

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd
Faculté de Technologie
Département d'Hydraulique



Thèse

Préparée au sein du Laboratoire de Recherche en Hydraulique Appliquée
(LARHYA)

Présentée pour l'obtention du diplôme de :

Doctorat en Sciences
Spécialité : Hydraulique
Option : Hydraulique

Sous le Thème :

**Impacts de l'irrigation sur la qualité des eaux
souterraines des régions semi-arides. Cas de la région de
Tébessa**

Présentée par :

ZEREG Salah

Devant le jury composé de :

M. MESSAID Belkacem	MCA	Université de Batna 2	Président
M. BOUDOUKHA Abderrahmane	Prof.	Université de Batna 2	Rapporteur
M. TIRI Ammar	MCA	Université de Batna 2	Examineur
M. BAALI Fethi	Prof.	Université de Tébessa	Examineur
M. FEHDI Chemseddine	Prof.	Université de Tébessa	Examineur
M. GOUAIDIA Layachi	Prof.	Université de Tébessa	Examineur

Janvier 2019

Remerciements

Au terme de ce Travail, mes remerciements s'adressent à tous ceux qui, directement ou indirectement, ont contribué à faciliter ma tâche.

Le professeur Abderrahmane Boudoukha, a bien voulu diriger, suivre et orienter ce travail. Ses encouragements et ses recommandations ont permis de finaliser ce projet. Qu'il trouve ici l'expression de ma reconnaissance, de mon amitié et de ma profonde gratitude.

Je suis très honoré que Monsieur MESSAID Belkacem Maître de Conférence « A » à l'Université de Batna 2 qu'il ait voulu accepter de présider mon jury et je l'en remercie.

Je suis très honoré que Dr. TIRI Ammar Maître de Conférence « A » à l'Université de Batna 2, le Dr. BAALI Fethi, le Dr. FEHDI Chemseddine et le Dr. GOUAIDIA Layachi ; Professeurs à l'Université de Tébessa qu'ils aient bien voulu accepter d'être les examinateurs. Leurs compétences dans le domaine me sont d'un concours précieux pour améliorer et valoriser les résultats obtenus.

Je n'oublie pas de remercier mes collègues de la station INRAA de Biskra et mes anciens collègues du haut commissariat au développement de la steppe de Tébessa pour leur soutien, sans oublier aussi le personnel des directions des ressources en eau et des services agricoles de la wilaya de Tébessa pour leur disponibilité durant ce parcours.

Et aussi tous mes amis, pour leur soutien et encouragements. Qu'ils trouvent ici mes meilleures salutations les plus distinguées.

Dédicaces

*A la mémoire de mes parents, à la mémoire du
Dr. Rouabhia Abdelkader, pour eux je prie Dieu le
tout puissant de les accueillir dans son vaste paradis*

A ma petite famille (ma femme et mes quatre enfants)

A ma grande famille frères et sœurs

A tous mes amis

A tous ceux qui me sont cher(e)s

A tous les universitaires

Je dédie ce modeste travail



Zereg Salah

ملخص

تقع " المرجة " وهي طبقة مائية ضحلة في سهل تبسة في شمال شرق الجزائر، بمناخ شبه جاف وأنشطة زراعية - رعوية. وهو يمثل الخزان المائي الذي لا غنا عنه والذي تستخدمه مختلف القطاعات.

خاصة للتزود بمياه الشرب والزراعة. أدى استصلاح الأراضي على أساس تجنيد موارد المياه الجوفية ، كجزء من برنامج الدعم الزراعي منذ عام 2000 ، إلى نشوب المنافسة بين المزارعين للاستفادة من البرنامج. ولهذا الغرض ، فإن سهل تبسة هو من بين المناطق التي تم فيها حفر عدد كبير من الآبار ، تستغل مياهها الجوفية. بالإضافة إلى ذلك ، قرب المدينة من هذه الطبقة المائية يجعلها عرضة للتلوث. وفقا للدراسات التي أجريت في السابق ، فإن طبقة المياه الجوفية هذه تخضع لتدهور موسمي لجودة المياه (بين موسم رطب و آخرجاف) سببه أساسا الأنشطة المتعلقة بممارسة النشاط الفلاحي. تعتبر الدراسة في غاية الأهمية لأنها تتعقب نوعية المياه الجوفية وتهدف إلى فهم كيفية تأثير سقي المحاصيل و الظروف الطبيعية على هذا المورد الهام على كلا النطاقين: النطاق الزمني (بين السنوات)، و النطاق الجغرافي. من خلال رسم تطور العناصر الكيميائية المكونة للمياه، بحيث تم جمع وتحليل واحد وسبعين عينة من المياه الجوفية من آبار الشرب والري المتواجدة بالمنطقة، على مدى أربع حملات ميدانية (2001 و 2006 و 2009 و 2010). بعدها تم تحليل العينات في المختبر وفقاً للمعايير الدولية المعمول بها في هذا المجال. النتائج التي تم الحصول عليها كانت موضوع معالجة إحصائية (متغير واحد ومتعدد المتغيرات) ، قدمت في شكل رسوم بيانية ، نسب أيونية وخرائط. من خلال المعالجة بهذه الأدوات القنية تؤكد حقيقة تلوث المياه. تم الكشف عن تلوّثات نقطية بالنترات والملوحة على الخرائط ذات الصلة لهذه المكونات خاصة في اتجاه المصب لمدينة تبسة. كما تجلّى تلوث المياه بصفة منتشرة على معظم مساحة السهل. من خلال مخطط Piper تم تسجيل استقرار نسبي لنوع الماء كما اتضح أن هطول الأمطار يلعب دوراً في المعالجة الطبيعية من خلال المساهمة في إعادة تغذية طبقة المياه الجوفية. توضح النسب الأيونية والتحليل الأساسي للعناصر ، على التوالي ، أن التغير الزمني لجودة المياه الجوفية قد أثارته عملية التبادل الأيوني عملية تحلل و تجوية الصخور. ويبقى المصدر الرئيسي للتلوث بالنترات استخدامات الأسمدة (السماد الكيميائي والعضوي) ومياه الصرف الصحي.

RESUME

La plaine de Tebessa communément appelée la «Merdja», est située dans le nord-est de l'Algérie avec un climat typique des steppes semi-arides, où les activités agro-pastorales extensives dominent. Cette région renferme un aquifère peu profond qui constitue la principale ressource en eau utilisée par les principaux secteurs, notamment pour l'alimentation en eau potable et pour l'agriculture. La mise en valeur des terres basée sur la mobilisation des ressources hydriques souterraines, dans le cadre du programme du soutien agricole depuis 2000, avait enclenché une concurrence entre les agriculteurs pour bénéficier du dit programme. A cet effet, la plaine de Tébessa figure parmi les zones où un nombre important de puits et de forages ont été réalisés exploitants l'aquifère de celle-ci. En plus, la proximité de la ville rend cet aquifère vulnérable à la pollution. Selon des études antérieures, des fluctuations saisonnières de la qualité d'eau (entre les saisons sèches et humides), provoquées par des activités liées principalement à l'agriculture. L'étude est extrêmement importante car elle suit la qualité des eaux souterraines et vise à comprendre comment les activités anthropiques telle que l'irrigation et les conditions naturelles influencent cette ressource à des échelles temporelles (interannuelles) et spatiales, en suivant la tendance d'évolution des paramètres hydrochimiques de la nappe de la Merdja. Soixante et onze échantillons d'eau souterraine ont été collectés à partir de puits d'eau domestique / d'irrigation, à travers quatre campagnes de terrain, durant la période des hautes eaux (nov. 2001, jan. 2006, jan. 2009 et déc. 2010). Les échantillons sont ensuite analysés au laboratoire selon les normes internationales telles que décrites par les règles de l'art. Les résultats obtenus ont fait l'objet de traitement statistiques (à une et à plusieurs variables), présentés sous forme de diagrammes, de rapports ioniques et de cartes. Ces outils ont permis de confirmer le fait de la pollution des eaux de la région. Des pollutions ponctuelles anormales avec les nitrates et la salinité sont révélés sur les cartes respectives de ces paramètres, en particulier en aval dans les zones voisines de la ville de Tebessa. Des sources diffuses de pollution des eaux souterraines se manifestent également. L'établissement du diagramme de Piper révèle une relative stabilité du type d'eau. Les rapports ioniques et l'analyse en composantes principales mettent en évidence que le changement temporel de la qualité des eaux souterraines résulte respectivement: (i) du processus d'échange ionique et de la dissolution des évaporites; (ii) l'application excessive d'engrais azotés inorganiques, d'engrais organiques et d'effluents d'eaux usées, qui demeurent les sources de nitrates dans les eaux souterraines de la région. On note aussi que les précipitations enregistrées entre 2001 et 2006 ont joué un rôle dans l'auto-dépollution naturelle en participant à la recharge de l'aquifère.

