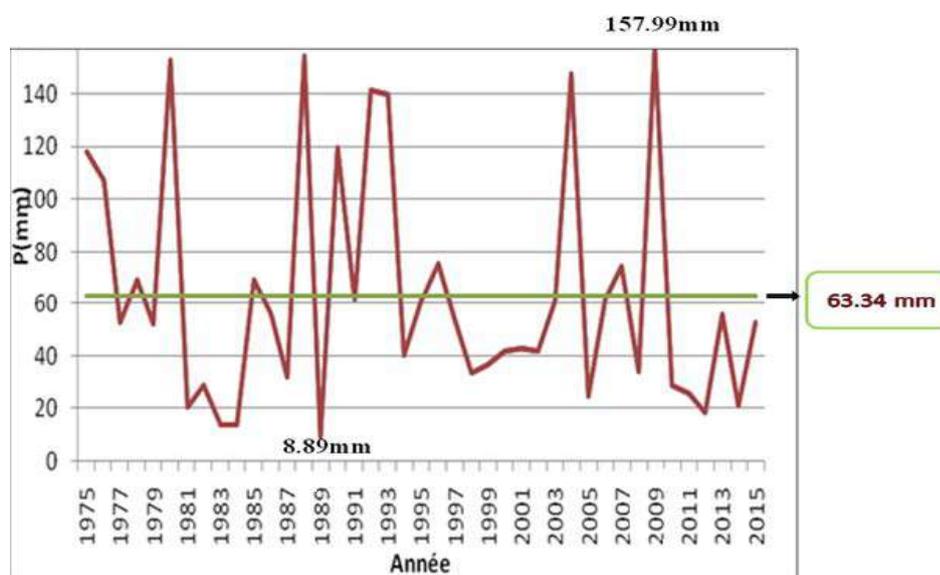


Figure.05: Variations interannuelles des précipitations, à la station de Touggourt (1975 – 2015).

L'analyse de la courbe des variations annuelles des précipitations effectuée sur une période de (1975-2015) montre que :

- la moyenne interannuelle est égale à 63,34mm.
- L'année 2009 est la plus pluvieuse, avec une précipitation de 157.99mm.
- L'année 1989 est la plus sèche, avec une valeur de 8,89mm.

❖ Coefficient d'irrégularité du régime des précipitations :

Le coefficient d'irrégularité du régime des précipitations annuelles à la station de Touggourt est donné par le rapport du module de l'année la plus humide PM à celui de l'année sèche Pm.

- $PM/Pm = 157.99/8.89 = 17.77$ valeur désignant une irrégularité prononcée, caractéristique du climat aride.

❖ Coefficient pluviométrique :

Pour mieux caractériser la pluviométrie annuelle et déterminer les années excédentaires ou déficitaires, on tient compte du coefficient pluviométrique (CP). Il est obtenu par le rapport de la pluviométrie d'une année à la pluviométrie moyenne d'une série, à une station donnée.

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

- ❖ **CP**: Coefficient pluviométrique
- ❖ **P** : Pluviométrie d'une année (mm)
- ❖ \bar{P} : Pluviométrie moyenne (mm).

Si : $CP > 1$: l'année est **excédentaire**.

$CP < 1$: l'année est **déficitaire**.

Le tableau ci-dessous, montre les coefficients pluviométriques calculés à la station de Touggourt, allant de 1975 à 2015 :

- ❖ les années **excédentaires** sont: 1975, 1976, 1978, 1980, 1985, 1988, 1990, 1992, 1993, 1996, 2004, 2007, et 2009 (13/41 années excédentaires).

- ❖ Les années **déficitaires** sont:
1977, 1979, 1981, 1982, 1983, 1984, 1986, 1987, 1989, 1991, 1994, 1995, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2005, 2006, 2008, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015 (28/41 années déficitaires).

Tableau.06 : Coefficients pluviométriques de la station de Touggourt (1975 – 2015).

Année	CP	Type de l'année	Année	CP	Type de l'année
1975	1.86	E	1996	1.19	E
1976	1.68	E	1997	0.85	D
1977	0.83	D	1998	0.52	D
1978	1.08	E	1999	0.57	D
1979	0.81	D	2000	0.65	D
1980	2.41	E	2001	0.66	D
1981	0.32	D	2002	0.65	D
1982	0.44	D	2003	0.95	D
1983	0.21	D	2004	2.33	E
1984	0.21	D	2005	0.38	D
1985	1.09	E	2006	0.97	D
1986	0.87	D	2007	1.17	E
1987	0.49	D	2008	0.53	D
1988	2.43	E	2009	2.49	E
1989	0.14	D	2010	0.44	D
1990	1.88	E	2011	0.40	D
1991	0.97	D	2012	0.28	D
1992	2.23	E	2013	0.87	D
1993	2.20	E	2014	0.32	D
1994	0.63	D	2015	0.82	D
1995	0.95	D	-		

II.2.2.2 Précipitations moyennes mensuelles :

Le tableau ci-dessous donne les précipitations moyennes mensuelles, observées durant la période (1975 – 2015) :

Tableau.07 : Valeurs des précipitations moyennes mensuelles, à la station de Touggourt (1975 – 2015).

Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D
P(mm)	13.04	3.91	8.57	6.25	3.14	0.76	0.59	1.67	5.77	4.88	8.91	5.80

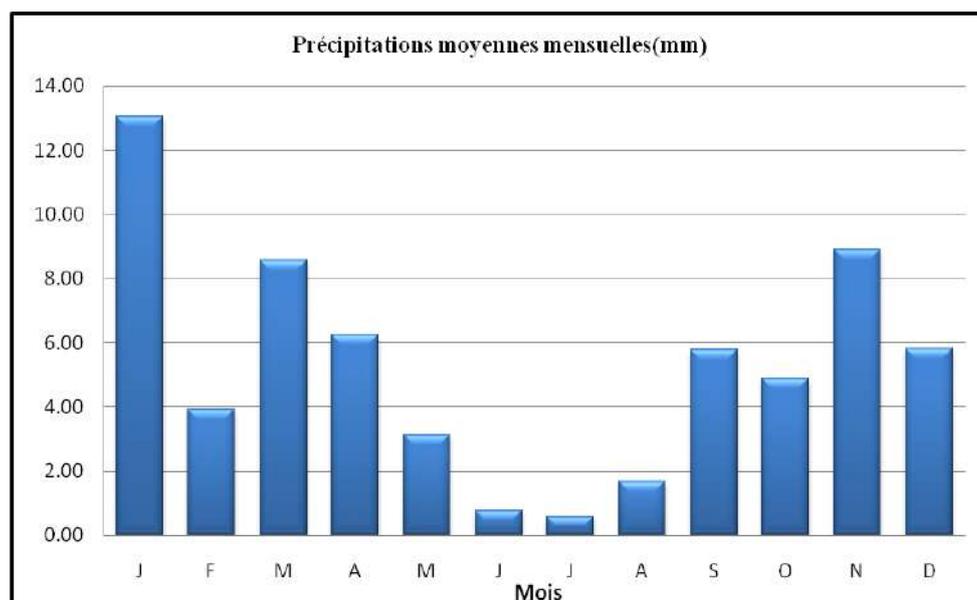


Figure.06 : Répartition moyenne mensuelle des précipitations (1975-2015).

-L'histogramme montre une variabilité des précipitations dans le temps, d'où :

- La pluviométrie moyenne mensuelle maximale est enregistrée au mois de Janvier, avec une valeur de 13.04 mm .La valeur minimale est de 0.59 mm, relevée au mois de Juillet.

II.2.2.3 Précipitations Saisonnières :

- **Automne** : Septembre, Octobre, Novembre.
- **Hiver** : Décembre, Janvier, Février.
- **Printemps** : Mars, Avril, Mai.
- **Eté** : Juin, Juillet, Août.

-Les précipitations saisonnières à la station de Touggourt sont données au tableau suivant :

Tableau. 08: Valeurs des précipitations saisonnières, à la station de Touggourt.

Saisons	Automne			Hiver			Printemps			Eté		
	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A
Moyenne Saisonnière (mm)	19.56			22.75			17.96			3.02		

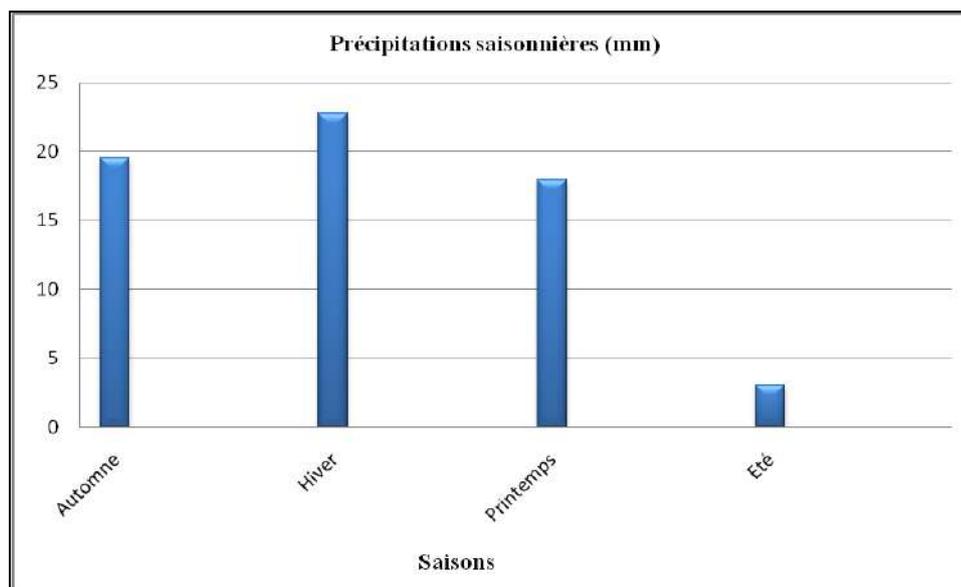


Figure 07: Histogramme des précipitations saisonnières, à la station de Touggourt.

Le tableau 08 et la figure 07, montrent que :

- l'Hiver est la saison la plus humide (22.75mm).
- l'été est la plus sèche (3.02mm).

II.2.3 Vitesse du vent:

Le vent est un phénomène continu au désert, il joue un rôle considérable en provoquant une érosion intense, grâce aux particules sableuses qu'il transporte. Les vents qui influencent dans la région d'Oued Righ soufflent suivant des directions différentes généralement, NNE en hiver et SSE en été (ANRH/Ouargla). Ceci provoque le déplacement des dunes et le dessèchement des végétaux.

Tableau.09: Vitesses moyennes mensuelles (km/h) du vent, enregistrées à la station de Touggourt.

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
vitesse du vent (Km/h)	11.41	10.74	12.86	14.76	14.53	13.15	11.75	10.91	10.60	10.12	10.08	8.70

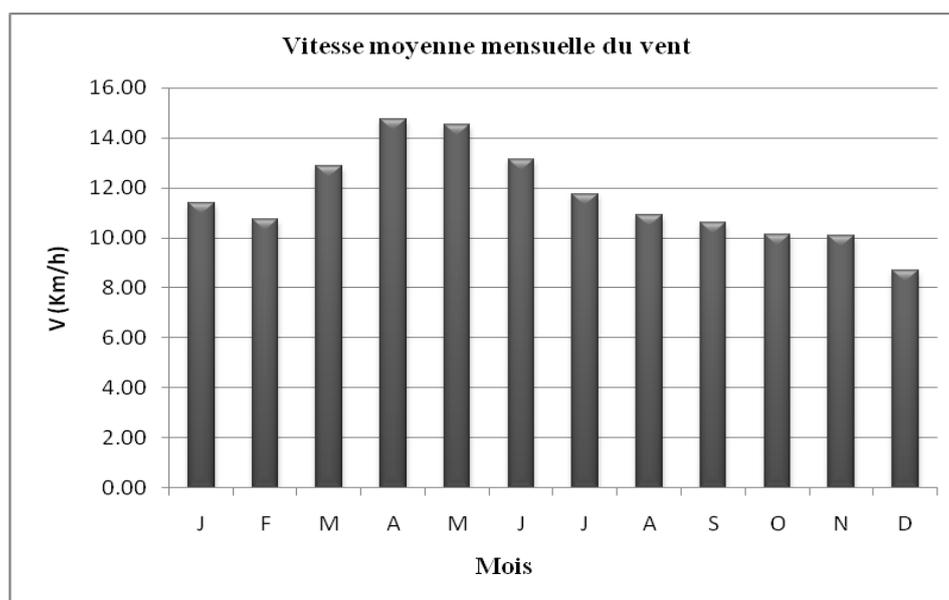


Figure.08 : Histogramme de distribution de la vitesse moyenne mensuelle du vent (1975-2015).

Selon le tableau 09 et l'histogramme 08, nous remarquons que le vent est fréquent durant toute l'année.

- Les vitesses les plus élevées sont enregistrées durant la période allant du mois de Mars jusqu'au mois de Mai, avec un maximum de 14.76 km/h, enregistré au mois d'Avril, tandis que la vitesse minimale est relevée en Décembre (8.70 km/h).

II.2.4 L'humidité relative :

Les valeurs moyennes mensuelles d'humidité relative, mesurées sur la période (1975-2015) sont données dans le tableau suivant :

Tableau.10: Valeurs moyennes mensuelles (%) d'humidité relative, enregistrées à la station de Touggourt.

Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D
Humidité (%)	60.72	50.72	45.10	39.90	36.70	31.98	29.44	31.14	41.02	46.73	56.20	62.05

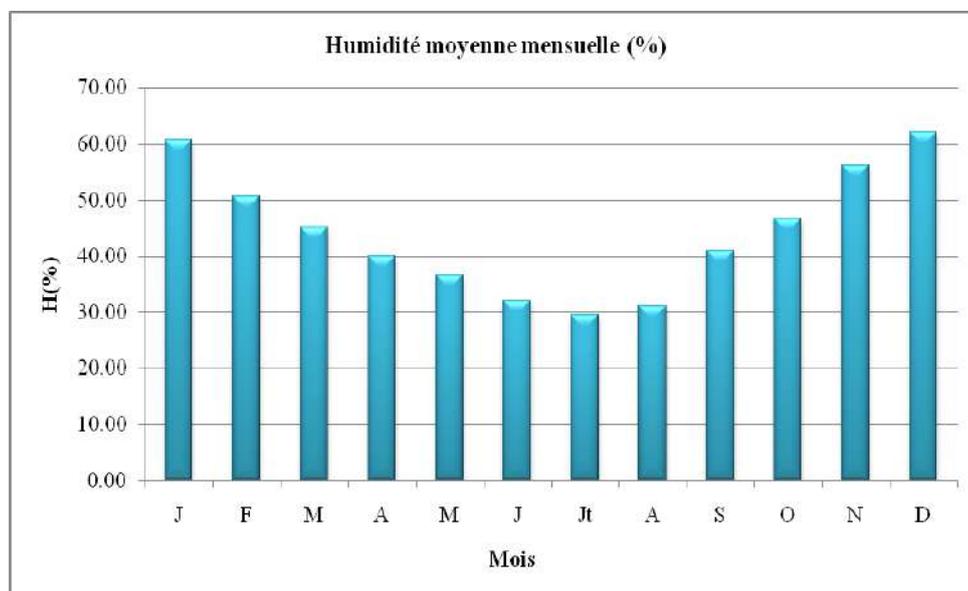


Figure.09: Histogramme des variations d'humidités moyennes mensuelles (1975 – 2015).

Durant la période d'observation (1975-2015), l'humidité de l'air dans la région est marquée par des périodes bien distinctes :

- A partir de mois de Janvier jusqu'au mois de Juillet, le taux diminue pour aboutir à un minimum de 29.44% (Juillet). Au mois d'Août, le taux s'élève jusqu'au mois de Décembre, pour atteindre un maximum de 62.05%.

II.3 SYNTHÈSE CLIMATIQUE :

L'étude du climat est basée sur deux types de méthodes :

- **Méthodes graphiques** : permettant de visualiser l'étendue des périodes sèches et humides.
- **Méthodes de calcul des indices** : permettent de caractériser le type du climat de la région.

II. 3.1 Méthode graphique :

❖ Diagramme pluvio-thermique de BAGNOULS et GAUSSEN:

-Selon la définition de **BAGNOULS** et **GAUSSEN**, une période sèche est une période pendant laquelle les précipitations moyennes du mois sont inférieures ou égales au double de la température moyenne du même mois ($p \leq 2 T$ °C). Sur le diagramme, sont reportés :

- En abscisses : les mois de l'année
- En ordonnées, à droite : les précipitations moyennes mensuelles, en mm.
- En ordonnées, à gauche : les températures moyennes mensuelles, en °C.

* Une période sèche est définie, quand la courbe des précipitations passe au-dessous de celle des températures.

* Une période humide est définie, quand la courbe des précipitations passe au-dessus de celle des températures.

-Les valeurs des précipitations et des températures moyennes mensuelles sont reportées dans le tableau suivant :

Tableau.11 : Valeurs moyennes mensuelles des précipitations et des températures.

Mois	Jan	Fév	Mars	Avri	Mai	Jun	Jult	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
p	13.04	3.91	8.57	6.25	3.14	0.76	0.59	1.67	5.77	4.88	8.91	5.8
T	10.61	13.04	16.93	21.35	26.2	31.32	34.3	33.79	29.17	23.14	16.26	11.63

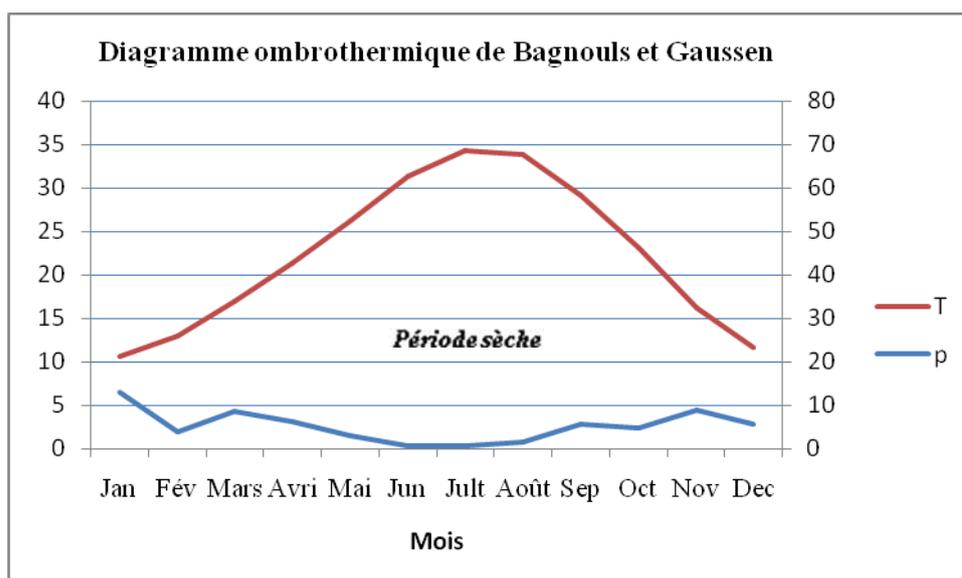


Figure. 10 : Diagramme ombrothermique de la station de Touggourt.

Le diagramme ombrothermique (figure10) montre que la courbe des températures se situe au-dessus de celle des précipitations, ce qui indique que la région d'étude est caractérisée par une saison sèche, pendant toute l'année.

II. 3.2 Méthode des indices climatiques :

1. L'indice d'aridité de De Martonne :

a) Indice d'aridité annuel de De Martonne (I) :

-De Martonne a défini, en 1923 un indice d'aridité, dont les variations correspondaient aux changements des conditions d'écoulement de l'eau.

Cet indice (I) est exprimé par la formule suivante:

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

Avec :

P : Précipitations moyennes annuelles (mm).

T : Températures moyennes annuelles (°C).

Tableau.12: Classification des climats, en fonction des indices d'aridité :

I	Type du climat
$I > 20$	Climat humide
$10 < I < 20$	Climat semi-aride
$5 < I < 10$	Climat désertique
$I < 5$	Climat hyper- aride

▪ Pour la station de Touggourt :

$$P = 63.34\text{mm}$$

$$T = 22.31^{\circ}\text{C}$$

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

$$I = \frac{63.34\text{mm}}{22.31^{\circ}\text{C} + 10}$$

$$I = 1.96$$

- L'indice d'aridité de De Martonne $I = 1.96$

$I < 5$, donc le climat de la région d'Oued Righ appartient à un régime *Hyper-aride* .(Figure.11.a).

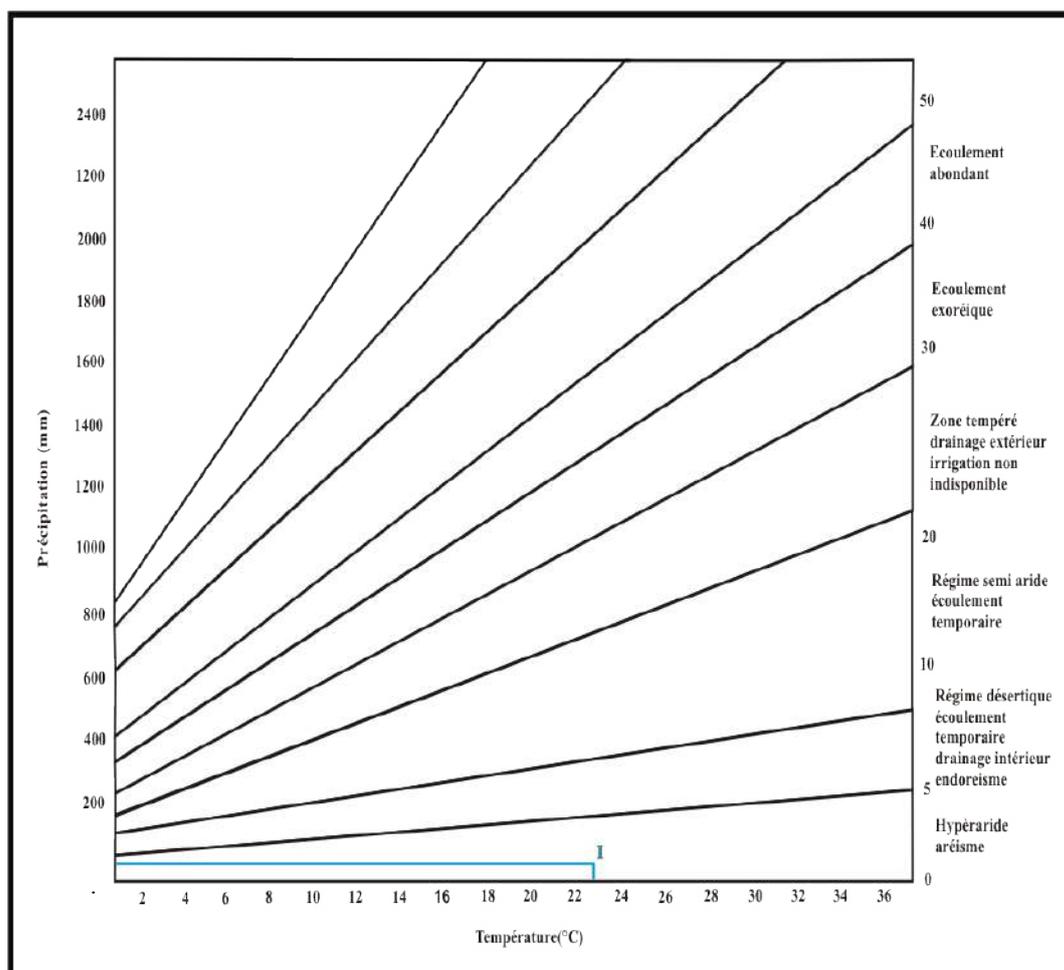


Figure. 11.a: Abaque de l'indice d'aridité annuel de De Martonne.

b) Indice d'aridité mensuel de De Martonne (i) :

Il est intéressant de considérer également les variations mensuelles de l'indice d'aridité de De Martonne:

$$\text{Avec : } i = \frac{12P}{T+10}$$

P : Précipitations moyennes mensuelles (mm).

T : Températures moyennes mensuelles (°C).

Les résultats d'indice d'aridité mensuel de De Martonne « i », sont reportés dans le tableau suivant :

Tableau.13: Indices d'aridité mensuels de De Martonne.

Mois	i	Climat	Mois	i	Climat
Janvier	7.59	Désertique	Juillet	0.15	Hyper-aride
Février	2.03	Hyper-aride	Août	0.45	Hyper-aride
Mars	3.81	Hyper-aride	Septembre	1.76	Hyper-aride
Avril	2.39	Hyper-aride	Octobre	1.76	Hyper-aride
Mai	1.04	Hyper-aride	Novembre	4.07	Hyper-aride
Juin	0.22	Hyper-aride	Décembre	3.21	Hyper-aride

*Hyper-aride ($i < 5$) : tous les mois de l'année.

*Désertique ($5 < i < 10$) : le mois de Janvier.

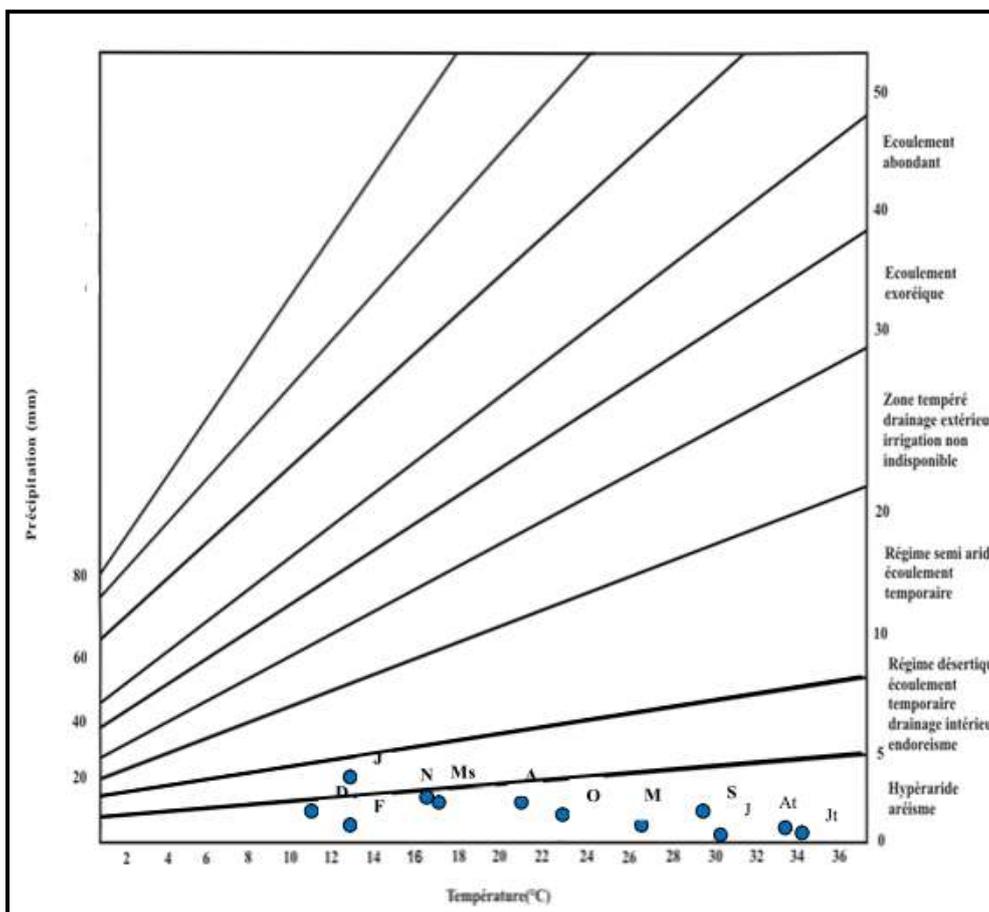


Figure. 11.b: Abaque de l'indice d'aridité mensuel de De Martonne.

2. Indice de Moral (Ia) :

a) L'indice annuel de Moral :

Exprimé par l'équation :

$$I_a = \frac{P}{T^2 - 10T + 200}$$

Avec:

P : précipitations moyennes annuelles (mm).

T : température moyenne annuelle (°C).

$$\longrightarrow I_a = 0.13$$

- Si : $I_a < 1$ on a un climat *sec*.
- Si : $I_a > 1$ on a un climat *humide*.

$I_a < 1$, le climat de notre région est **sec**.

b) Indice mensuel de Moral (I_m) :

Avec :
$$I_m = \frac{P}{0.1T^2 - T + 20}$$

P : précipitation du mois considéré (mm).

T : température du même mois (°C).

Tableau.14: Valeurs des indices mensuels de Moral.

Mois	Jan	Fév	Mars	Avri	Mai	Jun	Jul	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
I_m	0.63	0.16	0.27	0.14	0.05	0.008	0.005	0.01	0.07	0.09	0.29	0.26

Les quatre types de mois, indiqués par Moral sont :

- Mois pluvieux : $P > 0,1 T^2 + T + 30$.
- Mois humide : $0,1T^2 + T + 30 > P \geq 0,1T^2 - T + 20$.
- Mois sec : $0,1 T^2 - T + 20 > P \geq 0,05T^2 - T + 10$.
- Mois aride : $P < 0,05 T^2 - T + 10$

Tableau n° 15: Types des climats, selon Moral :

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
P(mm)	13.04	3.91	8.57	6.25	3.14	0.76	0.59	1.67	5.77	4.88	8.91	5.8
$0,1 T^2_{m+} + T_{m+} + 30$	51.86	60.04	75.59	96.93	124.84	159.41	181.9	177.9	144.25	106.6	72.69	55.15
$0,1 T^2_{m-} - T_{m-} + 20$	20.6	23.9	31.7	44.2	62.4	86.7	103.3	100	75.9	50.4	30.1	21.8
$0,05 T^2_{m-} - T_{m-} + 10$	5.01	5.4	7.4	11.44	18.12	27.72	34.52	33.2	23.7	13.6	6.9	5.13
Type	sec	aride	sec	aride	aride	aride	aride	aride	aride	aride	sec	sec

3. Indice climatique d'EMBERGER :

-Pour définir son indice d'aridité, EMBERGER s'est basé sur les limites des zones occupées par les différentes associations végétales. Il propose d'utiliser la relation suivante :

$$Q = \frac{2000P}{M^2 - m^2} \quad (1)$$

P : précipitations moyennes annuelles (mm).

M : moyenne des **maximas** des températures, en (°K) du mois le plus *chaud*

($M = 37.4 + 273 = 583.4^\circ\text{K}$).

m : moyenne des **minimas** des températures, en (°K) du mois le plus froid

($m = 7.9 + 273 = 280.9^\circ\text{K}$).

-La formule (1) est adaptée sous la forme suivante (formule de Stewart)

$$Q_3 = \frac{3.43 \cdot P}{M - m} \quad \Rightarrow \quad Q_3 = 7.36$$

-L'abaque de L. Emberger (modifié par Stewart) comporte en ordonnées les valeurs de Q_3 de Stewart, et en abscisses la température moyenne des minimas du mois le plus froid, en °C.

-En reportant cette valeur sur le diagramme d'EMBERGER (Figure. 12) qui comporte en ordonnées les valeurs de Q_3 et en abscisses, la moyenne des **minimas** du mois le plus froid (7.9°C), nous constatons que la région appartient à l'étage bioclimatique saharien, à hiver chaud.

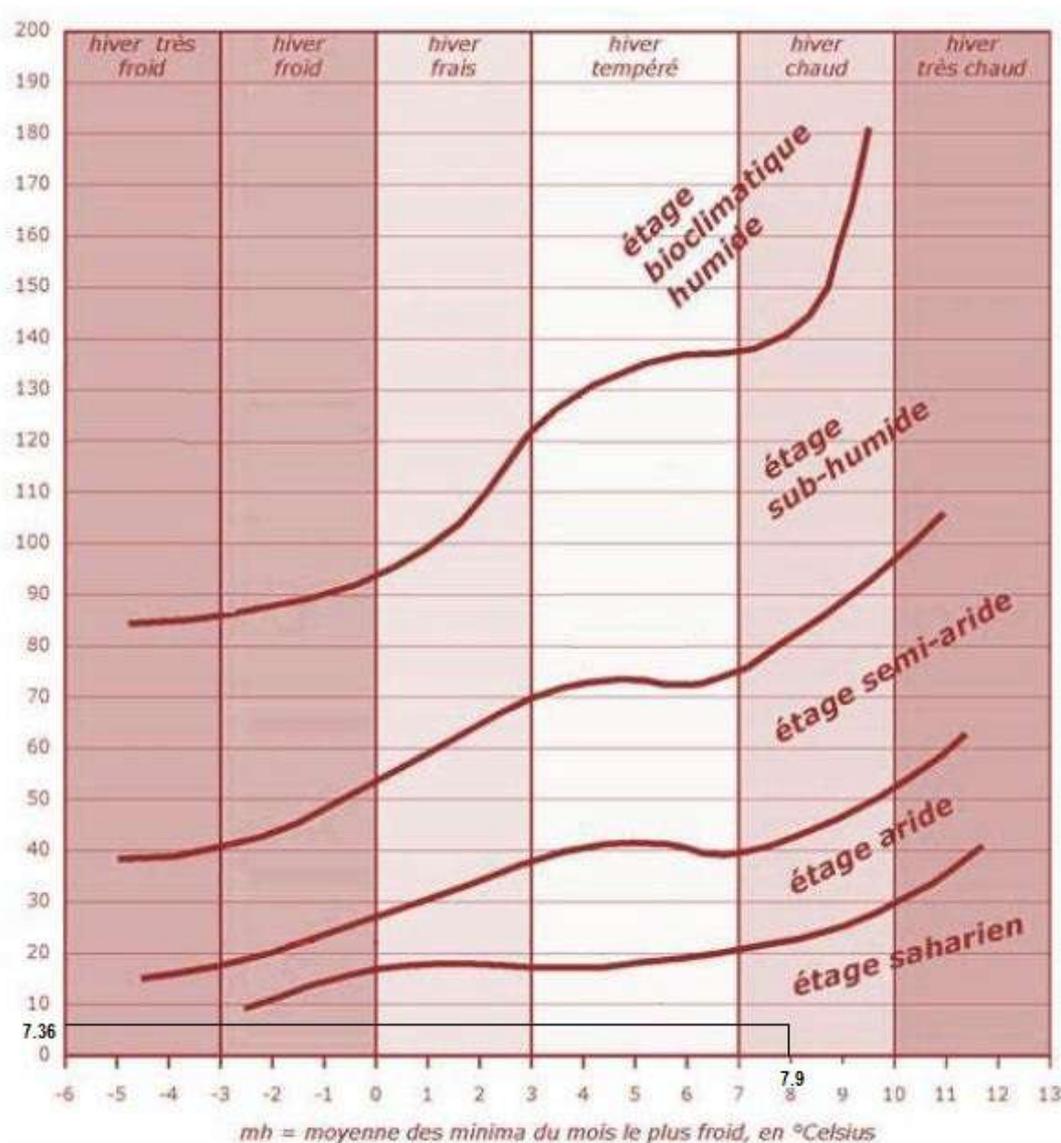


Figure. 12 : Climagramme d'Emberger, modifié par Stewart.

II.3.3 Evapotranspiration et déficit d'écoulement :

-Le retour de l'eau à l'atmosphère peut se faire de différentes manières, soit directement par évaporation, à partir d'une surface d'eau libre (mer, lac, cours d'eau, etc.), soit le plus souvent à partir d'un sol, ou par l'intermédiaire des végétaux. On parle dans ce deuxième cas d'évapotranspiration.

II.3.3.1 L'évapotranspiration :

❖ L'évapotranspiration potentielle (ETP):

L'ETP est un facteur important du cycle hydrologique. Elle résulte de deux phénomènes, l'un physique : l'évaporation et l'autre biologique : la transpiration. Elle est fonction de plusieurs facteurs (l'humidité, la température, l'insolation, vitesse de turbulence du vent, couvert végétal et sol). Pour l'estimation de ce paramètre, on utilise la formule de Thornthwaite et de Serra :

1-Formule de Thornthwaite :

$$E.T.P (mm) = 16 (10 T / I)^a$$

T : température moyenne mensuelle

$$I = \sum i \text{ avec } i = (T/5)^{1,514}$$

$$a = 6.75 \cdot 10^{-7} I^3 - 7.71 \cdot 10^{-5} I^2 + 1.79 \cdot 10^{-2} I + 0.49$$

Tableau.16: Calculs de l'ETP, selon Thornthwaite.

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Ann
T (°C)	10.61	13.04	16.93	21.35	26.2	31.32	34.3	33.79	29.17	23.14	16.26	11.6	22.31
i	3.12	4.26	6.33	9	12.27	16.08	18.45	18.04	14.44	10.17	5.96	3.58	121.76
P (mm)	13.04	3.91	8.57	6.25	3.14	0.76	0.59	1.67	5.77	4.88	8.91	5.8	63.34
ETP (mm)	10.96	19.31	39.53	74.73	131.09	213.98	274.62	263.55	176.02	93.22	35.38	14.1	1346.56
K	0.88	0.86	1.03	1.09	1.19	1.2	1.22	1.15	1.03	0.97	0.88	0.86	-
ETPc(mm)	9.64	16.6	40.72	81.46	156	256.78	335.03	303.09	181.31	90.42	31.14	12.13	1514.37

L'application de cette formule a donné une ETP de 1514.37 mm. Nous constatons que les précipitations sont inférieures à l'ETP, ce qui conduit à un déficit couvrant toute l'année hydrologique.

2- Formule de SERRA :

$$E.T.P (mm)= 16 (10 T/ I)^a$$

T : température moyenne mensuelle

$$I=\sum i \text{ avec } i=(0.09T)^{3/2}$$

$$a= 1.6 I/100 +0.5$$

Tableau. 17 : Calculs de l'ETP, selon SERRA.

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Ann
T (°C)	10.61	13.04	16.93	21.35	26.2	31.32	34.3	33.79	29.17	23.14	16.26	11.63	22.31
i	0.99	1.03	1.08	1.13	1.18	1.23	1.25	1.24	1.21	1.15	1.07	1	13.62
P (mm)	13.04	3.91	8.57	6.25	3.14	0.76	0.59	1.67	5.77	4.88	8.91	5.8	63.34
ETP (mm)	51.23	63.94	84.66	108.63	135.36	163.99	180.82	177.93	151.92	118.45	81.06	56.54	1374.6
K	0.88	0.86	1.03	1.09	1.19	1.2	1.22	1.15	1.03	0.97	0.88	0.86	-
ETPc(mm)	45.08	54.99	87.2	118.41	161.08	196.76	220.6	204.62	156.48	114.89	71.33	48.63	1480.17

❖ **Evapotranspiration réelle (ETR) :**

-Le calcul de l'ETR peut se faire à partir de plusieurs formules. On utilise la formule de Turc.

a) **Formule de Turc :**
$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + P^2/L^2}}$$

ETR : Evapotranspiration réelle annuelle (mm/an).

P : précipitations moyennes annuelles (mm/an).

T : Température moyenne annuelle (°C).

Avec : $L= 300 + 25T + 0,05T^3 = 1412.97$

P = 63.34 mm

T = 22.31 °C

L'ETR = **67.38 mm**. Cette méthode n'est pas applicable, car les précipitations sont inférieures à l'ETR.

b) Formule de Coutagne

-Coutagne a établi une autre formulation avec les mêmes facteurs que pour la formule de Turc, les moyennes annuelles des précipitations et des températures ; la formule s'établit comme suit :

$$\text{ETR} = P - \lambda P^2$$

$$\lambda = 1 / (0.8 + 0.14T).$$

Avec comme condition d'application ; $1/8 \lambda < P < 1/2 \lambda$.

P:Précipitation moyenne annuelle(m).

T : Température moyenne annuelle (°C).

λ : Facteur, fonction de la température.

ETR : évapotranspiration réelle (m/an).

-Le calcul a donné pour λ une valeur de 0.25 ; la condition d'application n'étant pas vérifiée, donc, la formule de Coutagne n'est pas applicable.

▪ A la lumière des résultats des différentes méthodes :

- L'E.T.R calculé par la méthode de Turc dépasse de peu les précipitations (67.38mm).
- L'E.T.R estimé par la méthode de Thornthwaite représente la totalité des précipitations pour la station Touggourt durant la période (1975-2015).

Tableau. 18 : Valeurs de l'ETP et de l'ETR obtenues par différentes méthodes.

ETP (mm)		ETR (mm)		
Thornthwaite	Serra	Thornthwaite	Turc	Coutagne
1514.37	1480.17	P=ETR=63.34	67.38	-

L'estimation de l'évapotranspiration à partir des différentes méthodes, citées ci-dessus a montré une évapotranspiration supérieure aux précipitations, ce qui explique que la totalité des précipitations seront reprises par l'évapotranspiration (P=ETR), et par la suite l'infiltration et le ruissellement ne seront pas estimés par ces méthodes.

B) II.4 APERÇU SUR L'EVOLUTION DU DEBIT DU CANAL D'OUED RIGH AU NIVEAU DES STATIONS HYDROMETRIQUES :

L'évolution de la région d'Oued Righ se fait sentir à travers la multiplication du nombre de forages suite à l'augmentation du nombre d'habitants, au développement socio-économiques et à l'extension des palmeraies par de nouveaux périmètres irrigués. Cette évolution a provoqué l'augmentation des volumes en eau à partir des forages exploités et des réseaux de drainages supplémentaires, donc une importante évolution spatiale et chronologique du débit du canal d'Oued Righ a été observée.

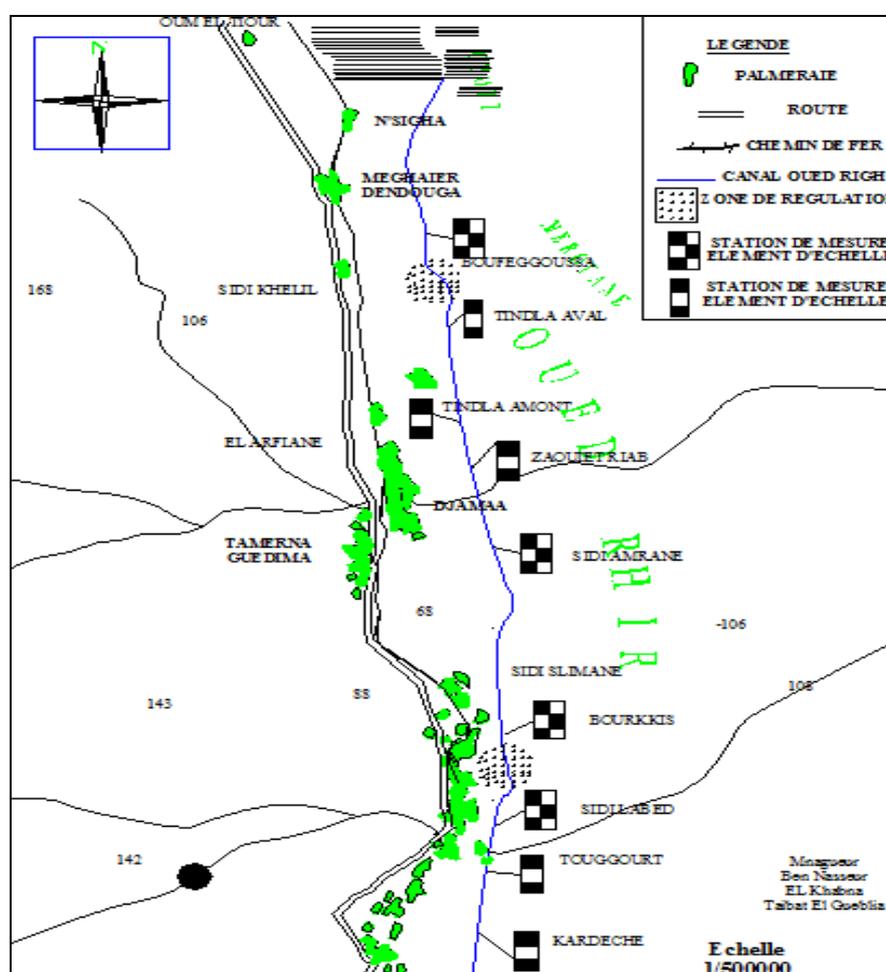


Figure.13 : Localisation des stations hydrométriques (ANRH/Ouargla).

Le canal d'Oued Righ commence au village d'El Goug et se termine au Chott Merouane, à El-Meghaïer. Ce canal passe par les trois grandes villes à savoir : la ville de Touggourt, Djamaâ et El-Meghaïer, qui sont entourées par des palmeraies.

❖ L'analyse des débits de ce canal (tableau E, en annexes) mesurés dans les stations hydrométriques a montré une irrégularité dans le temps et dans l'espace.

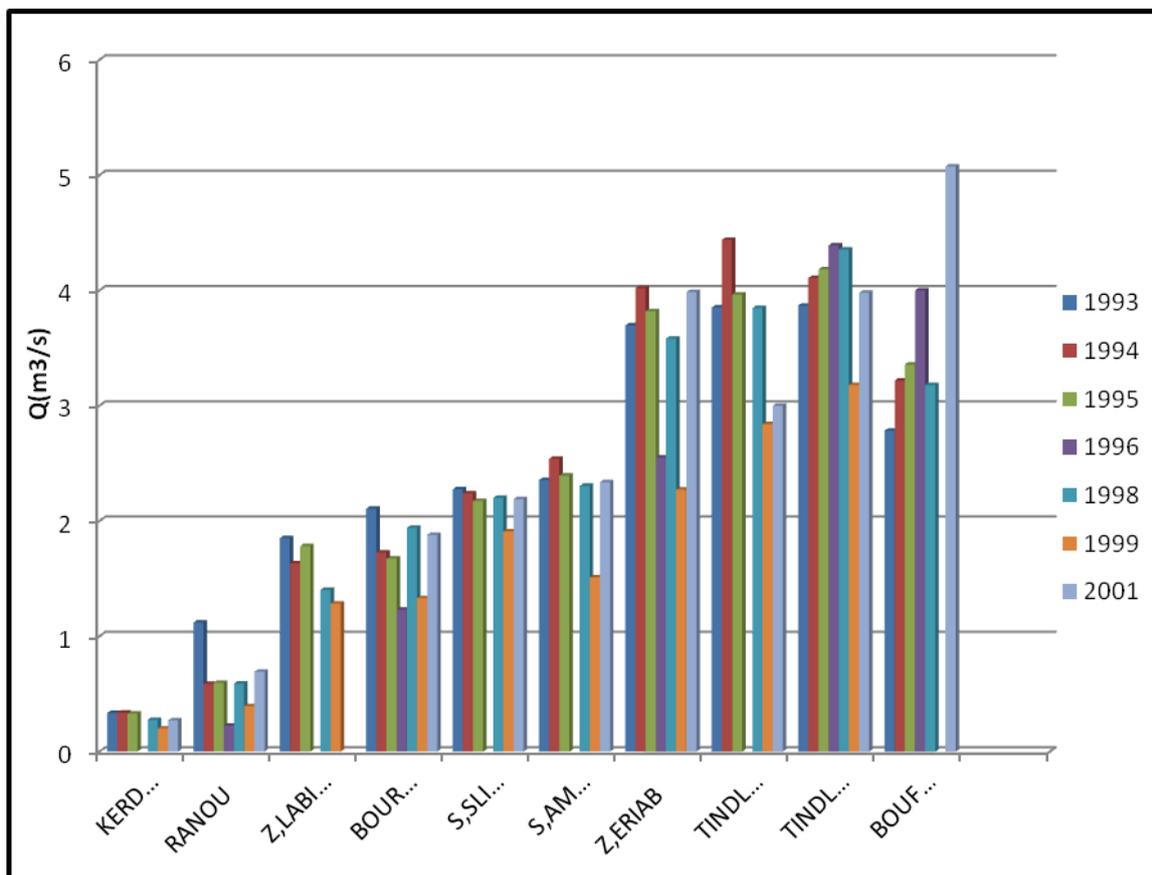


Figure.14: Histogramme d'évolution des débits, en fonction du temps, au niveau de toutes les stations.