ABSTRACT

The “Merdja” is the shallow aquifer of Tebessa plain, located in the northeast of Algeria. The climate is typical of semi-arid steppes, where extensive agro-pastoral activities are dominating. It is still the main water resource used by major sectors, especially, for the supply of drinking water and for agriculture. Land reclamation based on the mobilization of groundwater resources, as part of the agricultural support program since 2000, has triggered competition among farmers to benefit from the program. For this purpose, the plain of Tébessa is among the areas where a large number of wells and boreholes have been made, exploiting its aquifer. In addition, the proximity of the city makes this aquifer vulnerable to pollution. According to earlier studies, this aquifer undergoes seasonal water quality fluctuations (between wet and dry seasons), induced by activities mainly related to agriculture. The study is utmost important, as it tracks the groundwater quality and aims to gain an understanding of how the irrigation as anthropogenic activity and natural conditions influence this resource at temporal (interannual) and spatial scales, by following up the evolution trend of hydrochemical parameters of the “Merdja” aquifer. Seventy-one groundwater samples were collected and analyzed from drinking/irrigation wells, through four field measurement campaigns (2001, 2006, 2009, and 2010). The samples are then analyzed in the laboratory according to international standards as described by the state of the art. The results obtained have been the subject of statistical processing (one variable and multivariate), presented in the form of diagrams, ionic ratios and maps. These tools confirm the fact of water pollution. Point-sources of pollution with nitrate and salinity are revealed on the respective maps of these parameters, especially downstream at the nearby areas of Tebessa City. Non-point sources of groundwater pollution are also manifested. The Piper diagram reveals a relative stability of water type and that rainfall plays a role in the natural remediation, by taking part in the aquifer recharge. The ionic ratios and the principal components analysis highlight that the temporal change of groundwater quality results respectively from: (i) ionic exchange process and the dissolution of evaporites; (ii) the sources of nitrate in groundwater remain the excess application of inorganic nitrogenous fertilizers, organic manures, and wastewater effluents.

Table de matières

INTRODUCTION ET PROBLEMATIQUE	1
-------------------------------------	---

- PREMIERE PARTIE -

CHAPITRE I: SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	7
--	---

1.1 Introduction.....	7
-----------------------	---

1.2 Cycle hydrologique.....	7
-----------------------------	---

1.3 Conditions naturelles influençant la qualité de l'eau	10
---	----

1.3.1 La géologie	10
-------------------------	----

1.3.2 Le climat.....	10
----------------------	----

1.3.3 La morphologie	11
----------------------------	----

1.3.4 L'emplacement.....	12
--------------------------	----

1.3.5 Activités humaines qui influent sur la qualité de l'eau.....	12
--	----

1.3.5.1 Rivières et ruisseaux	12
-------------------------------------	----

1.4 Origines des éléments de la qualité de l'eau souterraine	14
--	----

1.5 Les paramètres de qualité de l'eau.....	18
---	----

1.5.1 Principaux paramètres de potabilité	18
---	----

1.5.1.1 La dureté	19
-------------------------	----

1.5.1.2 Le pH	19
---------------------	----

1.5.1.3 La turbidité.....	19
---------------------------	----

1.5.2 Origine et les impacts de quelques constituants communs :	20
---	----

1.5.2.1 Le Calcium (Ca^{2+}).....	20
--	----

1.5.2.2 Le Magnésium (Mg^{2+})	20
---	----

1.5.2.3 Le Sodium (Na^+)	20
---	----

1.5.2.4 Le Potassium (K^+)	20
---	----

1.5.2.5 Les Sulfates (SO_4^{-2}).....	20
1.5.2.6 Les Orthophosphates (PO_4^{3-})	21
1.5.2.7 Les Chlorures (Cl).....	21
1.6 Contamination des eaux souterraines	21
1.6.1 Introduction	21
1.6.2 L'interaction eau de surface et eau souterraine	22
1.6.3 Contamination des eaux souterraines	22
1.6.3.1 L'urbanisation:	23
1.6.3.2 Activité Industrielle	23
1.6.3.3 Exploitation minière.....	23
1.6.3.4 Exploitation agricole	24
1.6.3.5 Nutriments.....	24
1.6.3.6 Les pesticides	25
1.6.3.7 Les micro-organismes	25
1.7 Etats de connaissance sur qualité des eaux souterraines.....	25
1.7.1 Problématique de l'eau et l'irrigation.....	25
1.7.2 L'eau souterraine pollution-santé-irrigation.....	27
1.7.3 Sur la nappe alluviale de Tébessa	31
1.8 Conclusion	33
CHAPITRE II: CADRE GENERAL.....	35
2.1 Contexte géographique	35
2.2 Contexte topographique.....	35
2.3 Le sol	38
2.4 Le couvert végétal.....	38
2.5 Contexte économique :	40
2.6 Contexte Hydrographique.....	40
2.7 Situation sur l'irrigation.....	40

2.8	Population, eau potable et assainissement	42
2.9	Conclusion	44
CHAPITRE III: APERÇU CLIMATIQUE.....		47
3.1	Introduction.....	47
3.2	Les précipitations.....	47
3.2.1	Equipement de la région.....	48
3.2.2	Précipitations annuelles et interannuelles	48
3.2.2.1	Détermination de la lame d'eau moyenne précipitée.....	49
3.2.2.2	Précipitations mensuelles.....	50
3.2.3	Variation des précipitations interannuelles	52
3.2.4	La neige	53
3.3	Les températures	53
3.3.1	Température mensuelle :	53
3.3.2	Températures moyennes annuelles	55
3.4	Détermination des indices climatiques	56
3.4.1	Diagramme Pluvio-thermique	56
3.4.2	Climagramme d'Emberger	57
3.4.3	l'indice d'aridité de DE MARTONNE	57
3.5	Evapotranspiration	59
3.5.1	La formule de Penman :	61
3.5.2	Formules de FAO-Penman-Monteith.....	62
3.5.3	Formule de L. TURC mensuelle	65
3.5.4	Formule de THORNTHWAITE.....	65
3.6	Résultats de calculs de l'ETP	66
3.7	Bilan hydrique	67
3.7.1	Bilan simplifié selon THORNTHWAITE.....	67

3.7.1.1 Résultats de calculs du bilan hydrique de Thorntwaite	67
3.8 Conclusion	71
CHAPITRE IV: APERÇU GEOLOGIQUE	73
4.1 Introduction.....	73
4.2 Stratigraphie-lithologie	73
4.2.1 Le secondaire.....	76
4.2.1.1 Le Trias	76
4.2.1.2 Le Crétacé	76
4.2.1.3 L’Aptien.....	76
4.2.1.4 Albien.....	76
4.2.1.5 Cénomanién	77
4.2.1.6 Turonien	77
4.2.1.7 Le Campanien	77
4.2.1.8 Le Maestrichtien	77
4.2.2 Tertiaire	77
4.2.2.1 Le Danien-Eocène inférieur	77
4.2.2.2 Eocène moyen	78
4.2.2.3 Miocène.....	78
4.2.2.4 Le Pliocène.....	78
4.2.3 Le Quaternaire.....	78
4.2.3.1 Formations actuelles et récentes:	79
4.2.3.2 Formations anciennes :	79
4.3 Tectonique	80
4.3.1 Les Phases de l’orogénèse.....	80
4.3.1.1 La phase compressive fin-lutétiénne :.....	80
4.3.1.2 La phase distensive du Miocène Inférieur :	82
4.3.1.3 La phase compressive du Miocène Supérieur :.....	82

4.3.1.4 La phase compressive du Pliocène Inférieur :	82
4.3.1.5 La phase compressive du Pliocène Supérieur :	82
4.4 Géomorphologie	83
4.4.1 Introduction	83
4.4.2 Les monts septentrionaux	84
4.4.3 Les monts méridionaux	84
4.5 Conclusion	85
CHAPITRE V: APERÇU HYDROGEOLOGIQUE	87
5.1 Introduction	87
5.2 Géométrie des aquifères	87
5.3 Conditions aux limites	92
5.4 Etudes paramètres hydrodynamiques	92
5.4.1 Répartition des paramètres hydrodynamiques.	93
5.4.1.1 Carte de transmissivités:	94
5.4.1.2 Carte de la répartition de la perméabilité :	94
5.5 Conclusion :	96
- DEUXIEME PARTIE -	
CHAPITRE VI: MATERIELS & METHODES	99
6.1 Acquisition de données chimiques	99
6.1.1 Procédures d'échantillonnage	99
6.2 Analyse de l'eau souterraine	100
6.2.1 Composants inorganiques	100
6.2.2 Constituants organiques	102
6.2.3 Bactéries, virus et activité microbienne	102
6.3 Évaluation des données chimiques sur les eaux souterraines	103
6.3.1 Procédure générale	103
6.3.2 Caractérisation de la qualité des eaux souterraines	104

6.3.3	Traitement statistique et présentation des données	106
6.3.3.1	Statistiques de base:	106
6.3.3.2	Paramètres de position	106
6.3.3.3	Moyenne arithmétique :	106
6.3.3.4	Paramètres de dispersion.....	106
6.3.3.5	L'étendue :	107
6.3.3.6	La variance :.....	107
6.3.3.7	Ecart-type :.....	107
6.3.3.8	La covariance :.....	108
6.3.3.9	Coefficient de corrélation (linéaire) :.....	108
6.3.4	Représentations graphiques des résultats	109
6.3.4.1	Diagrammes hydrochimiques spécialisés	109
6.3.4.2	Diagramme de Piper	110
6.3.4.3	Diagramme de Stiff.....	111
6.3.4.4	Diagramme de Schöeller-Berkaloff	112
6.3.4.5	Qualité d'eau d'irrigation (diagramme de Richards)	113
6.3.5	Statistiques multivariées et méthodes d'interpolation géostatistique	116
6.3.5.1	Analyses en composantes principales	116
6.3.5.2	L'interpolation géostatistique	116

- TROISIEME PARTIE -

CHAPITRE VII: RESULTATS & INTERPRETATIONS	120
7.1 La Piézométrie	120
7.1.1 Évolution de la Piézométrie.	120
7.1.2 Etablissement des cartes piézométriques:	120
7.1.2.1 Inventaire des points d'eau	121
7.1.2.2 Carte piézométrique. Décembre 2001.....	121
7.1.2.3 Carte piézométrique : Janvier 2006	122

7.1.2.4 Battement de la nappe	123
7.2 Evaluation de la qualité des eaux destinées à l'irrigation	123
7.3 Hydrochimie générale.....	128
7.4 Evolution du faciès hydro-chimique:.....	131
7.5 Ratios ioniques.....	131
7.6 Cartographie hydro-chimique:.....	133
7.6.1 Evolution de la salinité.....	133
7.6.2 Evolution des nitrates	134
7.6.3 L'évolution des sulfates	136
7.6.4 Evolution du sodium	136
7.7 Analyses statistiques	139
7.7.1 Corrélation de Pearson	139
7.7.2 Les ACP	141
7.8 Conclusion	143
CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS	146

Liste des figures

Figure 1 : Cycle hydrologique (Gangbazo, 2004)	8
Figure 2: Cycle hydrologique en chiffres (Gangbazo, 2004)	9
Figure 3 : Schéma conceptuel du cycle hydrologique (Freeze et Cherry, 1979).....	9
Figure 4 : les facteurs qui contrôlent la qualité de l'eau (in : Unesco, 2004).....	14
Figure 5: Répartition de l'eau d'irrigation.	26
Figure 6 : Présentation et situations de la région d'étude.....	36
Figure 7: Carte topographique de la zone d'étude (coordonnées kilométriques Lambert, équidistance 50 m).....	37
Figure 8: Courbe hypsométrique de la plaine de Tébessa.	37
Figure 9 : Extrait de la carte de sols de l'Algérie (1 : 500.000 ^e , 1948)	38
Figure 10: Carte de la végétation de la zone d'étude. Source : HCDS-2005.....	39
Figure 11: Réseau hydrographique.....	41
Figure 12: Photo qui montre l'utilisation de l'eau usée pour irriguer une parcelle d'orge à la plaine de Tébessa (prise le 01/01/2009)	43
Figure 13: Photo de Oued El-Kébir pollué par les eaux usées (prise le 31/01/2008).....	44
Figure14: Carte des précipitations annuelles du Nord-Est de l'Algérie - ANRH.....	50
Figure 15: Variation des précipitations moyennes mensuelles à la station de Tébessa	51
Figure16: Fréquence des années sèches et des années humides, station de Tébessa 1935-2017	54
Figure17: Distribution mensuelle des températures à la station de Tébessa (Source FAO).	55
Figure 18 : Variation interannuelle des températures à la station de Tébessa (1983-2016)	55
Figure19: Diagramme pluviothermique de la station de Tébessa	56
Figure 20: Climatogramme d'Emberger.	58
Figure 21: Abaque de l'indice d'aridité annuel de De Martonne (1923).....	59
Figure22: Variation mensuelle de l'évapotranspiration potentielle à la station de Tébessa calculée par les trois méthodes Thorntwaite, Turc et FAO-Penman-Monteith.....	68
Figure 23: Bilan hydrique avec ETP de TURC, pour une année à pluviosité moyenne.	69
Figure 24: Bilan hydrique avec ETP de TURC pour une année à forte pluviosité (2001-2002).....	70