Les histogrammes de l'évolution des débits, en fonction du temps (Figure.14) montre que les débits enregistrés varient dans une même station et d'une année à l'autre. Vu l'insuffisance des données recueillies et les lacunes observées, nous pouvons dire que la majorité des débits ont augmenté en fonction du temps, en raison de l'évolution de la population, l'augmentation du nombre des pompages et le développement agricole.

❖ L'étude menée par SAYAH LEMBAREK. M, en 2008 pour l'étude hydraulique du canal d'Oued Righ sur les quatre stations hydrométriques choisies qui représentent les points les plus favorables pour prendre les mesures des paramètres hydrauliques du canal, en aval des grandes agglomérations et palmerais de l'Oued Righ et qui sont:

- 1- *Station de Ranou* : en amont du canal, elle réuni les drains et les rejets de Tamacine;
- 2- *Station de Sidi Slimane* : réuni les rejets et les drains de Touggourt ;
- 3- *Station de Tinedla amont* : rassemble ceux de la daïra de Djamaâ ;
- 4- *Station de Boufeggoussa* (l'exutoire) : englobe tous les rejets et tous les drains.

Cette étude a montré les résultats suivants :

Tableau.19 :Débits relevés au niveau des stations choisies.

<i>Station</i>	Ranou	Sidi Slimane	Tindela amont	Bouffagoussa
Débit (m³/s)	0,75	1,95	3,765	4,31

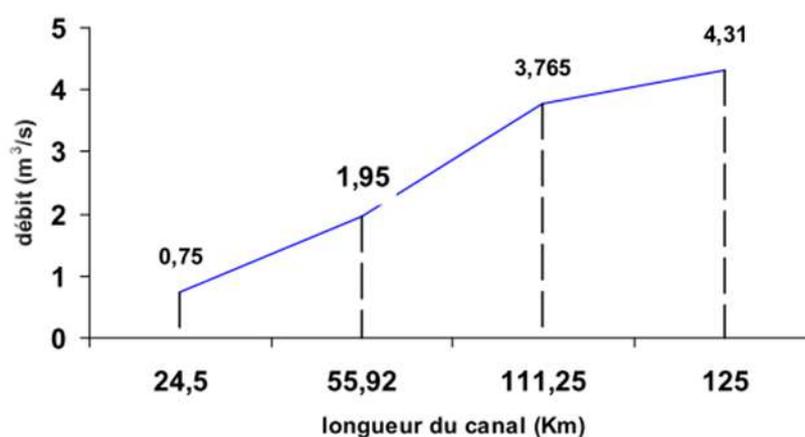


Figure.15 : Variation du débit en fonction de la longueur du canal (SAYAH LEMBAREK. M, 2008).

Nous remarquons, d'après ces résultats que le débit au niveau du canal augmente tout en allant vers le Nord (Chott Merouane). Aussi, nous constatons qu'il y a une nette augmentation du débit du canal entre la station de Sidi Slimane et celle de Tinedla amont, ce qui explique qu'il existe un apport important en eaux de drainage, à partir des palmeraies de Djamaâ et de Tinedla (SAYAH LEMBAREK.M, 2008).

II.V CONCLUSION :

Le climat de la vallée de Oued-Righ est connu par son aridité, marquée notamment par la faiblesse et l'irrégularité des précipitations d'une part (des précipitations moyennes annuelles de 63.34 mm), et par les amplitudes thermiques et les températures trop élevées d'autre part (une température moyenne annuelle de 22.31 °C). Cette aridité n'est pas seulement due à la rareté de la pluie, mais aussi à la forte évaporation qui constitue l'un des facteurs climatiques majeurs actuels qui règnent dans la région.

La synthèse des données climatiques nous permet de distinguer que la région d'étude est caractérisée par un climat hyper-aride, de type saharien.

Le mois le plus humide est Décembre, caractérisé par une forte humidité (62.05 %) ; et le mois le plus sec est juillet, caractérisé par une faible humidité (29.44 %).

La méthode des courbes pluvio-thermiques nous a permis de définir une période relativement sèche sur toute l'année. Le bilan hydrique est déficitaire, à cause des faibles précipitations et une forte évapotranspiration, ce qui provoque une reprise presque totale de toutes les précipitations et engendre une période sèche couvrant toute l'année.

Nous pensons que seul un pas de temps journalier permettrait une approche réelle aux vraies valeurs du ruissellement et d'infiltration. Par manque de données des mesures journalières (P,T,...), la détermination de ces paramètres est impossible.

Les résultats les plus récents que nous disposons, des mesures des débits du canal d'Oued Righ, au niveau des quatre stations : Ranou (0,72 m³/s), Sidi Slimane (1,95 m³/s), Tinedla amont (3,765 m³/s) et Boufeggoussa (4,31 m³/s) ont montré une croissance successive du débit, vers Chott Merouane.

Chapitre III :

Etude

Géologique

III.1 INTRODUCTION :

Il est plus que nécessaire de connaître la nature lithologique du terrain étudié, afin d'identifier les roches susceptibles d'être aquifères et d'expliquer les variations des concentrations de certains paramètres chimiques, existants dans l'eau.

III.2 GEOLOGIE REGIONALE :

La région d'étude fait partie du Bas Sahara, limitée : (Figure16)

- Au Nord: par l'accident Sud Atlasique, et les monts des Aurès et des Nemamcha.
- Au Sud : par la falaise méridionale de Tihert.
- A l'Est : par les affleurements du Crétacé de Dahar, Tunisie
- A l'Ouest : par la dorsale du M'zab.

C'est entre la bordure septentrionale du Hoggar et la bordure méridionale de l'Atlas saharien que se situe le grand bassin sédimentaire du Bas Sahara, avec plus de 600 km de diamètre, il couvre 700 000 km² de superficie, il s'étend des pieds des Aurès au Nord, jusqu'au Tassili au Sud, où une grande partie du bassin est recouverte par le Grand Erg Oriental (ROGNON.P, 1994).

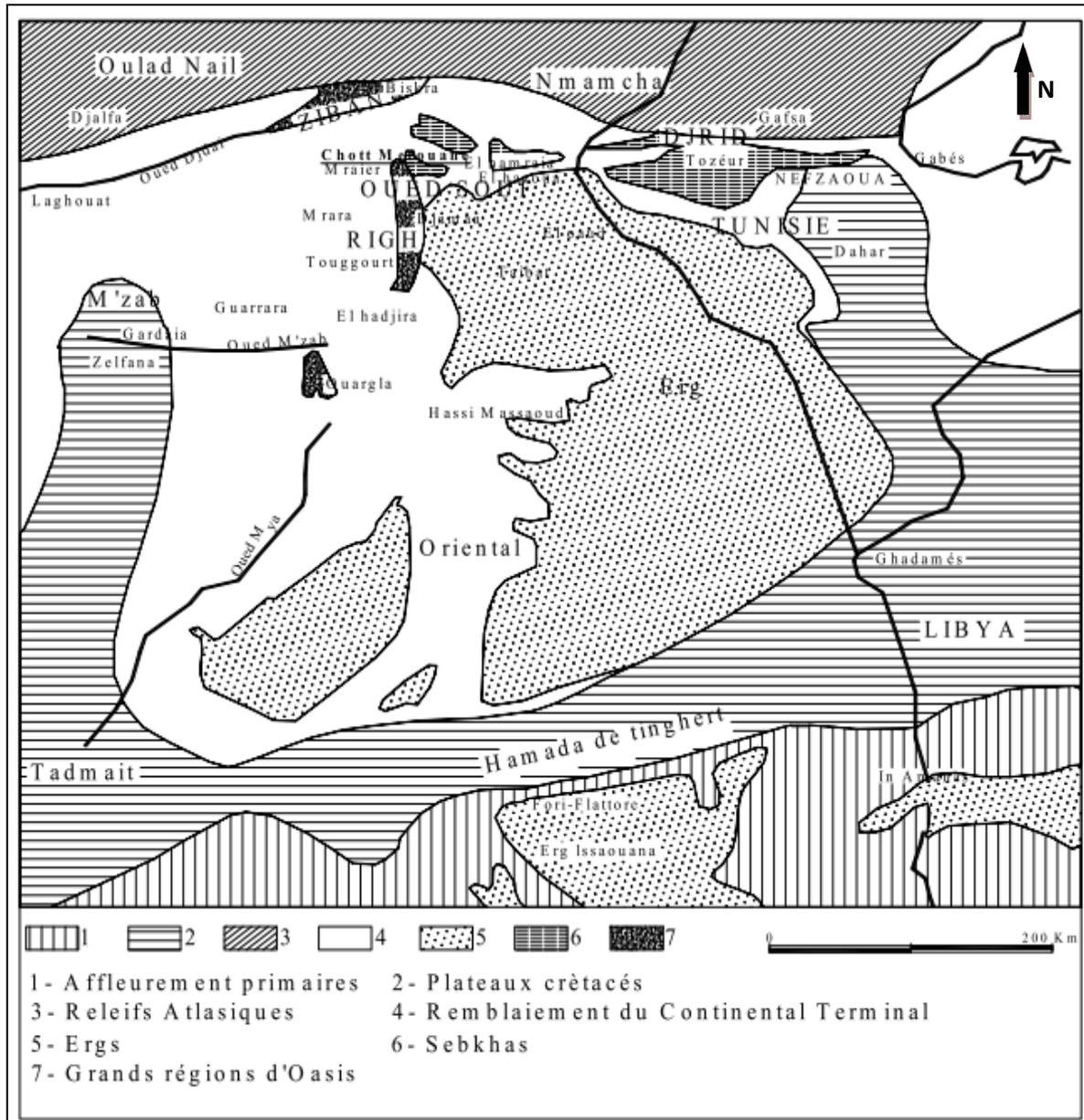


Figure 16: Les grandes unités géologiques au Sahara (In HACINIM, 2006).

III.2.1 SYNTHÈSE DES TRAVAUX ANTERIEURS SUR LE BASSIN DU BAS SAHARA :

Les travaux de BEL.F et DEMARGNE (1966), BEL.F et CUCHE.D (1969), de BUSSON.G (1970), de FABRE.J (1976), BALLAIS.JL (2005-2010) constituent les références de base, utilisées dans cette synthèse géologique.

Le bassin du Bas Sahara est, comme son nom l'indique, est une zone plate, déprimée, de faible altitude (200 m à -30 m dans les Chotts). C'est un pays d'Erg (le Grand Erg Oriental) et de Chotts (Chott Melrhir et Merouane), où le sable et le sel dominant.

A partir du massif ancien, les couches géologiques s'enfoncent vers le Nord, pour être brutalement pincées par l'accident sud atlasique. Dans l'ensemble, la couverture mésozoïque n'a pas subi de mouvements orogéniques et est demeurée tabulaire, mais elle est affectée à l'Est, d'un mouvement de subsidence, qui est à l'origine de la cuvette des Grands Chotts Algéro-tunisiens. Le dôme central (la dorsale mozabite) forme un môle, qui l'isole des formations occidentales.

Au cours des périodes les plus humides, l'Oued Igharghar descendait des pentes du Hoggar pour rejoindre ce grand bassin mais le réseau hydrographique est aujourd'hui masqué par les dunes du Grand Erg Oriental. La grande gouttière de l'Oued Righ représente la partie avale, plus ou moins colmatée par des placages sableux et des dunes vives et jalonnées de petites sebkhas. On trouve le socle ancien à 3000 m ou plus de profondeur, surmonté par les grès primaires plus ou moins plissés et érodés qui constituent les roches réservoirs des hydrocarbures. Au-dessus, s'entassent les grès du Continental Intercalaire qui constituent l'aquifère du même nom. A la suite de la discordance cénomaniennne s'empilent encore les couches marines du Sénonien et de l'Eocène qui se terminent par la couverture continentale du Mio-pliocène, également aquifère (Complexe Terminal).

⇒ Les terrains du Paléozoïque affleurent au Sud, entre les plateaux de Tadmait et Tinghert et le massif du Hoggar.

⇒ Les terrains du Mésozoïque et du Cénozoïque constituent les affleurements des bordures du Bas Sahara.

⇒ Des dépôts continentaux de la fin du Tertiaire et du Quaternaire, occupent le centre de la cuvette.

III.3 CADRE GEOLOGIQUE LOCAL « OUED RIGH »: (Carte.01)

Dans cette étude, nous nous intéressons surtout à la couverture sédimentaire post Paléozoïque, qui renferme les principaux aquifères du Sahara.

L'analyse litho-stratigraphique des forages réalisés par l'ANRH/Ouargla dans la zone d'étude (Fig.1et 2, en annexes) nous a permis de constater que la vallée d'Oued Righ recèle les formations suivantes :

III.3.1 Analyse litho- stratigraphique:

A. Secondaire :

A.1 Barrémien

Représenté par une alternance d'argiles et de sables moyens à fins parfois grossiers, avec présence de lignite vers le Nord de la vallée (Dendouga), tandis que vers le Sud de la vallée, il y a présence de quelques passées d'anhydrites ou de grès vers la base, à El Hadjira et Tamellaht respectivement.

A.2 Aptien

C'est un ensemble calcaireux à calcaire-dolomitique, parfois marneux, au Nord (Dendouga et Meghaire), devenant au Sud un ensemble sablo-gréseux à sablo-argileux (El Hadjira et Tamellaht) parfois, avec présence de quelques passées d'anhydrites à Tamerna. L'épaisseur varie entre 30m à Tamerna et 50m à Dendouga.

A.3 Albien

C'est un ensemble gréseux, avec passées d'argiles et de marnes et quelques passées de calcaires et d'anhydrites au Sud de la vallée (Tamellaht).La puissance varie entre 120m à El Meghaire, Dendouga et 450m à El Hadjira.

A.4 Vraconien

Dans le bassin oriental du Sahara algérien, le Vraconien est le terme de passage entre l'Albien sableux (sommet du Continental Intercalaire) et le Cénomaniens argilo-carbonaté (base du Complexe Terminal). Le Vraconien est une formation calcaire-dolomitique avec passées d'argiles et d'anhydrites. L'épaisseur de cette formation augmente du Sud (60 m à El Hadjira) vers le Nord (100m à Dendouga et El Meghaire).

A.5 Cénomanién

Le Cénomanién est généralement constitué par une alternance de dolomies, de calcaires dolomitiques, d'argiles, de marnes et d'anhydrites. Dans la partie sud de la vallée, le Cénomanién est essentiellement constitué d'argiles et d'anhydrites, avec quelques fines passées de dolomies et de calcaires à El Hadjira, Tamerna et Tamellaht. Tandis que vers le Nord de la vallée, il est constitué par une alternance de marnes, d'anhydrites et de dolomies (Dendouga, El Meghaire). L'épaisseur varie entre 50m à El Hadjira et 260m à Tamerna.

A.6 Turonien

Le Turonien est représenté par une alternance de marnes, calcaires dolomitiques avec passées d'anhydrites et d'argiles. Notons la présence d'une couche de sels massifs, vers la base de cette formation, au centre de la vallée (à Tamerna). L'épaisseur moyenne varie entre 95m à Dendougga et 440 m à Tamerna.

A.7 Sénonien

Le Sénonien est constitué de deux formations lithologiques superposées :

- Le Sénonien lagunaire, à la base.
- Le Sénonien carbonaté, au sommet.

A.7.1 Sénonien lagunaire

Le Sénonien lagunaire est constitué par un ensemble anhydritique, avec quelques passées d'argiles, de sels et de dolomies. Son épaisseur varie de 180m à Tamellaht, jusqu'à 405m à El Meghaire.

A.7.2 Sénonien carbonaté

Le Sénonien carbonaté est un ensemble calcaire-dolomitique à dolomitique à Tamerna, avec fines passées d'argiles à El Hadjira et Tamellaht, avec intercalations de marnes et d'argiles devenant au sommet des marnes argileuses avec présence de gypses et d'anhydrites, au sommet à El Meghaire et Dendouga. L'épaisseur de la formation varie de 20m à Tamerna et 645m à Dendougga.

Du fait de leur identité de faciès, le Sénonien et l'Eocène carbonatés doivent constituer une seule et même unité hydrogéologique, que nous interpréterons comme un aquifère.

B. Tertiaire

B.1 Eocène

On distingue deux formations dans l'Eocène, à savoir :

- l'Eocène carbonaté, à la base.
- l'Eocène évaporitique, au sommet.

B.1.1 Eocène carbonaté

L'Eocène carbonaté est formé par un ensemble calcaireux à calcaire-dolomitique, avec quelques passées de marnes, d'argiles et de gypses vers la base. La puissance de cette formation varie entre 50 m à Tamerna et à El Hadjira et 80 m à El Meghaire.

B.1.2 Eocène évaporitique

C'est une alternance d'argiles et de gypses vers le Sud de la vallée, devenant vers le Nord, un ensemble marneux avec quelques passées de calcaires et d'anhydrites à El Meghaire et Dendouga. L'épaisseur de la formation est généralement constante sur le long de la vallée (20m), tandis que le maximum est atteint à El Hadjira (100m).

B.2 Mio-Pliocène

B.2.1 Pontien

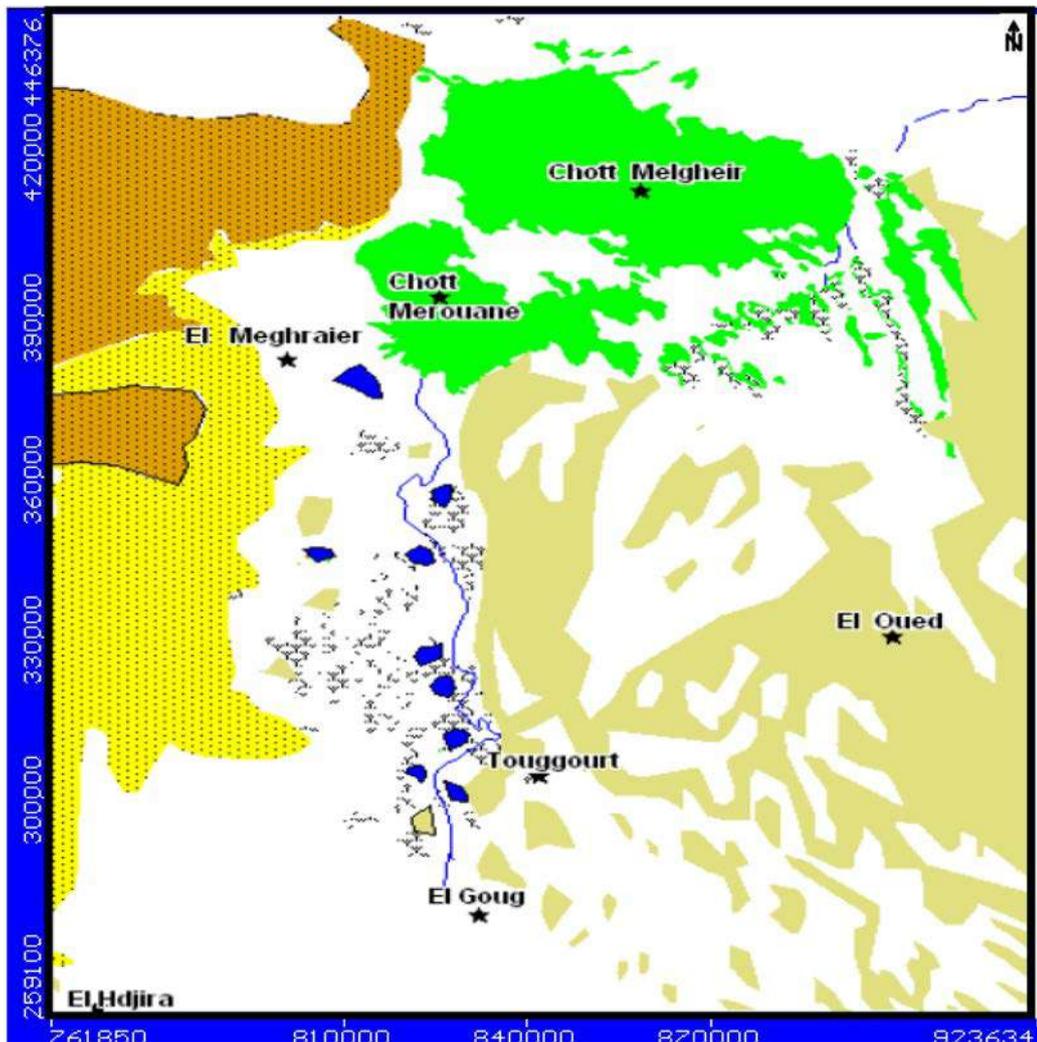
Vers le Sud, le Pontien est formé par un ensemble sableux à sablo-gréseux, avec quelques passées de marnes blanches à silex et d'argiles sableuses, vers la base à El Hadjira et d'argiles et/ou de calcaires lacustres à Tamellaht et Tamerna, tandis que vers le Nord, cette formation devient une alternance d'argiles, de grès à ciment argileux parfois calcaire à Dendouga, de sables moyens à fins, parfois des graviers quartzeux, avec des passées d'argiles à El Meghaire, et de calcaires vers la base à Dendouga (200m d'épaisseur).

B.2.2 Pliocène

C'est une formation érodée dans la partie sud de la vallée, son apparition est représentée par une alternance d'argiles et de sables fins argileux, avec passées de grès à ciment calcaire au Nord de la vallée. Sa puissance est de 110m à El Meghaire et 35m à Dendouga, devenant vers le sommet un ensemble sableux avec passées d'argiles, d'une épaisseur de 80m à El Meghaire et une formation sableuse, devenant vers la base des argiles à Dendouga, de 55m d'épaisseur.

C. Quaternaire

L'analyse litho-stratigraphique faite à partir des forages disponibles réalisés dans la zone d'étude (figure.2, en annexes) nous a permis de constater la disparition du Quaternaire dans la partie sud et centre de la vallée, tandis que dans la partie nord, il est formé par une alternance d'argiles, de grès à ciment calcaire de 25m d'épaisseur, devenant vers le sommet une alternance de sables et d'argiles de 30m de puissance à El Meghaire et une alternance d'argiles et de sables d'une épaisseur de 10m, surmontée par une formation sableuse de 20m à Dendouga.



Légende :

- | | | | |
|---|---|--|-------------------------------------|
|  | Alluvions actuelles : Croute Gypso-Saline |  | Pontien: Calcaires, Grès et Argiles |
|  | Dunes récentes |  | Lacs |
|  | Quaternaire Continental (Alluvions, Regs, Terrasses) |  | Chott |
|  | Pliocène continental, Poudingues et calcaires lacustres |  | Canal |

Carte. 01: Géologie de la vallée d'Oued Righ
(Extraite de la carte géologique de l'Algérie, FLANDRIN. M.J, 1951 et BUSSON.G, 1965)

III.4 TECTONIQUE:

D'après BEL.F et CUCHE.D (1969), et postérieurement au dépôt des formations marines du Primaire, le Sahara subit des mouvements tectoniques hercyniens verticaux et horizontaux, puis de nouveaux mouvements post- triasiques.

L'orogénèse atlasique est à l'origine de l'apparition des déformations à grand rayon, les calcaires du M'Zab sont transformées en dorsale, ceux de Tadmaît en cuvette. Au Sud, l'axe d'Amguid -El-Biod s'est effondré pour faire place à un axe synclinal méridien qui se poursuit jusqu'à l'Aurès. Des axes secondaires démontrent l'ondulation du plateau de Still au Nord-Ouest du chott Merouane.

La chaîne des Maghrébines qui a subi plusieurs phases orogéniques au Tertiaire, a eu des contre coups sur la Plate-forme saharienne.

Les mouvements de l'Eocène moyen à supérieur sont bien nets, la phase du Miocène inférieur lui succède et donne naissance au Tell et aux Aurès.

Enfin, la phase plio-quadernaire qui s'insère avec les précédentes dans la phase alpine, d'où l'apparition des fractures de direction est-ouest forment la surrection du massif des Aurès et l'affaissement de la partie sud « Sillon Sud Aurésien », ces fractures régissent l'écoulement des eaux souterraines, d'où la naissance des Chotts, tels que Chott Melghir et chott Merouane, où se déverse le canal d'oued Righ. La flexure sud Atlasique, de direction est-ouest, sépare deux domaines distincts, c'est ainsi qu'on peut avoir au Nord des points culminants « Monts des Aurès » et au Sud les points les plus affaissés.

III.5 PALEOGEOGRAPHIE :

BEL.F et DEMARGNE, en 1966 ont reconstitué l'histoire paléogéographique du Quaternaire de la vallée de l'oued Righ comme suit :

*Effondrement de la fosse pré-atlasique (centre de la région actuelle des chotts) et entaillage de profondes et larges vallées (dont celle de l'oued Righ) dans la couverture mio-pliocène de la périphérie.

*Surélévation locale du sol, avec détachement de l'oued Righ, de l'oued Igharghar et de son affluent, l'oued Mya.

*Descente lente et continue de la région des grands chotts, avec d'énormes apports fluviaux et éoliens. La sédimentation dans la vallée et dans tout le Sahara oriental a été de type continental et lagunaire. En effet, du Trias à l'Albien, se sont déposés des argiles et des sables d'origine éolienne ou fluvatile et des évaporites, d'origine lagunaire. On note cependant, quelques incursions marines, en particulier à l'Aptien. Le Cénomaniens est caractérisé par la grande transgression qui ramène le retour du milieu marin tantôt franc, tantôt lagunaire (le Turonien supérieur et le Sénonien inférieur paraissent régressifs).

Au cours de cette époque, un affaissement marque l'effondrement progressif de la partie centrale de la zone saharienne par un dépôt lagunaire, suivi d'une période d'arrêt au cours du Sénonien supérieur et l'Eocène inférieur. Une réapparition d'un dépôt lagunaire au cours de l'Eocène moyen, comble définitivement la dépression de la cuvette saharienne.

Une élévation de l'ensemble, suivie d'un nouveau mouvement de descente, selon l'axe de l'Oued Righ, cet exhaussement permet d'expliquer l'absence de l'Oligocène dans le Sahara.

L'Oued Righ et Igharghar formaient probablement un seul grand Oued avec l'Oued Mya, comme affluent et d'après BALLAIS.JL (2010), GRANGER. E en 1922 montre que l'Igharghar part du Tassili (2158 m) et atteint le chott Mérouane en empruntant l'Oued Rhir selon un tracé rectiligne sud-nord, alors que l'Oued Mya, qui se forme sur le plateau de Tademaït, atteint le Sud de Ouargla.

Un comblement partiel de la région effondrée et des vallées qui l'entaillent et l'exhaussement local, dû à la suite duquel l'Oued Righ se sépare de l'Oued Igharghar.

Un affaissement lent de la région des grands Chotts et le comblement de la vallée de l'Oued Righ à la suite d'importants apports pluviaux et éoliens finiront par envoyer l'Oued.

III.6 CONCLUSION:

Il ressort de cette synthèse géologique que la grande gouttière de l'Oued Righ, qui fait partie du Bas Sahara, est une dépression allongée de direction sud-nord, issue d'un grand paléo-système mythique, dénommé « l'Oued Igharghar ». Elle est limitée au Nord, par l'accident sud atlasique et les Monts des Aurès et Nemamcha, au Sud par la falaise méridionale du Tinhert, à l'Est par Les affleurements crétacés du Dahar et enfin on y trouve la dorsale du Mزاب, à l'Ouest.

Du point de vue géologique, les terrains secondaires et tertiaires, présentent une sédimentation tantôt marine, tantôt continentale, c'est cette dernière qui identifie le Continental Intercalaire et le Complexe Terminal.

L'analyse litho-stratigraphique des forages disponibles, réalisés dans la vallée d'Oued Righ nous a permis de distinguer les formations géologiques qui renferment les principales nappes dans la région d'étude ainsi que leurs substratums.

Chapitre IV.

Etude

Hydrogéologique

IV.1 INTRODUCTION :

Le bassin sédimentaire du Sahara Septentrional couvre la plus grande partie du Nord du Sahara algérien. Du point de vue hydrogéologique, ce bassin est constitué de plusieurs formations hétérogènes, très étendues, séparées par des formations imperméables, qui s'étendent au-delà des frontières algériennes (Tunisie et Lybie), connues sous : le Continental Intercalaire et le Complexe Terminal (Figure17).

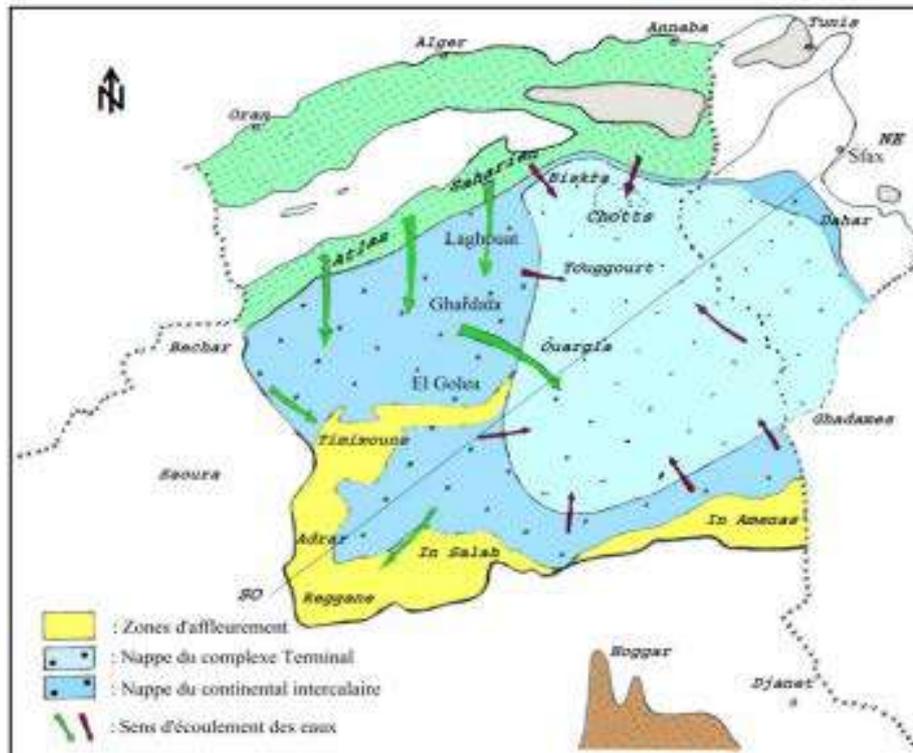


Figure17: Aquifères du Sahara algérien : Continental Intercalaire et Complexe Terminal (UNESCO, 1972).

IV.1.1 LE CONTINENTAL INTERCALAIRE (CI):

Le Continental Intercalaire constitue le réservoir profond du Sahara septentrional. Il s'étend sur plus de 600 000 km² sur les seuls territoires algériens et tunisiens, depuis l'accident Sud-atlasique au Nord jusqu'aux affleurements du Tidikelt et du rebord méridional du Tihert au Sud. Limité à l'Ouest selon un axe Béchar - Reggane, sa prolongation vers l'Est en Libye sous la Hamada Al Hamra, jusqu'au Graben de Hon, couvre encore quelques 250 000 km² supplémentaires (BRL,1998b).

La nappe du Continental Intercalaire est appelée souvent « nappe albienne », constituée essentiellement par des sédiments post-paléozoïques qui vont du Barrémien à

l'Albien et représentée par une alternance de couches grésosableuses et argileuses, où les niveaux perméables sont dominants. La nappe est ainsi captive, à l'exception des bordures.

Selon L'ANRH, les eaux du Continental Intercalaire sont caractérisées par :

- ⊗ Une température qui dépasse les 60°C, sauf aux endroits où l'aquifère est proche de la surface du sol.
- ⊗ Une charge en H₂S et CO₂ qui lui donne un caractère corrosif.
- ⊗ La minéralisation de l'eau oscille entre 1 et 2g/l de résidu sec et peut atteindre les 5g/l.

Plusieurs forages sont en activité : ils sont utilisés pour l'AEP et pour l'irrigation (Sidi Mahdi, Sidi Slimane, M'Rara, ...).

IV.1.2 LE COMPLEXE TERMINAL (CT):

Les terrains constitutifs du Complexe Terminal couvrent l'ensemble du Sahara septentrional, depuis la Saoura à l'Ouest jusqu'au Graben de Hon (et même jusqu'au Golfe de Sirte) à l'Est, depuis l'accident Sud-Atlasique au Nord, jusqu'au flanc nord des plateaux de Tademaït et du Tinhert en Algérie, de Gargaf (Nord du Fezzan), en Libye.

Il est noté dans l'étude de l'OSS (2003b) que classiquement et selon la définition de KILIAN (1931), le terme « Continental Terminal » désignait les formations continentales, sableuses et argileuses du Mio-Pliocène.

C'est avec le projet « ERESS, 1972 » qu'apparaît la notion du « Complexe Terminal », appellation publiée pour la première fois par BEL.F et CUCHE.D (1969), ce terme de « nappe du Complexe Terminal » qui groupe sous une même dénomination plusieurs aquifères, situés dans des formations géologiques différentes a été retenu, car ces nappes font partie d'un même ensemble hydraulique.

Ce complexe est constitué d'un remplissage de formations continentales sablo-argileuses, qui reposent sur les calcaires de l'Eocène inférieur, il s'étend sur une superficie de 350.000 Km² et affleure aux endroits suivants :

- Au Nord, dans le sillon des chotts algéro-tunisiens ;
- A l'Est, le long du flanc oriental du Dahar et du Djebel Nafusa ;
- Au Sud, sur les plateaux de Tinhert et de Tademaït ;
- A l'Ouest, sur la dorsale du M'zab.(PDGDRS,2002).

Cette nappe couvre l'ensemble de la cuvette du Bas-Sahara ainsi que le Sud-Ouest tunisien. Elle est exploitée depuis longtemps dans la vallée de l'Oued Righ, et représentée par trois nappes superposées, de haut en bas :CT₁,CT₂,CT₃.

IV.2 LES FORMATIONS AQUIFERES DANS LA VALLEE D'OUED RIGH:

Nous distinguons de bas en haut :

➤ **Nappe du Continental Intercalaire** : formée par une alternance d'argiles et de sables, avec présence de quelques anhydrites ou de grès à la base, d'âge Barrémien. Au milieu, elle est calcaireuse à calcaire-dolomitique avec présence de marnes au Nord de la vallée et sablo-gréseuse à sablo-argileuse avec présence d'anhydrites, au Sud attribuée à l'Aptien .Le sommet est représenté par un ensemble gréseux, avec passées d'argiles et de marnes et quelques passées de calcaires et d'anhydrites, au Sud de la vallée, d'âge albien.

➤ **Nappes du Complexe Terminal** :

A- 3^{ème} nappe du Complexe Terminal (CT₃) : Est un ensemble calcaire-dolomitique à dolomitique, avec présence de quelques passées d'argiles, de marnes et de gypses, d'âges sénonien et éocène carbonatés .Sa puissance est de 720 m à El Meghaire et de 70m à Tamerna.

Cette nappe est séparée de la 2^{ème} nappe (CT₂) par une formation imperméable, d'âge Eocène moyen (lagunaire), représentée par une alternance d'argiles et de gypses vers le Sud de la vallée, l'épaisseur est de 20m à Tamellaht, 15m à Tamerna ,devenant vers le Nord, un ensemble marneux avec quelques passées de calcaires et d'anhydrites.(20m d'épaisseur à Dendouga, et à El Meghaire).

B- 2^{ème} nappe du Complexe Terminal (CT₂) : d'âge Pontien. Au Sud de la vallée, elle est formée par un ensemble sableux à sablo-gréseux, avec quelques passées d'argiles et de calcaires lacustres, vers la base (d'épaisseur 100m à El Hadjira, 90m à Tamellaht et 140m à Tamerna). Tandis qu'au Nord, cette formation devient une alternance de sables et d'argiles, avec des passées d'argiles et de calcaires, vers la base (200m à Dendouga,155m à El Meghaire). La nappe du Pontien est surmontée, par une formation semi-perméable qui la sépare de la 1^{ère} nappe du Complexe Terminal, constituée d'une alternance d'argiles et de sables fins argileux avec présence de grès à ciment calcaire. Sa puissance est de 35m à Dendouga et 110m à El Meghaire.

C-1^{ère} Nappe du Complexe Terminal (CT₁) : d'âge Pliocène. C'est une formation érodée dans la partie sud de la vallée, son apparition est représentée par une alternance d'argiles et de sables fins argileux, avec passées de grès à ciment calcaire au Nord de la vallée.

Sa puissance est de 55m à Dendouga et 80m à El Meghaire.

La 1^{ère} nappe du Complexe Terminal est surmontée par une formation semi-perméable du Quaternaire : alternance d'argiles et de sables à Dendouga (10m d'épaisseur) et alternance d'argiles et de grès à ciment calcaire à El Meghaire (25m d'épaisseur).

➤ **Nappe du Quaternaire** : formée par des sables (20m d'épaisseur à Dendouga) et une alternance de sables et d'argiles à El Meghaire (30m d'épaisseur). L'analyse litho stratigraphique des forages réalisés dans la région d'étude nous a permis de constater la disparition du Quaternaire dans la partie sud et centre de la vallée. Son alimentation provient principalement des eaux de drainage des palmeraies, des pertes de réseaux et des rares précipitations. Cette nappe est drainée par le canal d'Oued Righ et ses eaux présentent de fortes salinités.

*En se basant sur la corrélation lithologique des forages répartis dans la zone d'étude (figure.2 en annexes) et selon la synthèse géologique, la 2^{ème} et la 1^{ère} nappe du Complexe Terminal, ainsi que celle du Quaternaire sont séparées par des formations semi-perméables, donc elles forment un seul système hydraulique, appelé : « **nappe du Mio-Plio-Quaternaire** ».*

IV.3 APERÇU SUR L'ETAT DES RESSOURCES EN EAU DANS LA VALLEE D'OUED RIGH :

Au cours de ces dernières décennies, de nombreuses zones arides ont subi des transformations socio-économiques et démographiques aussi importantes que rapides, qui se sont traduites par des pressions très importantes sur l'environnement, et en particulier sur les ressources en eau. L'eau constitue un enjeu du développement économique ; celui-ci est principalement fondé sur les ressources naturelles.

Au début du 18^{ème} siècle, les agriculteurs de la vallée d'Oued Righ se contentaient des quantités d'eau prélevées de la nappe phréatique, elles étaient suffisantes pour irriguer les périmètres existants et la qualité de l'eau étaient bonne. Le développement de la palmeraie dans la vallée a démarré avec la mise en exploitation du premier sondage moderne, en 1856 avec un débit de 66,6 L/s .Des forages et des puits anciens et modernes cohabitèrent pendant plus d'un siècle. En 1970, 1800 puits et forages, avec 60% de production était artésienne (ANRH/Ouargla, 2010).

La vallée d'Oued Righ contenait des forages très anciens qui deviennent une source de pollution pour la nappe, la décision de les boucher a été prise en 1993.

Afin d'assurer la continuité et le développement de l'agriculture dans la région, un grand programme de réalisation de nouveaux forages dans les aquifères du CT et CI a été lancé. L'étape de bouchage terminée, les services concernés sont passés à la réalisation de 34 forages au CT et 9 au CI, à débit d'exploitation respectifs de 30 et 150 L/s (ANRH/Ouargla, 2010).



Photo.9 : un forage du CT bouché à Ranou.



Photo.10 : un forage du CI bouché à Sidi Slimane.

Aujourd'hui, les zones des palmeraies connaissent d'énormes problèmes, dont la plupart sont liés directement aux conditions naturelles de la région, telles que : la morphologie du terrain, la forte évaporation, la salinité des eaux et des sols. En outre, la mauvaise exploitation des palmeraies (travaux culturaux, entretien, mode d'irrigation...). Ces contraintes conjuguées à une utilisation excessive des eaux profondes pour l'irrigation sont traduites par plusieurs problèmes, tels que :

****La remontée des eaux :***

La multiplication des forages, les pompages intensifs, les drainages insuffisants et les rejets des eaux usées engendrent certains problèmes particuliers, tels que la remontée du niveau hydrostatique de la nappe phréatique de la vallée d'Oued Righ et qui semble s'aggraver avec les années. Les premiers signes de la remontée de cette nappe sont visibles dans certaines régions, où la profondeur de l'eau est faible. C'est vrai que la situation actuelle de cette nappe n'est pas encore arrivée à celles des régions limitrophes, telles que Oued Souf et Ouargla, où ces villes vivent une situation dramatique, mais cette crainte n'est pas exclue!

***La chute de l'artésianisme:**

La région d'Oued Righ était caractérisée par l'artésianisme des forages des deux aquifères (CT₃, CI). La surexploitation du CT₃ a entraîné un rabattement du niveau statique, qui s'est répercuté sur la chute de l'artésianisme (ANRH, 2010). Les forages de l'Albien, en revanche restent artésiens, mais progressivement une diminution de la pression y est constatée (ANRH/Ouargla,2010).

***La dégradation du canal d'Oued Righ :**

Malgré le grand réservoir des eaux souterraines dans cette région, il n'y a pas des cours d'eaux ou des rivières qui aident à évacuer les eaux de drainage et d'assainissement. C'est pour cela que les habitants de cette vallée ont creusé ce canal artificiel. Vu la nature sableuse du sol de la région et sa richesse en sels, ainsi que la pente élevée dans certains tronçons du canal collecteur, on observe un phénomène de démolition et d'érosion sur les berges et cela à son tour provoque d'autres problèmes de bouchage et d'ensablement. Le passage de ce canal dans les zones sableuses, la turbulence des eaux provoque la destruction des berges notamment à Tamacine, Kerdache, Sidi Slimane, Bourkhis et Boufeggoussa (SAYAH LEMBAREK.M,2008).. Aussi, ce canal est menacé par les rejets des eaux usées de certaines localités avoisinantes, non raccordées au réseau d'assainissement ou qui ne se disposent pas de stations d'épurations et qui vont se déverser directement dans le Chott Merouane.



Photo.11 : Destruction des berges en sable, à cause des turbulents à Boufeggoussa.(SAYAH LEMBAREK.M,2008).



Photo.12 : Les rejets des eaux usées dans le canal d'Oued Righ. (BOUZNAD.IE,2009).

****Problème de la salinité :***

Selon l'ABHS, l'accumulation des sels dans les sols a pour origine plusieurs facteurs, dont les principaux sont : les eaux d'irrigation, la nature lithologique des roches plus ou moins salées, la très forte évaporation et surtout la concentration des sels dans le temps, en l'absence de drainage. Le caractère de salinité des sols peut varier d'une façon quantitative et qualitatif, surtout en présence d'un plan d'eau en relation étroite avec la dynamique des nappes saumâtres, imposées par les conditions géomorphologiques et climatiques de la région.

IV.4 LES CAUSES PRINCIPALES DE CES PROBLEMES :

Le climat défavorable, la croissance démographique et le développement agricole sont les plus importants facteurs agissant le plus rudement sur l'évolution du nombre des forages, ce qui se traduit par l'accroissement des besoins en eau, l'augmentation des rejets des eaux usées et l'excès de l'eau d'irrigation. Ces différents facteurs amènent à un état instable des ressources en eau, traduit par la remontée de la nappe phréatique, la dégradation du canal d'Oued Righ et le problème de salinité...etc. Par conséquent, ces différents problèmes sont accompagnés par des impacts négatifs sur le secteur sanitaire, agricole et environnemental (Figure17).