Figure 25: Bilan hydrique avec ETP de THORNTWAITE pour une année à forte pluviosité.	70
Figure 26: Colonne stratigraphique synthétique de la région de Tébessa. In Lessaad, 2011 (D'après : Dubourdiou 1956).....	75
Figure 27: Esquisse géologique de la plaine de Tébessa.....	81
Figure 28: Esquisse tectonique des environs de Tébessa, (W.M.Kowalski et al., 1997).....	83
Figure 29: Croquis géomorphologiques de la région de Tébessa.....	84
Figure 30: Localisation des profils électriques à la plaine de Tébessa	88
Figure 31: Coupes géo_électriques à travers la plaine de Tébessa (J,K,L et M)	89
Figure 32: Coupes géo-électriques à travers la plaine de Tébessa selon les profils (R,S,T etU)	90
Figure 33: Coupes géo-électriques selon les profils (V,W et X).....	91
Figure 34 : Coupe hydrogéologique a travers la plaine de la Merdja.	92
Figure 35: Carte des conditions aux limites.	93
Figure 36: Carte de transmissivité de la région étudiée (équidistance de $T= 0.2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$)	95
Figure 37: Carte de perméabilité dans la région d'étude ($K \times 10^{-5}$)	95
Figure 38: Kit multiparamètres de terrain.	100
Figure 39: Kit diagramme en moustaches des paramètres statistiques d'un échantillon d'eau.	108
Figure 40: Diagramme Piper.	110
Figure 41: Diagramme de Stiff.....	112
Figure 42: Diagramme de Shoeller Berkaloff.	113
Figure 43: Diagramme de Richards.....	115
Figure 44 : Inventaire des points d'eau à travers la région d'étude.....	121
Figure 45:Etat piézométrique de la Merdja en Décembre 2001.....	124
Figure 46 : Etat piézométrique de la Merdja en janvier 2006.	125
Figure 47 : Battement de la nappe de la Merdja entre déc. 2001 et jan. 2006.	126
Figure 48: Carte du risque de salinisation des sols (nov. 2001).....	127
Figure 49: Carte du risque de salinisation des sols (jan. 2006).	127
Figure 50: Carte du risque de salinisation des sols (jan. 2009).	128
Figure 51: Carte du risque de salinisation des sols (déc. 2010).	128
Figure 52: Diagramme de Piper. (A) Novembre 2001 ; (B) Janvier 2006.	132
Figure 53: Evolution du rapport Cl:SO4.	133

Figure 54: Evolution de la salinité.....	135
Figure 55: Evolution des nitrates.....	137
Figure 56: Evolution des sulfates.	138
Figure 57: Evolution du Sodium.	139
Figure 58: Evolution du rapport entre les ions carbonatés et les évaporites en fonction de la CE.	141
Figure 59: Distribution des individus sur les axes factoriels.....	143

Liste des tableaux

Tableau 1 : Le temps de résidences de l'eau dans les différents réservoirs	15
Tableau 2: Sources des éléments majeurs de l'eau.....	16
Tableau 3: Les éléments mineurs	17
Tableau 4: Les oligo- éléments.....	17
Tableau 5: Classification OSTRM (Source: Laborde, 2000).	37
Tableau 6 : Caractéristiques morpho-métrique du sous bassin versant.....	41
Tableau 7: SAU irriguée et infrastructures de petite et moyennes hydrauliques "inventaire et développement" de la plaine de Tébessa	42
Tableau 8: Evolution démographique.	43
Tableau 9: Caractéristiques des stations pluviométriques.....	48
Tableau 10: Précipitations moyenne inter-annuelles (1993-2008) de Tébessa et quelques stations avoisinantes.	49
Tableau 11: Précipitations moyennes inter-annuelles (1993–2008).	49
Tableau 12: Distribution mensuelle des précipitations annuelles (1984-1999).	51
Tableau 13: Précipitations interannuelles (2000-2010).....	52
Tableau 14: distribution des températures moyennes mensuelles.....	53
Tableau 15: Résultats du calcul de l'indice d'aridité pour la zone d'étude.....	59
Tableau 16: Caractéristiques climatiques enregistrées à la station de Tébessa.	64
Tableau 17: Résultats de calcul de l'ETP par les formules de Thontwaite, Turc.....	66
Tableau 18: Bilan hydrique avec ETP de Thornthwaite pour une année à forte pluviosité (2000-2001) à la station de Tébessa.	68
Tableau 19: Bilan hydrique pour une année à forte pluviosité (2000-2001) avec ETP de TURC à la station de Tébessa.....	69
Tableau 20: Récapitulatif des formations géologiques de la région de Tébessa d'après la carte géologique 1/ 200.000e.....	74
Tableau 21: Listes des forages d'AEP.	94
Tableau 22: Classification de l'eau selon TDS.	104
Tableau 23: Valeurs comparatives entre la composition chimique de l'eau souterraine par rapport aux eaux de pluie et celle des eaux de mer.	105

Tableau 24: Evolution de la profondeur du plan d'eau de la nappe de Tébessa dans quelques piézomètres.....	120
Tableau 25: Récapitulatif des résultats d'analyses hydro-chimiques.....	130
Tableau 26: Matrice des coefficients de corrélation de Pearson des deux campagnes (2001 et 2006).....	140
Tableau 27 : Contributions des variables après rotation du varimex.	142

Introduction et problématique

L'eau est vitale pour l'existence de l'homme. Presque toutes les premières civilisations humaines étaient centrées autour des sources et des cours d'eau. Beaucoup de civilisations aussi qui ont prospéré après avoir développé un système d'approvisionnement fiable en eau se sont effondrées lorsque cet approvisionnement a été réduit ou que sa qualité s'est détériorée. Tout au long de l'histoire, les populations du monde entier ont utilisé les eaux souterraines comme source d'eau potable et, aujourd'hui encore, plus de la moitié de la population mondiale dépend des eaux souterraines pour survivre ([UNESCO, 1992](#)).

L'eau est essentielle non seulement pour la croissance agricole, industrielle et économique, mais aussi elle est l'élément le plus important de l'environnement, avec un impact important sur la santé et la conservation de la nature. Actuellement, l'extension des superficies irriguées et la croissance rapide de la population, ainsi et le développement industriel ont stressés les aspects quantitatifs et qualitatifs du système naturel. En raison des problèmes croissants liés à la ressource en eau, l'homme a commencé néanmoins dans les pays développés à se rendre compte qu'il faut changer les mauvaises pratiques d'«utiliser et jeter» cette ressource, ou toute autre ressource naturelle. A cet effet, mettre une politique cohérente pour un aménagement rationnel des ressources est devenu évident ([Chartzoulakis et Bertaki, 2006](#)).

Certains pays en développement, déjà dépourvus de ressources en eau suffisantes, connaîtront inévitablement un ralentissement de leur développement lié à l'appauvrissement quantitatif de leurs ressources en eau. D'autres pays, « riches » en eau, verront la pollution de leurs ressources s'accroître à un niveau tel qu'il sera difficile d'y remédier. Parallèlement, les pays économiquement développés seront de plus en plus exigeants sur la qualité de leurs eaux ainsi que sur la sensibilité et le nombre des contrôles à effectuer sur les eaux distribuées et les eaux rejetées dans le milieu récepteur ([Rodier et al., 2009](#)).

Depuis plusieurs décennies, la croissance démographique induit une forte augmentation de la consommation d'eau pour ses différents usages, notamment pour l'alimentation en eau potable et l'irrigation. Face à cette consommation croissante, la gestion des eaux souterraines et des eaux superficielles constitue un domaine particulièrement sensible.

L'eau souterraine est l'eau stockée dans le sous-sol et les formations sous la surface de celui-ci. Il s'agit de la principale source d'eau potable pour de nombreuses communautés et la source secondaire pour les autres. L'eau souterraine est largement utilisée pour l'alimentation en eau potable et l'irrigation, elle est également une source importante d'eau pour les rivières et les ruisseaux, surtout pendant les longues périodes de sécheresse.