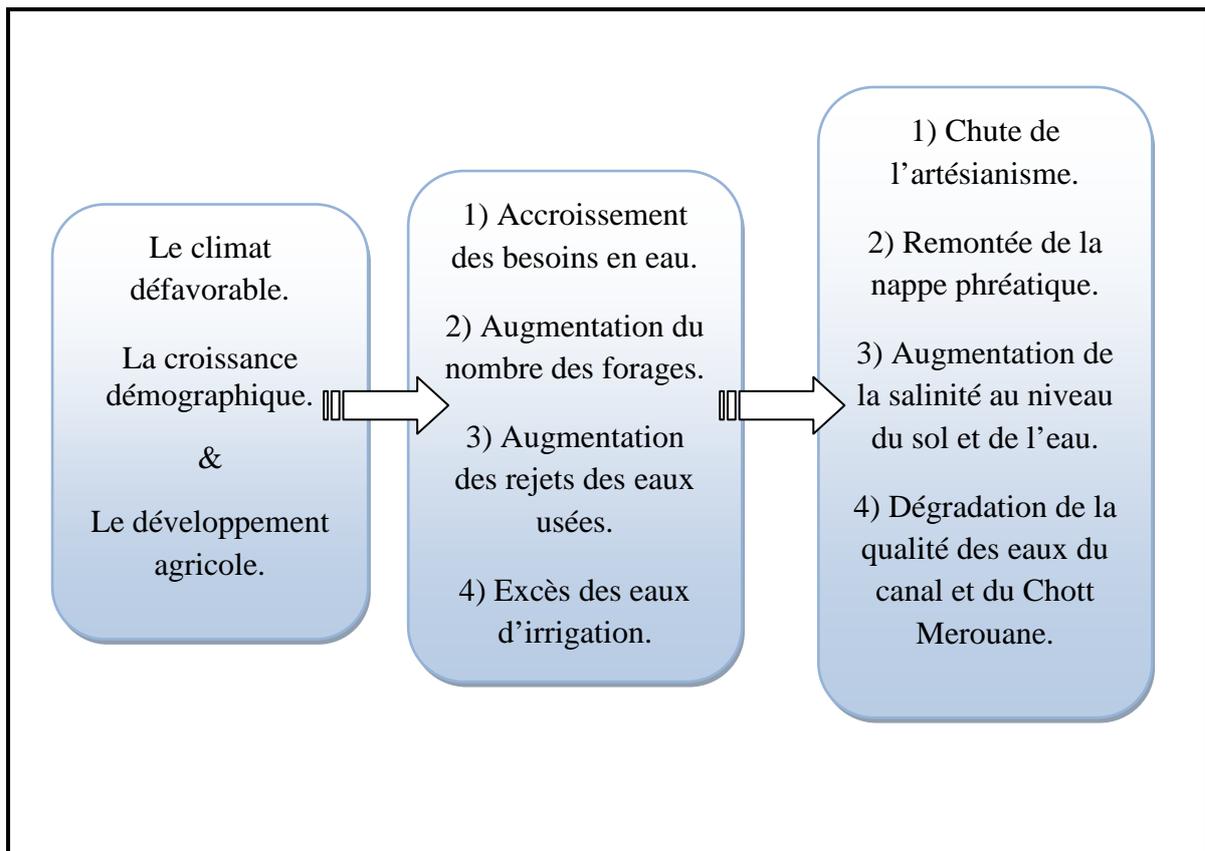


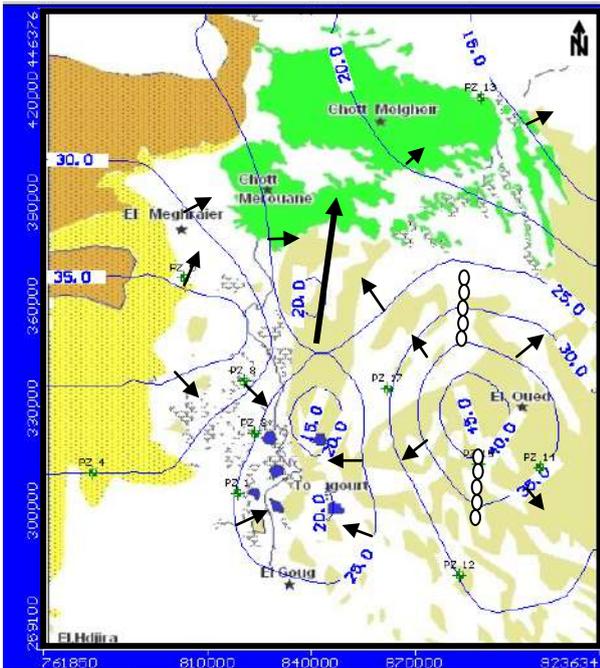
Figure 18: Impact de la croissance démographique et du développement agricole sur l'eau et le sol, au niveau de la vallée d'oued Righ.

IV.5 LA PIEZOMETRIE :

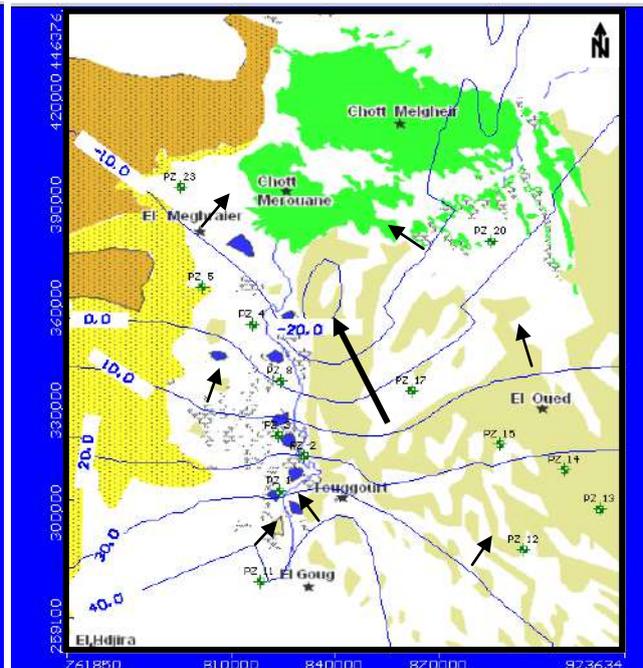
L'établissement des cartes piézométriques est une étape importante dans l'étude hydrogéologique. Elle permet d'étudier la nappe d'eau souterraine, en tenant compte du sens d'écoulement. Les différentes campagnes piézométriques établies par l'ANRH/Ouargla, sont données dans le tableau (F), en annexes.

IV.5.1 Interprétation des cartes piézométriques de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire :

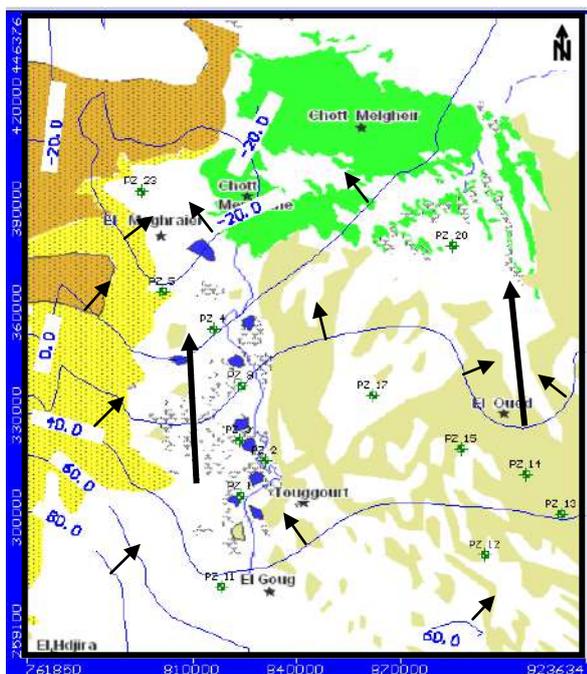
Les campagnes piézométriques effectuées par l'ANRH, en 2008, 2013 et 2015 (tableau F en annexes) ont servi à l'élaboration des cartes piézométriques (Cartes n°02, 03 et 04) où elles ont révélé toutes un sens d'écoulement des eaux, de direction sensiblement sud-nord. Ces eaux convergent vers le lit du canal dans la partie sud et suivent leur parcours vers l'exutoire de cette nappe (Chott Merouane).



Carte n°02 : piézométrie de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire (Campagne 2008)



Carte n°03: piézométrie de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire (Campagne 2013)



Carte n°04 : piézométrie de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire (Campagne 2015)

Légende :

- Ligne de courant
- ➔ Axe de drainage
- Ligne de partage des eaux

IV.5 CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES :

Les essais de pompage réalisés dans la nappe du Mio-Plio-Quaternaire dans la vallée d'Oued Righ par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (A.N.R.H.) d'Ouargla ont montré que les perméabilités dans la zone d'étude se situent dans l'intervalle 10^{-8} m/s et 10^{-2} m/s. Elles caractérisent grossièrement des aquifères à perméabilité médiocre à Bonne (CASTANY.G & MARGAT.J, 1977); ces valeurs reflètent la nature lithologique des formations constituant cette vallée, avec une granulométrie variée et une relative importance de la fraction argileuse et gypseuse.

<i>Forages</i>	<i>x (m)</i>	<i>y (m)</i>	<i>k (m/s)</i>
<i>F1</i>	<i>818039.1</i>	<i>283596.5</i>	<i>5×10^{-2}</i>
<i>F2</i>	<i>804131.0</i>	<i>335872.1</i>	<i>5×10^{-4}</i>
<i>F3</i>	<i>801809.5</i>	<i>380360.3</i>	<i>7.9×10^{-5}</i>
<i>F4</i>	<i>807568.9</i>	<i>348615.3</i>	<i>5×10^{-8}</i>
<i>F5</i>	<i>897713.6</i>	<i>343980.1</i>	<i>10^{-3}</i>

IV.6 CONCLUSION :

Il ressort de cette étude qu'il existe dans la vallée d'Oued Righ deux systèmes aquifères importants, séparés par d'épaisses séries argileuses et évaporitiques, et qui sont: le Continental Intercalaire et le Complexe Terminal, surmontés par la nappe phréatique du Quaternaire.

L'analyse litho-stratigraphique des forages a montré que la 2^{ème} et la 1^{ère} nappe des sables du Complexe Terminal, ainsi que celle du Quaternaire forment une seule unité hydrogéologique, séparée par des formations semi-perméables, nommée : « nappe du Mio-Plio-Quaternaire » de la vallée d'Oued Righ.

L'établissement des cartes piézométriques pour les campagnes de 2008, 2013, 2015 de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire montre un sens d'écoulement général, vers le lit du canal d'Oued Righ, puis vers Chott Merouane.

Tableau. 20: Intérêt hydrogéologique des formations géologiques

(Les épaisseurs sont variables, d'une zone à l'autre).

ERE	ETAGE	LITHOLOGIE	INTERET HYDROGEOLOGIQUE
QUATERNAIRE		Sables avec fines passées d'argiles	Nappe superficielle
		Alternance d'argiles et sables et d'argiles et grès à ciment calcaire.	(Semi-perméable)
TERTIAIRE	Mio-Pliocène	Pliocène	Ensemble sableux, avec quelques passées d'argiles.
			Alternance d'argiles et de sables fins argileux, avec présence de grès à ciment calcaire.
		Pontien	Sables, grès, graviers, avec passées d'argiles et de calcaires lacustres.
	Eocène	Eocène moyen (lagunaire)	Ensemble marneux, avec quelques passées de calcaires, anhydrites, argiles et gypses.
		Eocène inférieur (carbonaté)	Prédominance de calcaires sur les dolomies, avec quelques passées d'argiles et de marnes.
SECONDAIRE	Crétacé	Sénonien carbonaté	Dolomie, calcaires, avec fines passées de marnes, argiles, gypses et anhydrites.
		Sénonien lagunaire	Alternance d'anhydrites, de dolomies, d'argiles et de sels.
		Turonien	Calcaires et dolomies, alternés par des argiles, anhydrites et marnes.
		Cénomanién	Dolomies avec présence d'anhydrites, marnes et argiles.
		Vraconien	Calcaires et dolomies, avec passées d'argiles, d'anhydrites et de marnes.
		Albien	Sables, argiles, grès, calcaires et marnes
		Aptien	Calcaires, dolomies, sables, grès, argiles et marnes.
		Barrémien	Sables, grès, argiles.

Nappe du Mio-Plio-Quaternaire

Chapitre V :
Etude qualitative
des eaux
et vulnérabilité à
la pollution

A- LES EAUX SOUTERRAINES :**V.1 INTRODUCTION :**

L'étude du chimisme des eaux a pour but d'identifier leurs faciès chimiques, leur degré de potabilité, ainsi que leur aptitude à l'irrigation. Les analyses physico-chimiques des eaux des forages que nous disposons (tableaux G et I, en annexes) portent sur les eaux du Mio-Plio-Quaternaire, réalisées par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (A.N.R.H)/Ouargla, et concernent les paramètres suivants : le pH, la conductivité et les teneurs en éléments chimiques majeurs :

- Les cations: Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ .
- Les anions: HCO_3^- , SO_4^- , Cl^- .

Les forages sont répartis sur toute la vallée (cartes 5 et 6).

V.2 CONTRÔLE DES ANALYSES CHIMIQUES, PAR LA BALANCE IONIQUE :

-Les analyses peuvent être contrôlées par la formule suivante (Rodier, J. 2009):

$$BI = \left| \frac{\sum r^+ - \sum r^-}{\sum r^+ + \sum r^-} \right| \times 100$$

BI: Balance ionique en %.

r : quantités en réaction (meq/L).

Si : $BI < 2\% \Rightarrow$ Bonne analyse.

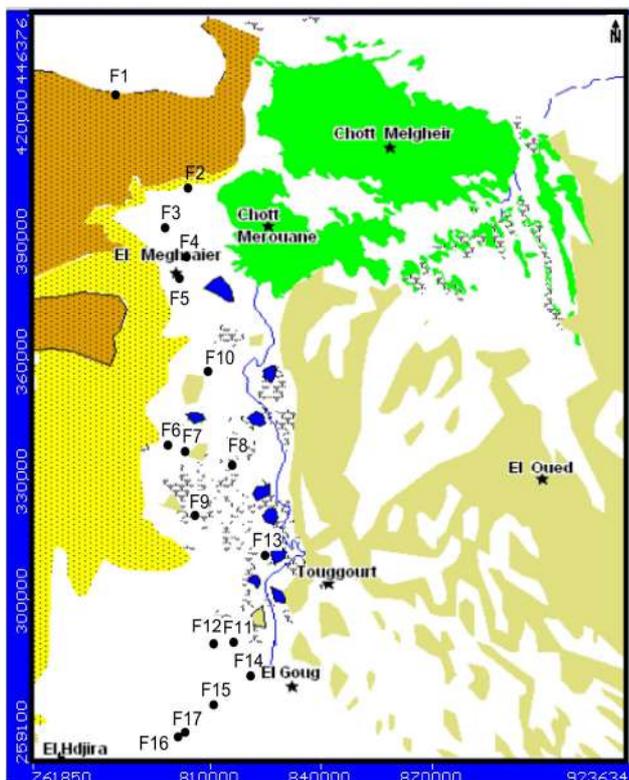
$2\% < BI < 5\% \Rightarrow$ Analyse acceptable.

$BI > 5\% \Rightarrow$ Mauvaise analyse.

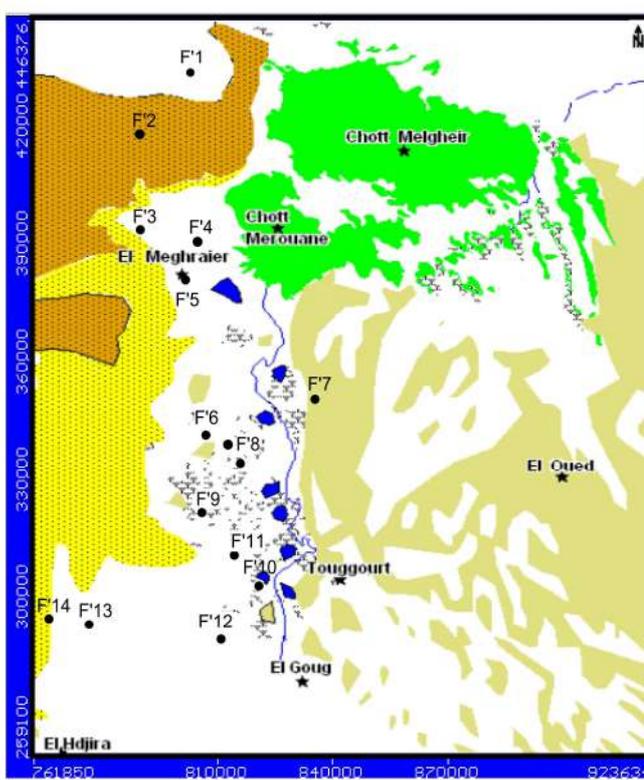
☞ La balance ionique calculée, pour l'année **2007** révèle que :

- Les forages : F₁, F₄, F₆, F₇, F₉, F₁₀, F₁₁, F₁₂, F₁₃, F₁₅, F₁₆, présentent une BI inférieure à 2%, les analyses sont bonnes.
- Les points d'eau : F₂, F₃, F₅, F₈, F₁₄, F₁₇, présentent des BI comprises entre 2% et 5%, nous considérons ces analyses, comme acceptables (tableau H, en annexes).

☞ La balance ionique calculée, pour l'année **2015** révèle que tous les forages présentent une BI inférieure à 2%, les analyses sont bonnes (tableau J, en annexes).

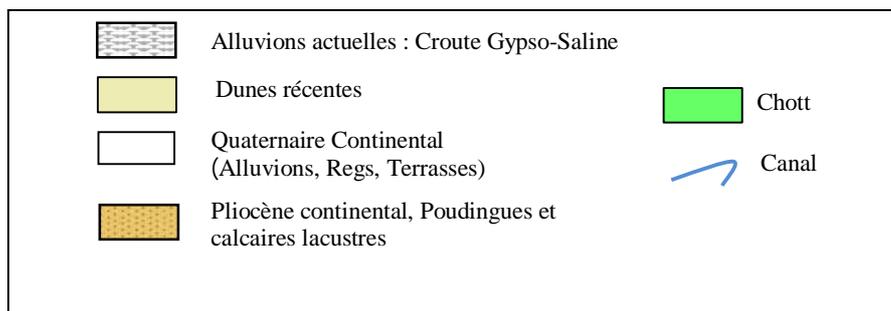


Carte.5: Répartition des points d'eau (campagne 2007).



Carte.6: Répartition des points d'eau (campagne 2015).

Légende :



V.3 INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS DES ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES :

V.3.1 Normes de potabilité :

La qualité de l'eau de consommation est appréciée sur la base des normes de potabilité, définies par la réglementation. Si un des paramètres dépasse la concentration limite autorisée, il y a absence de conformité aux normes établies.

Les normes algériennes (N.A6360-1992), (tableau L, en annexes) sont inspirées de l'organisation mondiale de la santé (O.M.S), relatives aux normes prescrites dans les directives de la Communauté Economique Européenne (C.E.E). L'interprétation des données fournies par l'ANRH/Ouargla, par rapport aux normes algériennes, a pour objectif de fixer la spécification physico-chimique des eaux, destinées à la consommation.

V.3.2. Paramètres physiques :

- ✓ **pH** : Le potentiel Hydrogène ou pH d'une solution varie en fonction de la concentration en ions (H_3O^+) ou (H^+). Il est lié à la nature des terrains traversés.

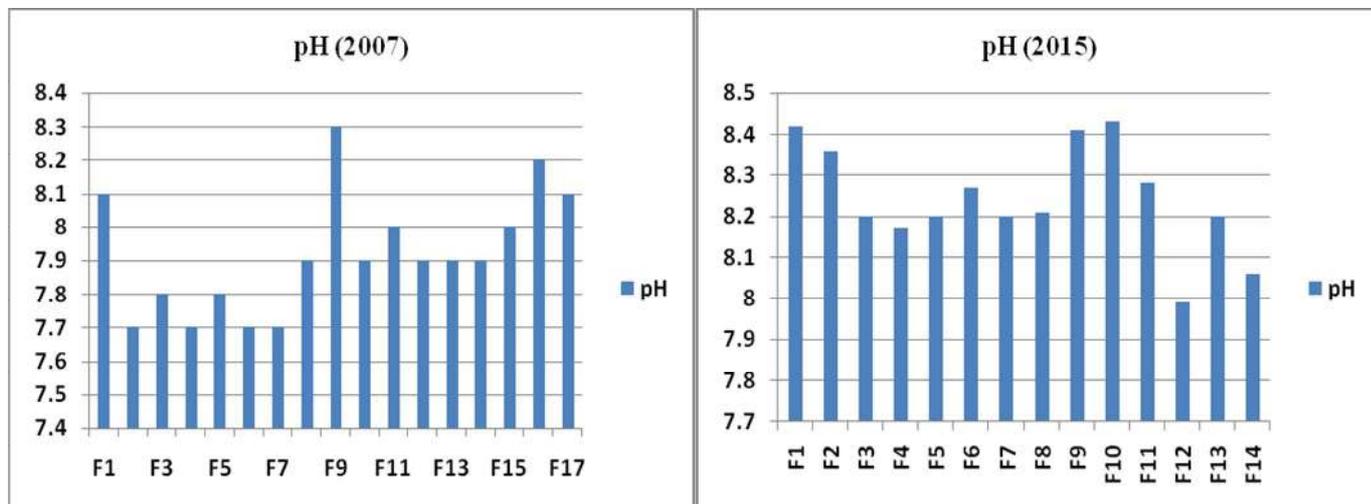


Figure.19: Histogrammes du pH (campagnes 2007/2015).

D'après la Figure19, les valeurs du pH sont comprises:

- Pour l'année 2007 : entre 7,7 et 8,3. Ces valeurs sont conformes aux normes algériennes (de 6.5 à 8.5).
- Pour l'année 2015 : entre 7,99 et 8,43.Elles répondent à la norme algérienne du pH.

- ✓ **Résidu sec :**

Il exprime la totalité des sels dissous et des suspensions organiques contenues dans l'eau, c'est-à-dire la minéralisation totale de l'eau (RODIER, J.2009) .Cette teneur en résidu sec est liée :

- 1-A la nature lithologique des formations.
- 2-Aux rejets des eaux usées.
- 3- A l'évaporation intense dans la région.

La valeur limite du résidu sec dans une eau destinée à la consommation humaine est fixée à 2000 mg/L, selon les normes algériennes (N.A 6360.1992).

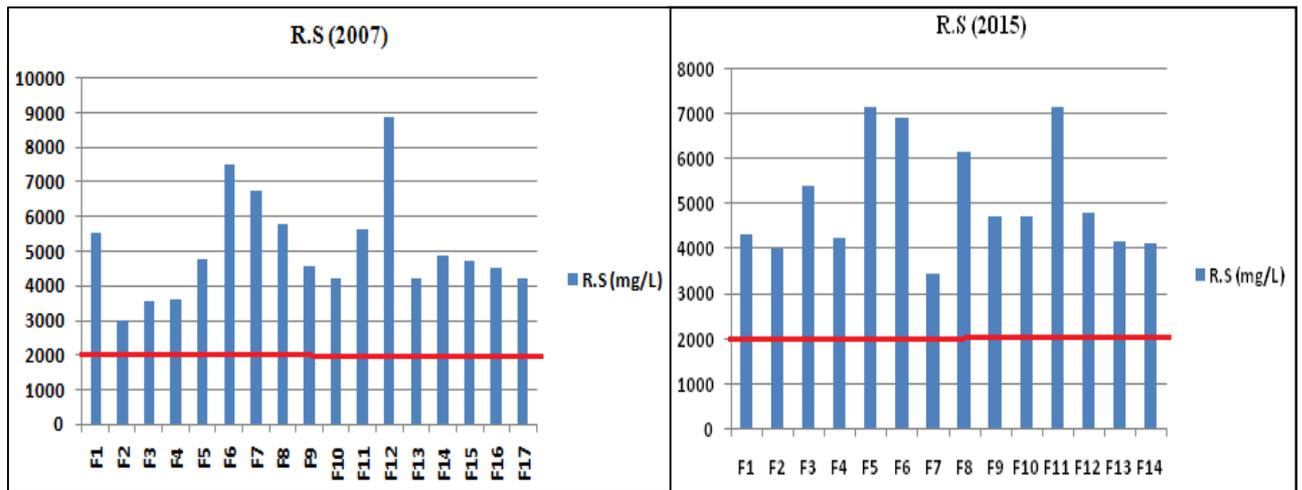


Figure.20: Histogrammes du Résidu sec (campagnes 2007/2015).

Les valeurs du résidu sec varient entre 3010 mg/L au F2 à 8871 mg/L au F12, pour l'année 2007 et de 3482mg/L au F7 à 7174mg/L au F5, pour l'année 2015. Toutes ces valeurs dépassent la norme algérienne (2000mg/L) (Figure.20).

✓ **Conductivité :**

La conductivité électrique augmente lorsque la teneur en sels dissous augmente "forte minéralisation", et cela est dû à la présence excessive des cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+) et d'anions (HCO_3^- , SO_4^- , Cl^-) et permet l'estimation de la minéralisation (RODIER ,J. 2009).

Les valeurs de la conductivité électrique des eaux souterraines de la zone d'étude sont exprimées en $\mu.S/cm$ et représentées en tableaux G et I, en annexes pour les années 2007 et 2015.

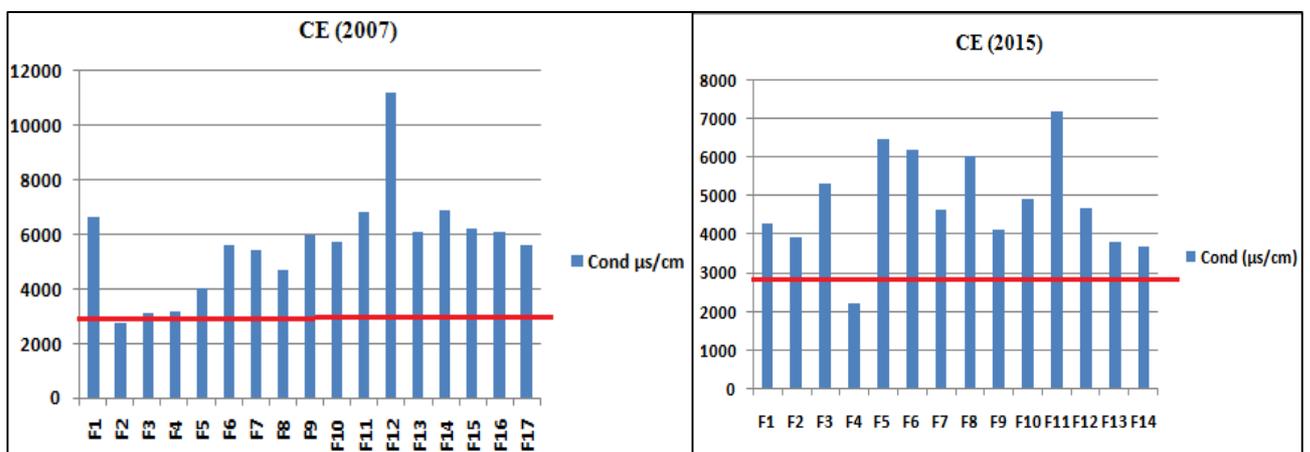


Figure.21: Histogrammes de la Conductivité Electrique (campagnes 2007/2015).

*2007 : La valeur de la conductivité varie entre 2760 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au F2 et 11200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au F12. Toutes les valeurs dépassent la norme algérienne de potabilité, fixée à 2800 $\mu\text{S}/\text{cm}$, à l'exception du forage F₂ (Figure.21).

*2015 : La valeur de la conductivité varie entre 2240 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au F4 et 7200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au F11. Tous les forages dépassent le seuil recommandé, sauf le F4. (Figure.21).

La conductivité électrique augmente avec la teneur en sels dissous et permet l'estimation de la minéralisation.

✓ Minéralisation globale :

La minéralisation en teneur globale des sels minéraux a été calculée à partir de la conductivité.

Tableau.21: Calcul de la minéralisation, à partir de la conductivité (Rodier, 2009).

<i>Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)</i>	<i>Minéralisation (mg/L)</i>
Conductivité <50	1,365079 x conductivités
50<Conductivité< 166	0,947658 x conductivités
166<Conductivité< 333	0,769574 x conductivités
333<Conductivité < et 833	0,715920 x conductivités
833<Conductivité < 10000	0,758544 x conductivités
Conductivité >10000	0,850432 x conductivités

Tableau.22: Résultats du calcul de la minéralisation, à partir de la conductivité (2007).

Forages	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	Minéralisation (mg/L)	Classification
F1	6620,00	5021.56128	Elevée
F2	2760,00	2093.58144	Elevée
F3	3110,00	2359.07184	Elevée
F4	3150,00	2389.4136	Elevée
F5	3990,00	3026.59056	Elevée
F6	5580,00	4232.67552	Elevée
F7	5430,00	4118.89392	Elevée
F8	4690,00	3557.57136	Elevée
F9	6000,00	4551.264	Elevée
F10	5700,00	4323.7008	Elevée
F11	6800,00	5158.0992	Elevée
F12	11200,00	9524.8384	Elevée
F13	6100,00	4627.1184	Elevée
F14	6900,00	5233.9536	Elevée
F15	6200,00	4702.9728	Elevée
F16	6100,00	4627.1184	Elevée
F17	5600,00	4247.8464	Elevée

Tableau.23: Résultats du calcul de la minéralisation, à partir de la conductivité (2015).

Forages	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	Minéralisation (mg/L)	Classification
F1	4280	3246.56	Elevée
F2	3930	2981.07	Elevée
F3	5350	4058.21	Elevée
F4	2240	1699.13	Elevée
F5	6480	4915.36	Elevée
F6	6220	4718.14	Elevée
F7	4640	3519.64	Elevée
F8	6060	4596.77	Elevée
F9	4130	3132.78	Elevée
F10	4950	3754.79	Elevée
F11	7200	5461.51	Elevée
F12	4700	3565.15	Elevée
F13	3810	2890.05	Elevée
F14	3710	2814.19	Elevée

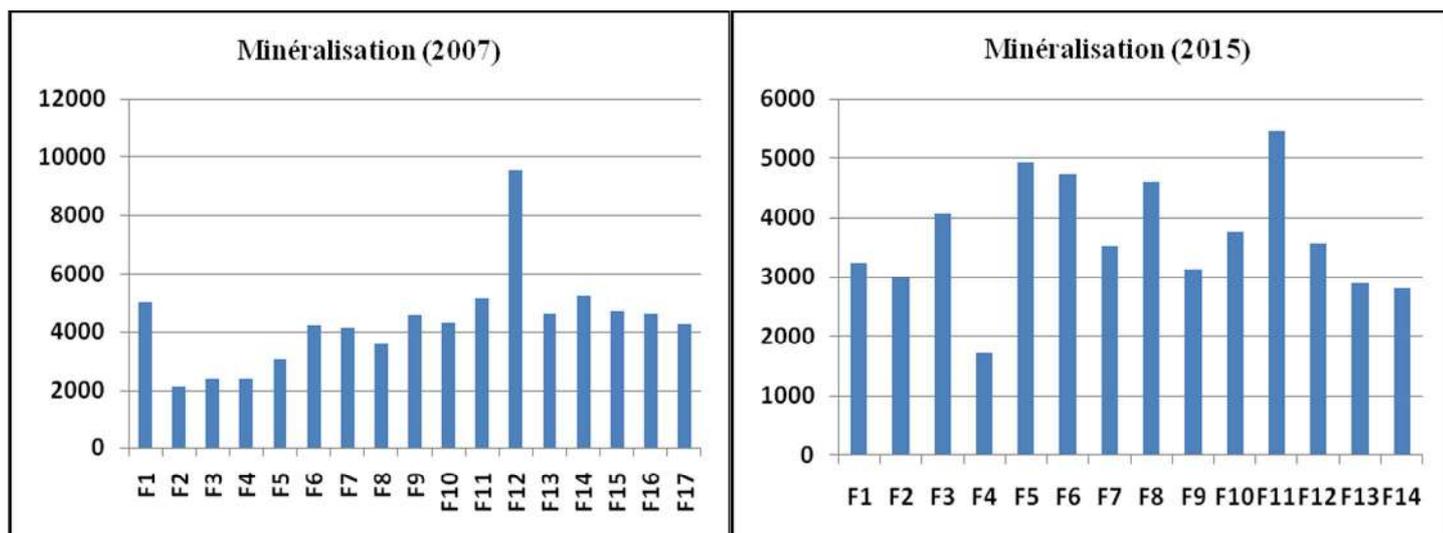


Figure.22: Histogrammes de la Minéralisation (campagnes 2007/2015).

La minéralisation des eaux souterraines dépend naturellement de celle des terrains traversés et du temps de séjours. Dans les zones semi- arides ou arides, les évaporites dont la cinématique de dissolution est très rapide constituent une source de contamination naturelle (RODIER, 2009). Cette minéralisation correspond à la teneur en sels dissous dans l'eau, elle varie entre 2093,58mg/L au F2 et 9524,83 mg/L au F12 pour l'année 2007 et de 1699,13mg/L au F4 à 5461,51mg/L au F11, pour l'année 2015.

Les concentrations de la minéralisation évoluent de la même manière que celles de la conductivité et dépassent largement la norme algérienne de potabilité (1000mg/L).

V.3.3. Paramètres chimiques :

V.3.3.1 Interprétation des histogrammes :

-Le Calcium (Ca^{2+}): est un élément de la dureté totale, la dissolution du calcium résulte principalement de l'attaque par le CO_2 dissous (acide carbonique) des roches calcaires et dolomitiques ou par simple dissolution sous la forme de sulfates de calcium dans le cas de gypse. Dans l'eau, il peut être échangé, sous certaines conditions, contre le sodium des roches traversées (argiles) (RODIER J, 2009). Les teneurs en Ca^{2+} des eaux du Mio-Plio-Quaternaire sont comprises entre 116 mg/L au F₂ et 776 mg/L au F₁₂ (analyse 2007) et entre 308,8 mg/L au F₂ et 480 mg/L au F₁₁ (analyse 2015). Toutes les concentrations en ion Ca^{2+} dépassent la norme (200 mg/L), à l'exception des forages F₂, F₃, F₄, de l'année 2007. (Figures.23, 24).

- Le magnésium (Mg^{2+}) : Ces ions proviennent de la dissolution des roches magnésiennes et surtout de la mise en solution des dolomies et des calcaires dolomitiques. Son origine peut être liée aussi à la dissolution des roches évaporitiques. Le magnésium contribue à la dureté de l'eau.

Nous constatons que les concentrations en Mg^{2+} sont très élevées au F₇ (579 mg/L) en 2007 et au F₁₁ (409,6 mg/L) en 2015. Les valeurs minimales sont de 145 mg/L (2007) au F₁₃ et 148.5 mg/L (2015) au F₂. Tous les forages dépassent la norme (150 mg/L), à l'exception du F₁₃ (2007) et F₂ (2015). (Figures.23 et 24).

-Le sodium (Na^+) : Lié à la constitution géologique des terrains traversés par les eaux souterraines, surtout salifères. Sa présence peut être liée aussi aux échanges de base (argiles). Nous remarquons que les valeurs maximales varient entre 1170 mg/L au F₁₁ en 2015 et 1420 mg/L au F₆ en 2007, par contre les plus faibles valeurs : 367 mg/L et 327.5 mg/L sont enregistrées au niveau du F₃ en 2007, et au F₁₄ en 2015 respectivement. Nous signalons que tous les points d'eau dépassent la norme de potabilité (200 mg/L) (Figures.23 et 24).

-Le potassium (K^+) : est un élément naturel dans les eaux. Son origine est soit liée aux formations argileuses, aux évaporites ou à l'utilisation des engrais du type NPK. Les valeurs maximales sont de 33 mg/L (2007) au F₁, F₁₄ et F₁₇ et 43.5 mg/L (2015) au F₁₁. Les minimas sont respectivement de 10 mg/L (2007) au F₂ et au F₉ et de 13.5 mg/L (2015) au F₉. Tous les

points d'eau dépassent la norme (20mg/L), sauf les forages F₂,F₉ (2007) et F₉,F₁₃,F₁₄,F₁₂ et F₂ (2015) (Figures.23 et 24).

-Les chlorures (Cl⁻) : Les teneurs en chlorures peuvent être d'origine naturelle, en fonction de la nature des terrains traversés surtout salifères. Les résultats des analyses chimiques montrent des valeurs importantes qui dépassent largement la norme de potabilité (500mg/L), à l'exception du F₁(2015), valeur minimale 470mg/L (Figure.24). Les valeurs maximales sont enregistrées au F₇ (2431mg/L), en 2007 et 2138mg/L au F₁₁, en 2015.

-Les sulfates (SO₄²⁻) : Les sulfates sont présents dans l'eau naturelle, ils ont comme origine la solubilité des roches gypseuses. Ils peuvent provenir des rejets des eaux usées ou de l'utilisation des engrais chimiques. Les plus fortes valeurs sont enregistrées au F₁₂ (2488mg/L) en 2007 et 2225 mg/L au F₅ en 2015, les faibles valeurs sont de 1180 mg/L au F₄, en 2007 et 1450mg/L au F₄ en 2015. Les valeurs enregistrées dépassent la norme de 400mg/L.(Figures.23 et 24).

-Les bicarbonates (HCO₃⁻) : Ils proviennent de la dissolution des formations carbonatées, par des eaux chargées en gaz carbonique (CO₂), selon l'équation suivante:



Les valeurs les plus faibles des concentrations en HCO₃⁻ sont comprises entre 98 mg/L au F₃ (2007) et 140,3 mg/L au F₁₀ (2015). Les valeurs maximales sont enregistrées au F₁, 172 mg/L (2007) et 201,3mg/L au F₂ (2015) (Figures.23, 24). Les variations des concentrations en HCO₃⁻ sont liées à la nature lithologique des terrains traversés, caractérisée par des formations carbonatées et des grès à ciment calcaire.

Les normes algériennes de potabilité ne fixent aucune valeur limite pour cet élément.

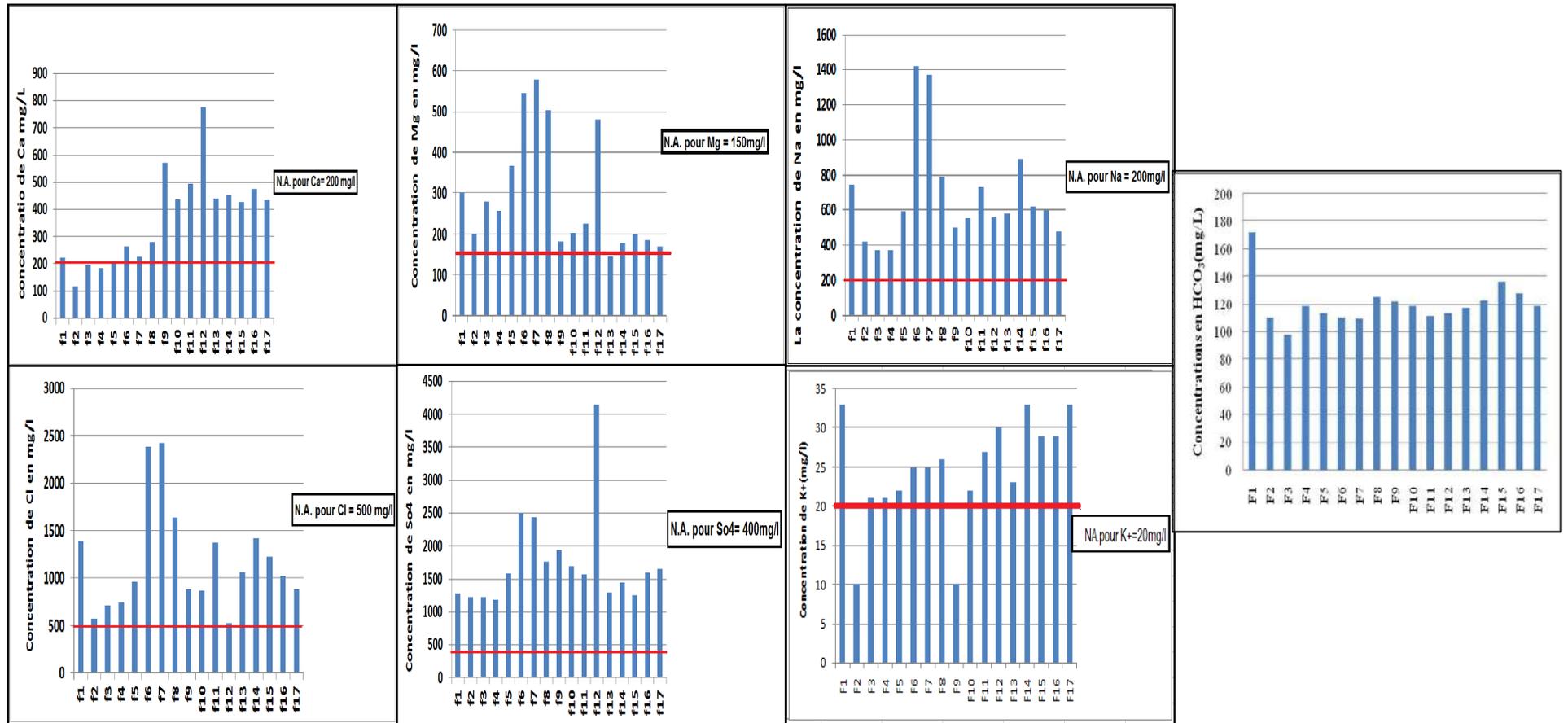


Figure. 23: Histogrammes des éléments chimiques majeurs (campagne 2007).

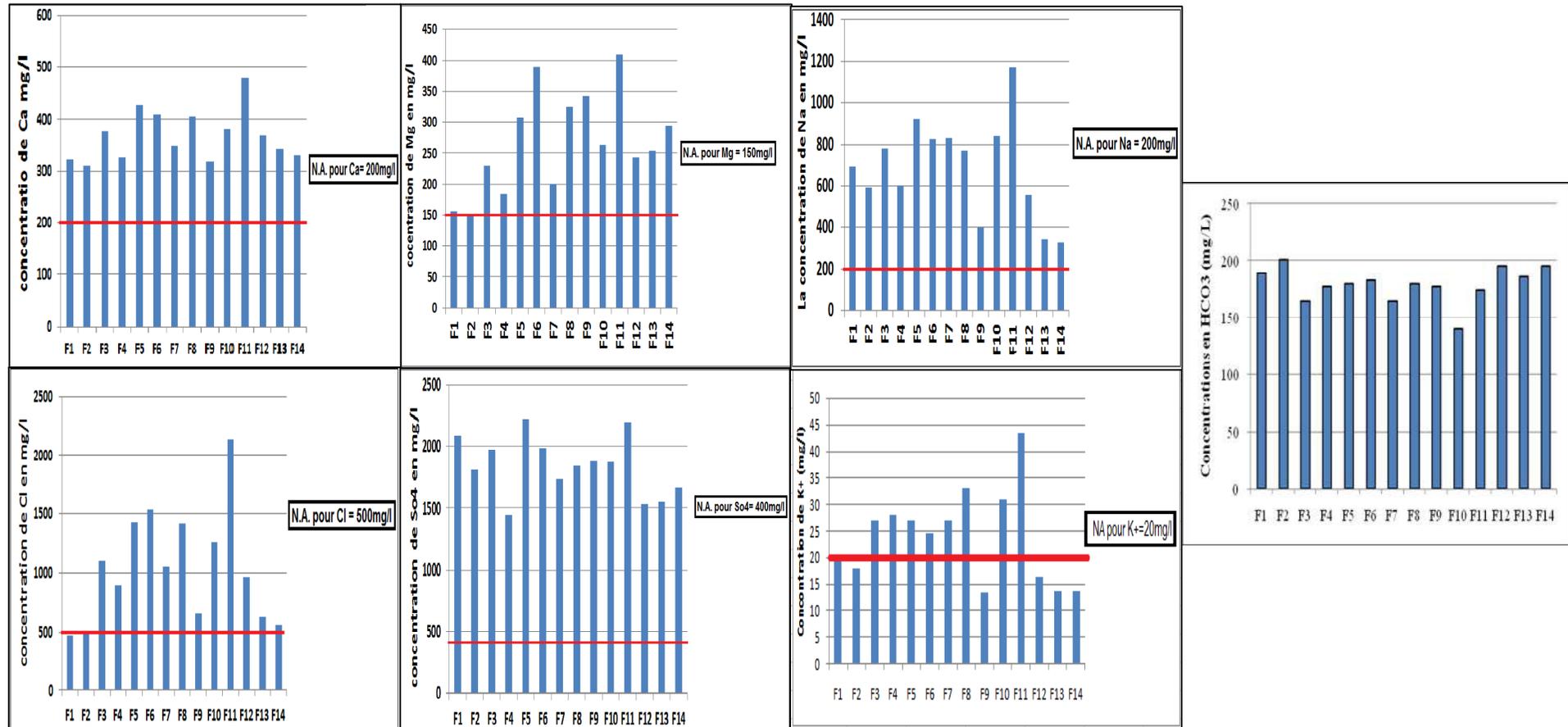


Figure.24: Histogrammes des éléments chimiques majeurs (campagne 2015).

V.4. REPRESENTATION GRAPHIQUE DES ANALYSES DE L'EAU :

V.4.1. Faciès chimiques et formules caractéristiques :

Les représentations graphiques, par le diagramme de SCHOELLER-BERKALOFF a permis de déterminer les principaux faciès chimiques des eaux, dans le secteur d'étude.

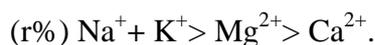
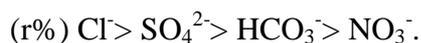
V.4.1.1 Diagramme de SCHOELLER-BERKALOFF : (Figures.25 et 26)

✓ Année 2007 :

L'utilisation de ce diagramme pour la représentation graphique des résultats des analyses chimiques des eaux, en tenant compte uniquement des principaux anions et cations, a permis de distinguer les types de faciès suivants :

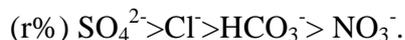
a) Eaux Chlorurées Sodiques:

Les eaux des forages cités respectivement (F₁,F₆,F₇,F₁₁,F₁₃,F₁₄,F₁₅) appartiennent à un faciès Chloruré Sodique. Leur formule caractéristique est:



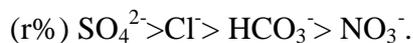
b) Eaux Sulfatées Magnésiennes :

Les eaux des forages (F₃,F₄,F₅,F₁₂) appartiennent à un faciès Sulfaté Magnésien. Leur formule caractéristique est :



c) Eaux Sulfatées Sodiques :

Les points d'eau (F₂,F₁₀,F₁₆) appartiennent à un faciès Sulfaté Sodique. Leur formule caractéristique est :



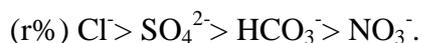
d) Eaux Sulfatées Calciques :

Ce faciès est représenté par les eaux des forages (F₉,F₁₇). Leur formule caractéristique est :



e) Eaux Chlorurées Magnésiennes:

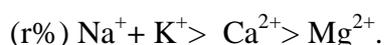
Ce faciès est représenté par les eaux du forage (F₈). La formule caractéristique est :



✓ **Année 2015 :**

a) Eaux Sulfatées Sodiques :

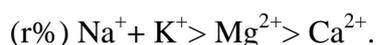
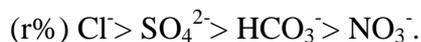
Il est représenté par les forages (F₁, F₂, F₃, F₄, F₅, F₇, F₁₀, F₁₂). Leur formule caractéristique est :

**b) Eaux Sulfatées Magnésiennes :**

Les eaux des forages cités respectivement (F₉, F₁₃, F₁₄) appartiennent à un faciès Sulfaté Magnésien. Leur formule caractéristique est :

**c) Eaux Chlorurées Sodiques:**

Représentées par les points d'eau (F₆, F₈, F₁₁). Leur formule caractéristique est :



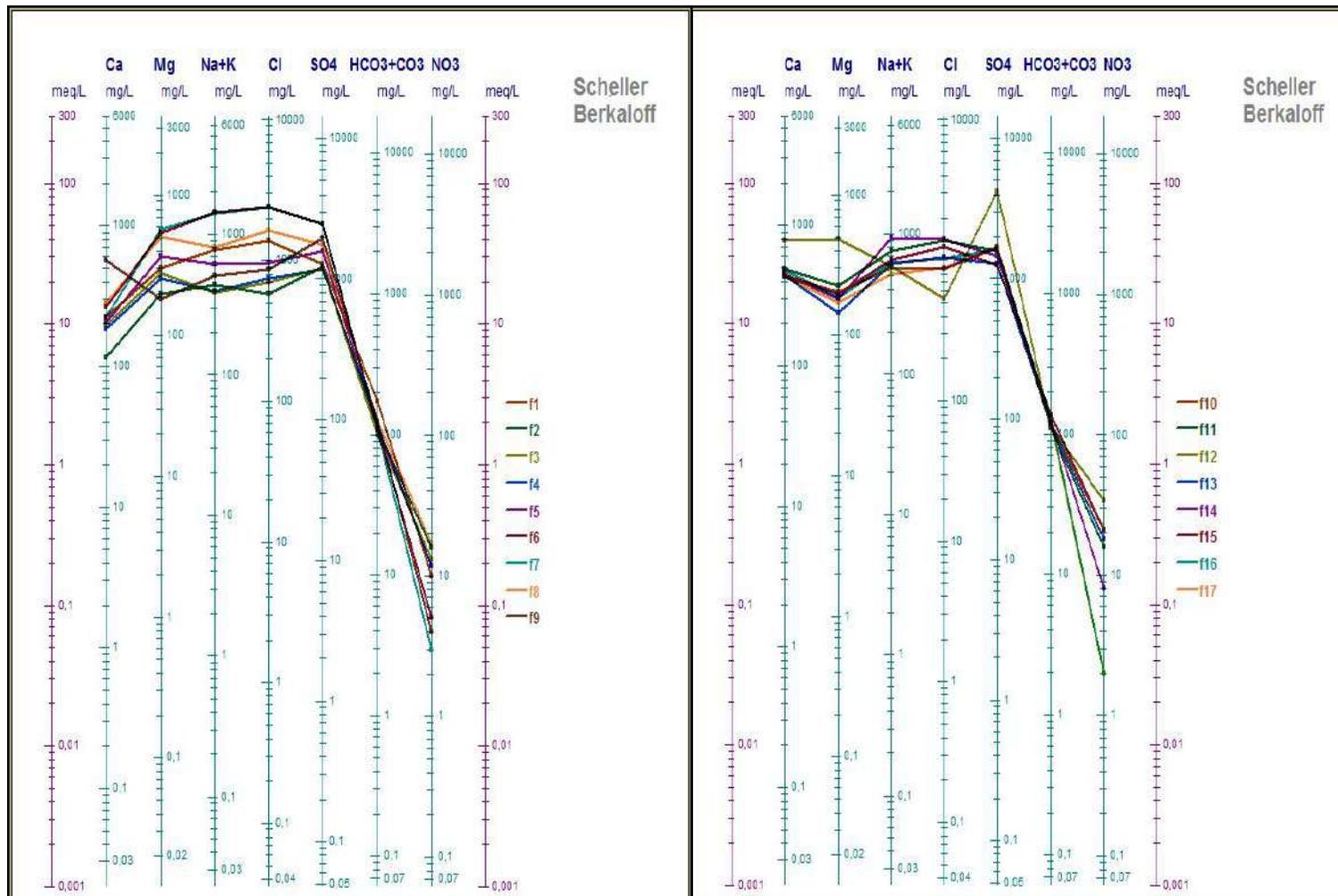


Figure. 25: Diagramme de Schoeller –Berkaloff (campagne 2007).

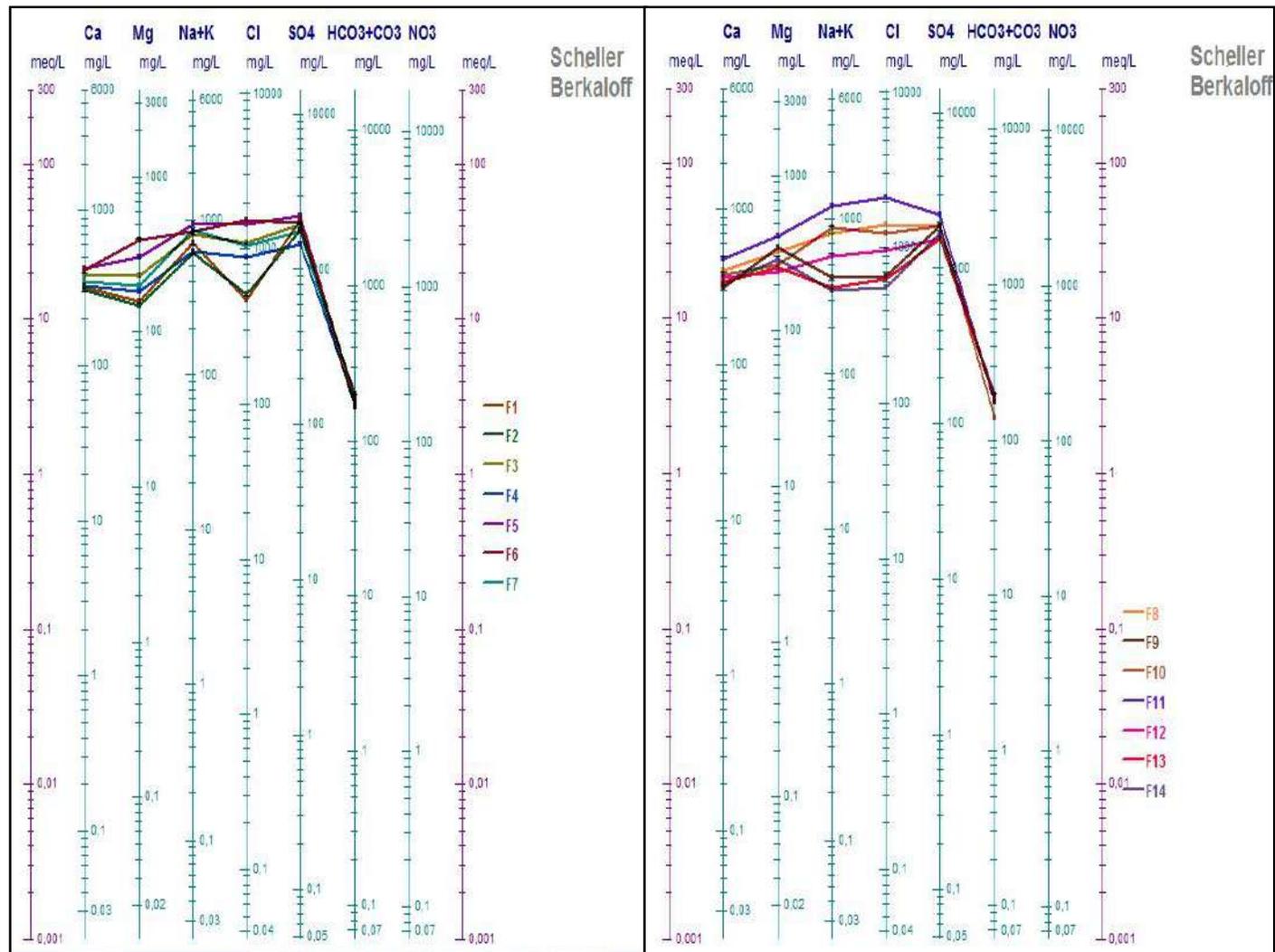


Figure. 26 : Diagramme de Schoeller –Berkaloff (campagne 2015).

V.4.1.2 Diagramme de PIPER :

La représentation des analyses chimiques sur le diagramme de Piper permet de catégoriser les familles des points d'eau.

D'après le diagramme de Piper (Figures.27 et 28) les eaux étudiées sont chlorurées et sulfatées calciques et magnésiennes.

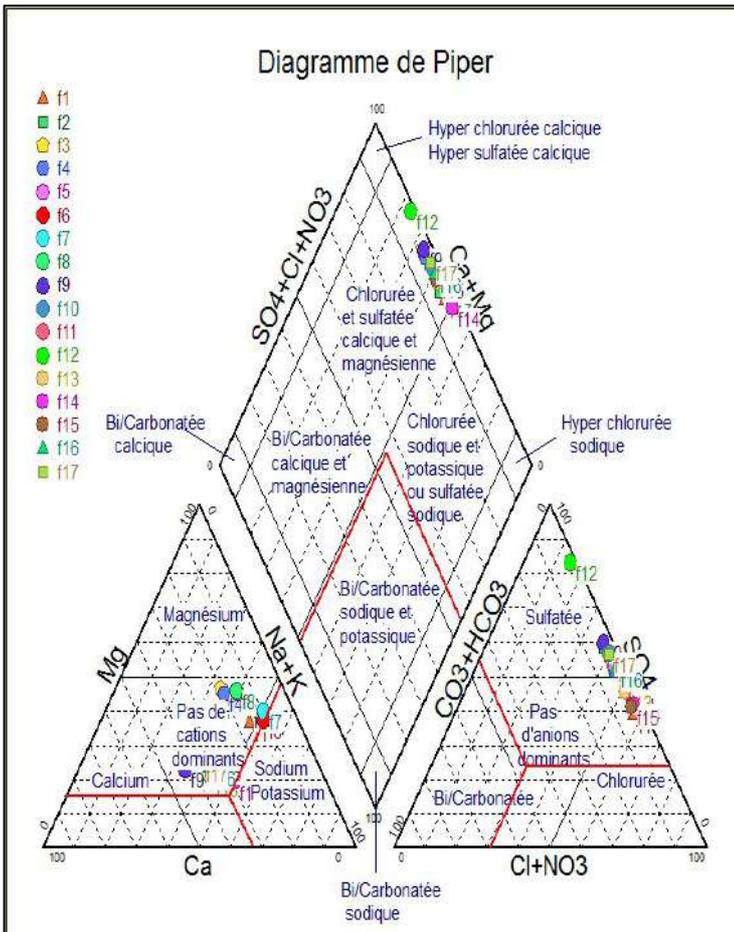


Figure.27 : Diagramme de Piper (campagne 2007).

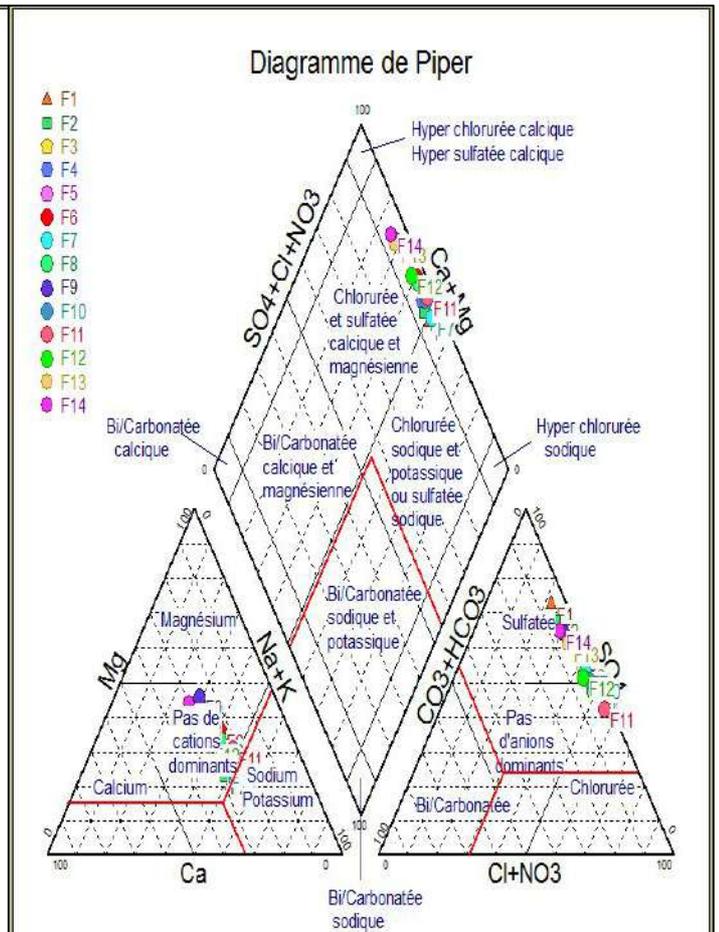


Figure.28 : Diagramme de Piper (campagne 2015).

V.4.2 Aptitude des eaux à l'irrigation :

Les eaux souterraines peuvent être utilisées pour l'alimentation humaine, l'utilisation industrielle ou pour l'irrigation. Les critères d'eau d'irrigation dépendent du type du sol, des plantes, des conditions climatiques et de la qualité chimique de l'eau.

Le degré de salinité de l'eau d'irrigation est généralement exprimé par des classes de convenance relative: une eau très minéralisée peut présenter un danger de salinisation et

d'alcalinisation des sols, par remplacement des ions de calcium et de magnésium, par l'ion de sodium.

L'aptitude des eaux à des fins d'irrigation, peut être évaluée par un certain nombre d'indices et de diagrammes, parmi lesquels : le Sodium Adsorption Ratio (S.A.R).

V.4.2.1 Sodium Adsorption Ratio (S.A.R) (Méthode de Richard 1954):

Lorsque la concentration des ions Na^+ à l'état soluble dans le sol est importante, ces ions remplacent le plus fréquemment les cations Ca^{2+} (échange de base). Une eau chargée en sels peut provoquer cette action. Ce risque est déterminé à l'aide de la valeur du sodium adsorbable (Sodium Adsorption Ratio, SAR) défini par la relation suivante :

$$\text{S.A.R.} = \frac{\text{rNa}^+}{\sqrt{(\text{rCa}^{2+} + \text{rMg}^{2+})/2}}$$

Na, Ca, Mg sont exprimés en meq/L.

- Eau excellente : à faible danger d'alcalinisation des sols : (S.A.R < 10).
- Eau bonne : danger d'alcalinisation assez appréciable (10 < S.A.R < 18).
- Eau convenable : danger d'alcalinisation important (18 < S.A.R < 26).
- Eau médiocre : S.A.R > 26.

Tableau.24: Classification des eaux d'irrigation, d'après J.Servant, 1975 (U.S. Salinity LAB).

Degré	Qualité	Classes	Description
1	Excellente	C1-S1	Eau utilisable sans danger dans l'irrigation de la plupart des cultures, sur la plupart des sols.
2	Bonne	C2-S1 C2-S2	En général, eau pouvant être utilisée sans contrôle particulier pour l'irrigation des plantes moyennement tolérant les sels, sur sols ayant une bonne perméabilité. Principaux problèmes dus aux plantes trop sensibles, au sodium et aux sols à forte capacité d'échange d'ions (sols argileux)
3	Admissible	C3-S1	En général, eau convenant à l'irrigation des cultures tolérant les sels, sur des sols bien drainés. L'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée. Principaux problèmes dus aux plantes trop sensibles au sodium et aux sols à faible perméabilité.
4	Médiocre	C4-S1 C4-S2 C3-S3	En général eau fortement minéralisée pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces tolérant bien les sels et sur des sols bien drainés et lessivés
5	Mauvaise	C3-S4 C4-S3 C4-S4	Eau ne convenant généralement pas à l'irrigation, mais pouvant être utilisée sous certaines conditions : sols très perméables, bon lessivage, plantes tolérant très bien le sel.

D'après les diagrammes (Figure .29 et tableau.26), les eaux des forages analysées appartiennent à deux classes : il s'agit de C4-S2 de qualité médiocre (F2-F3-F4-F5, pour l'année 2007 et F9-F12-F13-F14, pour l'année 2015) et C4-S3 de mauvaise qualité (F8 en 2007 et F1, F7, F10 en 2015). Les autres forages sont hors classes.

La qualité des eaux pour l'irrigation est donc du type médiocre à mauvais. Leur utilisation à l'état brut risque de causer des dégâts irréversibles aux sols de la vallée. L'effet cumulé des irrigations avec une eau de qualité médiocre à mauvaise, sous un climat très évaporant et la présence d'une nappe peu profonde engendre une salinisation secondaire des terres agricoles. Par ailleurs, la rareté de la ressource hydrique oblige les exploitants à l'utiliser malgré les risques, donc il est nécessaire de procéder à des solutions adaptées au problème de salinisation des sols. L'utilisation d'un mélange d'eau est un moyen qui est parfois préconisé pour abaisser la salinité des eaux chargées, aussi la mise en œuvre des techniques d'irrigation et de drainage bien adaptées aux cultures, aux oasis et aux sols est un facteur principal pour la préservation des sols de la vallée.

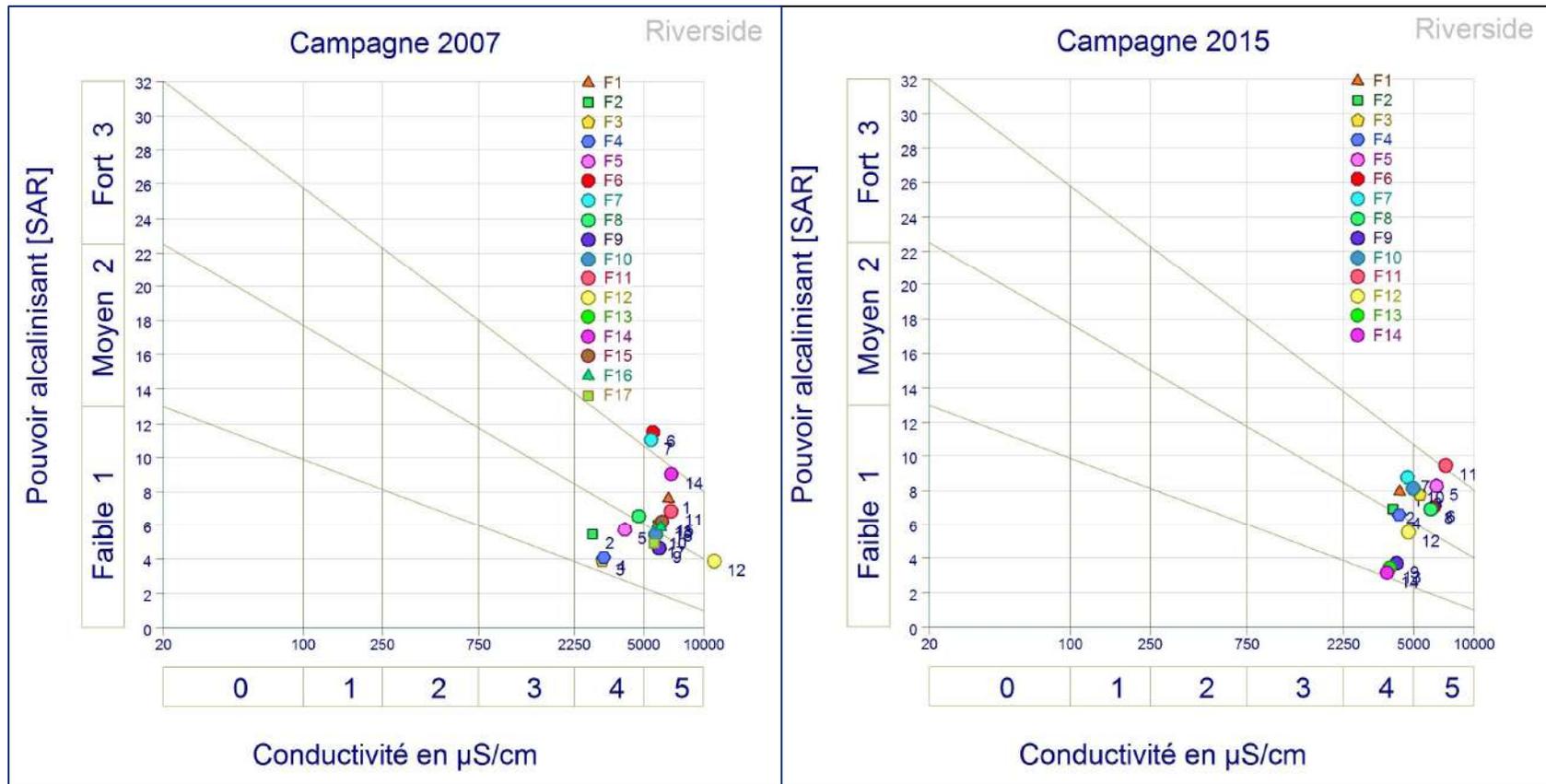


Figure .29 : Qualité des eaux d'irrigation, calculée par le SAR (Diagramme de Riverside).

V.5 CARTES DE VULNERABILITE A LA POLLUTION:

V.5.1 INTRODUCTION :

Les problèmes liés à la pollution des eaux souterraines constituent actuellement une source d'inquiétude qui requiert un intérêt universel. Cette pollution, générée par les activités anthropiques peut, en atteignant des niveaux critiques, présenter un danger grave pour la santé publique et l'environnement. Pour protéger ces ressources, il est nécessaire de prévoir des moyens de protection, face aux difficultés liées aux techniques de dépollution et au coût de celles-ci. Cette protection peut être assurée par la délimitation des zones, dites vulnérables ou à haut risque de pollution.

Dans le but de préserver la qualité des eaux de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire dans la vallée d'Oued Righ, ce travail consiste à cartographier les zones vulnérables à la pollution de cette région, par l'application des méthodes DRASTIC et GOD et à déterminer la méthode qui permet le mieux évaluer cette vulnérabilité. Ce sont des méthodes de cotation numérique. Elles tiennent compte des caractéristiques intrinsèques de l'aquifère, indépendamment du type de polluant, en exposant sa prédisposition à une pollution, liée à une activité provenant de la surface du sol (MURAT.V et al ,2003).

Tableau.25 : Différents paramètres utilisés, par les deux méthodes.

Méthodes	Paramètres de base							
	Type d'aquifère	Profondeur de l'eau	Lithologie de la zone non saturée	Recharge efficace	Lithologie de l'aquifère	Topographie du Sol	Type de Sol	Perméabilité de l'aquifère
GOD (Foster,1987)	X (G)	X (D)			X (O)			
DRASTIC (Aller et al, 1987)		X (D)	X (I)	X (R)	X (A)	X (T)	X (S)	X (C)

L'application de ces deux méthodes a nécessité la récolte et le traitement d'un ensemble de données numériques et cartographiques, fournies par l'ANRH/Ouargla, ainsi les résultats des perméabilités, obtenues par la modélisation, relatives à la région d'étude. Ces données ont été traitées et analysées avec différents logiciels du système SIG.

Cela, nous a permis de les synthétiser en format numérique et de les répartir par mailles, en unités élémentaires de dimension 1000 x 1000 m chacune. Les résultats finaux seront traduits sous forme de cartes représentatives de la vulnérabilité de l'aquifère à la pollution.

V.5.2 DESCRIPTION DE LA METHODE DRASTIC :

Cette méthode a été conçue dans les années 1980 par National Water-Well Association, afin d'évaluer les risques de pollution des eaux souterraines. Elle a été mise au point par l'EPA (Environmental Protection Agency) aux Etats-Unis, en 1985 et Aller et al, en 1987 afin d'estimer le potentiel de pollution des eaux souterraines. Elle permet d'évaluer la vulnérabilité verticale, en se basant sur sept paramètres. Chaque première lettre d'un paramètre constitue le nom de cette méthode et chacun des sept paramètres est affecté d'un facteur multiplicatif (p) qui va croissant de 1 à 5, selon son importance pour l'estimation de la vulnérabilité (MURAT.V, 2000). Chaque paramètre est classé en classes associées à des notes, variant de 1 à 10. La plus petite note représente les conditions de plus faible vulnérabilité à la contamination. Une valeur numérique appelée indice de vulnérabilité DRASTIC, notée ID est déterminée, elle décrit le degré de vulnérabilité de chaque unité hydrogéologique. L'indice de vulnérabilité DRASTIC est calculé, en faisant la somme des produits des poids, par les notes des paramètres correspondants :

$$ID = D_p * D_n + R_p * R_n + A_p * A_n + S_p * S_n + T_p * T_n + I_p * I_n + C_p * C_n$$

- Les $D_n, R_n, A_n, S_n, T_n, I_n, C_n$ sont les notes des paramètres DRASTIC.
- Les $D_p, R_p, A_p, S_p, T_p, I_p, C_p$ sont les poids des paramètres DRASTIC.

Tableau. 26 : Poids des paramètres DRASTIC (ALLER et al. 1987).

Paramètres	Poids
D : Profondeur du plan d'eau	5
R : Recharge efficace	4
A : Matériau de l'aquifère	3
S : Type de sol	2
T : Pente du terrain	1
I : Impact de la zone non saturée	5
C : Conductivité hydraulique	3

Tableau. 27 : Notes attribuées à chaque paramètre.

Profondeur du plan d'eau (D) (m)		Recharge efficace (R) (mm/an)	
0 – 1,5	10	0-50	1
1,5 – 4,5	9	50-100	3
4,5 – 9	7	100-180	6
9 – 15	5	180-250	8
15 – 23	3	> 250	9
23– 31	2		
>31	1		
Lithologie de l'aquifère (A)		Nature du sol (S)	
Calcaire karstique	10	Peu épais ou absent	10
Basalte	9	Gravier	10
Sable et gravier	8	Sable,	9
Calcaire massif	6	Argile, agrégats ou pentes	7
Grès massif	6	Limon sableux	6
Shales en séquence	6	Limon	5
Métamorphique altéré, grès lités, calcaires	4	Limon silteux	4
Métamorphique	4	Limon argileux	3
Shale massif	3	Argile non agrégée et non fissurée	1
	2		
Pente du terrain (T) (%)		Lithologie de la zone non saturée (I)	
0-2	10	Calcaire karstique	10
2-6	9	Basalte	9
6-12	5	Sable et gravier	8
12-18	3	Sable et gravier avec silt et argile	6
> 18	1	Calcaire lité, grès, shale	6
		Grès	6
		Calcaire	6
		Shale	3
		Silt/argile	1
Conductivité hydraulique (C)			
	0,04-4		1
	4-12		2
	12-29		4
	29-41		6
	41-82		8
	> 82		10

V.5. 3 DESCRIPTION DE LA METHODE GOD :

Cette méthode a été développée en Angleterre par FOSTER, en 1987. Elle présente la vulnérabilité de l'aquifère, face à la percolation verticale de polluants, à travers la zone non saturée. Le principe de cette méthode est basé sur l'identification de trois critères : Type de nappe (**G**roundwater occurrence) ; Type d'aquifère en termes de facteurs lithologiques (**O**verall aquifer class) ; Profondeur de la nappe (**D**epth to aquifer) (MURAT.V et al,2003).

❖ Calcul de l'indice de vulnérabilité « GOD »:

$$Iv(GOD) = C_A \times C_L \times C_D$$

Avec:

C_A = note du type d'Aquifère; C_L = note de la Lithologie de la ZNS de l'aquifère; C_D = note de la Profondeur (**D**epth) à la surface de la nappe.

Les notes utilisées pour chaque paramètre varient entre 0 et 1.

Tableau.28: Notes du type d'aquifère.

Type d'aquifère	Note
Aucun aquifère	0
Aquifère confiné et artésien	0.1
Aquifère confiné et non artésien	0.2
Aquifère semi-confiné	0.3
Aquifère avec couverture de surface assez perméable	0.4-0.6
Aquifère non confiné	0.7-1

Tableau.29 : Notes de la lithologie de la zone non saturée.

Nature lithologique	Note
Sol résiduel	0.4
Limon alluvial, argile, marne ,calcaire fin	0.5
Sable éolien, silts, tuf ,roche ignée et métamorphique fracturée	0.6
Sable et gravier, grès, tuf	0.7
Gravier (colluvions)	0.8
Calcaire	0.9
Calcaire fracturé ou karstique	1

Tableau. 30: Notes de la profondeur de la nappe/sol.

Profondeur (m)	0-2	2-5	5-10	10-20	20-50	50-100	>100
Note	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4

Après le calcul des indices des deux méthodes à travers les données fournies, nous déterminons les classes de vulnérabilité correspondantes aux intervalles des indices obtenus.

Généralement, ces indices sont répartis en cinq classes de vulnérabilité, allant de « très faible » à « très forte » (tableau. 33).

Tableau. 31 : Intervalles des indices de vulnérabilité et classes correspondantes.

Indices de vulnérabilité de la méthode DRASTIC	Indices de vulnérabilité de la méthode GOD	Classes de vulnérabilité correspondantes
50-75	00-0.1	Très faible
75-100	0.1-0.3	Faible
100-125	0.3-0.5	Moyenne
125-150	0.5-0.7	Forte
150-200	0.7-1	Très forte

V.5.4 RESULTATS ET DISCUSSION :

Les cartes de vulnérabilité obtenues, à partir des méthodes DRASTIC (Carte.7) et GOD (Carte.8) pour la nappe du Mio-Plio -Quaternaire de la vallée d'Oued Righ montrent que le degré de vulnérabilité moyen est la classe la plus dominante pour la méthode DRASTIC. Alors que la méthode GOD classe la majeure partie de la vallée à faible degré de vulnérabilité.

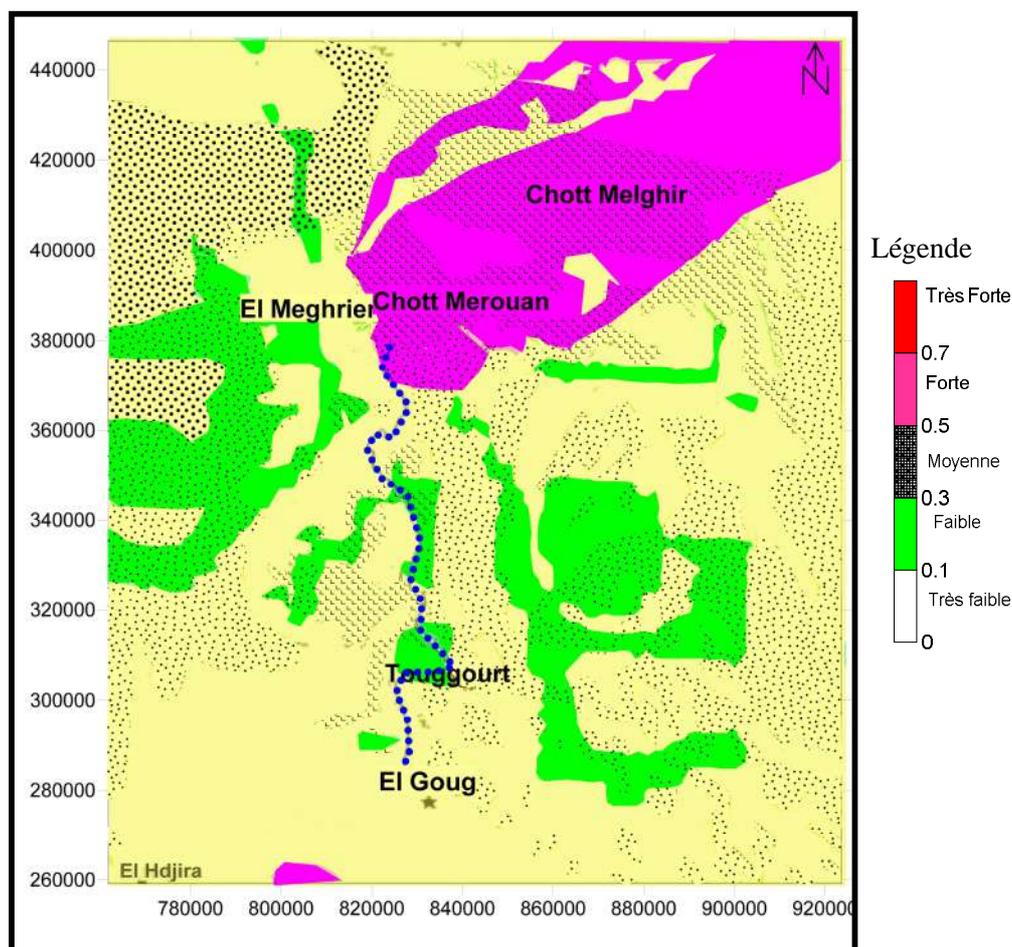
V.5.4.1 Carte de vulnérabilité, par la méthode DRASTIC :(Carte.7)

-La classe « **Faible** » : représente 12.60 % des terrains, dans la partie Sud-Est, près d'El Oued et Touggourt et dans la partie sud-ouest et ouest, près d'El Meghair, jusqu'à Oum Thiour. Cet indice faible est dû aux profondeurs importantes de la nappe dans certaines zones et aux perméabilités faibles, dues à la nature lithologique des terrains.

-La classe « **Moyenne** » : s'étend du Sud au Nord, en occupant la proportion la plus importante de la plaine (74.30%). Le degré de vulnérabilité moyen est lié à la profondeur moyenne de la nappe et aux formations géologiques semi-perméables (sables avec passage argileux ou gypseux), traduisant une perméabilité moyenne.

-La classe « **Forte** » : reflète 13.02 % de la superficie de la plaine et se rencontre au Nord, dans la zone des Chotts (Chott Merouane et Melghir) ainsi qu'au Sud, près d'El Hadjira. Le degré fort de la vulnérabilité peut être expliqué par les faibles profondeurs de la nappe et une bonne perméabilité.

-Les classes « **Très faible** » (0.08%) et « **Très forte** » ne sont pas observables sur la carte.



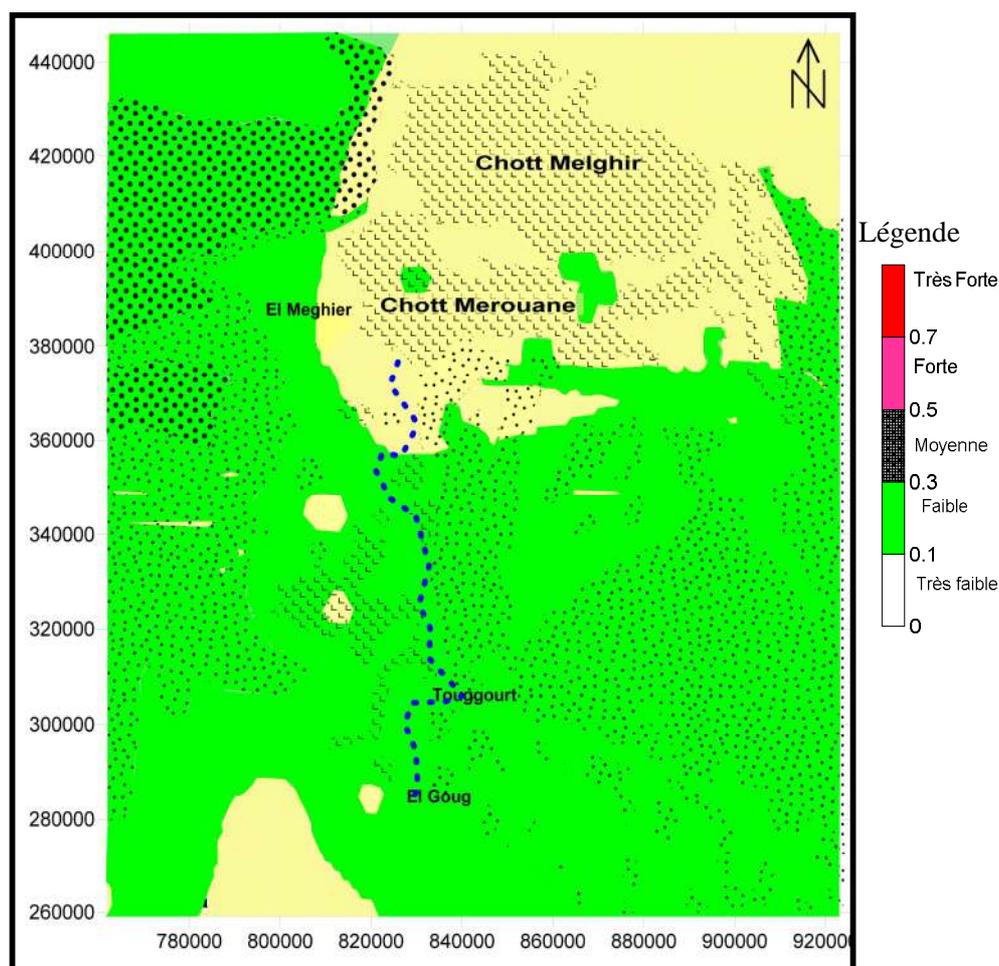
Carte.7: Vulnérabilité à la pollution, selon la méthode DRASTIC (2015).

V.5.4.2 Carte de vulnérabilité, par la méthode GOD :(Carte.8)

-La classe « **Faible** » : occupe la plus grande partie de la plaine (70%) qui s'étend du Sud au Nord-Ouest. Cela peut être expliqué par les grandes profondeurs de la surface piézométrique.

-La classe « **Moyenne** » : se localise au Sud-Ouest, près d'El Hadjira et El Goug, au centre et dans la partie nord, au niveau des Chotts Merouane et Melghir, occupant 30 % de la zone cartographiée. Ce taux de vulnérabilité est dû à la profondeur moyenne de la nappe et à la lithologie de la zone non saturée.

-Les classes « **Très faible** », « **Forte** » et « **Très forte** » n'apparaissent pas sur la carte.



Carte.8 : Vulnérabilité à la pollution, selon la méthode GOD (2015).

V.5.5 COMPARAISON DES METHODES D'EVALUATION DE LA VULNERABILITE A LA POLLUTION :

La comparaison des résultats obtenus, par l'application des deux méthodes (DRASTIC et GOD) permet de déterminer les variations d'évaluation du degré de vulnérabilité dans l'espace, par le test de concordance (test de Kendall), basé sur l'évolution des indices de la vulnérabilité, aussi par l'analyse des surfaces relatives aux classes de vulnérabilité. Le nombre de mailles obtenues, par classes et par les deux méthodes constitue l'élément de base pour cette comparaison.

* Le test de Kendall :

Le coefficient de Kendall (W) représente l'indice statistique qui mesure le degré de concordance d'une évaluation entre deux ou plusieurs évaluateurs, ayant à juger un même phénomène. Ce coefficient a une marge de variation comprise entre 0 et 1 (GOUAIDIA, L et al, 2011) .Il présente un degré de concordance qui est d'autant plus élevé que la valeur du

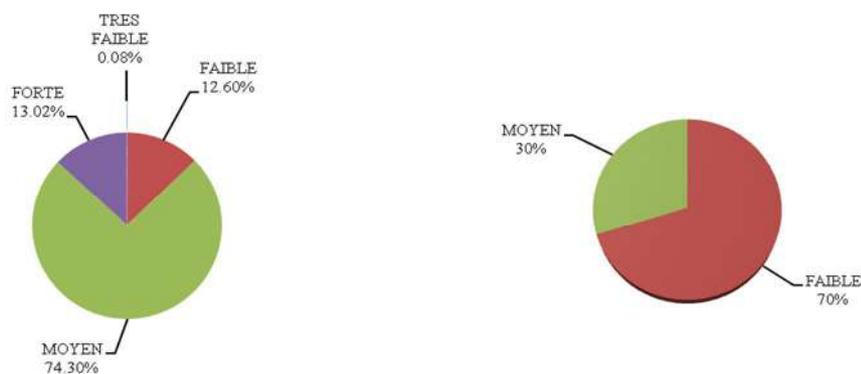
coefficient W est proche de 1. Le calcul du coefficient de Kendall a révélé que ce test est fiable, puisque la valeur du coefficient de Kendall (W) est positive, donc interprétable :

($W = 0.703$).

*** Analyse statistique des surfaces, par classes :**

Les résultats de l'application des méthodes DRASTIC et GOD sur l'aquifère du Mio-Plio-Quaternaire de la vallée d'Oued Righ montrent que :

- La méthode DRASTIC classe la majeure partie de la nappe à degré de vulnérabilité moyen «74,30%». Tandis que la méthode GOD présente un degré de vulnérabilité faible, avec un pourcentage de 70% (Figure.30).



Répartition spatiale du degré de vulnérabilité suivant la méthode DRASTIC.

Répartition spatiale du degré de vulnérabilité suivant la méthode GOD.

Figure.30 : Représentation graphique des pourcentages des degrés de vulnérabilité de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire de la vallée d'Oued Righ, selon les méthodes utilisées.

Tableau.32 : Répartition, par mailles des classes d'indice de vulnérabilité, obtenues par la méthode DRASTIC.

Intervalles		Degré de vulnérabilité	Nombres de cellules
50	75	TRES FAIBLE	24
75	100	FAIBLE	3837
100	125	MOYEN	22629
125	150	FORT	3967
150	200	TRES FORT	
Total			30456

Tableau.33 : Répartition, par mailles des classes d'indice de vulnérabilité, obtenues par la méthode GOD.

<i>Intervalles</i>		<i>Degré de vulnérabilité</i>	<i>Nombres de cellules</i>
0	0.1	<i>TRES FAIBLE</i>	0
0.1	0.3	<i>FAIBLE</i>	21367
0.3	0.5	<i>MOYEN</i>	9090
0.5	0.7	<i>FORT</i>	0
0.7	1	<i>TRES FORT</i>	0
Total			30456

L'étude comparative des méthodes DRASTIC et GOD a permis de constater que la première méthode (DRASTIC) donne une information plus fine pour la représentation de la vulnérabilité, car la carte obtenue est découpée en quatre classes, contre deux classes, fournies par la méthode GOD (Tableaux 32 et 33).

Un autre point à noter est que la méthode GOD n'utilise que trois paramètres, par contre la méthode DRASTIC utilise sept paramètres. Il semble donc que la quantité d'information acquise pour l'évaluation de la vulnérabilité par la méthode GOD n'est pas suffisante pour comprendre le système aquifère de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire dans la vallée d'Oued Righ, puisque la carte produite est relativement uniforme, par rapport à la méthode DRASTIC qui fournit une carte d'indice de vulnérabilité très diversifié et qui semble correspondre aux attentes, puisque la zone de vulnérabilité se situe dans les zones de faibles épaisseurs de sédiments.

B- LES EAUX DU CANAL, DES LACS ET DU CHOTT MEROUANE:

L'Oued Righ est une région riche en zones humides, malheureusement les lacs sont mal entretenus et menacent l'environnement écologique de la région.

Le canal d'Oued Righ dirige les eaux de drainage vers Chott Merouane (-31m), sur une centaine de kilomètres, de Blidet Aneur, au Sud jusqu'à El Meghaire, au Nord, ce canal collecteur constitue le nerf principal pour la vie des oasis qui y existent, de part et d'autre de la vallée, il assure l'évacuation des eaux d'irrigation excédentaires et celles d'assainissement des zones urbaines, il commence à El Goug en amont, jusqu'à Sidi Khelil il reçoit directement les eaux usées et de drainage de toutes les oasis, par les différents rejets installés de part et d'autre du canal. A partir de Sidi Khelil, les eaux usées de cette commune et celles d'Ain Cheikh sont évacuées par deux grands rejets qui débouchent dans Oued Kherouf.

A El Meghaire et Oum Thiour, les nombreux rejets se déversent directement dans Oued Kherouf (BOUCHAHM.N et al, 2013).

V.6 LE CANAL :

V.6.1 Paramètres physico-chimiques du canal, en 2006 :

Tableau.34 : Paramètres physico-chimiques des eaux du canal (ANRH, 2006).

Stations	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	RS (mg/L)	Min (mg/L)	Con(ms/cm)	pH
KERDACHE	940	945	3725	222	5777	4861	15802	14807	17.42	8.10
RANOUE	1150	1171	4480	295	6859	6251	18124	17077	20.09	8.17
SIDI SLIMANE	990	1154	3987	180	6654	5134	16462	15419	18.14	7.92
SIDI AMRNE	1000	1233	3808	180	6551	5389	17742	16847	19.82	7.85
TINEDLA AVALE	1020	982	4235	210	6400	5263	16336	15350	18.07	7.94

VI.4.2.1 Interprétations des paramètres physico-chimiques du canal (MOULAY LAKBIRE.Z et YAHIAOUI.Z,2015)

Les courbes des différents paramètres représentés (Figure.31) montre que :

- Le potentiel d'Hydrogène (**pH**) varie entre 7.85 (station de Sidi Amrane) et 8.17 (station de Ranou). Ce pH, d'après les normes de classification, est de type alcalin (compris entre 7.25 et 8.5).

- La **conductivité électrique** varie entre 17.42ms/cm (station de Kerdache) et 20.09ms/cm (station de Ranou). Ces valeurs traduisent une minéralisation excessive de l'eau. Les valeurs de la minéralisation sont entre 14807mg/L (station de Kerdache) et 17077mg/L (station de Ranou).

- Les concentrations en **Résidu Sec**, varient entre 15802mg/L (station de Kerdache) et 18124mg/L (station de Ranou).

- Les concentrations en **Ca²⁺** sont de 940mg/L (station de Kerdache) à 1150mg/L (station de Ranou).

- Les concentrations en **Mg²⁺** sont de 945 mg/L (station de Kerdache) et 1233 mg/L (station de Sidi Amrane).

- Les concentrations en **Na⁺** varient entre 3725mg/L (station de Kerdache) et 4480mg/L (station de Ranou).

- Les concentrations en **K⁺** varient entre 180mg/L (station de Sidi Slimane et Sidi Amrane) et 295mg/L (station de Ranou). Toutes les valeurs dépassent la norme de 15mg/L.

- Les concentrations en **Cl⁻**, varient entre 5777mg/L (station de Kerdache) et 6859 mg/L (station de Ranou). Toutes les concentrations dépassent la norme de 250 mg/L.

-Les concentrations en SO_4^{2-} sont entre 4861 mg/L (station de Kerdache) et 6251 mg/L (station de Ranou). Ces teneurs élevées sont dues à la nature géologique des terrains, rejets des eaux usées et l'utilisation des engrais (par lessivage des terrains).

Certains paramètres sont dus à la nature géologique des terrains traversés. Le taux élevé de certaines concentrations est dû surtout, aux rejets domestiques et aux eaux du drainage agricole des palmeraies avoisinantes.