Cette ressource est reliée à toutes les autres formes de l'eau dans l'environnement à travers le cycle hydrologique, ces connexions rendent la menace de contamination des eaux superficielles (rivières, lacs, étangs, ...etc) une menace aussi pour la qualité des eaux souterraines. Les activités qui se déroulent à la surface de la terre sont les principaux responsables de la pollution des eaux souterraines. Parmi les activités responsables de la pollution des eaux souterraines, on peut citer:

- Les déversements accidentels ou une mauvaise élimination des produits pétroliers et solvants industriels ;
- L'application excessive d'engrais et de pesticides ;
- Stockage des déchets alimentaires et les déchets animaux à la surface du sol ;
- L'utilisation de systèmes septiques dans des endroits inadaptés.

Comme les eaux souterraines sont généralement profondes et inaccessibles, il est difficile ou impossible de les nettoyer, une fois qu'elles deviennent polluées, les méthodes de leurs dépollution, tels que l'isolement de la zone contaminée, le pompage et le traitement de l'eau contaminée, ne sont pas toujours couronnées de succès et quel que soit le succès, les tentatives pour dépolluer les eaux souterraines sont toujours très chers ([Vigil, 2003](#)).

Le manque d'eau dans les régions arides et semi-arides, devient une contrainte majeure pour le bien-être économique et le développement régional durable. Ces régions déficitaires sont caractérisées par des déséquilibres spatio-temporels importants entre la demande et d'approvisionnement, des stratégies et des directives pour la gestion de l'eau sont devenus fortement nécessaires pour la formulation et la mise en œuvre de la gestion intégrée et durable des ressources en eau ([Karousakis et Koundouri, 2006](#)).

Notre pays se compte parmi les régions déficitaires les plus sérieusement exposés à la rareté de l'eau à l'échelle du bassin méditerranéen, où la disponibilité de l'eau douce atteindra 378 m³/hab/an en 2025 et 309 m³/hab/an avant 2050 ([UN, 1995](#)). A cet effet l'utilisation durable de la ressource en eau est primordiale, parce qu'à sa rareté s'ajoute la dégradation de sa qualité, qui est devenu un sujet d'ordre mondial. Selon [Agoumi \(2003\)](#)

les données climatiques de la région du Maghreb (Algérie, Maroc, Tunisie et Lybie), durant le 20^e siècle indiquent un réchauffement estimé à plus de 1°C avec une tendance accentuée les 30 dernières années. Les données de Tebessa pour une période de 25 ans (1983-2008) en témoignent aussi de cette augmentation [Zereg \(2010\)](#). D'après une étude de la [Banque Européenne d'Investissement \(2008\)](#), les pays de la région du Maghreb en raison de leurs faibles ressources en eau auront à subir les impacts des changements climatiques qui seront d'autant plus importants à savoir :

- i) la hausse des températures moyennes entraînera une augmentation de la température de l'eau des oueds, ce qui aura pour effet de réduire leur teneur en oxygène et leur capacité d'autoépuration ;
- ii) la diminution du ruissellement entraînera en conséquence des concentrations plus élevées de polluants ;
- iii) la salinité des cours d'eau et des eaux souterraines augmentera (provoquée par une évaporation plus élevée, des demandes accrues en eau dues à la croissance démographique) ;
- iv) la pollution des eaux des estuaires due à une présence accrue de germes pathogènes.

Donc la ressource en eau d'une manière générale avec tous ses aspects qualitatifs et quantitatifs est influencée par des facteurs naturels et anthropiques telle que l'irrigation.

L'irrigation mal-gérée, présente deux inconvénients majeurs pour les milieux naturels : elle est grande consommatrice d'eau et peut accélérer la désertification de certaines régions par déstockage des réserves. Au niveau mondial, les prélèvements en eau de l'irrigation représentent aujourd'hui environ 70 % des prélèvements totaux, ce qui est énorme, la politique agricole actuelle de l'Algérie, basée sur l'extension de la surface agricole utile (SAU) irriguée a poussé les agriculteurs à mobiliser l'eau souterraine de façon intensive, avec comme corollaire une hausse de la consommation d'engrais naturel et minéral et de produits de traitement des plantes, tous vecteurs de pollution potentielle des eaux souterraines et superficielles. Dans ce concept s'insère la présente étude, afin de connaître les impacts et les conséquences de ces facteurs sur la qualité de la ressource en eau souterraine d'une région semi-aride située à l'Est Algérien où le choix a été porté sur la nappe alluviale de la plaine de Tébessa dite « La Merdja ». A la lumière des anciens travaux, ([Djabri 1987](#), [Rouabhia 2004-2009](#), [Zereg 2010](#), [Lakhneche 2012](#), [Belmiloud](#)

2010, Gherieb 2011) le sous bassin de cette zone présente des symptômes suffisamment représentatifs de dégradation de la qualité de la ressource en eau souterraine. Toutes les études précédentes se sont intéressés à l'évolution saisonnière entre la période des hautes eaux et la celle des basses eaux durant la même année, la présente étude aborde cette problématique en s'intéressant à la composante interannuelle à travers quatre campagnes de terrains en période des hautes eaux (Nov. 2001, Janv. 2006, Janv. 2009 et Déc. 2010).

Quatre parties avec sept chapitres ont été consacrées pour atteindre l'objectif de la présente thèse :

1. La première partie : regroupe la problématique et 04 chapitres :
 - Le premier chapitre représente une synthèse bibliographique en relation avec la thématique choisie avec un rappel sur l'état de connaissance et les travaux antérieurs qui avaient été réalisés sur la même zone d'étude.
 - Les chapitres 2 à 4 ont été consacrés à la description et la présentation de la région d'étude dans un cadre général, géologique, hydro-climatique et hydrogéologique,
2. La deuxième partie contient un chapitre :
 - Le sixième chapitre traite les méthodes d'analyses et traitements statistiques.
3. La Troisième partie contient un chapitre :
 - Le septième chapitre évoque les résultats et leurs interprétations.
4. La conclusion générale passe en revue l'ensemble des faits marquants du présent travail et qui représente la synthèse des principaux résultats obtenus avec les recommandations.

Première partie

Chapitre I:

Synthèse bibliographique

Chapitre I:

Synthèse bibliographique

1.1 Introduction

Les eaux souterraines sont une partie essentielle du cycle hydrologique et une ressource naturelle très précieuse, car plus de 1,5 milliard de personnes dans le monde comptent sur les eaux souterraines pour s'approvisionner en eau potable (UNESCO, 1992). La plupart des gens considèrent l'eau souterraine comme une source vierge d'eau potable qui ne peut pas être polluée parce que selon eux qu'elle est naturellement protégée contre la pollution par des couches de sols et de roches ; alors que cette évidence n'est pas toujours absolue, puisqu'en réalité la pollution des eaux a été toujours présente, en raison de son lien étroit avec les activités de l'homme, qui se passent généralement à l'intérieur ou à proximité d'une entité géographique appartenant à un bassin versant.

1.2 Cycle hydrologique

La plus grande partie de l'eau de notre planète se trouve sous forme d'eau salée dans les océans et profondément sous terre ou est contenue dans les calottes polaires et sur la couverture de glace permanente des hautes chaînes de montagnes. Ainsi, seuls 30 millions de km³ d'eau douce, soit seulement 2% de l'eau, participent activement au cycle hydrologique et au maintien de toute vie sur les continents. Le cycle hydrologique (fig. 1 et 2) n'a ni commencement ni fin, il représente d'une manière synthétique comment une partie de l'eau de l'océan s'évapore, la vapeur d'eau retourne en eau douce sous forme de pluie, de grêle et de neige à la surface de la terre (océans, mers et continents), puis s'écoule sur la surface (glaciers, ruissellement, ruisseaux) et une partie infiltrée dans le sol (eau du sol) cette dernière est reprise par la végétation (évapotranspiration), et/ou pour recharger les nappes souterraines. Par la suite, la plupart des eaux souterraines retournent, soit par pompage, soit par écoulement naturel, vers des plans d'eau de surface qui se déversent ensuite dans la mer ou s'évapore (De Wiest, 1965).

Selon Board (1999), Les précipitations qui tombent dans un bassin versant peuvent emprunter trois voies:

1. Une partie est interceptée par la végétation et s'évapore ou transpirée pour retourner vers l'atmosphère;

2. Une partie est emmagasinée dans la glace, l'eau souterraine, les étangs ou les milieux humides pour une période de temps variable;
3. Une partie ruisselle à la surface du sol ou pénètre dans le sol et s'écoule vers le réseau hydrographique (ruisseaux, rivières, etc.) pour ensuite retourner à l'océan.

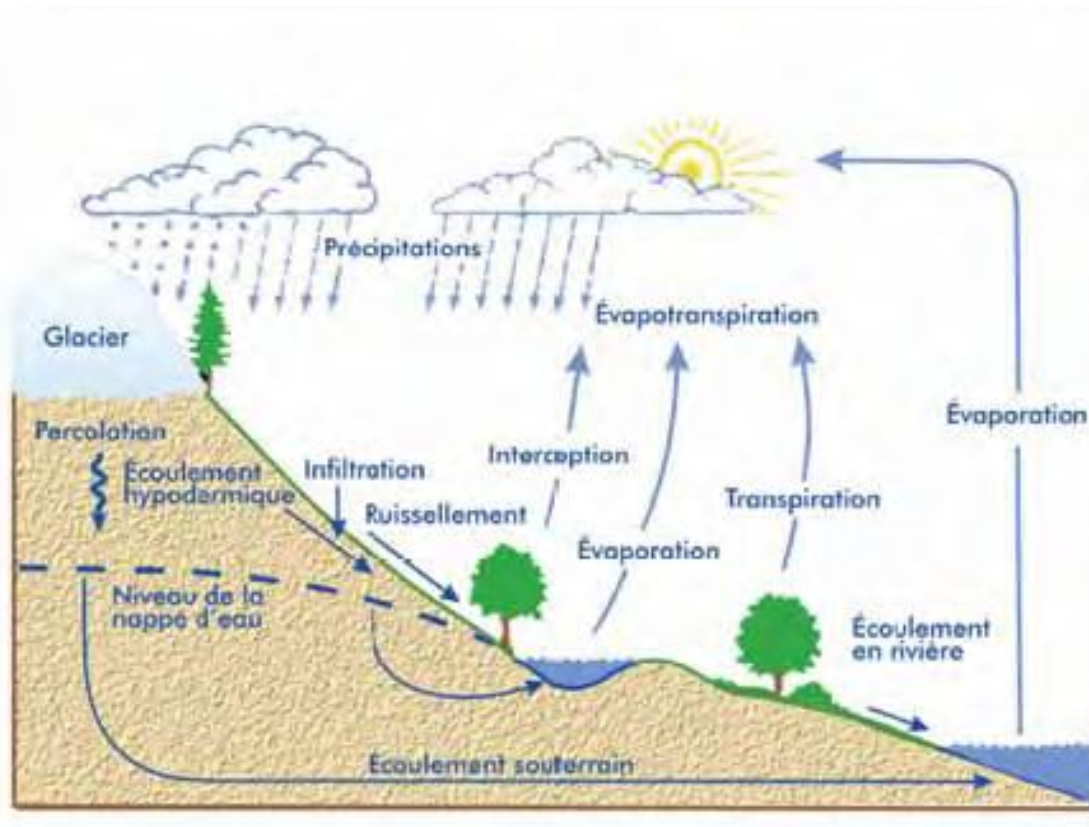


Figure 1 : Cycle hydrologique (Gangbazo, 2004)

Selon Freeze et Cherry (1979) le cycle hydrologique peut être synthétisé sous la forme conceptuelle dans la figure 3. L'eau sur les masses terrestres est toujours en mouvement, soit en mouvement rapide (transport de vapeur, précipitations, écoulement de surface), soit lentement (écoulement des eaux souterraines, glaciers). La lenteur de l'écoulement des eaux souterraines signifie que la majeure partie de l'eau douce est sous la forme d'eau souterraine. Par conséquent, les eaux souterraines constituent le principal réservoir d'eau douce, tandis que les eaux de surface peuvent être considérées comme les précipitations excédentaires qui n'ont pas pu s'infiltrer ou qui ont été rejetées comme débordement du réservoir souterrain (sources et autres exutoires).

Lorsque l'eau pénètre dans le sol (infiltration), elle devient l'eau du sol; l'eau du sol peut ne pas remplir complètement les pores entre les particules du sol. Ainsi, la zone à travers laquelle l'eau se déplace est insaturée (zone insaturée ou vadose). L'écoulement à travers la

zone non saturée est essentiellement vertical. Au sommet de la zone vadose, le flux vertical peut être dirigé vers le bas sous l'effet de la gravité, vers le haut (flux capillaire) résultant

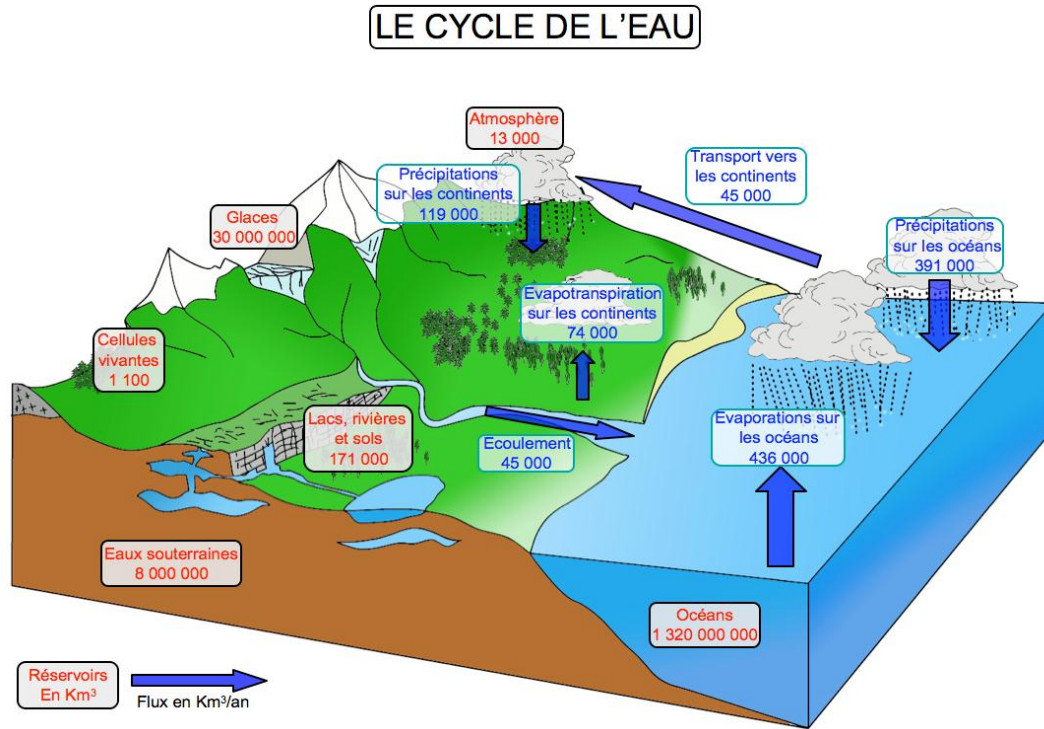


Figure 2: Cycle hydrologique en chiffres (Gangbazo, 2004)