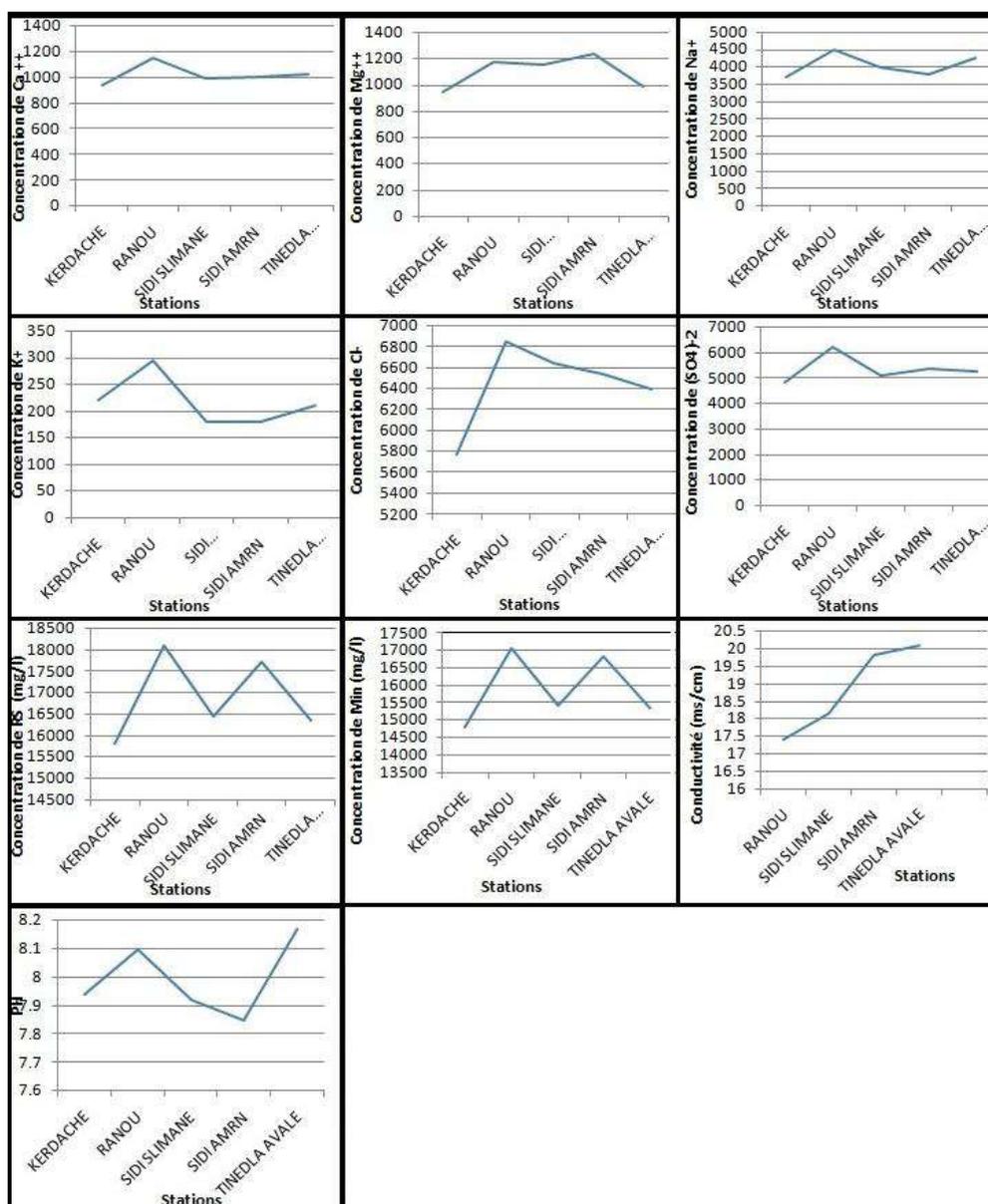


Figure.31 : Courbes des paramètres physico-chimiques du canal (2006).
(MOULAY LAKBIRE.Z et YAHIAOUI.Z,2015)

V.7 LES LACS ET LE CHOTT :

Trois zones humides ont été analysées : **Lac Ayata** , **lac d'Oued Kherouf**, et **Chott Merouane**. Les résultats des analyses ont été pris du travail de DJENNATI. K et DRISSI. A, 2015.

V.7.1. Présentation et caractérisation des sites d'étude :

V.7.1.1. Lac Ayata :

Le lac Ayata est situé dans la daïra de Djamaa, commune de Sidi Amrane wilaya d'El Oued, il est limité à l'Ouest par la route nationale, au Nord par la commune de Djamaa, au Sud par la commune de Sidi Slimane (Ouargla) et à l'Est par la commune d'El-Merrira (El Oued).

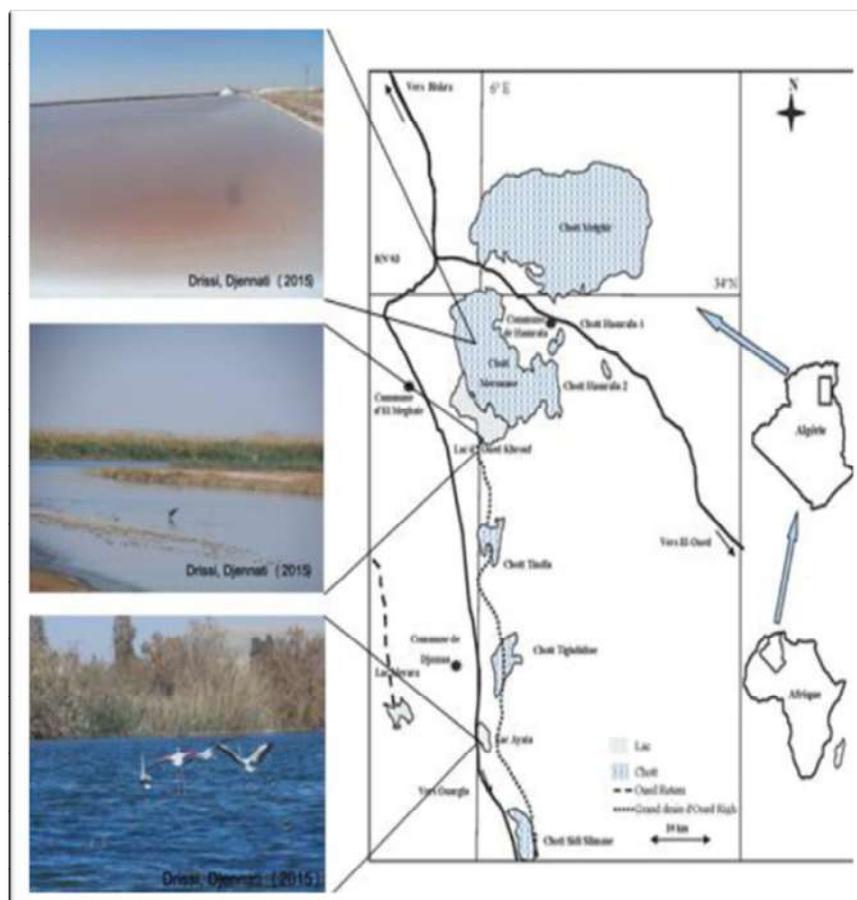


Figure.32 : Localisation des sites
(Source : DJENNATI. K et DRISSI. A, 2015).

V.7.1.2. Lac d'Oued Kherouf : Cette zone humide appartenant à la commune d'Ain Chikh (25 km au Sud de la ville d'El-Meghaire). Elle représente l'extrémité atteinte par les eaux de la vallée de l'Oued Righ.

V.7.1.3. Chott Merouane : Le Chott Merouane est une zone humide, d'importance internationale; situé dans le Sud-Est algérien, classé récemment parmi les zones humides de l'Algérie. Constitue avec les Chotts algéro-Tunisiens de grandes étendues lagunaires. Le Chott Merouane est situé au Nord- Est du Sahara septentrional et fait partie administrativement de la wilaya d'El-Oued et de la daïra d'El-Maghaire.

V.7.2. Qualité physico-chimique des eaux :

Les paramètres physico-chimiques fournissent des indications sur la qualité de l'eau, elles sont sujettes à des variations, par les activités anthropiques qui modifient leurs caractéristiques.

❖ Les stations choisies pour chaque site d'étude :

-En amont (S1).

-A proximité du site (S2).

-En aval (S3).

Tableau.35: Paramètres physiques et chimiques des eaux des stations étudiées.

	Lac Ayata			Lac Oued Kherouf			Chott Merouane		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3
pH	8,7	7,79	9,63	7,83	8,98	8,32	7,95	8,23	8,9
T(°C)	13,33	13,54	13,57	18,46	20,78	20,68	20,89	19,52	22,84
O₂	5,44	4,7	5,51	4,4	4,72	4,37	0,73	0,39	0,35
CE(mS/s)	13,5	13,28	13,71	18,32	15,89	16,37	227,3	241,9	170,7
Salinité (‰)	7,69	7,71	7,76	10,9	9,3	9,63	70	70	70
MES(mg/L)	286,8	129,6	266	120	200	120	2920	4160	2720
DCO(mg/L)	222	178	253	2,02	9,18	0,098	1,35	40,1	1,26
DBO₅(mg/L)	70	25	140	4	3	1	24	6	10
SO₄⁻²(mg/L)	275118,4	271694,4	282308,8	84316	78152,8	66768	309700,8	312268,8	292923,2
Cl⁻(mg/L)	1231	310	410	140	120	127	7970	6440	5970
CO₃⁻	-	-	-	-	-	-	-	-	-
HCO₃(mg/L)	43	43	13	36	35	51	21	12	49
K⁺(mg/L)	4,48	6,36	5,47	12,22	10,97	10,56	6,82	8,48	6,4
Na⁺(mg/L)	8,84	157,46	178,69	258,62	285,65	294,66	817,18	844,2	862,23

Source : DJENNATI. K et DRISSI. A, 2015.

1. Température (°C) :

Les variations de la température au niveau des trois stations : dans le lac Ayata est entre 13,33°C et 13,57°C, dans le lac d'Oued Kherouf elle est entre 18,46°C et 20,78°C, et dans le Chott Merouane, elle est de 19,52°C et 22,84°C. Les températures de ces eaux ne dépassent pas 25°C (Rodier, 2009).

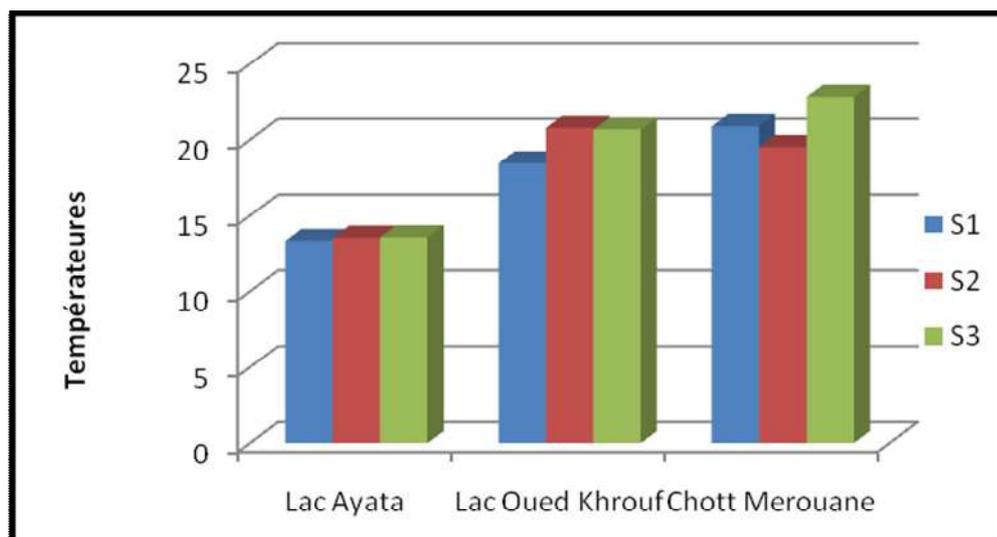


Figure.33: Variations des températures des eaux des stations étudiées.

2. Potentiel d'Hydrogène (pH) :

La figure ci-dessous, montre que les valeurs du pH sont entre la norme des eaux de surface 7,25 et 8,5, pour la station S2 d'El Ayata, S1 et S3 d'Oued Khrouf, et S1 et S2 du Chott traduisant un pH alcalin. Les autres stations présentent un pH très alcalin (>8.5).

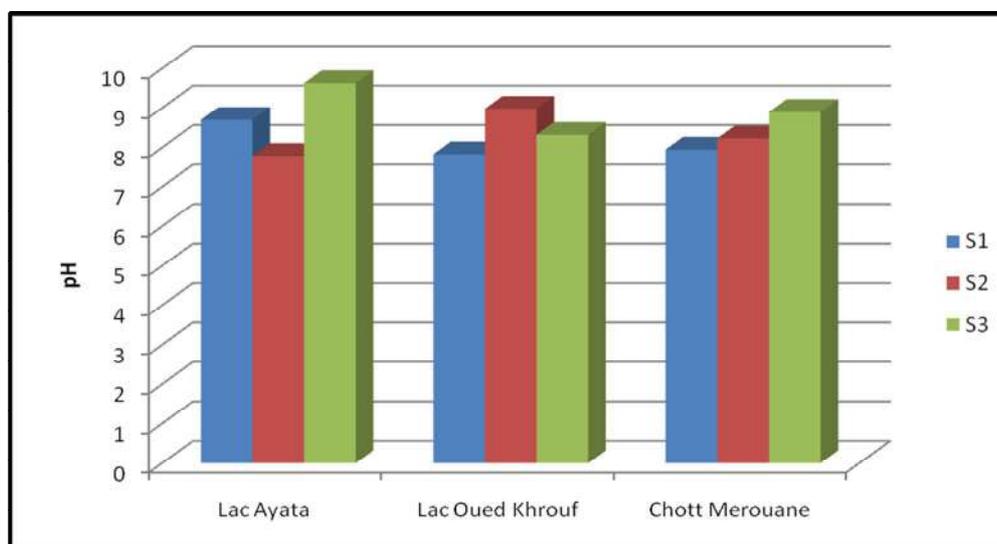


Figure.34 : Variations du pH des eaux des stations étudiées.

3. Conductivité électrique (ms/cm) :

Les valeurs des conductivités électriques, enregistrées dans les trois zones sont (Figure.35):

-Dans le lac Ayata, le maximum est de 13,71 ms/cm

-Dans le lac d'Oued Kherouf, la valeur maximale enregistrée est de 18,32 ms/cm

-A Chott Merouane, la conductivité électrique atteint son maximum (241,9 ms/cm), par rapport aux deux stations précédentes. Ces taux élevés, traduisent une minéralisation excessive et sont dus à la nature des terrains traversés et aux rejets domestiques.

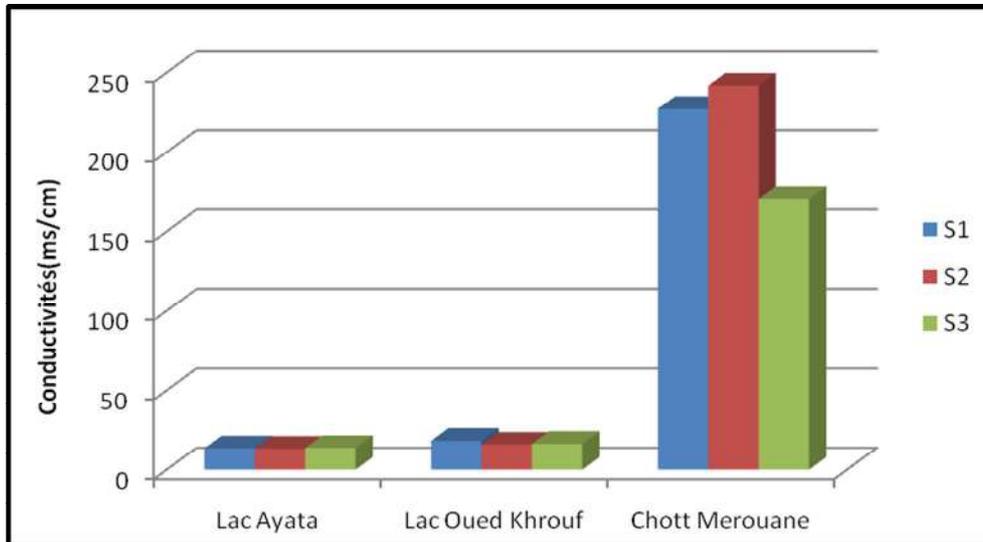


Figure. 35: Variations de la conductivité électrique des eaux des stations étudiées.

4. Salinité‰ :

Les teneurs en sels dans les eaux du lac Ayata sont entre 7,69 ‰ et 7,76‰ et pour le lac d'Oued Kherouf sont entre 9,30‰ et 10,90‰ .A Chott Merouane, dans les trois stations la valeur maximale enregistrée est de 70 ‰ (Figure. 36).

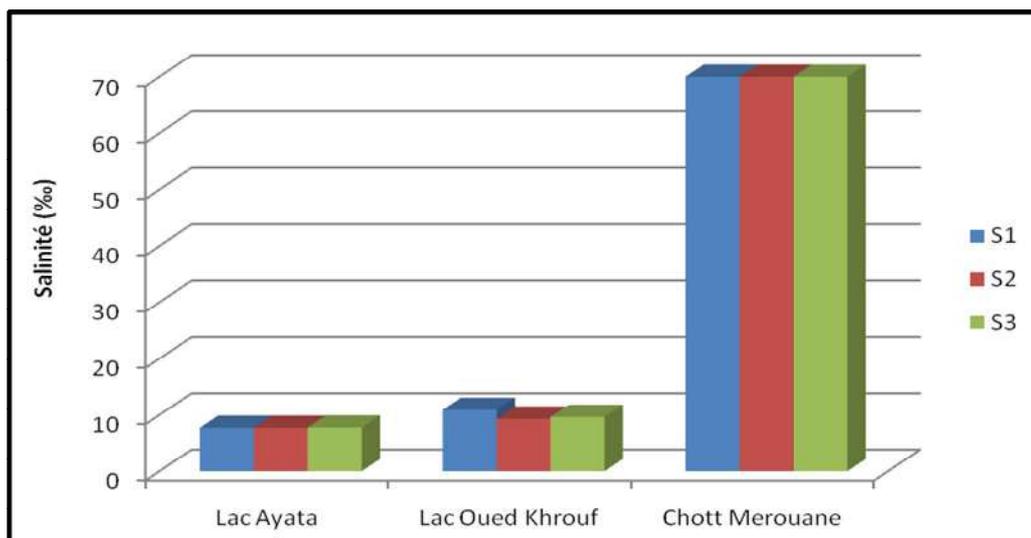


Figure. 36: Variations de la salinité des eaux des stations étudiées.

5. Matière en suspension (MES) :

Les concentrations élevées des matières en suspension sont :

- Dans le lac Ayata : 286.8mg/L (relevée à la S1).
- A Oued Kherouf : 200 mg/L (relevée à la S2).
- A Chott Merouane : 4160 mg/L (relevée à la S2).

Les teneurs élevées des matières en suspension dans les eaux des lacs proviennent des apports d'évacuations des eaux usées, des eaux déversées dans le canal d'Oued Righ et des eaux de drainages.

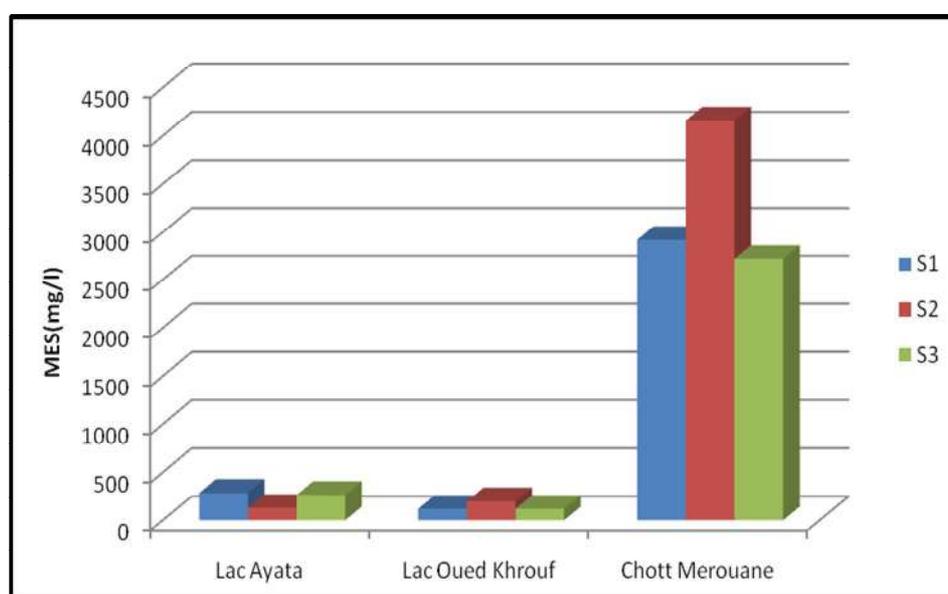


Figure.37 : Variations des matières en suspension des eaux des stations étudiées.

6. Oxygène dissous (OD) :

Les teneurs en oxygène dissous dans le lac Ayata à la S1(5.44mg/L) et S2(5.51mg/L) sont supérieures à la norme 5mg/L. Ces eaux sont excellentes à acceptables.

Les S2 d' Ayata (4.70mg/L) et S1(4.40mg/L), S2(4.72mg/L) et S3(4.37mg/L) d'Oued Kherouf présentent des valeurs entre la norme 3mg/L et 5mg/L (qualité moyenne à médiocre pouvant ainsi générer un stress biologique). Les trois stations du Chott Merouane (valeurs entre 0mg/L <math><O_2</math><math><1\text{mg/L}</math>) sont hors classe niveau 2, relevant du domaine anoxiques.

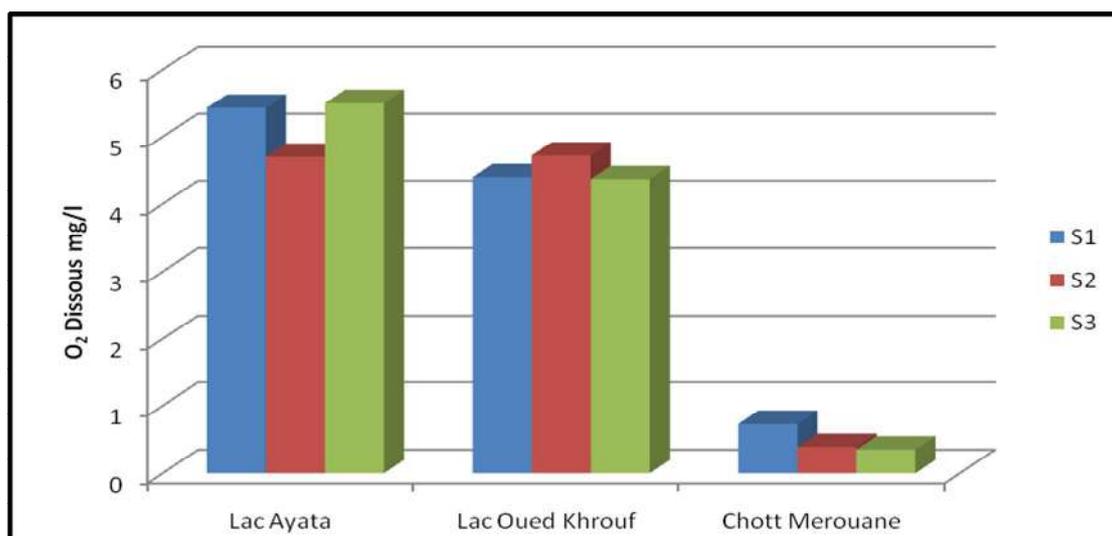


Figure.38 : Variations de l'Oxygène dissous des eaux des stations étudiées.

7. Demande Chimique en Oxygène (DCO) :

Les concentrations en DCO qui dépassent le seuil de 80 mg/L sont relevées aux stations : S1(222mg/L),S2(178mg/L),S3(253mg/L) d'Ayata. Les autres stations : S2 du Chott (40.1mg/L) est de qualité médiocre, les eaux d'Oued Kherouf sont classées comme excellentes (<20) (Figure.39).

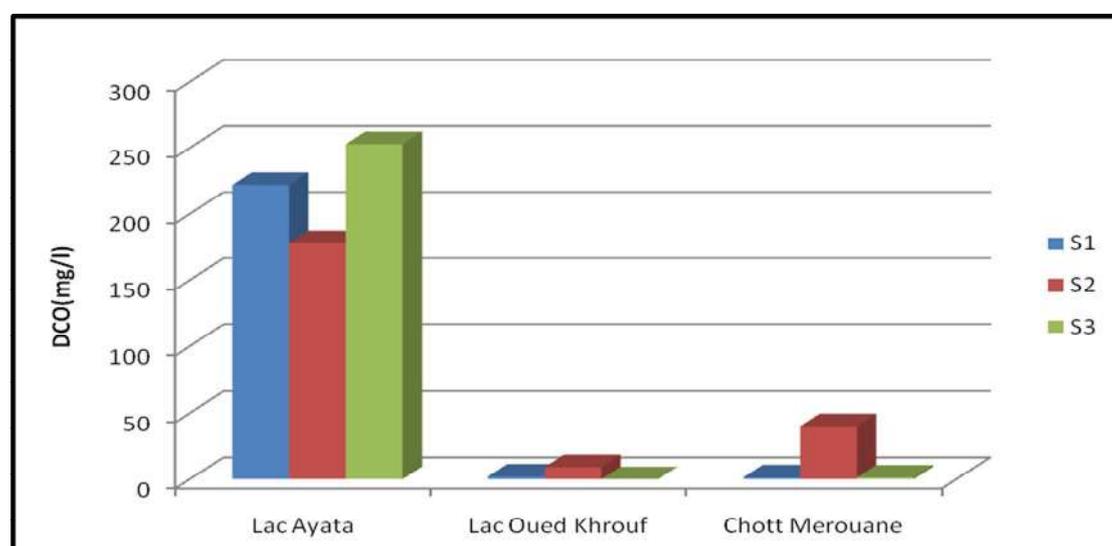


Figure. 39: Variations de la DCO (mg/L) des eaux des stations étudiées.

8. Demande biologique en oxygène (DBO₅) :

-Les stations S2(3mg/L) et S3(1mg/L) de Oued Kherouf sont classées, selon les normes, comme des eaux d'excellente qualité. La S1(4mg/L) du même lac est d'une bonne qualité (pollution modérée).

- Les concentrations des DBO₅ qui varient entre 5 mg/L à 10 mg/L sont mesurées aux S2(6mg/L) et S3(10mg/L) dans les eaux du Chott, elles sont de qualité moyenne (pollution nette).

-Les eaux de la S1(24mg/L) du Chott et S2(25mg/L) d'Ayata sont de qualité médiocre (pollution importante), les S1(70mg/L) et S3(140mg/L) d'Ayata sont de qualité hors classe (pollution excessive).

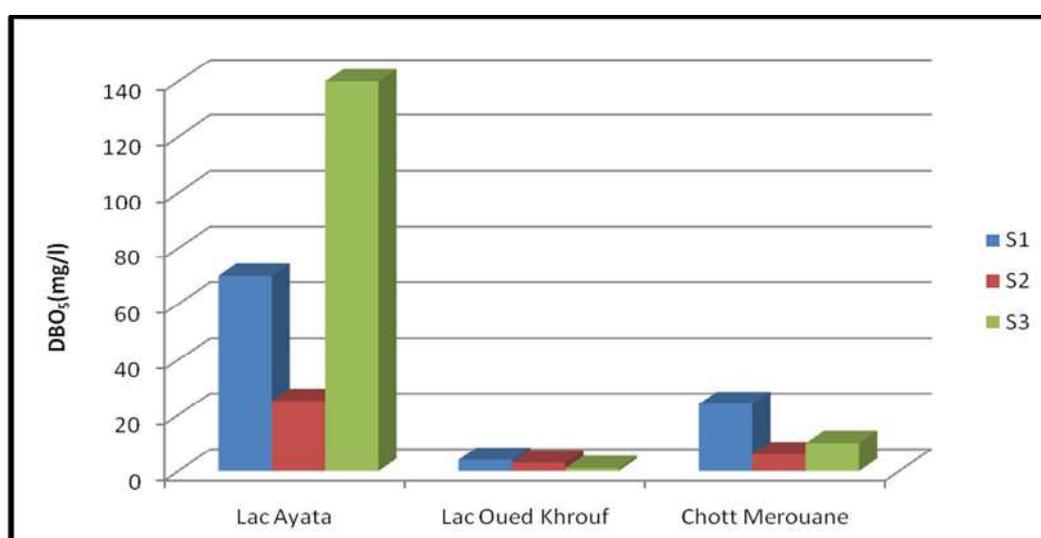


Figure. 40: Variations de la DBO₅ des eaux des stations étudiées.

9. Les chlorures (Cl) :

Les concentrations élevées en chlorures sont relevées au Chott (valeur maximale 7970mg/L). Toutes les stations dépassent la norme de 250mg/L, à l'exception des stations d'Oued Kherouf.

Selon RODIER (2009), les teneurs en chlorures des eaux sont liées principalement à la nature des terrains traversés.

L'élévation des concentrations des chlorures est due aux apports de lessivage superficiel, eaux de drainage, ainsi qu'aux eaux usées, elle est liée aussi aux roches évaporitiques.

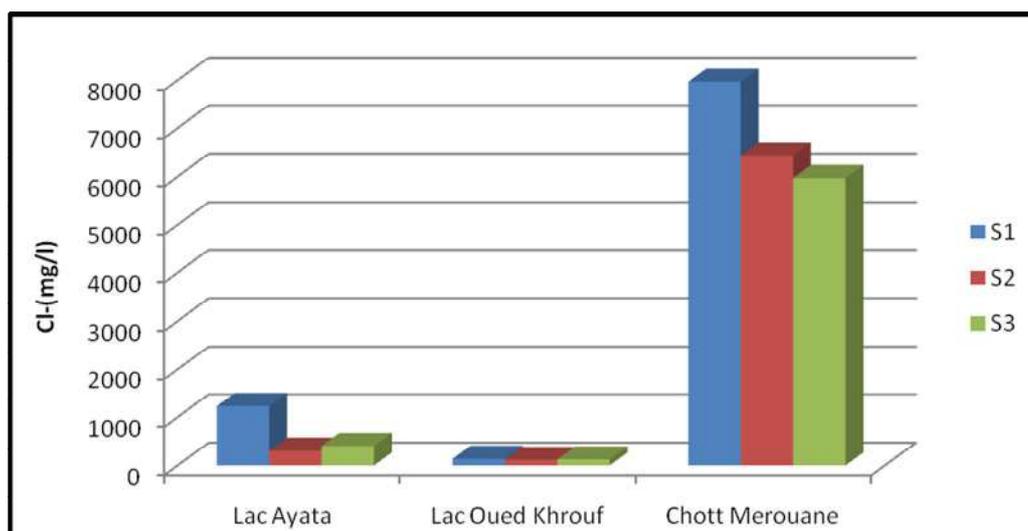


Figure. 41: Concentrations des chlorures dans les eaux étudiées.

10. Les bicarbonates (HCO_3^-) :

Les teneurs en bicarbonates varient entre 13 mg/L (valeur minimale) et 43 mg/L (valeur maximale) au lac Ayata, et dans le lac d'Oued Kherouf elles sont de 35 mg/L (valeur minimale) et 51 mg/L (valeur maximale). Au Chott Merouane, la valeur minimale est de 12 mg/L et maximale est de 49 mg/L. (Figure. 42)

L'augmentation des teneurs en bicarbonates est due à la dissolution, par les eaux chargées en gaz carbonique, des formations géologiques carbonatées et à la nature des eaux résiduaires.

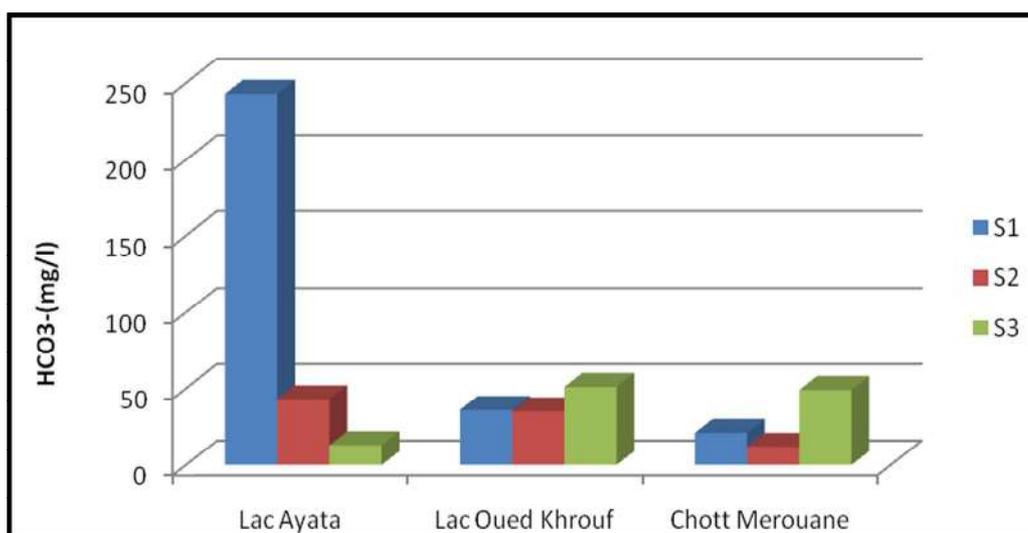


Figure. 42: Variations des bicarbonates des eaux des stations étudiées.

11. Les sulfates (SO_4^{2-}) :

Les valeurs maximales des teneurs en SO_4^{2-} (Figure.43) sont relevées au Chott Merouane (312268.8mg/L). Les sulfates sont d'origine naturelle (mise en solution des roches évaporitiques, notamment le gypse).

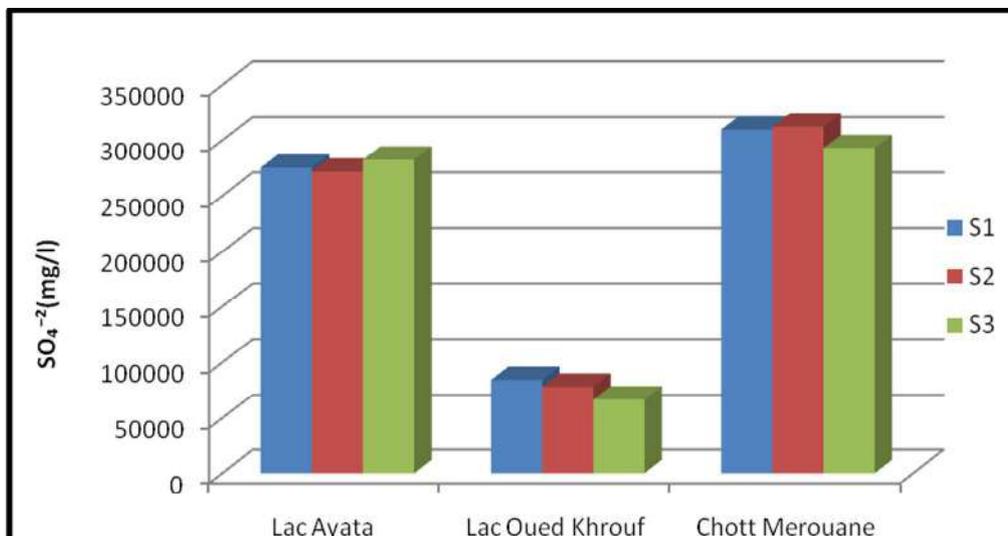


Figure. 43: Variations des Sulfates des eaux des stations étudiées.

12. Potassium (K^+) :

Les teneurs en potassium (Figure.44), montre que la S1(12.22mg/L) d'Oued Kherouf enregistre la valeur maximale. Selon RODIER, (2009), les eaux naturelles ne dépassent pas habituellement 10 mg/L à 15mg/L. Les valeurs de potassium des eaux du lac Ayata et Chott Merouane sont inférieures aux normes, à Oued Kherouf elles sont conformes aux normes. L'ion K^+ provient, essentiellement, des évaporites (Sylvite KCl), ou par suite d'altération des formations argileuses.

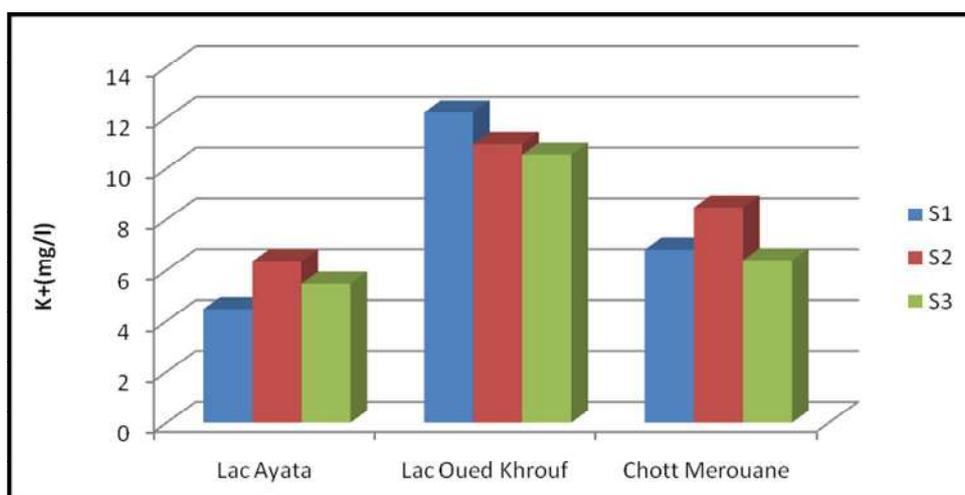


Figure. 44 : Variations des valeurs du potassium des eaux des stations étudiées.

13. Sodium (Na^+) :

Les teneurs en sodium les plus élevées (Figure.45) sont remarquables à Chott Merouane (valeur maximale à la S3 : 862.23 mg/L).

Le sodium est un élément présent dans l'eau, toutefois les concentrations peuvent être extrêmement variables. Les élévations constatées des teneurs en sodium dans les eaux analysées sont liées à la nature géologique des terrains et peuvent être dues à d'autres facteurs : lessivage des terrains par les eaux de drainage et d'irrigation ainsi que les eaux usées.

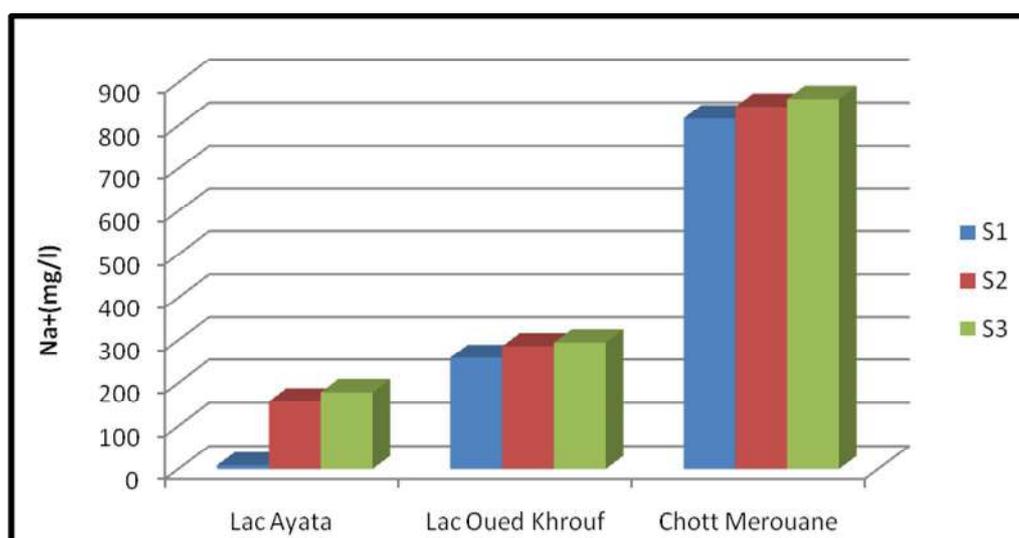


Figure. 45 : Variations du sodium des eaux des stations étudiées.

V.8 CONCLUSION :

❖ L'étude physico-chimique de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire de la vallée d'Oued Righ montre que les eaux des forages présentent des teneurs élevées en tous les paramètres analysés, qui dépassent largement les normes de potabilité algériennes. Cela présente un réel danger pour la santé de la population de la région.

-Le diagramme de Schoeller- Berkaloff permet de distinguer plusieurs types de faciès :

Pour l'année 2007 :

- Chloruré Sodique.
- Sulfaté magnésien.
- Sulfaté sodique.
- Sulfaté calcique.
- Chloruré magnésien.

Pour l'année 2015 :

- Sulfaté sodique.
- Sulfaté magnésien.
- Chloruré Sodique.

-Le diagramme de Piper montre que les eaux étudiées sont chlorurées et sulfatées calciques et magnésiennes.

L'estimation de la qualité des eaux souterraines à des fins d'irrigation, en utilisant le diagramme de Riverside a montré deux classes d'utilisation. En effet, les eaux sont très minéralisées et d'une manière globale, elles sont médiocres à mauvaises, pour l'irrigation.

❖ La cartographie de la vulnérabilité intrinsèque de l'aquifère du Mio-Plio-Quaternaire de la vallée d'Oued Righ, par les méthodes DRASTIC et GOD montre une tendance de vulnérabilité moyenne par la méthode DRASTIC (74.30%) et faible par celle de GOD (70%). La comparaison des deux cartes de vulnérabilité obtenues à partir des deux méthodes (DRASTIC et GOD) a montré que la première méthode (méthode DRASTIC) représente le mieux la répartition des degrés de vulnérabilité à la pollution de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire. Ces résultats sont relatifs aux terrains évalués, car ils ne présentent pas une vulnérabilité absolue, mais relative à celle des terrains avoisinants. Aussi, ces cartes de vulnérabilité n'utilisent que les caractéristiques du milieu, sans prendre en considération la nature du polluant. Elles sont spécifiques à des périodes, pour lesquelles les données sont valides (exemple: profondeurs des eaux de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire).

Enfin, il serait intéressant pour valider les résultats de la méthode DRASTIC, d'élaborer un modèle numérique hydro-dispersif qui pourrait être basé sur le temps d'infiltration et les concentrations des polluants.

❖ Le canal d'Oued Righ joue un rôle important dans la région, il protège l'environnement, en évacuant les eaux de drainage et d'assainissement. Malheureusement, ce canal connaît une dégradation de la qualité de ses eaux (minéralisation : 17077mg/L, résidu sec :18124 mg/L). L'étude qualitative des eaux des lacs indique la présence de certains paramètres indicateurs de pollution due à l'activité anthropique : aux rejets des eaux usées et à celles du drainage. La protection de ces écosystèmes fragiles contre la pollution est obligatoire pour leur préservation et leur durabilité.

2^{ème} PARTIE :

**« ETUDE DE LA RELATION CHOTT MEROUANE/
NAPPE DU MIO-PLIO-QUATERNAIRE ».**

- ***CHAPITRE VI : MODELISATION MATHEMATIQUE***

Chapitre VI :

Modélisation

Mathématique

VI.1 INTRODUCTION :

Après plusieurs années d'exploitation des nappes du Continental Intercalaire et du Complexe Terminal dans la vallée d'Oued Righ, plusieurs problèmes apparaissent liés surtout à la mauvaise gestion de la ressource. En effet, il est difficile de gérer une ressource sur un territoire aussi vaste, sans un modèle mathématique de gestion.

Suite à l'étude, par modèle mathématique du Système Aquifère du Sahara Septentrional, élaboré par l'Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS) en 2003, dont les premiers résultats ont montré un souci de risque d'inversement d'écoulement des eaux du Chott Merouane vers la nappe du Mio-Plio-Quaternaire, destinée à l'AEP et en grande partie à l'irrigation, surtout que la vallée d'Oued Righ est à vocation agricole, cette zone qui connaît d'énormes problèmes, dont la plupart sont liés à la mauvaise gestion de la ressource en eau, la surexploitation qui a engendré l'assèchement de certains puits, la dégradation de la qualité des eaux de la nappe.....etc. et face à cette situation qui peut être considérée comme inquiétante, cette problématique a été cernée, afin de localiser les zones de remontée des eaux du Mio-Plio-Quaternaire et de trouver des solutions appropriées au risque de contamination de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire par les eaux salées du Chott Merouane, pour éviter les risques d'extension de ce phénomène sur l'environnement de la région, qui constitue un pôle économique important.

VI.2 GENERALITES SUR LES MODELES :

Dans le domaine de la gestion des eaux souterraines et de la protection des aquifères, il est souvent nécessaire de faire appel à des techniques de modélisation des aquifères.

- D'une façon générale, on peut définir un modèle comme une représentation simplifiée de la réalité, en vue de simuler la réponse d'un système à une série de sollicitations. Cette représentation doit cependant être la plus conforme possible, du point de vu des mécanismes et processus simulés.
- Les modèles hydrogéologiques sont des représentations théoriques simplifiées d'un système aquifère. Ils comportent la définition d'une structure (le sous-sol), la formulation de lois (relations déterministes ou probabilistes) reliant les entrées du système (par exp. des mesures de débits) à ses sorties (par ex. diagrammes des flux des eaux souterraines), et la définition des paramètres (constantes ou variables pouvant prendre des valeurs numériques

comme les coefficients de perméabilité des roches) entrant dans ces relations (CASTANY. J, 1977).

- La modélisation hydrogéologique consiste à reproduire, à l'aide des modèles mathématiques ou numériques l'écoulement des eaux souterraines et la migration des polluants dans les sols et les eaux. Elle permet de simuler le comportement des nappes d'eaux souterraines, par exemple sous l'effet de contraintes, et les phénomènes complexes de transport de polluants (BONNET.P, 1982).

➤ **La modélisation hydrogéologique est un outil largement utilisé dans de nombreux domaines et permet de :**

- Mieux comprendre l'hydrogéologie de la région d'étude.
- Mieux gérer l'exploitation des ressources en eau.
- Optimiser le réseau de piézomètres.
- Evaluer l'impact d'une nouvelle sollicitation sur la nappe.
- Déterminer l'évolution de la pollution, au fil du temps.