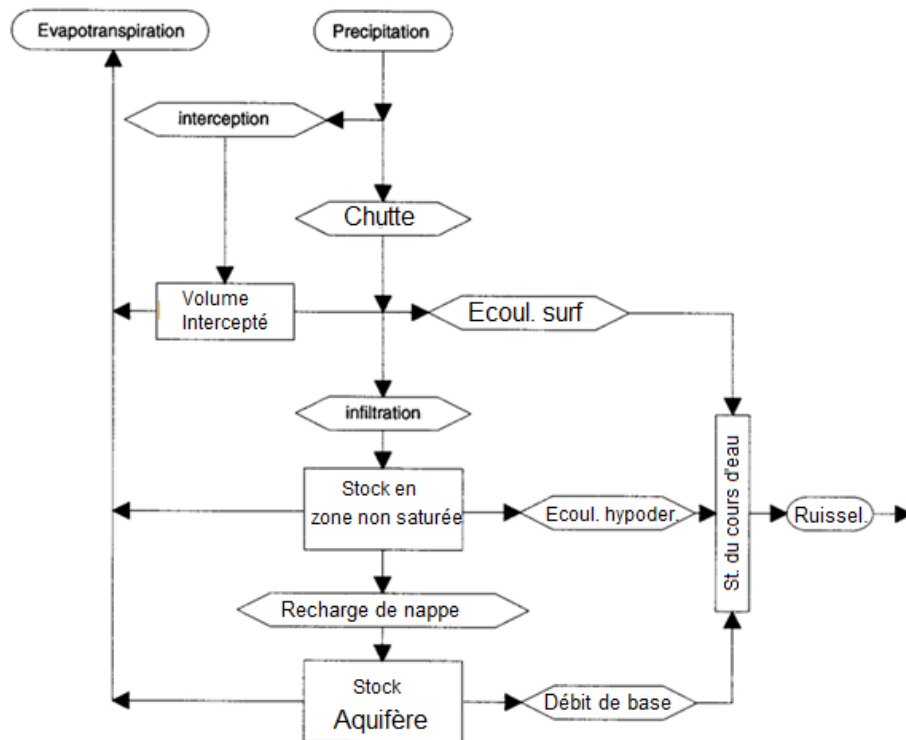


Figure 3 : Schéma conceptuel du cycle hydrologique (Freeze et Cherry, 1979).

des processus d'évapotranspiration. À une profondeur de 5 m sous le sol, tout écoulement insaturé est dirigé vers le bas (les arbres et les arbustes à racines profondes, par exemple le cèdre de sel, peuvent encore retirer l'eau de l'écoulement descendant).

1.3 Conditions naturelles influençant la qualité de l'eau

L'eau souterraine à l'instar des autres différentes formes de l'eau dans la nature - les rivières et les ruisseaux, les lacs et les étangs, les terres humides, les baies et les estuaires, les océans et les mers ont toutes des caractéristiques uniques. Ces caractéristiques sont influencées par les activités humaines et aussi par les conditions naturelles dans l'environnement. Certaines des conditions naturelles les plus importantes comprennent la géologie, le climat, la quantité et le type de végétation présente, les caractéristiques morphologiques telles que la taille, la forme, la profondeur et l'étendue.

1.3.1 La géologie

La géologie d'une zone ou d'une région donnée détermine, en grande partie, la composition minérale de ses eaux. Par exemple, l'eau dans les zones avec des dépôts de calcaire contient des minéraux calcaires tels que le calcium et le magnésium. Ces minéraux se dissolvent et s'infiltrent dans l'eau lorsqu'elle traverse des formations rocheuses et du sol contenant du calcaire. Parce que tous les minéraux se dissolvent dans une certaine mesure dans l'eau, on peut en savoir beaucoup sur la teneur en minéraux dans l'eau dans une zone donnée en apprenant quel genre de minéraux se trouvent dans le sol et la roche de la région.

La qualité de l'eau est donc le produit de sa circulation ([Jermar, 1987](#)). Les changements de la géochimie des eaux souterraines peuvent être fonction des variations des propriétés hydrogéologiques ou de la proportion des minéraux des roches encaissantes ([Glynn & Plummer, 2005](#)). De nombreux auteurs se sont intéressés à la caractérisation des aquifères par le biais de l'approche couplée hydrogéologique et géochimique ([Banwart et al., 1999](#) ; [Lenczewski et al., 2003](#); [Glynn & Plummer, 2005](#) ; [Van Der Hoven et al., 2005](#)).

1.3.2 Le climat

D'après les études menées à travers le monde, les changements climatiques auront des conséquences directes sur les ressources en eau souterraine, aussi bien sur le plan quantitatif que qualitatif. ([SIGES Aquitaine](#)).

La recharge des nappes souterraines, notamment les nappes libres, se fait principalement grâce à l'infiltration de l'eau des précipitations. D'après les météorologues du monde, les changements climatiques se manifestent en règle générale, par une diminution des précipitations, notamment pour la période estivale. A cela s'ajouterait une augmentation de l'évapotranspiration, ce qui aura comme conséquence directe une diminution de la quantité d'eau réellement infiltrée (flux entrant), ceci d'une part, d'autre part, si les cours d'eau sont asséchés en été les nappes d'eau vont les alimenter par un flux sortant. Donc La diminution du flux entrant et le drainage de la nappe par un flux sortant aura des conséquences par une modification des conditions de recharge des systèmes hydrogéologiques.

Le climat influence la qualité de l'eau car la température, les précipitations et le vent affectent les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques de l'eau. La température est l'une des conditions naturelles les plus importantes influençant la qualité de l'eau. Elle affecte la quantité de gaz dissous, tels que l'oxygène, dans l'eau. L'eau chaude contient moins d'oxygène que l'eau froide. En outre, les réactions chimiques et biologiques se produisent plus rapidement dans l'eau chaude que dans l'eau froide.

1.3.3 La morphologie

La forme et les dimensions des masses d'eau ont une influence directe sur leur qualité. Par exemple, un lac peu profond sera généralement mélangé complètement par l'action des vagues et du vent. Cette action de mélange aide à répartir les minéraux et les gaz dissous de manière égale dans tout le lac. En revanche, un lac profond ne sera généralement pas bien mélangé. Le fond du lac peut avoir moins d'oxygène et plus de minéraux que la surface du lac. Les lacs profonds et non mélangés peuvent développer des couches, chacune ayant des caractéristiques de qualité de l'eau différentes. (La stratification est le terme utilisé pour décrire cet effet de stratification.) Comme les cours d'eau sur les pentes raides s'écoulent rapidement, ils ont souvent une meilleure qualité d'eau que les cours d'eau sur les pentes plus douces. Les cours d'eau sur les pentes abruptes subissent plus de turbulence lorsque l'eau tombe en cascade sur les roches et les bûches, ajoutant de l'oxygène à l'eau en se mélangeant à l'air. Les cours d'eau situés sur des pentes douces n'ont pas le bénéfice d'un mélange turbulent pour aérer l'eau. Cependant, les cours d'eau rapides ont aussi plus d'énergie pour provoquer l'érosion. Les sédiments provenant des berges érodées peuvent être suspendus dans l'eau, ce qui augmente la turbidité et diminue la qualité de l'eau

1.3.4 L'emplacement

L'emplacement d'un plan d'eau sur le paysage terrestre détermine les conditions naturelles décrites ci-dessus - géologie, climat, végétation et morphologie - et donc la qualité naturelle de son eau. Par exemple, une rivière lente qui serpente à travers une large vallée plate n'aura pas la même qualité qu'un cours d'eau de haute montagne. Le ruisseau de haute montagne sera probablement clair et frais tandis que la vallée de la rivière peut être trouble et chaude simplement en raison de l'emplacement et des conditions naturelles.