➤ **Les modèles sont réalisés à l'aide de logiciels ou codes de calcul spécialisés et éprouvés.**

Selon la problématique, les modèles peuvent être réalisés en 1D, 2D ou 3D, en régimes permanents (pour un état hydrogéologique donné) ou transitoires (en prenant compte de la dynamique de la nappe d'eau souterraine). Chaque situation nécessite une analyse détaillée qui permet de choisir le logiciel approprié, en fonction :

- Du contexte géologique et hydrogéologique local.
- De la problématique à résoudre (écoulements souterrains et/ou transport de polluants).
- Du type de polluants, en présence.
- Du comportement des polluants dans les sols et les eaux souterraines.
- Des moyens financiers, à disposition.

➤ **Données nécessaires pour la modélisation des écoulements souterrains :**

- Géométrie, géologie des différentes formations pour discrétisation spatiale adéquate du modèle.
- Paramètres de l'écoulement en milieu souterrain saturé : conductivité hydraulique et coefficient d'emmagasinement.

- Valeurs de toutes les sollicitations appliquées au système et de leurs variations temporelles : les débits ou flux pompés ou drainés, et les flux entrants (recharge, réinjections) éventuellement à ajuster, par calibration.
- Valeurs historiques des hauteurs piézométriques et leurs variations dans le temps en un maximum de points : données indispensables pour calibrer et valider le modèle. (DASSARGUES. A 1995).

1. Etapes de la modélisation : (DASSARGUES.A, 1995)

1.1. Modèle conceptuel :

La conceptualisation ou la construction d'un modèle conceptuel du problème à étudier consiste à choisir les hypothèses fondamentales qui vont sous-tendre toute la modélisation. Ces hypothèses réduisent le problème réel en un problème simplifié qui doit être acceptable, au vue des objectifs de modélisation et des questions spécifiques, auxquelles il faut répondre.

1.2. Modèle mathématique :

Cette étape consiste à transcrire le modèle conceptuel en un modèle mathématique, en équations mathématiques. Le modèle mathématique existera à partir de la définition de la géométrie, des équations exprimant les bilans des quantités extensives considérées, des équations de flux (flux exprimés en fonction des variables d'état), des équations constitutives décrivant les propriétés des différents fluides, des termes de sources et de disparitions, des conditions initiales et des conditions aux frontières, décrivant les interactions du domaine étudié avec son environnement.

1.3. Modèle numérique :

Les principales caractéristiques des modèles numériques, permettant la résolution des problèmes d'écoulement et de transport, en milieu poreux saturé et non saturé, sont les suivantes :

- La solution est trouvée en des points discrets du domaine spatio-temporel.
- Les équations aux dérivées partielles sont remplacées par un système d'équations algébriques, écrites en fonction des variables d'état, comme inconnues.
- Le nombre d'équations à résoudre simultanément et à de multiples reprises dans le système est souvent très important, il faut donc avoir à sa disposition un programme informatique (code) qui soit efficient à cette fin.

1.4. Vérification du code :

Les méthodes de résolution induisent toujours des erreurs numériques, en relation avec la discrétisation spatio-temporelle choisie. En général, ces erreurs peuvent être réduites de

façon significative par une discrétisation adéquate, de manière à ce qu'elles soient négligeables, par rapport aux autres approximations. Il faut également contrôler la qualité des réponses fournies par le modèle numérique sur différents problèmes classiques, résolus par d'autres méthodes (analytiques ou numériques). Le modèle numérique doit en quelque sorte passer de façon positive tous les tests d'une procédure assurant sa qualité (BEAR, 1982) : c'est la vérification du code.

1.5. Validation du modèle :

Cette opération consiste à vérifier que les résultats du modèle correspondent à la réalité, il faut que malgré les simplifications, le modèle décrive de façon fiable la réalité. Pour des validations à l'échelle in situ, on intègre le plus souvent cette opération à la calibration.

1.6. Estimation des paramètres-calibration :

Dans la plus part des cas d'étude, la connaissance quantitative des propriétés de l'aquifère est le problème majeur, lors de l'élaboration d'un modèle à cause de l'insuffisante connaissance quantitative de la géologie, de l'hydrogéologie et des paramètres hydrodynamiques et hydro- dispersifs du milieu étudié. Dans le meilleur des cas, les valeurs des paramètres ne sont connues, que dans certaines zones locales et l'hydrogéologue doit fournir des estimations pour les autres zones.

1.7. Exploitation du modèle et simulations :

Après la calibration, le modèle est prêt à l'emploi pour des prévisions. Le modèle a la capacité de calculer des extrapolations, dont les résultats constituent une aide précieuse lorsque des décisions concernant des modifications des sollicitations de l'aquifère sont à prendre.

1.8. Limites de la modélisation :

La modélisation n'étant qu'une représentation schématique de la réalité, elle ne va pas sans poser quelques problèmes qu'il faut constamment garder en mémoire, afin de pouvoir interpréter des résultats de simulations. C'est pourquoi la communauté scientifique a formulé des recommandations, pour garantir un usage avisé de ces outils.

- ***Incertitudes conceptuelles :***

On distingue plusieurs causes d'incertitudes, liées à la structure du modèle : limites théoriques, simplifications théoriques, approximations numériques et discrétisation temporelle et spatiale. Sur le plan théorique, certains processus restent encore mal connus et ne sont pas pris en compte dans les modèles, à base physique. De plus, les lois physiques établies pour des milieux homogènes ne s'appliquent pas forcément aux milieux hétérogènes, rencontrés à l'échelle régionale.

La résolution des équations différentielles, dont on ne sait pas calculer de solutions analytiques s'effectue à l'aide des méthodes numériques diverses. Cependant, ces méthodes imposent très souvent de discrétiser les différentes dimensions dans lesquelles s'appliquent ces équations. Dans le domaine des sciences de la terre, on se place toujours dans un système à quatre dimensions (les trois dimensions de l'espace et celle du temps). Ces discrétisations ont pour conséquence directe de ne connaître les valeurs des variables calculées qu'en quelques points de l'espace et du temps. Se pose alors le problème de l'interpolation de la valeur de la variable, en tout point de l'espace et du temps.

Plus les discrétisations de l'espace et du temps sont grossières, plus les erreurs de calcul risquent d'être importantes.

- ***Disponibilité des données et incertitudes :***

En supposant acceptables les approximations liées à la structure des modèles, la modélisation se heurte souvent à un problème de disponibilité des données et aux incertitudes sur ces données. Les méthodes de mesures ponctuelles à des échelles spatiales beaucoup plus fines que la discrétisation choisie posent le problème de la comparaison entre les résultats simulés, sur une maille et ceux observés, en un point.

- ***Calage :***

Certains paramètres, impossibles à mesurer à l'échelle du modèle ou à évaluer, font l'objet d'une estimation par calage. Il s'agit de rechercher la valeur optimale de ces paramètres, en fonction de critères choisis. Le choix de la période de référence est capital. On préférera, dans la mesure du possible, des périodes très contrastées qui permettront de juger de la pertinence des paramètres calés, en fonction de la représentation par le modèle d'événements, très différents.

La qualité de la simulation sur cette période est généralement évaluée, en mesurant les écarts entre les séries simulées et observées, l'ajustement des paramètres consistant à rechercher l'écart minimum.

- ***Validation et prédiction :***

Les modèles calés, qui ne constituent qu'une représentation simplifiée de la réalité, doivent être validés, en utilisant un jeu de données différent de celui de la phase de calage. Cette étape permet de s'assurer que la représentation faite par le modèle est conforme à la réalité. En effet, une tentative de validation ne permet pas de conclure qu'un modèle est une représentation exacte de la réalité dans la mesure où un nouveau jeu de données peut invalider la théorie, en vigueur.

Ainsi, les modèles offrent des possibilités d'exploration accrue et ils sont d'ailleurs bien souvent développés dans ce but, mais nécessitent une grande prudence dans leur utilisation. En effet, la phase de calage impose une contrainte d'unité de temps, d'espace et d'action (DE MARSILY.G, 1981).

Ainsi, dès qu'un modèle est utilisé en prévision ou en extrapolation, en dehors des conditions pour lesquelles il a été validé, une réflexion doit être menée sur le choix des paramètres et la signification des résultats de simulation.

2. Organigramme récapitulant les étapes de la modélisation :

La figure suivante montre globalement les étapes d'une étude de modélisation :

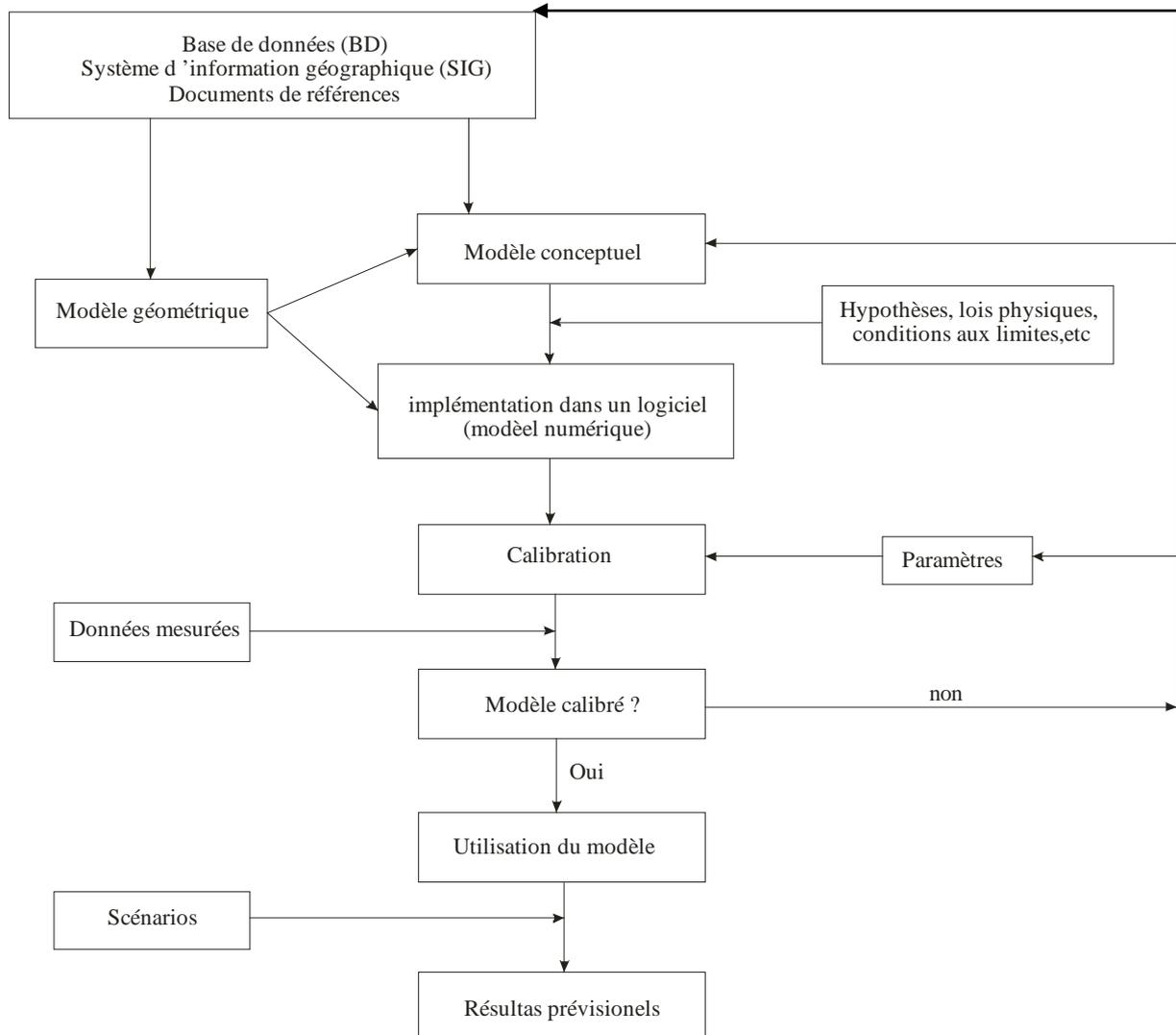


Figure.46 : Etapes d'une modélisation, par un code de calcul.

3. Formulation mathématique :

Les écoulements souterrains sont décrits par des équations, selon le régime d'écoulement, En générale la formule de la diffusivité est décrite par l'équation aux dérivées partielles :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (01)$$

Si on considère que le système est homogène et isotrope, l'équation (01) devient :

$$K \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (02)$$

□ **Écoulement permanent :*

On considère que tous les paramètres d'écoulement (charges, débits, vitesses, etc....) sont indépendants du temps (conditions fixes dans le temps), l'équation (02) devient :

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (03)$$

□ **Écoulement en régime transitoire:*

Il a été supposé que la charge hydraulique est faible par rapport la puissance de la nappe, l'équation (02) devient :

$$K \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (04)$$

Si on considère que les écoulements des eaux souterraines sont régis par la formule suivante :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} + Q \quad (05)$$

C'est une équation qui doit se résoudre pour chaque maille.

En régime permanent, si on considère que la charge hydraulique est constante dans le temps, ce qui implique: $(dh/dt)=0$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = Q \quad (06)$$

Techniques de modélisation :

Nous pouvons se voir obligé d'utiliser une solution numérique des équations de l'écoulement et/ou de transfert que l'on ne peut pas résoudre par les moyens analytiques, pour cela, deux méthodes numériques ont été proposées, basées sur la discrétisation du domaine d'étude en parcelles (mailles) de différentes formes et tailles.

Il existe deux principales méthodes qui sont :

- **Différences finies** : cette méthode est facile à comprendre et à programmer, elle convient très bien à la résolution de problèmes régionaux d'écoulement d'une nappe. En pratique elle est limitée à des mailles simples. Elle peut très bien représenter les hétérogénéités des propriétés du milieu. L'anisotropie doit être limitée aux directions parallèles, aux cotés des mailles.
- **Éléments finis** : cette méthode est moins facile à expliquer et beaucoup moins facile à programmer que la précédente. Un programme d'élément finis est peut être plus compliqué à utiliser et peut demander davantage de temps à l'ordinateur. Ceci, permet de décrire d'une manière beaucoup plus satisfaisante la forme des limites du milieu, ainsi que celle des hétérogénéités ou les fonctions source, ce qui rend cette méthode idéale pour résoudre les problèmes à limites mobiles.

Dans les deux cas, la méthode aboutit à un système d'équations linéaires, dont les inconnues sont les valeurs approchées de la fonction recherchée (la charge hydraulique, en l'occurrence) en un nombre donné de points (le centre de chaque maille, en l'occurrence). Nous exposerons ci-dessous, la méthode des différences finies, présentée par E. Ledoux, 1986 qui est la plus souvent utilisée en hydrogéologie, car elle nécessite moins de mémoire pour les ordinateurs. Cette méthode consiste à discrétiser le domaine en mailles carrées (Figure. 47).

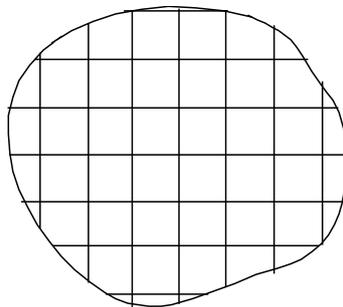


Figure.47: Discrétisation en mailles carrées.

L'équation (05) va être appliquée à chaque maille, où nous allons choisir pour approximation de la charge, une fonction H_i définie sur chaque maille i . Les calculs sont faits, en admettant que la valeur de la charge est attribuée au centre de la maille considérée.

Nous procéderons de la même manière pour tous les autres paramètres (T_i , S_i et Q_i). En admettant que les fonctions d'approximation satisfiront localement (c'est à dire au centre de chaque maille) à l'équation de diffusivité, nous obtiendrons un système d'équations linéaires définissant les valeurs H_i au centre de chaque maille.

Si l'on considère une maille i (Figure. 48), elle est entourée de quatre mailles que l'on peut nommer N(Nord), S(Sud), E(Est) et W(Ouest).

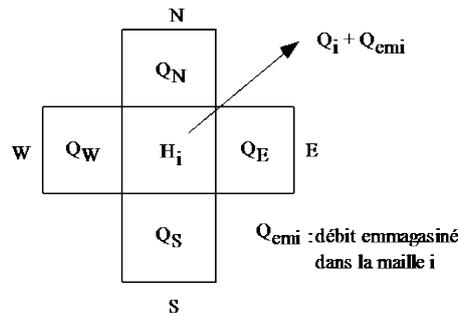


Figure.48 : Bilan des flux entrants sur la maille i .

D'après le principe de continuité qui implique la conservation de débit entrant algébriquement par les quatre limites de la maille i , nous avons :

$$Q_N + Q_S + Q_E + Q_W = Q_i + Q_{emi}$$

La loi de Darcy appliquée à la maille i nous donne :

$$Q_N = T_N \cdot a \cdot \frac{H_N - H_i}{a} = T_N \cdot (H_N - H_i)$$

T_N : transmissivités de l'aquifère, entre la maille i et la maille située au Nord.

H_i , H_N : approximations de la charge hydraulique, respectivement au centre de la maille i et de la maille N.

$$Q_{emi} = a^2 \cdot S_i \cdot \frac{\partial h}{\partial t}$$

Enfin l'équation d'état fournit l'expression du débit emmagasiné.

S_i : coefficient d'emmagasinement, définit au centre de la maille i .

$$T_N (H_N - H_i) + T_S (H_S - H_i) + T_E (H_E - H_i) + T_W (H_W - H_i) = Q_i + a^2 \cdot S_i \cdot \frac{\partial H_i}{\partial t}$$

En appliquant le même travail à chaque maille du modèle, nous

obtenons un système linéaire de n équations à n inconnues que nous pouvons résoudre. Nous simplifierons la présentation, en adoptant l'écriture matricielle suivante :

$$\overline{T} \cdot \mathbf{H} = \mathbf{Q} + a^2 \cdot \overline{S} \cdot \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}$$

4. Conditions initiales et conditions aux limites :

Afin de résoudre l'équation de diffusivité (8), il est nécessaire de définir les conditions initiales et les conditions aux limites du domaine discrétisé.

4.1. Conditions initiales :

Les conditions initiales sont données par la variable H (charge hydraulique) qui est supposée être connue, en tout point du domaine modélisé, à un temps de référence ($t = 0$).

4.2. Conditions aux limites :

Ces conditions contrôlent les règles d'échanges des flux entre le domaine modélisé et le milieu extérieur. La description de ces conditions fait partie de la définition de la structure du modèle et en conditionne par conséquent fortement la validité, car c'est effectivement à travers les limites que s'établit le bilan d'un aquifère; les relations entre les différentes zones de circulation sont d'un intérêt primordial, pour cerner le fonctionnement du système en entier. Les principaux types de conditions aux limites, couramment cités dans la bibliographie sont les suivants (DE MARSILY .G, 1981):

- Limite à potentiel imposé (condition de Dirichlet).
- Limite à flux imposé (condition de Neumann).
- Condition de Fourier.
- Condition de surface libre.

4.2.1. Limite à potentiel imposé :

Une limite est dite à potentiel imposé, si le long de cette limite la charge hydraulique est indépendante des conditions de circulation de la nappe. Cette charge peut varier dans l'espace et dans le temps.

Dans la réalité, ces limites sont matérialisées par des plans d'eau, des lacs, des canaux ou des rivières, en communication avec des nappes.

4.2.2. Limite à flux imposé :

Une limite est dite à flux imposé, si le long de cette limite le débit par unité de surface est constant et connu.

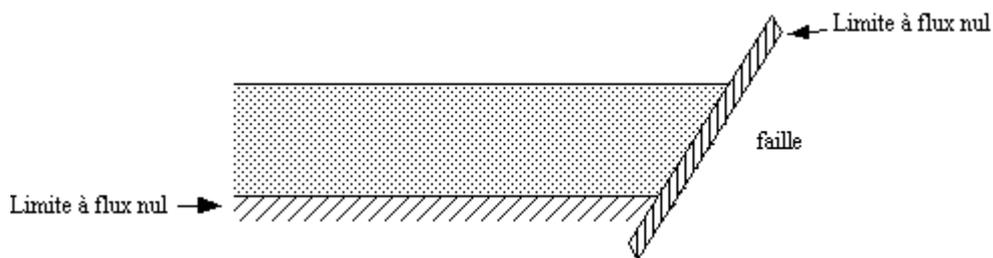
$$q_n = -K \cdot \frac{\partial h}{\partial n}$$

Cela revient à imposer un gradient de charge perpendiculaire à la limite considérée.

Deux cas se présentent :

- si :
$$-\frac{\partial h}{\partial n} = 0$$

On aura une **limite à flux nul** : ces limites sont représentées lorsqu'un aquifère est en contact avec des formations imperméables.



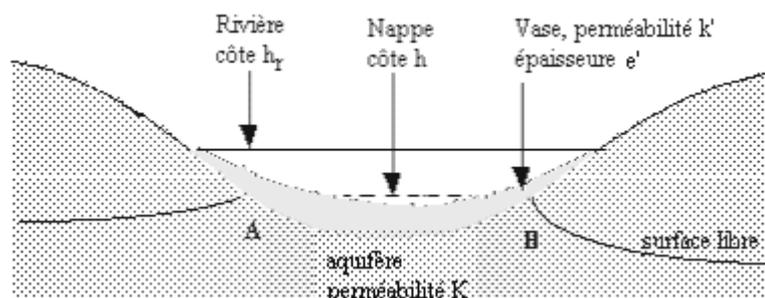
- et si :
$$-\frac{\partial h}{\partial n} \neq 0$$

On aura une **limite à flux imposé non nul** : Ces limites sont matérialisées par les limites du domaine ou par les ouvrages de captage.

4.2.3. Condition de Fourier :

Cette condition se présente lorsqu'une rivière, dont le fond est colmaté est en communication (drainage ou alimentation) avec une nappe libre. La condition de Fourier est alors définie par la conservation du flux à la traversée de l'interface AB et s'écrit :

$$-K \cdot \frac{\partial h}{\partial n} + \frac{K'}{e'} \cdot h = \frac{K'}{e'} \cdot h_r$$



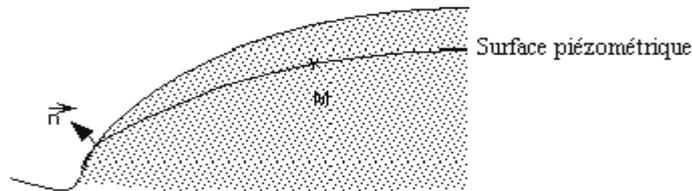
(G. DE MARSILY, 1981).

4.2.4. Condition de surface libre :

La condition de surface libre est une double condition imposée sur une surface :

- Condition de potentiel :

La pression atmosphérique s'exerce sur tous les points M de la surface libre considérée. Exprimée en charge, elle est prise par convention égale à 0 : $h = z$.



(G. DE MARSILY, 1981)

- Condition de flux :

* Si la nappe n'est pas alimentée par sa surface, nous avons :

$$\frac{\partial h}{\partial n} = 0$$

* Si la surface libre de la nappe est traversée par un flux (alimentation ou évaporation), ce flux est donnée par :

Où :
$$\frac{\partial h}{\partial n} = a$$

n : est le vecteur normal orienté vers l'extérieur.

a : flux, positif ou négatif, selon qu'il y ait alimentation ou évaporation.

VI.3 MODELISATION DE LA NAPPE DU MIO-PLIO-QUATERNAIRE DE LA VALLEE D'OUED RIGH

VI.3.1 LOGICIEL UTILISE :

L'outil utilisé pour la modélisation est le Visual Modflow, version 4.0.0121, réalisé par Nilson Guiguer et Thomas Franz, en 2003 et qui fonctionne sur une interface, en Visual Basic. Ce logiciel, a pour qualités premières d'être simple, modulaire et d'avoir été rendu fiable par une utilisation mondiale massive pour identifier les caractéristiques

hydrodynamiques des aquifères, en milieux poreux et le champs de propagation des polluants (ELANGO. L, 2005).

Le Visual Mod flow est un modèle à base physique, déterministe, capable de représenter des écoulements monophasiques tridimensionnels dans des systèmes multicouches. Il résout l'équation de la diffusivité aux dérivées partielles de l'écoulement des eaux souterraines, en milieu poreux par la méthode des différences finies (WANG.H, 2013).

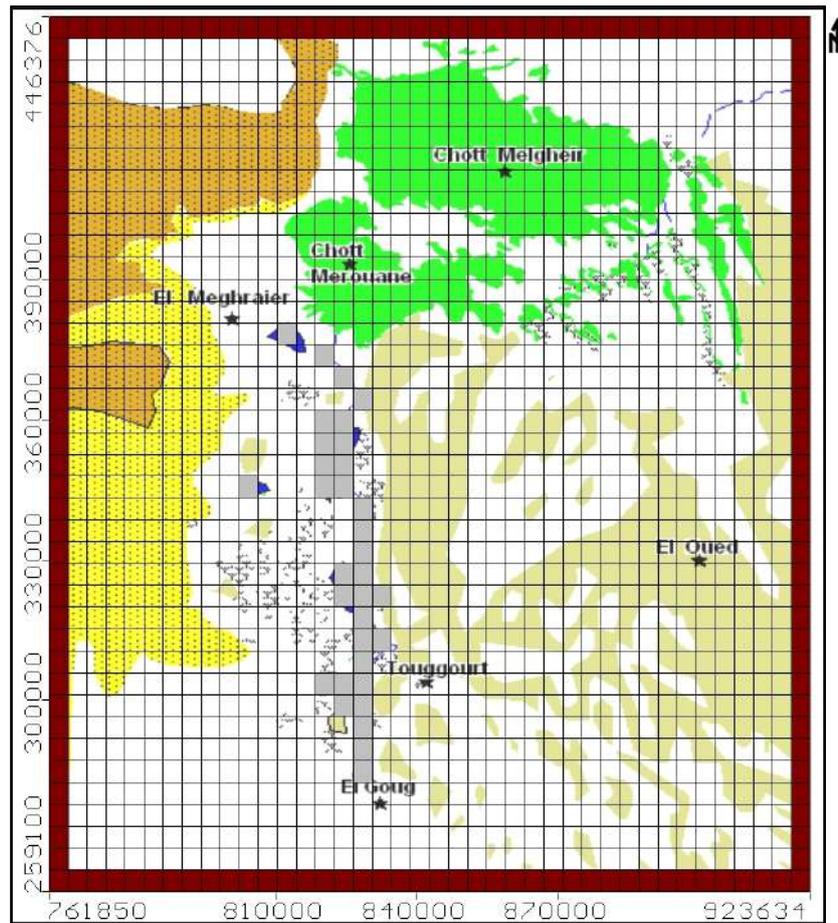
Pour ce faire, l'aquifère doit être discrétisé en mailles quadrangulaires et des conditions aux limites doivent être imposées (ELANGO.L, 2005). Le nombre et la taille des mailles dépendent de la précision attendue et de la nature des données sources (Nombre, distribution, qualité...).

VI.3.2 CONSTRUCTION DU MODELE :

Le modèle est obtenu par une division de l'aquifère, en deux couches et trois horizons, dont le premier horizon (couche supérieure) représente la topographie du domaine et le dernier représente l'allure du substratum. Les épaisseurs de la couche aquifère sont proportionnelles à la distance (Z) qui sépare le toit (topographie) du substratum.

Le domaine d'écoulement est discrétisé en mailles rectangulaires, de longueur 4.5Km et de largeur 04 Km. Le domaine aquifère du Mio-Plio-Quaternaire est découpé en 1600 mailles actives, représentant ainsi une superficie de 30300 Km², il peut être étudié comme monocouche.

Les limites du domaine sont présentées dans la carte 9. Les formations qui entourent la nappe du Mio-Plio-Quaternaire dans la vallée d'Oued Righ sont perméables à semi perméables, ce qui nous a permis de caractériser les limites de la zone d'étude par des charges imposées ; les lacs et le canal sont représentés par des drains.



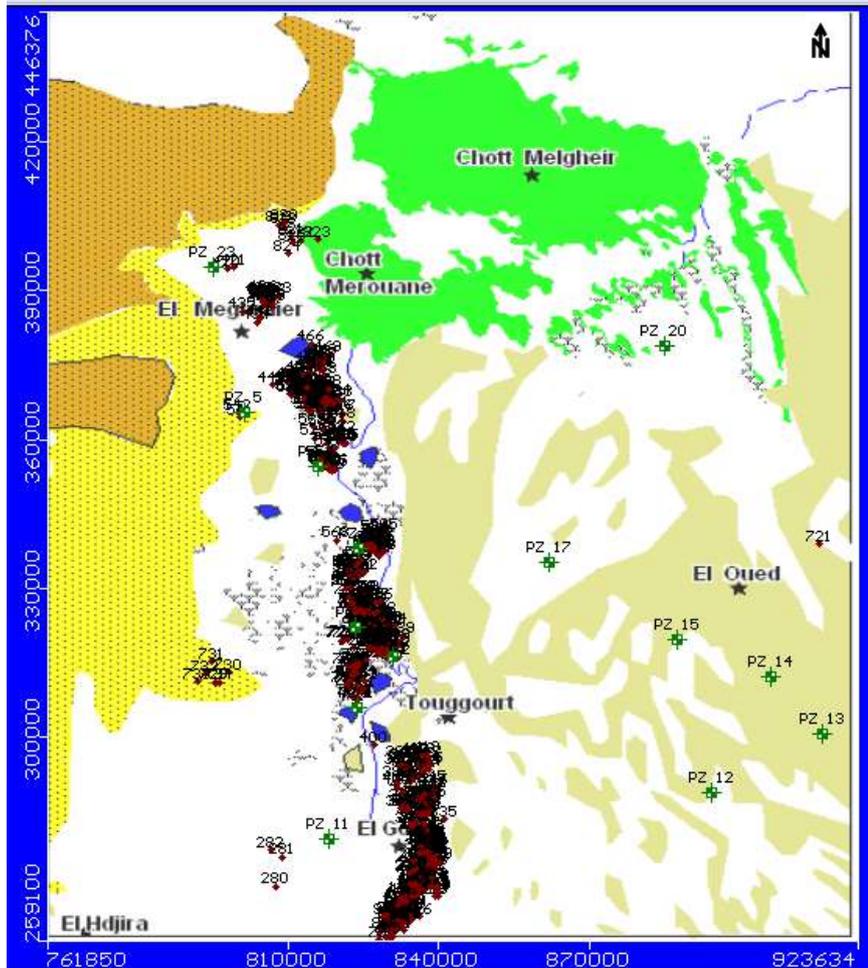
Légende :

- Potentiel imposé
- Flux imposé

Carte.9 : Conditions aux limites.

VI.3.3 CALAGE DU MODELE :

Nous avons réalisé un calage en régime permanent, puis en régime transitoire. L'état de référence qui a servi au calage du modèle en régime permanent est l'état piézométrique mesuré en 2008, les points d'observations piézométriques sont en nombre de 23 piézomètres, répartis sur toute la nappe (Carte.10). Les débits d'exploitation des forages (746 forages) sont fournis par l'A.N.R.H/Ouargla.(Tableau N, en annexes).



Légende :

-  Forage
-  Piézomètre

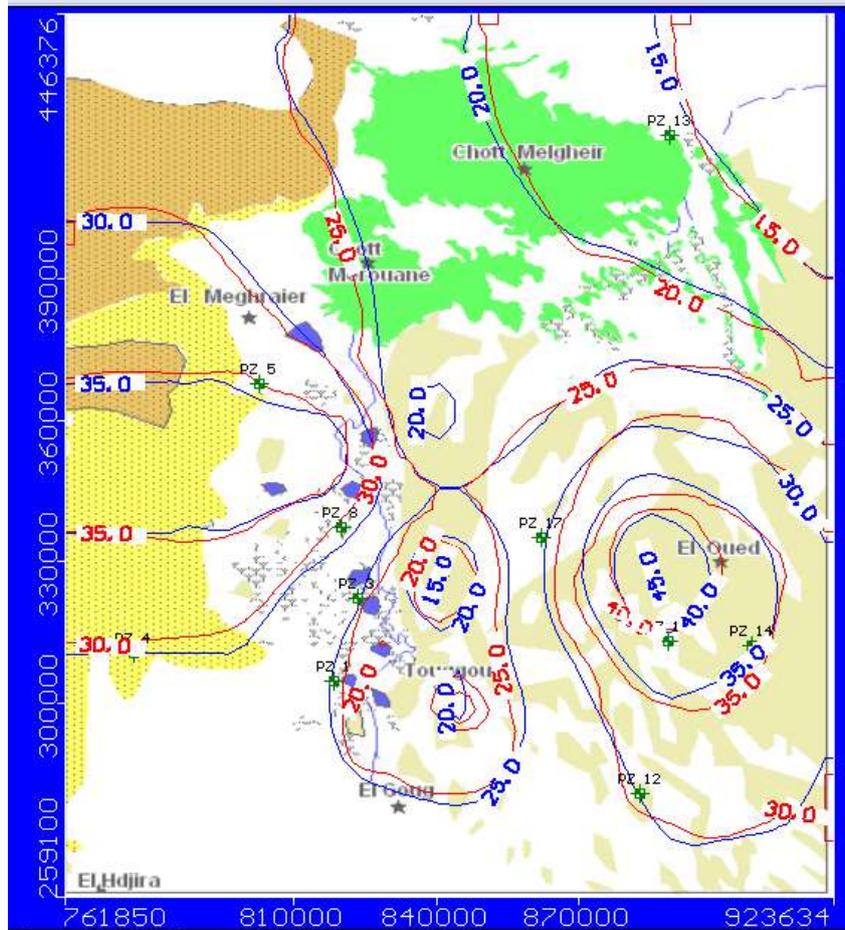
Carte.10 : Localisation des forages et piézomètres.

VI.3.4 RESULTATS ET DISCUSSIONS :

VI.3.4.1 LE REGIME PERMANENT:

1. Potentiels mesurés et potentiels calculés :

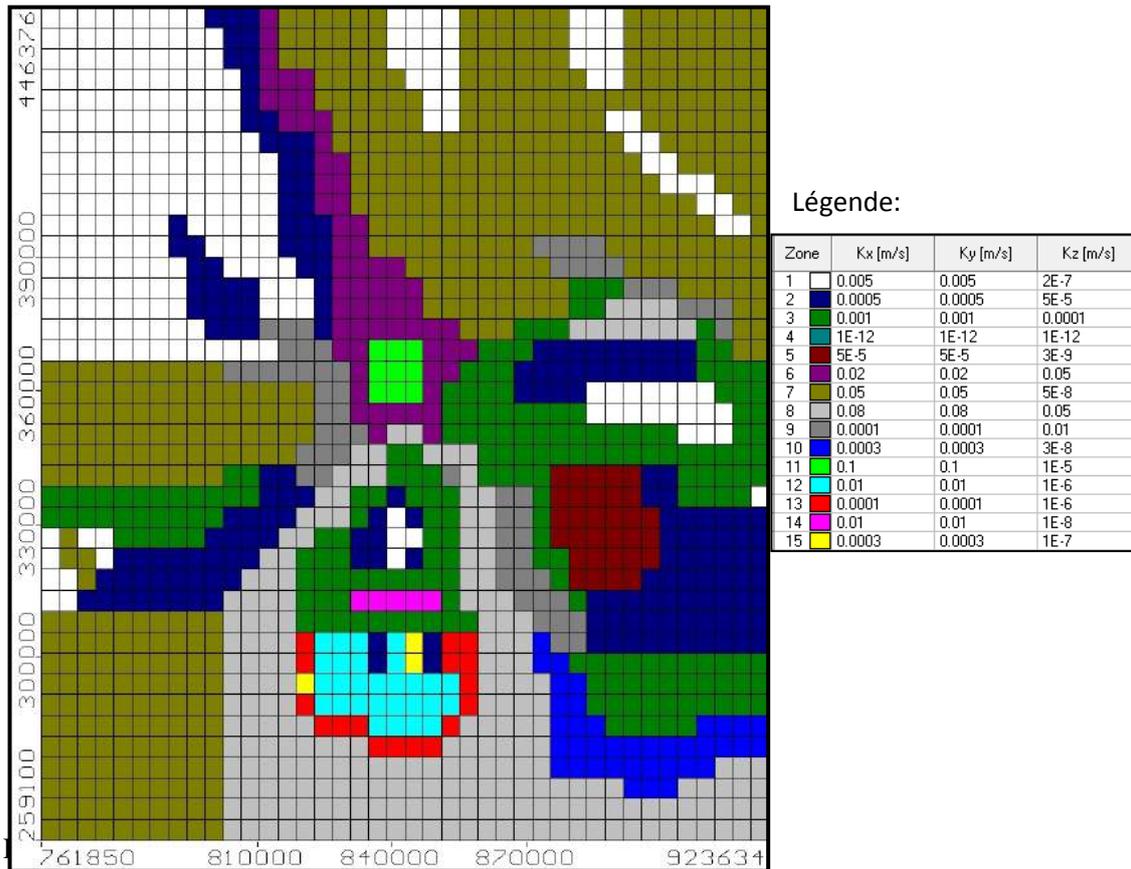
Les potentiels mesurés et simulés pour l'état de référence (2008) montrent que les écarts entre eux sont acceptables (Carte.11). Les perméabilités ajustées, en régime permanent reflètent l'hétérogénéité de l'aquifère (Figure.49).



Légende :



Carte. 11 : Calage en régime permanent (année 2008).



2. Bilan en eau, en régime permanent:

A la lumière de ce bilan (Tableau.36), on peut déduire que l'apport d'alimentation le plus important de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire est par les bordures. L'étude du bilan de la nappe donne des résultats satisfaisants, quant à l'équilibre entrées –sorties.

Tableau. 36: Bilan en eau calculé de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire pour le régime permanent 2008 (m³/jour).

Entrées	Volume	Sorties	Volume
Alimentation par les bordures	5324600	Partie Nord	9070580
La recharge	3745900		
TOTAL	9070500	TOTAL	9070580

3. Test de cohérence :

Les écarts entre les potentiels mesurés et calculés sont relativement bons, le coefficient de corrélation est de 0.971 (Figure.50).

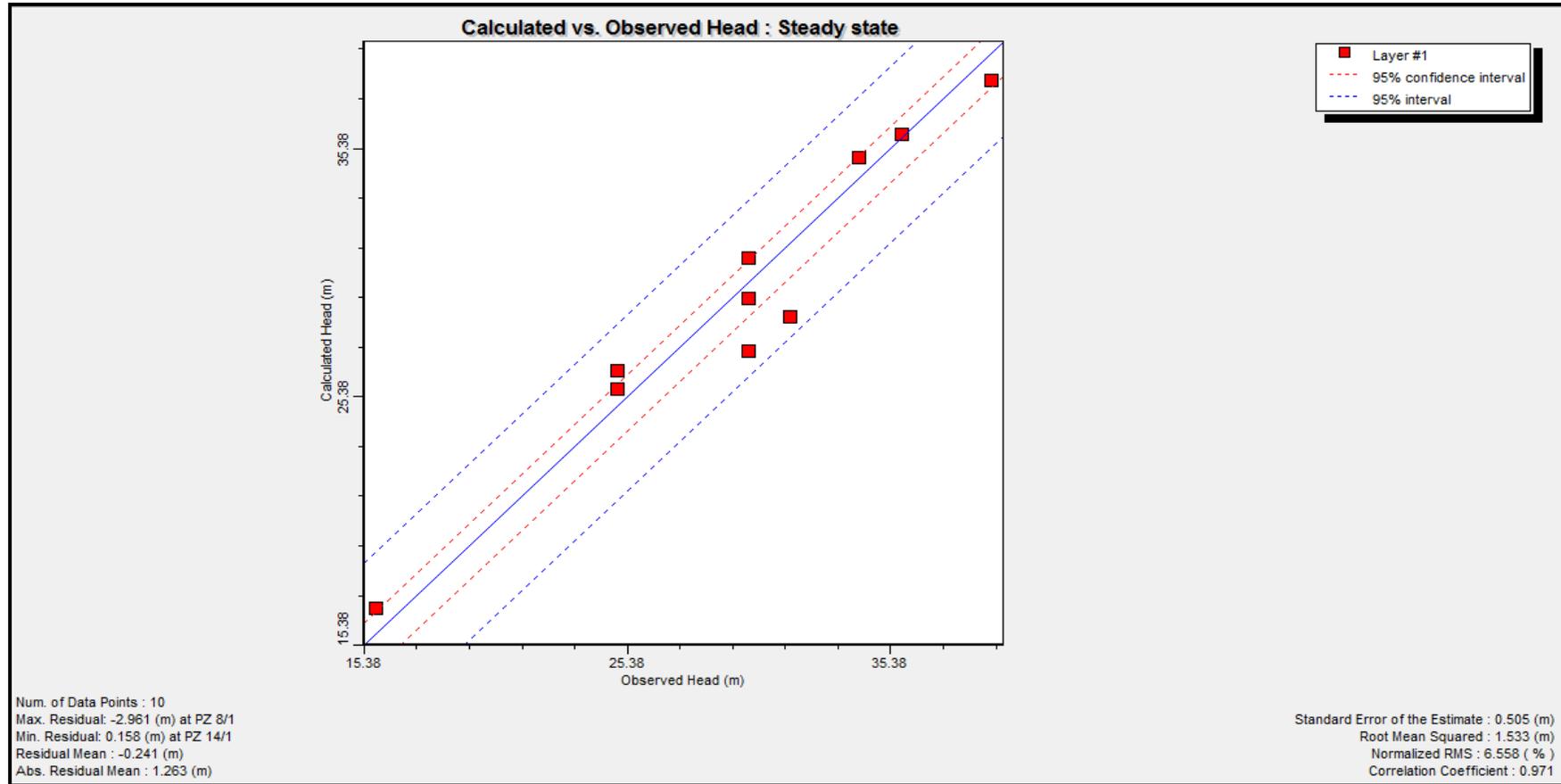
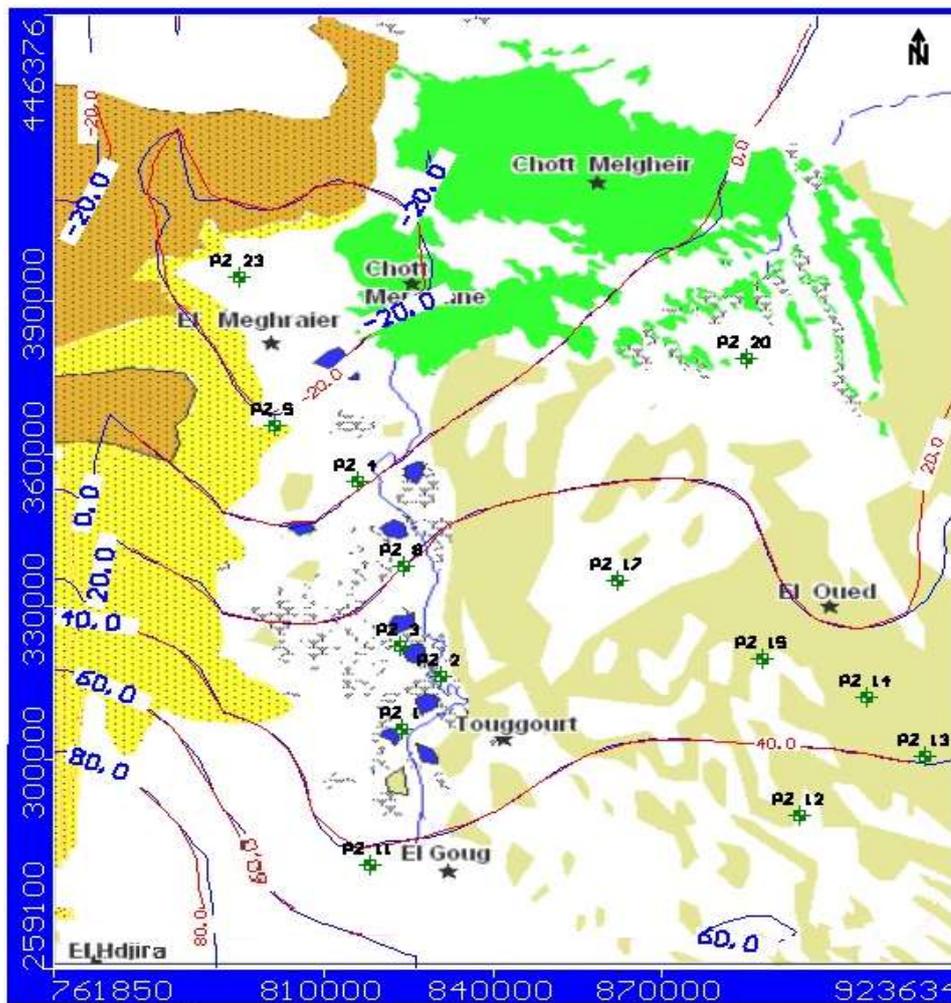


Figure.50: Corrélation entre les niveaux piézométriques mesurés et simulés, année 2008.

VI.3.4.2 LE REGIME TRANSITOIRE :

1. Potentiels mesurés et potentiels calculés :

Le calage des écoulements souterrains, en régime transitoire de la nappe consiste à reproduire, par les calculs un état piézométrique qui concorde avec la piézométrie initiale mesurée. La restitution de la carte piézométrique simulée de 2015 consiste à initialiser les calculs, avec l'état piézométrique simulé en régime permanent, influencé par les pompages et la variation de la recharge. Seulement, un jeu de la variation de la porosité efficace nous a permis de retrouver une bonne superposition entre les potentiels mesurés et calculés (Carte.12). Le calage en régime transitoire nous a permis de constater que la zone d'étude est caractérisée par une porosité efficace qui varie entre 0.34 et 0.40 dans la majeure partie, les faibles valeurs de la porosité (0.05) sont marquées dans la partie est-sud-est (Figure.51).



Légende :

— Carte piézométrique mesurée — Carte piézométrique simulée

Carte.12: Calage en régime Transitoire (année 2015).

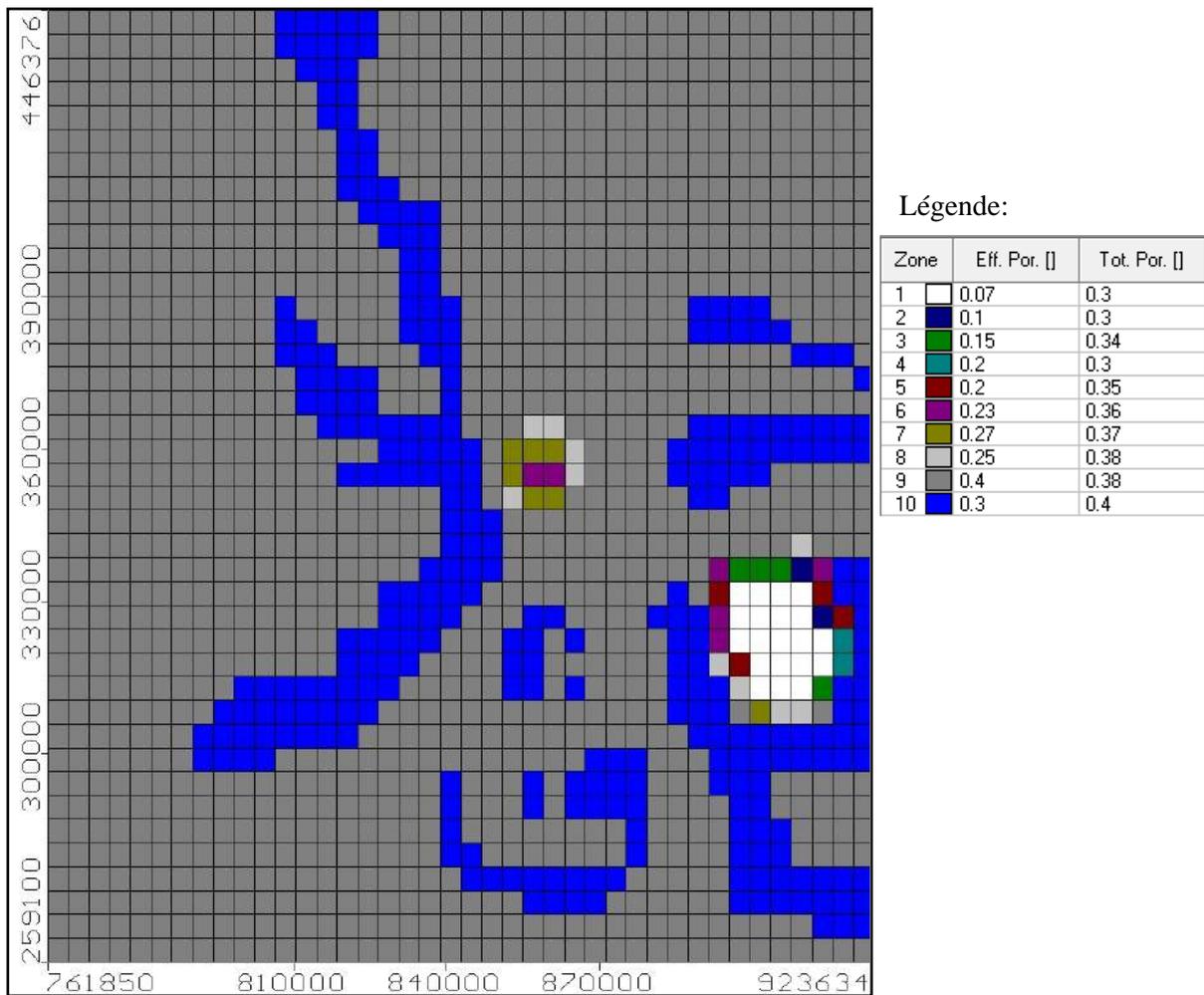


Figure.51: Répartition des porosités efficaces, après calage.

2. Bilan en eau, en régime transitoire:

Tableau 37 : Bilan en eau calculé de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire pour l'année 2015(m³/jour).

Entrées	Volume (m ³)	Sorties	Volume (m ³)
Alimentation par les bordures	2625271700	Partie Nord	2439500000
La recharge	3745900	Pompages	189530000
TOTAL	2629017600	TOTAL	2629030000

L'étude du bilan de la nappe (Tableau 37), donne des résultats satisfaisants, quant à l'équilibre entrées-sorties.

3. Test de cohérence :

Les écarts entre les potentiels mesurés et calculés sont relativement bons, le coefficient de corrélation est de 0.975 (Figure.52).

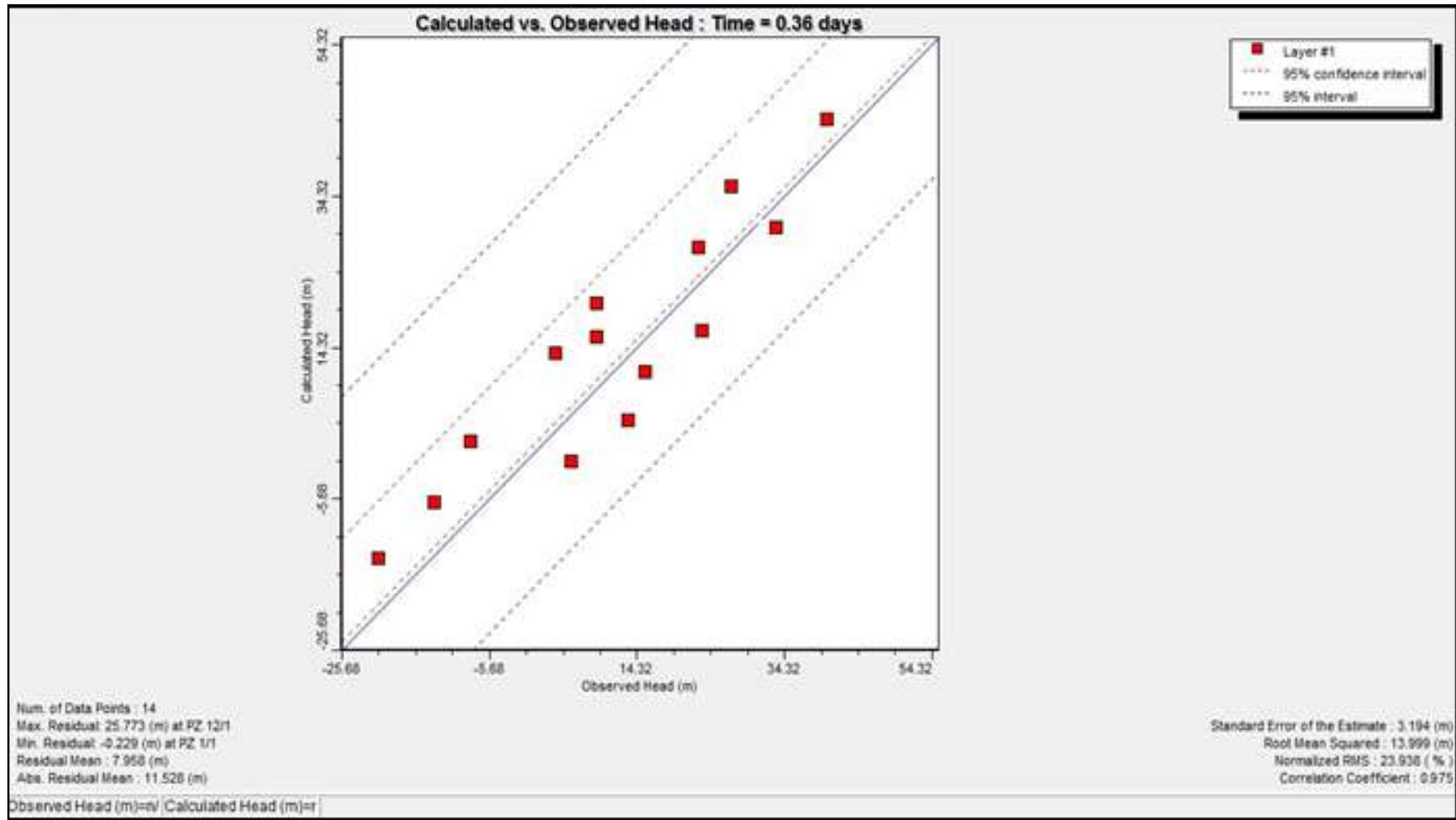
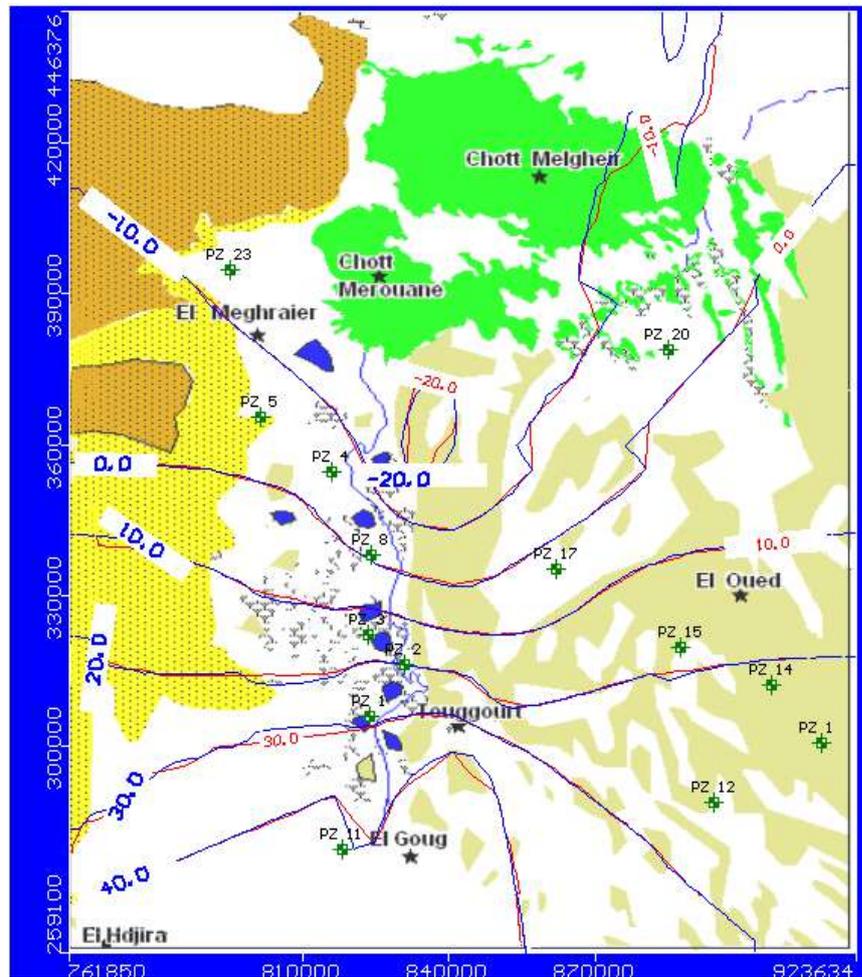


Figure.52 : Corrélation entre les niveaux piézométriques mesurés et simulés, année 2015.

VI.3.4.3 VALIDATION DU MODELE : « CAMPAGNE 2013 ».

La validation du modèle était en utilisant la campagne piézométrique du 2013, avec un pas de temps de six mois. Cette validation nous a permis de constater que la carte simulée coïncide avec celle mesurée (Carte.13).



Légende :

— Carte piézométrique mesurée — Carte piézométrique simulée

Carte. 13 : Validation du modèle (année 2013).

Test de cohérence :

Les écarts entre les charges mesurées et calculées sont bons, le coefficient de corrélation est de 0.988 (Figure.53)

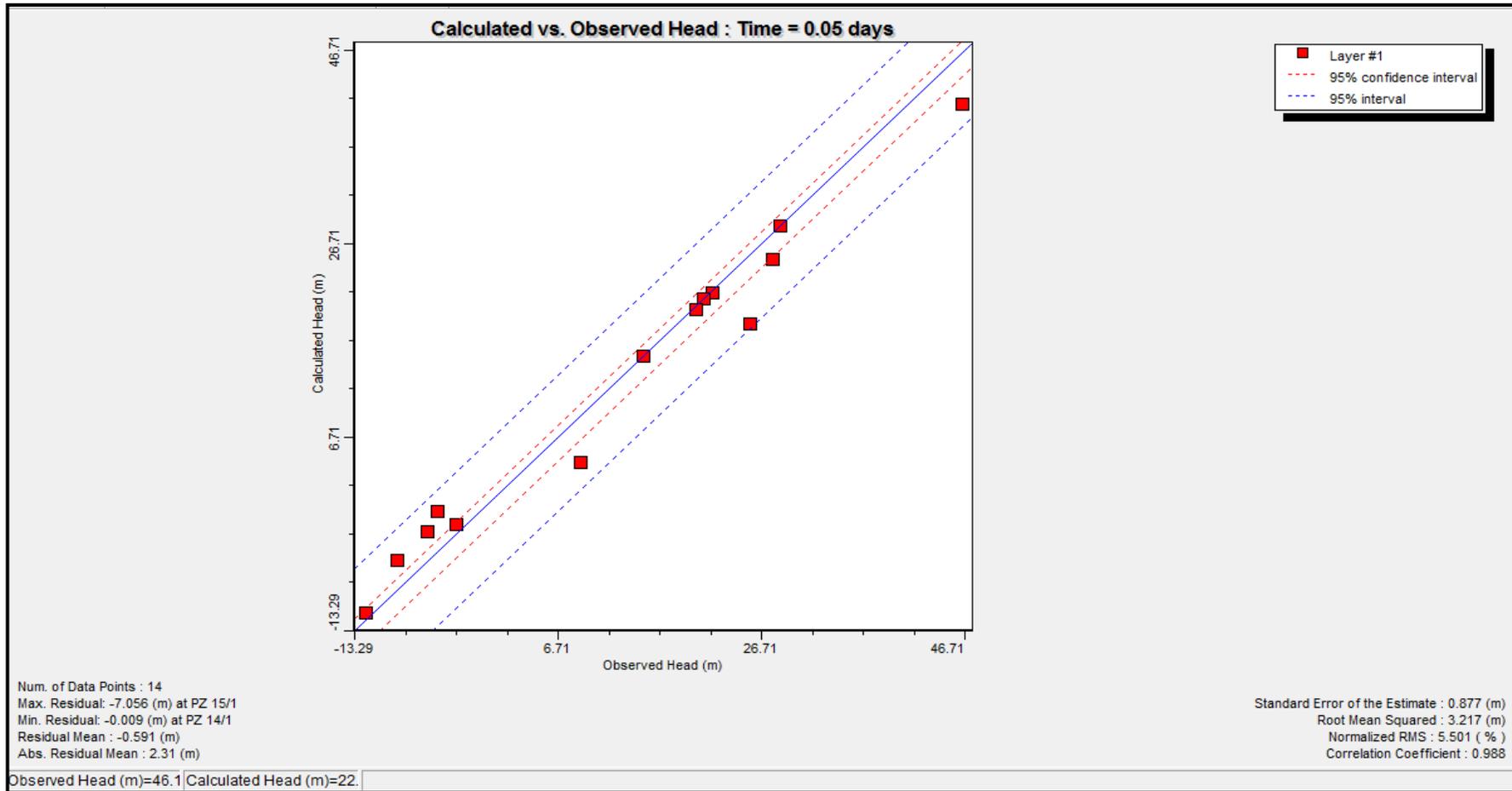


Figure.53 : Corrélation entre les niveaux piézométriques mesurés et simulés, année 2013.

VI.3.4.4 SCENARIO D'EXPLOITATION :

La nappe du Mio-Plio-Quaternaire est considérée comme une seule unité hydrogéologique. L'intercalation des formations semi-perméables entre les aquifères du Mio-Plio-Quaternaire ont favorisé à la fois, l'existence des niveaux statiques pour chaque aquifère, mais aussi des communications, par des infiltrations. L'irrigation irrégulière à partir des eaux du Complexe Terminal et du Continental intercalaire qui s'ajoute aux rejets des eaux usées favorisent la saturation de la nappe du Quaternaire caractérisée par une forte salinité et par la suite la remontée du niveau statique de cette dernière ainsi que l'apparition des lacs (figure 54).

L'augmentation de la salinité des eaux des nappes du Complexe Terminal (CT1, CT2), (7g/L en 2015/ANRH Ouargla) suite au contact avec la nappe sus-jacente du Quaternaire induira par le temps l'hypothèse de la réduction des débits d'exploitation de ces dernières, ce qui favorise l'augmentation de leurs niveaux statiques.

Afin d'étudier cette hypothèse, un scénario est élaboré par la réduction du débit d'exploitation à la moitié de l'actuel, afin de localiser les zones de remontées des eaux du CT1 et du CT2. Les résultats de ce scénario ont montré une remontée des eaux de la nappe au niveau du Chott sur une surface de 1.33Km², après une année de réduction du débit (Carte.14), puis se propagera pour atteindre une superficie de 1419.45Km², après cinq ans (Carte.15).

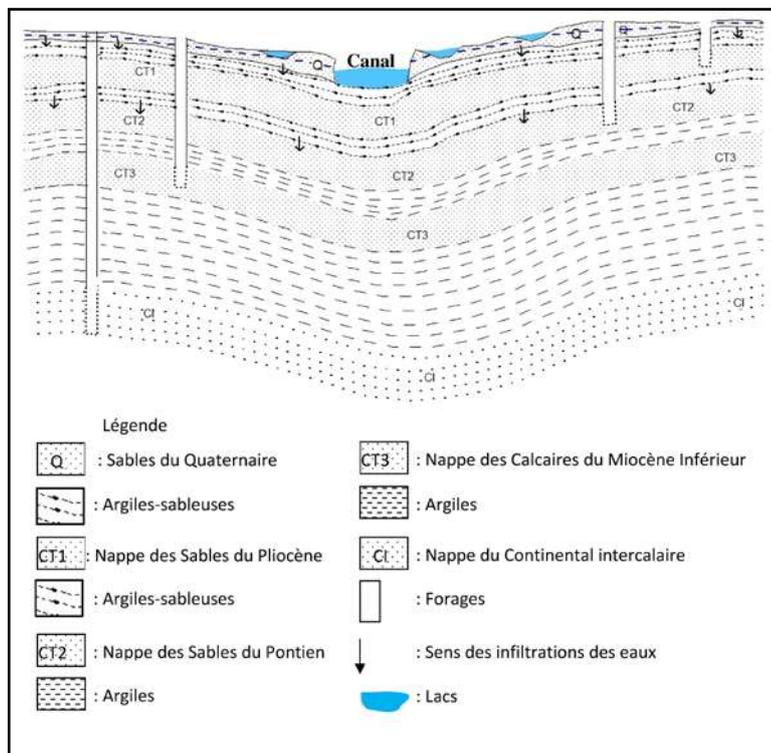
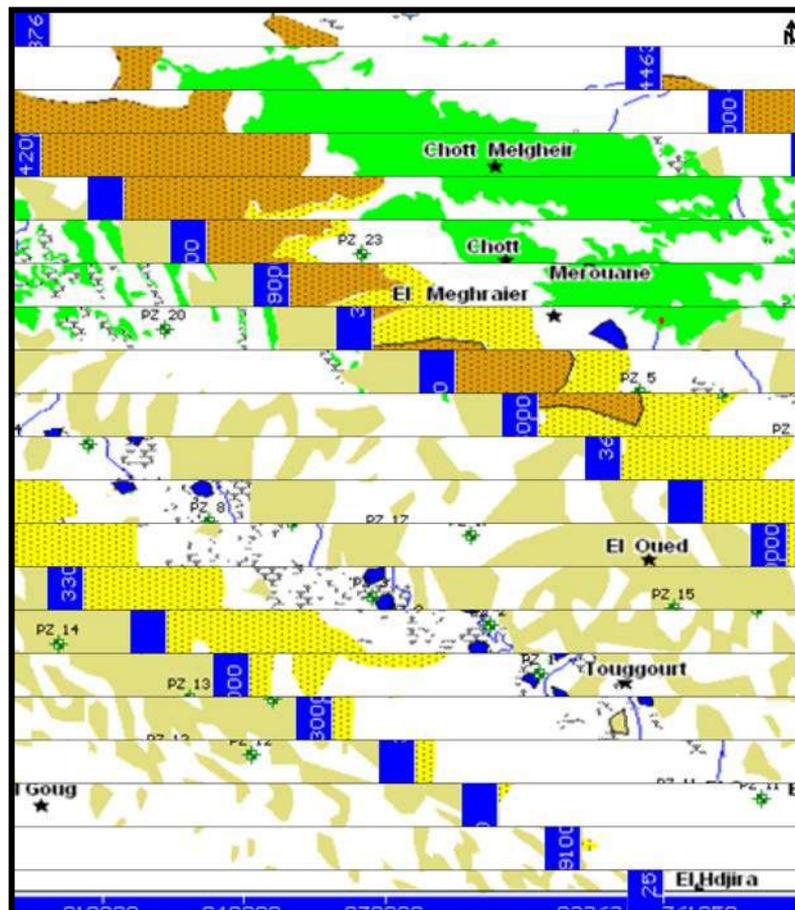
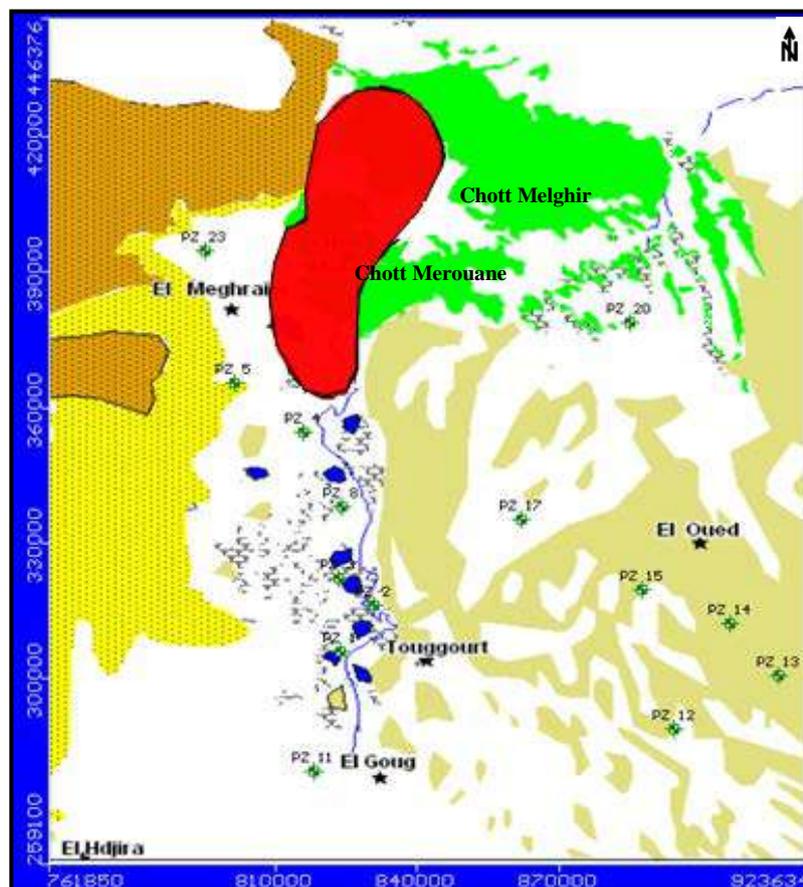


Figure.54 : Schéma représentatif des différentes nappes dans la vallée d'Oued Righ.



Carte. 14 : Zone de remontée des eaux du Mio- Plio-Quaternaire, après une année de réduction du débit d'exploitation, à la moitié.



Carte.15: Zone de remontée des eaux du Mio- Plio-Quaternaire, après cinq ans de réduction du débit d'exploitation, à la moitié.

VI.3.5 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS :

❖ Les besoins en eau dans la vallée d'Oued Righ sont assurés à partir des ressources souterraines, contenues dans les nappes du Complexe Terminal et du Continental Intercalaire. L'appel intensif aux ressources de ce dernier, l'insuffisance des réseaux d'évacuation des eaux usées et celles du drainage des eaux d'irrigation ont renforcé le phénomène écologique de la remontée des eaux dans la vallée.

❖ Le calage en régime permanent puis en régime transitoire, nous a permis de déduire une meilleure concordance entre les états piézométriques mesurés et simulés, en 2008, 2013 et 2015, ainsi que la répartition des paramètres hydrodynamiques dans la vallée: la perméabilité et la porosité efficace.

❖ Le scénario d'exploitation (réduction du débit d'exploitation à la moitié de l'actuel) a permis de localiser les zones de remontée des eaux de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire.

❖ Pour éviter tout contact entre la nappe du Mio-Plio-Quaternaire et les eaux usées déversées dans le Chott, des mesures doivent s'imposer, d'où la nécessité de la mise en place d'un plan d'aménagement hydro-agricole et d'une stratégie de gestion des eaux usées. On doit :

➤ Diminuer la recharge de cette nappe par les eaux d'irrigation provenant de la nappe du Continental Intercalaire et de la 3^{ème} nappe du Complexe Terminal (Sénonien et Eocène carbonatés). A cet effet, il faut prévoir une meilleure gestion, concernant le secteur d'agriculture, par la réutilisation des eaux épurées pour l'irrigation, l'utilisation de nouvelles techniques d'irrigation et l'amélioration du drainage dans les cultures, par pompage ou refoulement (évacuation).

➤ Réaliser des stations d'épuration pour chaque agglomération, afin de déverser une eau épurée dans le canal, ainsi que la surveillance des raccordements et l'entretien des réseaux d'assainissement.

❖ Afin de perfectionner ce modèle et pour diminuer les risques d'extension de ce phénomène sur l'environnement, qui constitue un pôle économique et touristique important, il est nécessaire d'étudier la fluctuation de la nappe dans la zone qui se situe à proximité du Chott Merouane, par un suivi périodique, à partir des piézomètres et des campagnes de surveillance, quantitatives et qualitatives des eaux.

Conclusion Générale

et

Recommandations

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

La vallée d'Oued Righ, qui représente un pôle agronomique et économique important, se situe au Sud- Est de l'Algérie, plus précisément au Nord- Est du Sahara, sur la limite nord du Grand Erg Oriental, et la bordure Sud du massif des Aurès. Administrativement, elle fait partie de deux wilayas : Ouargla et l'Oued, elle commence au Sud, par le village d'El Goug et se termine sur une distance de 150km, plus au Nord vers le village d'Oum-Thiour.

❖ La synthèse des données climatologiques nous a permis de distinguer que la région d'étude est caractérisée par un climat hyper- aride, de type saharien. Les précipitations moyennes annuelles sont de 63.34 mm et les températures moyennes annuelles atteignent 22.31°C ; Le mois le plus humide est Décembre, caractérisé par une forte humidité (62.05 %) et le mois le plus sec est Juillet, caractérisé par une faible humidité (29.44%).

Les résultats que nous disposons des mesures des débits du canal d'Oued Righ, au niveau des quatre stations : Ranou (0,72 m³/s), Sidi Slimane (1,95 m³/s), Tinedla amont (3,765 m³/s) et Boufeggoussa (4,31 m³/s) ont montré une croissance successive du débit, vers Chott Merouane.

❖ L'étude géologique à travers l'analyse litho-stratigraphique des forages disponibles a permis de déterminer les formations susceptibles d'être aquifères et leurs substratums, elles sont de bas en haut:

✚ 1^{er} Horizon (**nappe du Continental Intercalaire**): formé par une alternance d'argiles et de sables, avec présence de quelques anhydrites ou de grès à la base, d'âge Barrémien. Au milieu, il est calcaireux à calcaire-dolomitique avec présence de marnes au Nord de la vallée et sablo-gréseux à sablo-argileux, avec présence d'anhydrites au Sud, attribué à l'Aptien. Le sommet est représenté par un ensemble gréseux, avec passées d'argiles et de marnes et quelques passées de calcaires et d'anhydrites, au Sud de la vallée, d'âge Albien. Cet horizon qui définit la **nappe du Continental Intercalaire** est surmonté par d'épaisses formations *imperméables*.

✚ 2^{ème} Horizon (**nappe du Complexe Terminal : CT₃**): Est un ensemble calcaire-dolomitique à dolomitique, avec présence de quelques passées d'argiles, de marnes et de gypses, d'âge Sénonien et Eocène carbonatés. Cet horizon représente la 3^{ème} nappe du Complexe Terminal qui est séparée de la 2^{ème} nappe (CT₂), par une formation *imperméable*, d'âge Eocène moyen (lagunaire).

✚ 3^{ème} Horizon (**nappe du Complexe Terminal : CT₂**) : d'âge Pontien. Au Sud de la vallée, il est formé par un ensemble sableux à sablo-gréseux, avec quelques passées d'argiles et de calcaires lacustres, vers la base. Tandis qu'au Nord, cette formation devient une alternance de sables et d'argiles, avec passées d'argiles et de calcaires, vers la base. La nappe du Pontien est surmontée par une formation *semi-perméable* qui la sépare de la 1^{ère} nappe (CT₁).

✚ 4^{ème} Horizon (**nappe du Complexe Terminal : CT₁**) : d'âge Pliocène. C'est une formation érodée dans la partie sud de la vallée, son apparition est représentée par une alternance d'argiles et de sables fins argileux, avec passées de grès à ciment calcaire, au Nord de la vallée.

La 1^{ère} nappe est surmontée par une formation *semi-perméable* du Quaternaire.

✚ 5^{ème} Horizon (**nappe du Quaternaire**) : constitué par des sables et une alternance de sables et d'argiles au Nord de la vallée. L'analyse litho-stratigraphique des forages réalisés dans la région d'étude nous a permis de constater la disparition du Quaternaire dans la partie sud et centre de la vallée.

❖ Du point de vue hydrogéologique, la 2^{ème} et la 1^{ère} nappe du Complexe Terminal ainsi que celle du Quaternaire forment une seule unité hydrogéologique, séparée par des formations semi-perméables, nommée nappe du « **Mio-Plio-Quaternaire** » de la vallée d'Oued Righ.

Les cartes piézométriques de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire ont montré que le sens général d'écoulement est orienté vers l'exutoire naturel, Chott Merouane.

❖ L'étude qualitative des eaux des forages, fournis par l'ANRH/Ouargla a montré qu'elles présentent des teneurs élevées en tous les paramètres analysés, qui dépassent largement les normes de potabilité algériennes. Cela présente un réel danger pour la santé de la population de la région.

Du point de vue irrigation, le diagramme de Riverside a montré que les eaux sont médiocres à mauvaises.

❖ La cartographie de la vulnérabilité intrinsèque de l'aquifère du Mio-Plio-Quaternaire, par les méthodes DRASTIC et GOD montre une tendance de vulnérabilité moyenne par la méthode DRASTIC (74.30%) et faible par celle de GOD (70%).

La comparaison des deux cartes de vulnérabilité obtenues à partir des deux méthodes (DRASTIC et GOD) a montré que la première méthode (méthode DRASTIC) représente mieux la répartition des degrés de vulnérabilité à la pollution, au niveau de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire dans la vallée d'Oued Righ. Ces résultats sont relatifs aux terrains évalués, car ils ne présentent pas une vulnérabilité absolue, mais relative à celle des terrains avoisinants. Aussi, ces cartes de vulnérabilité n'utilisent que les caractéristiques du milieu, sans prendre en considération la nature du polluant. Elles sont spécifiques à des périodes, pour lesquelles les données sont valides.

❖ Le canal d'Oued Righ joue un rôle important dans la région, il protège l'environnement, en évacuant les eaux de drainage et d'assainissement. Malheureusement, ce canal connaît une dégradation de la qualité de ses eaux. L'étude qualitative des eaux des lacs indique la présence de certains paramètres indicateurs de pollution, due à l'activité anthropique, aux rejets des eaux usées et celles du drainage. La protection de ces écosystèmes fragiles contre la pollution est obligatoire, pour leur préservation et leur durabilité.

❖ Afin de localiser les zones de remontée de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire dans la vallée d'Oued Righ, nous avons établi un modèle mathématique, et nous avons aboutis aux résultats suivants :

➤ Le calage en régime permanent puis en régime transitoire, nous a permis de déduire une meilleure concordance entre les états piézométriques mesurés et simulés, en 2008 (coefficient de corrélation :0.971), 2013(coefficient de corrélation :0.988) et 2015(coefficient de corrélation :0.975), ainsi que la répartition des paramètres hydrodynamiques dans la vallée :la perméabilité et la porosité efficace.

➤ Le scénario d'exploitation (réduction du débit d'exploitation à la moitié de l'actuel) a permis de localiser les zones de remontée des eaux de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire.

RECOMMANDATIONS :

Les ressources en eau dans la vallée d'Oued Righ sont essentiellement constituées de ressources non renouvelables, représentées par les deux grands aquifères : le Complexe Terminal et le Continental Intercalaire. Malheureusement, la richesse en eau dans cette région du bas Sahara est accompagnée par différents problèmes, dont la plus part sont liés principalement à la mauvaise gestion de la ressource en eau.

❖ Afin de mieux préserver la qualité des eaux de la région étudiée, nous proposons quelques recommandations :

➤ L'implantation des stations d'épuration, afin d'épurer les eaux résiduaires, avant leur rejet dans le canal. Ce dernier joue un rôle très indispensable dans la région, il protège l'environnement, en évacuant les eaux de drainage et d'assainissement. Actuellement, ce canal collecteur tend vers une dégradation importante, à cause de plusieurs phénomènes, la protection durable de ce canal nécessite :

- La cimentation des berges dans certaines parties du canal, qui sont presque détruites par l'érosion ou par la turbulence de l'eau.
- La lutte contre la pollution, soit eaux usées ou déchets solides rejetés dans le canal.
- Effectuer des mesures hydrologiques régulières, afin de voir l'évolution des volumes des rejets dans ce canal, ainsi que des analyses physico-chimiques pour contrôler l'état de ses eaux.

➤ Assurer un réseau de drainage des eaux d'irrigation ou évacuer ces eaux, loin du canal.

➤ Protéger les zones humides (ressources naturelles) contre la pollution, afin d'éviter la dégradation de leur qualité. Le réaménagement de ces zones et leur protection durable nécessitent :

- La prise en charge des rejets des eaux usées urbaines dans ces lacs et la sensibilisation des gens qui vivent à proximité et qui y déversent leurs déjections, ce qui provoque la pollution des eaux.

❖ Pour atténuer le contact entre la nappe du Mio-Plio-Quaternaire et les eaux usées déversées dans le Chott, des mesures doivent s'imposer, d'où la nécessité de la mise en place d'un plan d'aménagement hydro-agricole et d'une stratégie de gestion des eaux usées. On doit :

- Diminuer la recharge de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire par les eaux d'irrigation, provenant de la nappe du Continental Intercalaire et de la nappe des calcaires du Sénonien et de l'Eocène (CT3). A cet effet, il faut prévoir une meilleure gestion, concernant le secteur d'agriculture, par la réutilisation des eaux épurées pour l'irrigation et l'amélioration du drainage dans les cultures, par pompage ou refoulement.
- Réaliser des stations d'épuration pour les localités limitrophes du canal, ainsi que la surveillance et l'entretien des réseaux d'assainissement.
- Sensibilisation des populations à l'économie de l'eau.
- Penser à l'adoucissement de l'eau dans les régions à forte salinité.
- Faire un suivi des analyses physico- chimiques (des eaux souterraines, du canal et des zones humides) surtout les paramètres indicateurs de pollution.
- ❖ Afin de perfectionner ce modèle et pour diminuer les risques d'extension de ce phénomène sur l'environnement, qui constitue un pôle économique et touristique important, il est nécessaire d'étudier la fluctuation de la nappe dans la zone qui se situe à proximité du Chott Merouane, par un suivi périodique à partir des piézomètres et des campagnes de surveillance, quantitatives et qualitatives des eaux.

Références
Bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

- ALLER. L, BENNETT. T, LEHR .J.H, PETTY .R.J & HACKETT.G, (1987): DRASTIC a standardised system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. National Water Well Association 1987 ; Report EPA-600/2-87-035, 622 p.
- ANRH, (2010) : Note sur l'exploitation de la ressource hydrique dans la vallée d'Oued Righ. Rapport. Agence Nationale des Ressources Hydriques, Ouargla.17 p.
- A.R.M.IN.E.S,(1975) :Modèles de gestion et de mise en valeur des nappes aquifères du Complexe Terminal, Oued Righ-Souf-Ouargla. Rapport n°111, résultats des simulations. Ecole Nationale Supérieure de Paris, centre d'information géologique,110p.
- BALLAIS. JL, (2005) : Les villes sahariennes et les ressources en eau. In : La ville et le désert - Le Bas-Sahara algérien, Édit. Karthala, Paris, M. CÔTE édit., p. 73-93.
- BALLAIS.JL, (2010) : Des oueds mythiques aux rivières artificielles :l'hydrographie du Bas-Sahara algérien. Pub. Physio-Géo, Vol IV, pp.107-127.
- BEAR.J,(1970) :Hydraulics of groundwater,299 p.
- BEL. F & DERMAGNE. F,(1966) : Etude géologique du Continental Terminal, ANRH Alger, Algérie, 22p.
- BEL.F & CUCHE.D,(1969) : Mise au point des connaissances sur la nappe du Complexe Terminal, ERESS-Ouargla, Algérie, 320p.
- BESBES . M. & ZAMMOURI . M, (1988) : Extension en Libye du modèle du CI algéro- tunisien. Int. Conf. Comput. Methods and water resources, Rabat.
- BONNET.P,(1982) :Méthodologie des modèles de simulation en hydrogéologie. Thèse de doctorat.Université Pierre et Marie Curie, école polytechnique de Lorraine et BRGM, 270p.
- BONTOUX.J, (1993) : Introduction à l'étude des eaux douces (eaux naturelles, eaux usées, eaux de boisson), édition CEBEDOC,169 p.
- BOUCHAHM.N,CHAIB.W, DROUICHE.A, ZAHIF, HAMZAOUI.W, SALEMKOUR.N, FEKRAOUI.F & DJABRIL,(2013) :Caractérisation et cartographie des sites de remontée dans la région de l'Oued Righ,bas sahara algérien. Journal algérien des régions arides, N°13. CRSTRA, pp.78- 81.
- BOUDJEMA.A, HACINI.M, GUETTAIA.S, ZAHROUNA.A, BABA SY.M & BRINIS.N,(2014) : Modeling Groundwater Flow of the Mio-Pliocene Aquifer in the El-Outaya Plain, Biskra (Algeria).Publication. International Journal of Sciences :Basic and Applied Research.Vol 17 n°2,pp.1-14. <http://gssrr.org/index.php?journal=Journal Of Basic And Applied & page=article& op=view & path%5B%5D=2491>.
- BOUDJEMA.A, (2015) : Hydrogéologie, vulnérabilité et modélisation de la nappe du Mio-Pliocène d'El Outaya, Biskra, Sud- Est algérien. Thèse de doctorat .Université de Tlemcen, 143p.

- BOUZNAD .I.E, (2009) : Ressources en eau et essai de la gestion intégrée dans la vallée d'Oued Righ (Sahara septentrional algérien).Mémoire de Magister, Univ.Badji Mokhtar-Annaba, pp.85-91-92 ,Fig 35-36 et 41- 42.
- BRL ingénierie (Compagnie d'aménagement du Bas Rhône et du Languedoc), (1998b) Etude du Plan directeur général de développement des régions sahariennes. Modélisation du Continental Intercalaire. Rapport, ANRH, Alger, 30p.
- BRL ingénierie,(1998c) : Etude du Plan directeur général de développement des régions sahariennes. Modélisation du Complexe Terminal. Rapport, ANRH, Alger, Algérie,40 p.
- BUSSON. G, (1965) : Carte géologique du bassin Mésozoïque du Sahara Algéro-tunisien et de ses abords,1/200 000.
- BUSSON.G,(1970) : Le Mésozoïque saharien, 1^{ère} partie, Edition, Paris, Centre de recherches des zones arides, p118.
- CASTANY.G & MARGAT.J,(1977) :Dictionnaire français d'hydrogéologie. Edition BRGM,249 p.
- CASTANY.G, (1982) :Principes et méthodes d'hydrogéologie. Edition Dunod, 233p.
- DASSARGUES.A,(1995): Modèles mathématiques en hydrogéologie ,130p.
- DE MARSILY.G,(1981) :Hydrogéologie quantitative. Edition Masson, Paris ,215p.
- DJENNATI.K & DRISSI.A,(2015) :Contribution à l'étude des caractéristiques physico-chimiques des eaux de quelques zones humides de la région d'El Oued. Mémoire de Master. Université d'Ouargla,61p.
- DUBIEF .J, (1953) : Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara. Institut de Météorologie et de Physique du Globe de l'Algérie ; Service des Etudes Scientifiques ; Alger, Algérie, 451p.
- DUBOST D, 1992. Ecologie, aménagement et développement agricole des oasis algériennes. CRSTRA , 423p.
- ELANGO. L, (2005): Numerical Simulation of Groundwater Flow and Solute transport. Department of Geology Anna University. India,244p.
- ERESS, (1972b) : Nappe du Continental intercalaire. Plaquette 2. OSS, Tunis ; Tunisie, 46p.
- ERESS, (1972c) : Nappe du Complexe terminal. Plaquette 3, OSS, Tunis ; Tunisie, 59p.
- FLANDRIN.M.J,(1951) : Carte géologique de l'Algérie, 1/500 000.

- FOSTER SSD, (1987): Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: van Duijvenbooden W, van Wae-geningh HG, eds. Vulnerability of soil and groundwater to pollutants. Proceedings and Information No. 38 of the International Conference held in the Netherlands. The Hague : TNO Committee on Hydrological Research.
- GEOPETROLE ,(1964) : Etude analogique de la nappe du Continental Intercalaire saharien, pour la Mise en valeur sous-sol saharien. Direction Générale des Ressources en Eau, Tunis.
- GOUAIDIA. L, BOUDOUKHA. A, DJABRI. L & GUEFAIFIA .O, (2011) : Evaluation de la vulnérabilité d'une nappe en milieu semi-aride et comparaison des méthodes appliquées: cas de la nappe de Meskiana (Est algérien). Sécheresse vol. 22, n1 ,35-42p.
- HACINI.M. (2006) : Géochimie des sels et des saumures du chott Merouane et calcul des vitesses de précipitation de quelques minéraux évaporitiques. Thèse de doctorat d'état. Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie,190p.
- KHADRAOUI.A. (2006) : Eaux et sols en Algérie : Gestion et impact sur l'environnement. Recueil de communications, 392p.
- LEDOUX.E,(1980): Modélisation intégrée des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique.Thèse de doctorat.ENSMP,Paris,236p.
- MARGAT J. & SAAD K. F. (1984) : Les nappes souterraines profondes : des mines d'eau sous les déserts Unesco ; Nature et Ressources, Vol. XX, n°2.
- MOULAY LAKBIRE.Z & YAHIAOUI.Z,(2015) :Etude hydrogéologique et hydrochimique des eaux de la région d'El Oued, Sud-Est algérien. Mémoire de Master. Université de Tlemcen,110p.
- MURAT. V, MARTEL. R, MICHAUD .Y & THERRIEN. R, (2000) : Etude comparative des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des aquifères à la pollution: Application aux aquifères granulaires du Piémont Laurentin, Québec, AIH-CNC et SCG, 2000, 411-418p.
- MURAT.V, PARADIS.D, SAVARD .M.M, NASTEV .M, BOURQUE. E & HAMEL. A, (2003) : Vulnérabilité à la pollution des aquifères fracturés du sud-ouest du Québec : évaluation par les méthodes DRASTIC et GOD. Ressources naturelles, Canada. Québec: Commission géologique du Canada. <http://dsp.psd.pwgsc.gc.ca/Collection/GSC-CGC/M44-2003/Articles/d03.pdf> ; 14p.
- OSS,(2003) : Système Aquifère du Sahara Septentrional. Volume 4 : Modèle Mathématique. Projet SASS ; Rapport interne. Annexes. Tunis, Tunisie. 229p.
- OUELD BABA SY .M, (2005) : Recharge et paléo-recharge du système aquifère du Sahara septentrional, région Algérie, Tunisie et la Lybie. Thèse de doctorat d'état. Université El Manar, Tunisie.261p.
- PDGDRS² « Plan Directeur Général de Développement des Régions Sahariennes », (2002) :Ressources en eau, connaissance d'ensemble. Rapport, 98 p.

- RODIER. J,(2009) : L'analyse de l'eau. 9^{ème} Edition , Dunod, Paris, VII, 1511p.
- ROGNON.P,(1994): Biographie d'un désert. Sahara. Édition, L'Harmattan, Paris, 350 p.
- SAYAH LEMBAREK.M ,(2008) : Etude hydraulique du canal oued Righ : Détermination des caractéristiques hydrauliques. Thèse de Magister. Université Kasdi Merbah, Ouargla, pp.33, Photo II.4.
- SOGREAH, (1971): Participation à la mise en valeur de l'Oued Righ, Etude agro-pédologique, Rapport,poly MTPC,Alger,36p.
- WANG.H, (2013): Modeling the Impact of Soil and Water Conservation on Surface and Ground Water Based on the SCS and Visual Modflow. Published online www.plosone.org, Volume 8, Issue 11, e79103.

Annexes

Tableau (A): Températures moyennes mensuelles à la station de Touggourt (°C).

Année-Mois	Jan.	Fév.	Mars.	Avr.	Mai.	Jun.	Juil.	Août.	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
1975	9.2	11.7	15.9	22.8	25.3	31.4	35.1	33.8	30.4	21.4	14.4	12.8
1976	10.1	13.7	14.7	21.2	25.6	29.8	34.4	32.9	29.1	22.6	14	13.5
1977	13.1	16.8	19.3	22.7	24.9	31.4	36.4	32.5	29.1	23.4	18	13
1978	10.8	18.9	17.8	22.1	26.5	31.8	34.3	31.9	29.6	20.1	14.6	14.6
1979	15	12.5	18.9	20.4	25.5	31.4	33.3	36.1	26.2	26.6	14.5	12.1
1980	12.1	14.2	17.7	20	25.4	31.6	33.4	34.2	30	20.5	17.3	8.7
1981	7.9	10.2	18.9	22.8	27.1	31.6	31.4	30.1	28.1	23.3	16.6	14.9
1982	12.5	14.3	15.9	20.9	25.9	35	37.4	35.4	30	23.9	16.9	11.4
1983	9.3	12.6	17.3	23.6	28	32.2	35.6	35.3	29.4	23.3	18.9	11.3
1984	11.5	13	16.7	22.7	26.4	31	33.8	33.7	29.5	22.1	16.7	10.2
1985	9.6	15.2	14.6	21.8	24.9	31.8	35.1	34.1	29.4	22.8	19.1	12.4
1986	10.2	13	15	19.5	26.5	29.8	34.3	35.5	30.5	24.6	15.7	11.9
1987	9.7	13	15.7	21.8	24.8	31.6	33.9	34	29.8	23.8	15.1	12.9
1988	12.1	13	16	21.8	28.2	30.4	34.7	33.5	26.8	23.7	16.6	9.9
1989	9.2	12.6	17.3	20.1	25.2	28.8	32.5	34.5	29.8	21.9	17.1	13.5
1990	11.5	14	16.3	19.9	23.4	31.8	32.9	31.4	31.9	24.2	16.1	10.1
1991	8.9	11.5	17.2	18.6	21.9	29.1	33.4	32.7	28.5	22.2	14	9.7
1992	8.6	11.4	15.2	19.5	24	28.9	31.2	32.9	29.3	22.9	15.8	11
1993	8.7	11.1	14.9	20.6	26.2	32.5	33.8	33.2	28.2	23.1	15.9	10.5
1994	11.3	14.5	16.9	18.6	27.9	31.2	33.6	33.8	28.7	22.1	16.5	10.5
1995	9.6	14.6	15.9	18.7	26.5	30.4	33.8	33	27.1	22.2	15.8	13.2
1996	12.9	11.8	16.4	20.6	25.5	28.4	32	34.5	27.2	20	16.1	13
1997	11.8	13.8	15.3	18.8	26.1	33.4	35.1	33.2	27.9	22.6	16.1	12.5
1998	10.7	13.3	15.9	21.7	25.4	31.1	33.8	33.4	30.3	20.4	15.1	9.9
1999	10.5	11.3	16.9	22.1	29.4	33.9	34.3	36.4	30.5	25.3	15.1	10.4
2000	7.9	12.5	17.6	22.9	28.7	30.8	34.2	32.9	29.6	21.4	16.4	12.6
2001	11.3	12.5	21.2	21.4	26.7	32.4	36.2	34.2	30	26.7	15.9	10.4
2002	9.2	13.5	18.5	22.3	26	31.6	34.6	33.8	28.8	22.5	17.1	12.9
2003	11.8	11.6	16.2	22.4	27.2	31.7	36.1	33.6	28.7	25.4	16.2	11
2004	10.9	14.3	17.6	21	23.7	30.4	33.1	35	27.8	24.8	14.3	11.7
2005	8.4	10.4	17.7	21.3	28.2	31.6	35.8	33.5	28.6	23.8	21.9	10.2
2006	8.7	12.3	18.5	24	28.5	32.1	34.4	33.7	27	24.4	16.2	12.1
2007	11.2	15	16.3	20.4	26.8	32.9	32.9	34.1	30.5	23.7	14.6	10.5
2008	10.9	12.9	17.6	23.1	27.4	30.5	35.9	34.2	30	23	14.8	10.5
2009	11.3	12.5	16.6	19.3	26	31.5	35.2	34.4	27.3	21.8	15.6	13.6
2010	12.2	15.9	18.8	22.5	24.9	32.1	34.7	34.4	28.6	22.2	16.3	12.3
2011	11.1	12	16.1	22.2	25.4	30.1	34.9	33.8	31.2	21.4	16.3	11.5
2012	10	9.7	16.6	21.5	27	34.3	36.3	34.7	29.3	24.4	18.3	10.8
2013	11.5	11.5	19.9	22.5	26.1	30.1	34.5	32.3	29.8	26.3	15.9	10.8
2014	11.9	14.4	16.3	22.5	27	30.6	34.5	34.6	31.6	24	18.2	11.4
2015	10.1	11.7	16.1	22.6	28.1	31.1	33.5	34.1	29.7	23.8	16.6	10.8

Tableau (B): Précipitations moyennes mensuelles à la station de Touggourt (mm).

Années Mois	Jan.	Fév.	Mars.	Avr.	Mai.	Jun.	Juil.	Août.	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
1975	50.2	12.9	0	39	0	0	0	0	1.4	0	12.7	1.9
1976	19.7	16.5	34.5	0	1.6	0	0	0	7	5.3	21.4	1
1977	16	0	11.8	0.6	5.6	0	0	0	0.3	0	10.4	8
1978	12.6	18	0	32	1.8	0	0	3	0	1.5	0	0
1979	7.9	22.8	1.8	3.5	0.8	0	0	0	4.8	8	2.3	0
1980	10.1	14	64.7	10	0	0	0	0	0	0	50.2	4
1981	0	1.02	5.08	6.1	0.51	0	0	0	0	0	6.6	1.02
1982	0	2.03	7.11	0	2.03	1.02	0	0	0	0.25	2.03	13.97
1983	0	0	5.59	0.51	0	0	0	0	0	0	6.09	1.53
1984	0	0	5.59	0.51	0	0	0	0	0	0	6.09	1.53
1985	57.6	0	1.02	3.05	1.53	0	0	0	0	0	0	6.1
1986	1.02	0.25	19.3	9.91	3.3	0	0	0	0.51	6.09	6.1	9.15
1987	4.06	1.27	1.53	0	2.04	5.207	2.03	0	0	13.97	0	1.53
1988	0	0	2.03	0	1.78	4.57	0	0	5.04	6.096	83.32	51.3
1989	1.52	0	0	2.04	0	0	0	0	0	0	5.33	0
1990	56.13	0	6.61	10.42	30.21	0	0	16.15	0	0	0	0
1991	0	0	12.96	0	20.06	2.03	0	0	4.58	16	5.59	0.25
1992	34.7	0	48.01	12.95	22.35	0	11.41	0	0	0	2.03	9.91
1993	0	14.99	6.1	0	1.02	0	0	1.02	62.7	32.7	17.27	4.06
1994	0	0	16.51	3.05	0.51	1.02	0	0	8.89	10.16	0	0
1995	3.05	0	0	0	0	0	0	0.51	29	1.02	2.04	25.15
1996	40.39	12.45	17.28	0	0	0	1.09	0	4.07	0.25	0	0
1997	0	0	0	18.03	0	1.02	0	0	14	0	12.95	8.13
1998	0	0	1.02	0	0	7.87	0	0	3.05	19.3	2.03	0
1999	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	35	1.25
2000	0	0	1.25	1.52	14.99	1.02	0	0	1.52	19.31	0	1.78
2001	4.07	0	2.04	1.02	0	0	0	0	5.08	1.02	2.03	27.17
2002	5.08	0	0	0	4.06	0	9.39	3.55	3.56	7.11	8.65	0
2003	18.28	4.57	11.94	0	0	0	0	5.08	0	12.7	4.06	4.07
2004	59.94	0.76	16.52	11.94	0	1.53	0	0	10.9	0	39.12	7.12
2005	0	3.56	0.76	0	0	3.05	0	6.1	6.1	3.05	0	2.03
2006	19.82	1.02	0	2.03	0	0	0	2.04	15	13.97	2.03	6.1
2007	0	1.02	0.76	40.13	0	0	0	20.07	0	1.02	0	11.18
2008	7.11	1.02	0	0	1.02	2.79	0	0	4.07	8.89	3.05	6.1
2009	89.66	0	25.66	11.94	5.33	0	0	0	23.4	1.02	0	1.02
2010	7.12	0.76	0	10.16	2.03	0	0	0	5.08	1.27	2.03	0
2011	1.02	0	7.87	2.04	6.09	0	0	2.03	0	6.1	0	0.51
2012	2.04	0	0	7.87	0	0	0	0	3.3	3.05	2.04	0
2013	3.56	1.53	0	16	0	0	0.51	8.13	0	0.25	6.1	19.31
2014	2.03	0	4.06	0	0.25	0.25	0	0	5.33	0	7.12	1.78
2015	0	29.97	12.19	0	0	0	0	1.02	8.13	1.02	0	0

Tableau (C): Vitesses moyennes mensuelles du vent à la station de Touggourt (Km/h).

	Jan.	Fév.	Mars.	Avr.	Mai.	Jun.	Juil.	Août.	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
1975	0	0	25.7	34	11.8	11.8	15.7	15.7	13.7	13.3	16	13.6
1976	14	16.7	17.9	20.5	17	16	14.6	15.7	13.8	20	13.7	11.3
1977	15.2	16.9	13.7	14.1	16.1	17.8	17.2	20.1	14.5	10.4	10.4	10
1978	11.5	12.1	13.9	17.4	20.3	18.5	13.4	9.4	11.1	5.2	6.7	7.6
1979	14	9.4	10.4	13.1	10.8	4.3	11.9	10.3		17.2	22.1	7.7
1980	11.1	6.3	13	13.8	15.3	15.3	9.8	6.6	8.3	8.8	11	4.1
1981	4.5	9.4	9.4	13.2	13.9	12.4	16.8	11.5	9.5	7	6.9	12.2
1982	9.1	10.3	12.6	14.2	14.2	10.6	8.4	11.2	8	10.9	10.1	11.7
1983	2.8	8	14.2	12.1	12.7	11.7	10.4	10.3	7.8	8.1	7.5	3.6
1984	8.9	12.3	11.4	15.2	19.7	12.4	5.6	11.2	9	10.8	7.5	6.7
1985	12.4	10.7	12.3	17.1	17.1	15.3	10.4	10.7	9.7	13.2	22.1	8.2
1986	10.6	13.7	12.9	14.5	11.5	13.5	16.4	11.2	14.3	12.2	12.2	15.3
1987	12.4	13.6	13.1	14.2	18.6	19	20.1	14.6	10.3	11.4	13.5	9.6
1988	14.2	13.6	13.1	16.3	19.8	22.2	14.4	13.2	13	14	10.2	10.2
1989	11.9	14.5	15	19.2	17.2	18.6	14.4	13.4	15	10.6	12	7.8
1990	13.5	6.8	11.9	16.5	16.6	12.3	11.1	10.7	11.9	8.9	8	7.8
1991	4.9	9.9	14.4	12.6	15.2	15.3	10.6	9.7	10.2	11.6	9.3	4.9
1992	4.4	7.1	11.3	13.4	10.5	11.7	11.5	7	7	12.3	11.1	10.2
1993	6.8	15.5	12.1	14.6	19.6	17.9	16.8	11.7	15.3	13.4	13.6	5.9
1994	8.1	7.5	12.6	13.7	8	9.7	5.1	5.8	7.3	6.2	3.1	5
1995	8.9	7.5	12.4	10.7	9.6	10.9	9.9	10.7	10.2	7.7	8.6	9.8
1996	10.1	14.8	8.5	11.3	12.5	9.9	8.2	8.5	8.5	5.8	5	8.4
1997	5.4	2.7	5.8	11.8	11.9	10.6	9.9	7	7.3	6	8.7	8.1
1998	6.9	5.7	9.4	11.4	13.5	10.4	7.1	7.7	10.6	10	9.5	6.6
1999	9.3	11.9	14.3	15.1	15.5	13.8	12.7	13.6	14.3	13.2	12.7	11.1
2000	7.7	9.6	13.3	18.4	14.5	11.3	11.9	9.1	12.2	10	9.1	12.4
2001	11.4	10.8	14.6	13.3	17.3	15.2	15.6	12.6	12.5	11.5	12.1	10.5
2002	7.9	8.8	10.1	14.3	16.2	12.8	15.3	12.7	10.5	6.1	14.7	10.5
2003	14.5	12.3	8.6	15.5	14.6	8	7	6.6	7.4	12.3	7.5	11.6
2004	13.7	11.1	13.8	15.4	17.3	15.2	10.2	13.4	8.2	8.9	9	12
2005	8.2	12.2	15	14.4	13.1	12.4	12	12.4	11.6	8.9	5.2	8.2
2006	8.4	10.8	13.6	12.3	13.1	12.9	10.7	10.1	9.8	9.3	5.4	7.6
2007	3.9	9.3	13.3	14.9	10.9	12.5	11	14.2	11.8	11.9	5.8	6.7
2008	6.3	4.1	11.9	12	17.1	14.4	13.9	11	13.5	11.6	9.2	6.4
2009	9.66	11.3	16.1	15.3	15.4	9.9	8.7	11.2	10	6.5	8.5	12.5
2010	12.7	15.2	12.2	10.8	12	13	8.6	8.1	7.6	8.5	11	12.7
2011	5.1	10.1	12.3	13.9	12	9	12.8	10.2	9.4	6.4	9	6.5
2012	7.3	9.7	8.6	14	13.3	10.4	10.6	8.4	8.2	6.2	7.8	6.1
2013	9.5	11.2	13.2	15.2	14.2	13.9	9.4	9.7	12.2	8.2	9.5	6.8
2014	9.6	11.2	14.5	11.5	13	13.9	11.5	9.7	9.9	10.6	10.1	7.7
2015	9.7	15.3	14.9	14.1	13.1	12.7	10.3	10.6	8.6	9.9	7.9	3.9

Tableau (D): Valeurs moyennes mensuelles de l'humidité relative à la station de Touggourt (%).

Années-Mois	Jan.	Fév.	Mars.	Avr.	Mai.	Jun.	Juil.	Août.	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
1975	-	-	42	46.3	36.6	31.9	30.6	30.3	49.7	45.4	57.9	57
1976	60.2	52.4	57.8	40.5	43.6	41.3	29.5	30.1	41.9	49.2	64.5	59.3
1977	69.3	51.2	40.4	33.6	42.4	31.4	29.6	36.1	40.4	37.1	50.6	57.8
1978	55.4	36.3	34.4	37.9	42.2	36.1	33.7	39	44.6	36.2	55.4	44
1979	45.7	63.3	35.5	36.4	33.8	37.6	36.7	25	0	44.5	49.7	54.2
1980	55.1	44.1	38.3	43.5	34.4	30.6	32.4	29.6	40.8	47.1	55.2	62.9
1981	61.4	48	38.9	40.1	37.2	24.5	43.7	34	41.4	40.2	49.7	49.5
1982	48.8	42.6	42.8	53.1	29.7	24.5	22.9	35.9	45.2	42.9	60.7	62
1983	48.2	44.8	41.3	33.7	32.1	27.8	21	25.4	29.4	39.7	42.6	52.5
1984	50	41.3	40.6	36.4	33.2	30	28.3	34.8	36.2	46.6	51.4	61
1985	55.7	46.4	48.7	30.7	32.6	27.6	23.1	27	34.8	45.5	43.7	51.2
1986	50.5	44.3	50.4	41.8	36.6	35	29.5	27.3	40	50.1	66	65.1
1987	61.1	52.5	54.7	39.6	39.7	29.8	27.9	29.5	35.8	45.4	51.3	62.4
1988	49.9	46.8	35.9	34.8	37.1	44.7	29.7	34.8	42.2	49.5	65.3	73.7
1989	68.1	49.2	42.9	41.6	41.1	37.2	35.1	36.4	46.3	60.6	57.8	68
1990	74.7	60.3	50.9	48.4	54.6	34	33.3	43.8	27.8	43.5	65.7	67.3
1991	56.3	50.5	46.1	39.9	39	33	28	30.6	44.3	50.2	54.5	66.9
1992	70.7	54.4	56.6	45.9	43.8	31.9	31	26.9	33.6	37.7	62.6	65.2
1993	61.5	63.4	51.2	39.8	36.1	25.5	25.9	26	39.5	43.1	71.2	72.8
1994	62.8	47.1	51.4	40.5	33.6	39.5	30.7	32.2	47.9	57.4	65.4	66.3
1995	61.5	57.6	47.7	44.1	36	34.8	33.5	35.7	47.8	52.3	52	71.6
1996	67.4	55.6	51.7	42.4	36.7	39	33.6	31.7	40.6	49.1	52.4	48.3
1997	56.4	44	48.4	48.2	41.3	34.4	30.8	33.8	48	53.5	58.2	62
1998	62.3	56.8	40.4	35.2	37.2	30.5	27.5	35.1	42.1	56.3	57.6	60.4
1999	71.7	53.9	44.6	31.9	27.9	28.2	29.9	29.6	41.2	44.9	61.9	73
2000	70	52.6	42.4	34.8	42.2	34.6	29.8	31.7	38.9	54.5	52.9	58.8
2001	59.3	45.4	40.4	40.2	37.6	29.2	26.2	30.7	45.5	42.7	56.7	67.5
2002	66.4	51.6	43.4	37.9	36.8	28	31.2	32.7	38.8	45.1	51.8	56.7
2003	60.7	53.3	48.6	36.8	34.2	31.3	27.4	29.3	39.4	48.9	58.4	63.2
2004	67	52.1	46.1	43.5	38.6	32	29.3	34.6	42.2	41.5	70.4	75.8
2005	66.7	55.9	45.4	37	29.9	33.2	27.1	33.5	44	51.8	46.2	61.8
2006	64.4	53.9	36.8	34.8	30.6	23.5	27.6	32.9	42.3	43.7	55.5	69.9
2007	61.6	50.1	41.5	52.4	29.8	25	29.7	29.2	38.4	45.5	49	60.9
2008	62.8	50.2	41.4	29.3	32.3	38.1	28.6	34	44	61.2	64.6	69.7
2009	74.7	49.2	50.4	41.3	33.8	30.1	29.9	29.8	51.4	45.9	51.2	54.6
2010	60.1	45.3	41.7	42	35.2	26.3	27.4	31	44.4	46	52	53.2
2011	59.9	57.5	55.1	47.1	45.6	38.7	28.3	30.3	36.6	54.2	55.3	62.8
2012	57.5	50.3	42.6	39.3	35.6	26.7	22.9	24.7	32.4	41.5	51	53.2
2013	50.2	48.6	40.4	34.8	33.4	29.3	27	35	39.7	38.7	53.4	68.3
2014	63.6	53.9	54.7	42	36.7	33	30.9	33.5	38.1	39.8	52.2	63.5
2015	59.5	52.2	44.9	36.8	34	31.5	26.2	3.4	43.5	47.1	60.4	68.7

Tableau (E) : Evolution du débit en fonction du temps, au niveau de chaque station.

Stations/Années	Evolution du débit Q (m ³ /s)						
	1993	1994	1995	1996	1998	1999	2001
KERDACHE	0,3345	0,33725	0,3296	-	0,27575	0,2	0,2715
RANOU	1,119	0,58825	0,5972	0,225	0,58925	0,394	0,6935
Z/ LABIDIA	1,8515	1,633	1,7816	-	1,4033333	1,283	-
BOURKHIS	2,107	1,728	1,675	1,23	1,94	1,33	1,88
S/SLIMANE	2,275	2,241	2,1744	-	2,20125	1,91	2,19
S,AMRANE	2,356	2,5395	2,3938	-	2,305	1,51	2,3375
Z/ERIAB	3,6965	4,02025	3,8204	2,55	3,5825	2,272	3,985
TINDLA/AMONT	3,8525	4,439	3,965	-	3,8475	2,84	3
TINDLA/AVAL	3,868	4,10875	4,183	4,39	4,355	3,18	3,98
BOUFFEGOUSA	2,783	3,217	3,357	4	3,18	-	5,075

Source : ANRH/Ouargla.

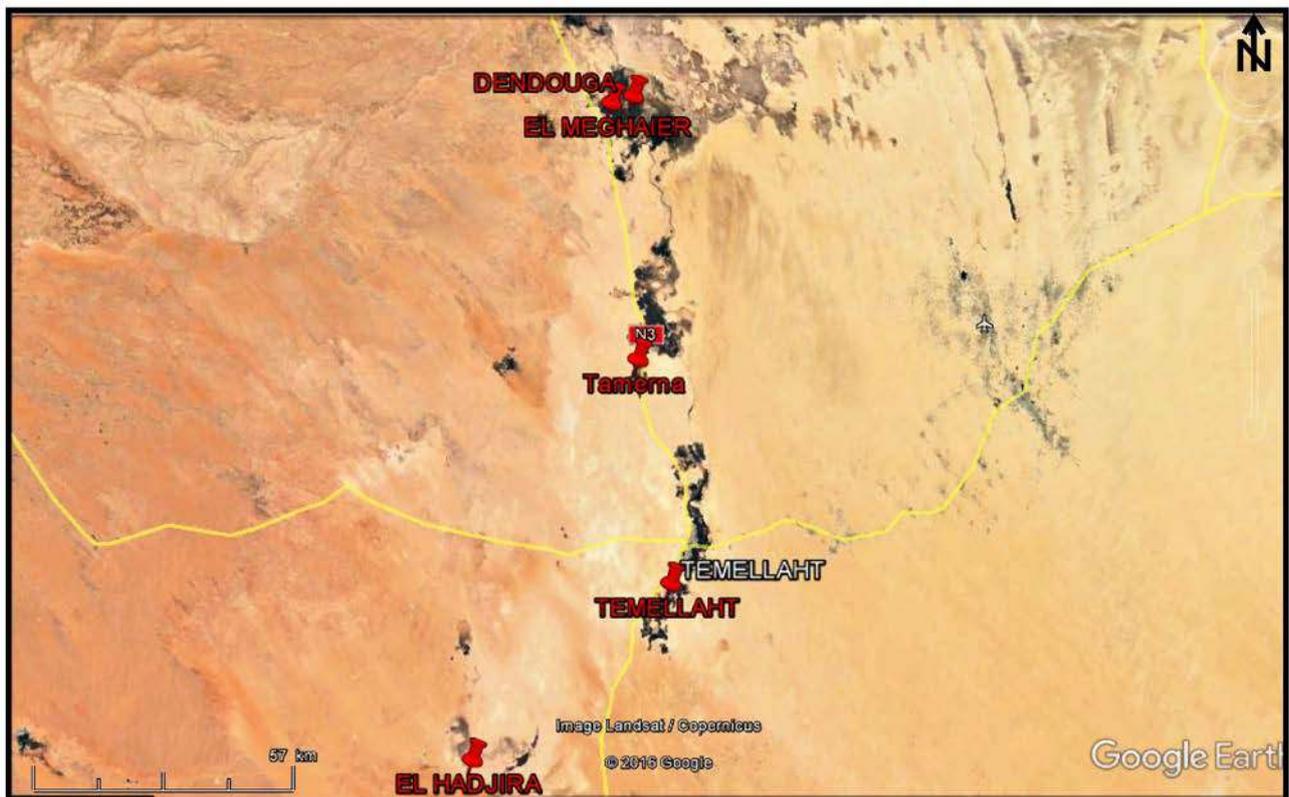
**Figure.1 :** Localisation géographique des forages, pour la corrélation (Google Earth).

Tableau (F) : Relation entre la conductivité et la minéralisation (J.Rodier ,2009)

Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Minéralisation (mg/L)
Conductivité <100	Très faible
100 < Conductivité < 200	Faible
200 < Conductivité < 333	Moyenne
333 < Conductivité < 666	Moyenne à accentuée
666 < Conductivité < 1000	Importante
Conductivité > 1000	Elevée

Tableau (G): Potabilité des eaux, selon les normes algériennes.

Paramètres	Niveau guide	concentration maximale admissible	Unités
pH	6.5	8.5	-
Conductivité	-	2800	$\mu\text{S}/\text{cm}$
Minéralisation	-	1000	mg/L
Résidu sec (180°C)	-	2000	mg/L
Calcium	75	200	mg/L
Magnésium	-	150	mg/L
Chlorures	-	500	mg/L
Sulfates	200	400	mg/L
Nitrates	-	50	mg/L
Sodium	-	200	mg/L
Potassium	-	20	mg/L

Tableau(H) : Normes pour la qualité de l'eau de surface.

pH		Eau				
6,75 < pH < 7,25		Nature				
7,25 < pH < 8,5		Alcalin				
pH > 8,5		Très alcalin				
La charge	DCO (mg/l)	Prise d'essai (ml)	facteur			
Très faible	0-40	432	1			
Faible	0-80	365	2			
Moyenne	0-200	250	5			
Plus que moyenne	0-400	164	10			
Un peu chargée	0-800	97	20			
Chargée	0-2000	43,5	50			
Très chargée	0-4000	22,7	100			
Classe de qualité	Taux de saturation en O ₂ (en %)	oxygène dissous (en mg/l)	DBO ₅ (en mg/l)	DCO (en mg/l)	IBGN	Qualité de l'eau
1A	≥ 90	≥ 7	≤ 3	≤ 20	≥ 17	Excellente
1B	70...90	5...7	3...5	20...25	16...13	Bonne
2	50...70	3...5	5...10	25...40	12...9	Moyenne
3	< 50	< 3	10...25	40...80	8...5	Médiocre
4	-	-	> 25	> 80	≤ 4	Hors classe
O ₂ dissous > 5mg/l		Excellence à acceptable				
3mg/l < O ₂ < 5mg/l		Qualité moyenne à médiocre pouvant ainsi générer un stress biologique				
2mg/l < O ₂ < 3mg/l		Considérée de mauvaise à très mauvaise qualité				
0mg/l < O ₂ < 2mg/l		Le domaine hypoxique du plan d'eau est atteinte				
1mg/l < O ₂ < 2mg/l		L'eau est hors classe, niveau 1				
0mg/l < O ₂ < 1mg/l		L'eau est hors classe, niveau 2, relevant du domaine anoxique				

(Source : In BONTOUX.J, 1993).

Tableau (I) : Forages exploités dans la vallée d'Oued Righ.

Désignation	debit_m3J	Désignation	debit_m3J	Désignation	debit_m3J	Désignation	debit_m3J
1	1439.01437	50	690.726899	99	633.166324	149	2878.02875
2	1554.13552	51	2072.1807	100	2878.02875	150	2878.02875
3	1942.6694	52	1726.81725	101	1439.01437	151	2590.22587
4	1079.26078	53	575.605749	102	1798.76797	152	1798.76797
5	1726.81725	54	1266.33265	103	2374.37372	153	1554.11362
6	1439.01437	55	1554.13552	104	777.067762	154	1151.2115
7	2072.1807	56	1726.81725	105	1151.2115	155	2158.52156
8	2072.1807	57	1554.13552	106	1726.81725	156	2878.02875
9	1295.11294	58	1554.13552	107	1151.2115	157	1942.6694
10	1439.01437	59	863.408624	108	863.408624	158	1151.2115
11	1942.6694	60	2762.9076	109	2374.37372	159	2158.52156
12	1554.13552	61	805.848049	110	2590.22587	160	1439.01437
13	1079.26078	62	1726.81725	111	1151.2115	161	1079.26078
14	1726.81725	63	1554.13552	112	899.383984	162	1582.91581
15	2014.62012	64	1726.81725	113	863.408624	163	1798.76797
16	2302.423	65	1439.01437	114	1439.01437	164	1582.91581
17	1726.81725	66	2302.423	115	1295.11294	165	1582.91581
18	1841.9384	67	1582.91581	116	1439.01437	166	1223.16222
19	1798.76797	68	1295.11294	117	1611.6961	167	2374.37372
20	1295.11294	69	1007.31006	118	1582.91581	168	2374.37372
21	460.4846	70	1582.91581	119	1798.76797	169	2590.22587
22	1266.33265	71	1439.01437	120	1151.2115	170	2302.423
23	1266.33265	72	2158.52156	121	2374.37372	171	1439.01437
24	1439.01437	73	1439.01437	122	2518.27515	172	1942.6694
25	1035.84394	74	1295.11294	123	2590.22587	173	2518.27515
26	791.457906	75	2158.52156	124	3108.27105	174	28.7802875
27	1036.09035	76	1942.6694	125	3108.27105	175	1439.01437
28	1726.81725	77	2590.22587	126	3021.93018	176	1295.11294
29	2072.1807	78	2158.52156	127	2590.22587	177	10360.9035
30	920.969199	79	1079.26078	128	2158.52156	178	12951.1294
31	2014.62012	80	1295.11294	129	2331.20329	179	719.507187
32	1611.76728	81	1439.01437	130	2158.52156	180	1439.01437
33	1726.81725	82	460.4846	131	2518.27515	181	2374.37372
34	1259.13758	83	1439.01437	132	1151.2115	182	2590.22587
35	1259.13758	84	86.3408624	133	1439.01437	183	777.067762
36	2302.423	85	1295.11294	134	1439.01437	184	1582.91581
37	978.529774	86	1726.81725	135	1316.69815	185	1726.81725
38	2014.62012	87	2014.62012	136	1798.76797	186	431.704312
39	10360.9035	88	2158.52156	137	1439.01437	187	2158.52156
40	3108.27105	89	1582.91581	138	1439.01437	188	12951.1294
41	2734.12731	90	1798.76797	139	2158.52156	189	1654.86653
42	107.926078	91	1439.01437	140	2158.52156	190	2158.52156
43	1036.09035	92	1439.01437	141	2374.37372	191	2302.14921
44	287.802875	93	1439.01437	142	2518.27515	192	2374.37372
45	2302.423	94	1554.13552	143	2374.37372	193	2158.52156
46	2302.423	95	2878.02875	144	2158.52156	194	1295.11294
47	1726.81725	96	1259.13758	145	1439.01437	195	1942.6694
48	690.726899	97	2158.52156	146	1439.01437	196	2374.37372
49	230.2423	98	971.334702	147	1582.91581	197	2158.52156
						198	2158.52156

Désignation	debit_m3J	Désignation	debit_m3J	Désignation	debit_m3J	Désignation	debit_m3J
199	1439.01437	249	2158.52156	300	1582.91581	351	4748.74743
200	2849.24846	250	1439.01437	301	1439.01437	352	3453.6345
201	2518.27515	251	2158.52156	302	2823.3462	353	3021.93018
202	1295.11294	252	1439.01437	303	2331.20329	354	3885.33881
203	2518.27515	253	2590.22587	304	1942.6694	355	474.874743
204	1122.43121	254	2878.02875	305	1158.40657	356	1151.2115
205	2518.27515	255	3021.93018	306	1158.40657	357	3021.93018
206	1942.6694	256	2331.20329	307	1726.81725	358	3108.27105
207	2158.52156	257	2590.22587	308	474.874743	359	3453.6345
208	1295.11294	258	2331.20329	309	992.919918	360	2417.54415
209	1554.13552	259	1582.91581	310	2158.52156	361	2072.1807
210	1439.01437	260	2590.22587	311	1439.01437	362	316.439261
211	1798.76797	261	1726.81725	312	1813.15811	363	251.827515
212	1295.11294	262	1899.49897	313	1985.83984	364	805.848049
213	1798.76797	263	1439.01437	314	719.507187	365	575.605749
214	1798.76797	264	1439.01437	315	1626.08624	366	647.556468
215	2158.52156	265	518.045175	316	2374.37372	367	755.482546
216	2518.27515	266	215.852156	317	1899.49897	368	809.445585
217	2158.52156	267	1439.01437	318	2374.37372	369	503.655031
218	2331.20329	268	1942.6694	319	1100.846	370	791.457906
219	2302.423	269	2158.52156	320	107.926078	371	435.301848
220	1295.11294	270	12951.1294	321	3021.93018	372	791.457906
221	1079.26078	271	1582.91581	322	2590.22587	373	1510.96509
222	1036.09035	272	1726.81725	323	2460.71458	374	568.985626
223	719.507187	273	1439.01437	324	647.556468	375	287.802875
224	2590.22587	274	431.704312	325	2878.02875	376	575.605749
225	647.556468	275	1942.6694	326	3280.95277	377	2590.22587
226	719.507187	276	971.334702	327	3280.95277	378	2518.27515
227	1726.81725	277	791.457906	328	1187.18686	379	2158.52156
228	106.447639	278	1439.01437	329	1079.26078	380	611.581109
229	863.408624	279	1701.6345	330	2244.86242	381	719.507187
230	2590.22587	280	2158.52156	331	1798.76797	382	2878.02875
231	777.067762	281	2158.52156	332	1510.96509	383	2878.02875
232	1439.01437	282	863.408624	333	2806.07803	384	2590.22587
233	1439.01437	283	1439.01437	334	1295.11294	385	3597.53593
234	1798.76797	284	935.359343	335	863.408624	386	1726.81725
235	1798.76797	285	2374.37372	336	3280.95277	387	323.778234
236	1798.76797	286	1582.91581	337	1165.60164	388	3597.53593
237	1439.01437	287	1021.32786	338	8634.08624	389	3021.93018
238	2446.32444	288	1151.2115	339	1223.16222	390	1295.11294
239	1439.01437	289	2158.52156	340	1510.96509	391	2374.37372
240	2158.52156	290	1439.01437	341	2590.22587	392	5036.55031
241	1208.77207	291	1554.13552	342	1813.15811	393	3597.53593
242	971.334702	292	1985.83984	343	2590.22587	394	669.141684
243	2158.52156	293	2849.24846	344	3453.6345	395	949.749487
244	1554.13552	294	1439.01437	345	3280.95277	396	10360.9035
245	1726.81725	295	3108.27105	346	3108.27105	397	1079.26078
246	1942.6694	296	604.386037	347	2878.02875	398	2374.37372
247	2590.22587	297	719.507187	348	3280.95277	399	2878.02875
248	1798.76797	298	1079.26078	349	3453.6345	400	10360.9035
		299	1295.11294	350	2590.22587	401	2374.37372

Désignation	debit_m3J	Désignation	debit_m3J	Désignation	debit_m3J	Désignation	debit_m3J
402	1978.64476	453	2878.02875	504	2302.423	555	1726.81725
403	431.704312	454	4676.79671	505	1079.26078	556	1165.60164
404	2302.423	455	2590.22587	506	863.408624	557	1957.05955
405	2158.52156	456	2158.52156	507	3453.6345	558	2028.63792
406	2302.423	457	2878.02875	508	2302.423	559	2590.22587
407	863.408624	458	1942.6694	509	3885.33881	560	1259.13758
408	2518.27515	459	10360.9035	510	575.605749	561	1439.01437
409	2072.1807	460	10360.9035	511	518.045175	562	2244.86242
410	1079.26078	461	10360.9035	512	2244.86242	563	978.529774
411	2014.62012	462	1079.26078	513	3453.6345	564	1611.6961
412	3237.78234	463	1554.13552	514	2014.62012	565	1323.89322
413	2590.22587	464	1554.13552	515	863.408624	566	1611.6961
414	2302.423	465	1259.13758	516	719.507187	567	2187.30185
415	2590.22587	466	1295.11294	517	2158.52156	568	2590.22587
416	2590.22587	467	575.605749	518	3367.29363	569	1496.57495
417	2302.423	468	2590.22587	519	690.726899	570	2302.423
418	2230.47228	469	2734.12731	520	3021.93018	571	1439.01437
419	1439.01437	470	1870.71869	521	2590.22587	572	2359.98357
420	1439.01437	471	2158.52156	522	3885.33881	573	1784.37782
421	401.48501	472	2072.1807	523	1554.13552	574	2331.20329
422	3309.73306	473	2949.97947	524	949.749487	575	3021.93018
423	431.704312	474	1611.6961	525	1295.11294	576	1079.26078
424	2302.423	475	1582.91581	526	3021.93018	577	11224.3285
425	215.852156	476	1079.26078	527	575.605749	578	2849.24846
426	1036.09035	477	1295.11294	528	3237.78234	579	3885.33881
427	10360.9035	478	2590.22587	529	2590.22587	580	3021.93018
428	15.1096509	479	2734.12731	530	3453.6345	581	2590.22587
429	1295.11294	480	1439.01437	531	2158.52156	582	4317.04312
430	2158.52156	481	2590.22587	532	2590.22587	583	1726.81725
431	2266.44764	482	3309.73306	533	1439.01437	584	1726.81725
432	2734.12731	483	3237.78234	534	2374.37372	585	1295.11294
433	2014.62012	484	3093.8809	535	3453.6345	586	8634.08624
434	2302.423	485	1295.11294	536	1726.81725	587	2590.22587
435	2734.12731	486	53.963039	537	3453.6345	588	1295.11294
436	2331.20329	487	1510.96509	538	3885.33881	589	1151.2115
437	2590.22587	488	2014.62012	539	1165.60164	590	1726.81725
438	2734.12731	489	89.9383984	540	949.749487	591	1122.43121
439	2949.97947	490	1439.01437	541	1122.43121	592	1165.60164
440	3093.8809	491	863.408624	542	2878.02875	593	1295.11294
441	1439.01437	492	1439.01437	543	2590.22587	594	1295.11294
442	1439.01437	493	1439.01437	544	1510.96509	595	1899.49897
443	1079.26078	494	2086.57084	545	1510.96509	596	1899.49897
444	755.427789	495	1798.76797	546	1122.43121	597	2014.62012
445	503.655031	496	2590.22587	547	2331.20329	598	1079.26078
446	237.437372	497	2590.22587	548	1467.79466	599	777.067762
447	35.9753593	498	2590.22587	549	777.067762	600	863.408624
448	805.848049	499	1439.01437	550	1467.79466	601	1726.81725
449	388.533881	500	2590.22587	551	1165.60164	602	2374.37372
450	269.815195	501	2590.22587	552	1467.79466	603	1942.6694
451	647.556468	502	2590.22587	553	1467.79466	604	1151.2115
452	2374.37372	503	2590.22587	554	1554.13552	605	1007.31006

Désignation	debit_m3J	Désignation	debit_m3J	Désignation	debit_m3J
606	1439.01437	657	2590.22587	708	1510.96509
607	1726.81725	658	2158.52156	709	1208.77207
608	1554.13552	659	2878.02875	710	949.749487
609	3453.6345	660	2158.52156	711	1798.76797
610	2014.62012	661	10360.9035	712	2302.423
611	2302.423	662	1798.76797	713	2129.74127
612	2014.62012	663	2518.27515	714	2158.52156
613	2590.22587	664	1439.01437	715	2590.22587
614	1726.81725	665	1345.47844	716	2538.97331
615	3108.27105	666	1439.01437	717	518.045175
616	215.852156	667	863.408624	718	1841.9384
617	1151.2115	668	1151.2115	719	2935.58932
618	179.876797	669	1266.33265	720	1942.6694
619	2331.20329	670	719.507187	721	2331.17591
620	2331.20329	671	1726.81725	722	3275.47707
621	1295.11294	672	1554.13552	723	3237.78234
622	2590.22587	673	1151.2115	724	2129.74127
623	1899.49897	674	1151.2115	725	3165.83162
624	1151.2115	675	1798.76797	726	1978.64476
625	1726.81725	676	1439.01437	727	4604.846
626	3237.78234	677	2590.22587	728	3957.28953
627	1726.81725	678	1798.76797	729	1381.4538
628	2014.62012	679	1942.6694	730	2072.1807
629	2014.62012	680	1295.11294	731	2590.22587
630	1439.01437	681	3237.78234	732	3957.28953
631	2014.62012	682	2302.423	733	2590.22587
632	2590.22587	683	1295.11294	734	3165.83162
633	1295.11294	684	2158.52156	735	2662.17659
634	1726.81725	685	2158.52156	736	1942.6694
635	1079.26078	686	2518.27515	737	2014.62012
636	2878.02875	687	3237.78234	738	1554.13552
637	2014.62012	688	2518.27515	739	2849.24846
638	10360.9035	689	2878.02875	740	3007.54004
639	1726.81725	690	1582.91581	741	3165.83162
640	690.726899	691	2302.423	742	2978.75975
641	1510.96509	692	2158.52156	743	1798.76797
642	1079.26078	693	2518.27515	744	1798.76797
643	647.556468	694	2878.02875	745	1439.01437
644	28.7802875	695	2331.20329	746	2849.24846
645	1510.96509	696	2590.22587		
646	1726.81725	697	3453.6345		
647	863.408624	698	3453.6345		
648	1007.31006	699	1726.81725		
649	1899.49897	700	1798.76797		
650	8634.08624	701	920.969199		
651	9929.19918	702	2158.52156		
652	9497.49487	703	647.556468		
653	10360.9035	704	2878.02875		
654	10360.9035	705	3237.78234		
655	359.753593	706	3957.28953		
656	2158.52156	707	10360.9035		

دراسة العلاقة "شط مروان/ طبقة المياه الجوفية للميو بليو كواترنار" وتأثيرها على نوعية المياه الجوفية.

تهتم هذه الدراسة بطبقة المياه الجوفية للميو بليو كواترنار في منخفض وادي ريغ. هذه المنطقة الصحراوية الجزائرية المنخفضة تمتد من جنوب واحات القوق إلى غاية شط مروان، بين ولايتي الواد وورقلة. طبقة المياه الجوفية للميو بليو كواترنار تعتبر منبعاً هاماً للسقي وللتزويد بمياه الشرب في المنخفض. لدراسة العلاقة بين طبقة المياه الجوفية للميو بليو كواترنار وشط مروان في الجزائر تمثل لنا من الضروري تقديم سيناريوهات استناداً إلى نموذج رياضي وذلك باستخدام المفتاح "Visual Mod Flow" وتقييم ورسم خرائط القابلية للتلوث باستخدام الطريقتين: Drastic وGOD. مطابقة النموذج في الحالة الثابتة والحالة المتغيرة سهلت لنا معرفة مدى صلاحية النتائج، فيما يخص هندسة وامتداد طبقة المياه الجوفية وكذا خصائصها الهيدروديناميكية. أظهرت سيناريوهات التنقيب أن الجهة الشمالية، قرب شط مروان لها قابلية معتبرة. بينت الدراسة المقارنة، اعتماداً على اختبار Kendall أن طريقتي God وDrastic لهما نفس الاتفاق ($W=0,703$). كشف التحليل الإحصائي لمختلف أقسام القابلية للتلوث أن القابلية باستخدام طريقة Drastic ممثلة بأربع أقسام: "ضعيفة جداً"، "ضعيفة"، "متوسطة"، و"قوية" مع هيمنة القسم "المتوسط" (74,30%). أظهرت طريقة God قابلية مركزة على قسمين: "ضعيف" و"متوسط"، أين لاحظنا الأغلبية للقسم "الضعيف" (70%). مقارنة خريطتي القابلية للتلوث الناتجتين عن طريقتي Drastic وGod بينت أن الطريقة الأولى (طريقة Drastic) مثلت الأحسن توزيع قيم القابلية للتلوث لطبقة المياه الجوفية للميو بليو كواترنار. لتفادي أي تلاقي بين طبقة المياه الجوفية للميو بليو كواترنار والمياه المالحة والملوثة الملقاة في الشط، يلزم أخذ التدابير اللازمة، والأهم وضع برنامج لإعادة تسيير التنمية المائية الزراعية، وكذا منهاج لتسيير المياه القذرة.

الكلمات المفتاحية: منخفض وادي ريغ، طبقة المياه الجوفية للميو بليو كواترنار، شط مروان، نموذج، قابلية التلوث، God، Drastic، العلاقة طبقة المياه الجوفية/ شط، تسيير.

ETUDE DE LA RELATION « CHOTT MEROUANE/NAPPE DU MIO-PLIO-QUATERNAIRE » ET SON IMPACT SUR LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES.

La présente étude a intéressé la nappe du Mio- Plio-Quaternaire, dans la vallée d'Oued Righ. Cette région du bas Sahara algérien s'étend du Sud de la palmeraie d'El Goug, jusqu'au chott Merouane, entre les wilayas d'El Oued et d'Ouargla. L'aquifère du Mio-Plio-Quaternaire constitue une ressource importante pour l'irrigation et l'alimentation en eau potable de la vallée. Pour étudier la relation entre la nappe du Mio-Plio-Quaternaire et Chott Merouane en Algérie, il nous a paru nécessaire, de présenter des scénarios, basés sur un modèle mathématique, à l'aide du code « Visual Mod- flow » et d'évaluer et de cartographier sa vulnérabilité à la pollution, en appliquant les méthodes DRASTIC et GOD.

Le calage du modèle, en régime permanent puis en régime transitoire a permis de vérifier la fiabilité des résultats, concernant la géométrie et les limites de l'aquifère, ainsi que ses paramètres hydrodynamiques. Les scénarios d'exploitation indiquent que la partie nord, près du Chott Merouane présente une vulnérabilité assez prononcée.

L'étude comparative, fondée sur le test de Kendall a montré que les méthodes DRASTIC et GOD ont un accord modéré ($W = 0.703$). L'analyse statistique des différentes classes de vulnérabilité a révélé que la vulnérabilité par la méthode DRASTIC est représentée par quatre classes : « très faible », « faible », « moyenne » et « forte », avec une domination de la classe « moyenne » (74.30%). La méthode GOD a abouti à une vulnérabilité concentrée entre deux classes « faible » et « moyenne », où nous remarquons la domination de la classe « faible » (70%). La comparaison des deux cartes de vulnérabilité, obtenues à partir des méthodes DRASTIC et GOD nous a montré que la première méthode (DRASTIC) représente mieux la répartition des degrés de vulnérabilité à la pollution, au niveau de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire.

Pour éviter tout contact entre la nappe du Mio-Plio-Quaternaire et les eaux salées et usées, déversées dans le Chott, des mesures doivent s'imposer, d'où la nécessité de la mise en place d'un plan d'aménagement hydro-agricole et d'une stratégie de gestion des eaux usées.

MOTS CLES : Vallée d'Oued Righ- Nappe du Mio-Plio-Quaternaire- Chott Merouane- Modélisation- Vulnérabilité à la pollution -DRASTIC- GOD- Relation nappe/Chott- Gestion.

STUDY OF THE RELATIONSHIP « CHOTT MEROUANE/MIO-PLIO-QUATERNARY AQUIFER » AND ITS IMPACT ON THE QUALITY OF GROUNDWATER.

In order to study the relationship between the groundwater of the Mio-Plio-Quaternary and Chott Merouane in Algeria, it seemed to us necessary to present scenarios, based on a mathematical model, using the code "Visual Mod flow", and to assess and map its vulnerability to pollution, by applying the DRASTIC and GOD methods.

The calibration of the model, in steady state and then transient state, allowed checking the reliability of the results related to the geometry and the limits of the aquifer, as well as its hydrodynamic parameters. The exploitation scenarios indicate that the northern part, near Chott Merouane, has a fairly significant vulnerability.

The comparative study, based on Kendall test, showed that the two methods have a moderate agreement ($W = 0.703$). The statistical analysis of different vulnerability classes revealed that vulnerability assessment, using the DRASTIC method, may be represented by four classes: "Very low", "Low", "Medium" and "High", with a dominance of class "Medium" (74.30%). The GOD method resulted in a vulnerability that sits between two classes, 'Low' and 'Medium', with a noted domination of class "Low" (70%). Comparison of the two vulnerability maps obtained from the DRASTIC and GOD methods shows that the DRASTIC method better represents the distribution of degrees of vulnerability to pollution in the aquifer of the Mio-Plio-Quaternary.

To prevent any contact between the groundwater of the Mio-Plio-Quaternary and the wastewater discharged into the Chott, drastic measures must be taken, hence the need for establishing a hydro-agricultural development plan and a wastewater management strategy.

KEYWORDS: Valley of Oued Righ – Groundwater of Mio-Plio-Quaternary – Chott Merouane - Modeling - Vulnerability to pollution- DRASTIC- GOD -Relationship groundwater /Chott - Management.