1.3.5 Activités humaines qui influent sur la qualité de l'eau

Pratiquement toutes les activités humaines, tous les types d'installations ou de structures installées par l'homme représentent une source potentielle de pollution. Pendant des siècles, l'homme dispose des déchets en les plaçant dans des cours d'eau, en les stockant sur ou dans le sol ou par diverses méthodes. Chaque jour, une grande variété de substances potentiellement nocives est régulièrement déposée ou introduite dans les formations rocheuses souterraines et les aquifères. Certaines de ces activités ont eu lieu pendant de nombreuses générations et certaines ont commencé plus récemment. Ainsi la pollution des eaux qu'elle soit de surface ou souterraines comme toute autre forme de pollution, est le prix que le monde civilisé doit payer pour son existence.

1.3.5.1 Rivières et ruisseaux

Depuis l'antiquité les gens utilisent les rivières et les ruisseaux pour voyager et transporter leurs biens et marchandises. Malheureusement, ils les ont également utilisés pour éliminer et transporter leurs déchets, une pratique qui menace sérieusement la qualité de l'eau dans les rivières et cours d'eau. Depuis des siècles, les villages ont été construits sur les berges des rivières. Les déchets de ces villages sont jetés dans les rivières pour être emportés. Mais avant, peu de gens vivaient en aval et les rivières avaient la capacité naturelle d'assimiler les déchets et de se nettoyer. Cette capacité naturelle pour un corps d'eau de se nettoyer est appelée capacité d'assimilation. Au fur et à mesure que la population continuait de croître, les capacités d'assimilation des eaux étaient dépassées et les rivières ont tendance à perdre cette capacité. Aujourd'hui, la plupart d'entre nous savent qu'il est inacceptable de déverser des déchets non traités dans une rivière ou un cours d'eau. Les déchets déversés dans une rivière en amont seront transportés vers les utilisateurs en aval.

L'expression «nous vivons tous en aval» est souvent utilisée pour nous rappeler d'utiliser sagement nos rivières, en respectant les droits de tous les utilisateurs en aval. Bien que dans les pays développés le traitement des eaux usées provenant de la plupart des collectivités et des industries soit maintenant devenu une tâche courante pour éliminer les polluants, elles sont rejetées dans les rivières en même temps que les polluants qui restent après le traitement. Les efforts pour garder les rivières propres et en bonne santé rivalisent avec cette pratique séculaire d'utiliser nos rivières pour transporter les déchets. Parfois, les déchets pénètrent dans nos rivières et nos cours d'eau par des rejets plus dispersés, indirects ou diffus, ou par des rejets de sources non ponctuelles. Par exemple, les engrais, les pesticides et les herbicides peuvent être transportés de nos pelouses et de nos champs dans les eaux avoisinantes pendant et après les orages, à la suite du ruissellement des eaux pluviales.

En conclusion la figure 4 synthétise d'une manière schématique les facteurs qui influencent et qui contrôlent la qualité de l'eau souterraine.

Pour être en mesure d'identifier les réactions hydrogéochimiques, il faut connaître le passé et le présent des facteurs géologiques, hydrologiques, biologiques, chimiques, météorologiques et les activités humaines qui influent sur la qualité de l'eau. L'arrivée d'une espèce chimique ou biologique dans la zone non-saturée de recharge d'un aquifère est largement contrôlée par l'utilisation des sols (végétation et couverture du sol), la fréquence, la quantité et la durée des précipitations et l'irrigation, la minéralogie du sol, la température de l'air et le taux d'échange gaz / air du sol.

Les facteurs qui influent sur la chimie des eaux souterraines dans la zone saturée sont le taux de réaction chimique, le temps de séjour dans la zone saturée et la minéralogie de la matrice rocheuse.

La qualité de l'eau de surface infiltrée est contrôlée par la composition de l'eau de surface ainsi que par la température, la composition des sédiments du fond de ces eaux et le temps de séjour dans ces sédiments de fond.

Le temps de résidence et le chemin d'écoulement sont déterminés par des facteurs tels que l'épaisseur de l'aquifère, la perméabilité, la porosité et la recharge ; avec tous ces facteurs essentiellement naturels s'ajoutent des effets anthropogéniques, conduisant à des stress chimiques et physiques sur le système hydrogéologique, qui peuvent être dominants dans certaines zones.

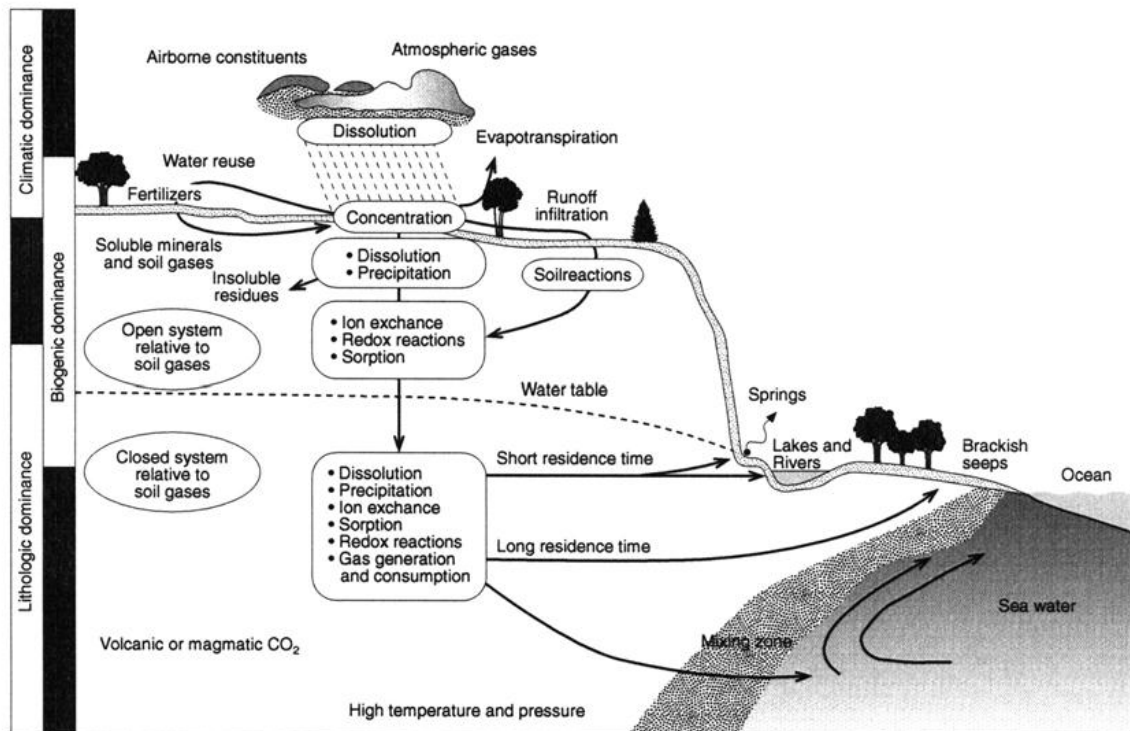


Figure 4 : les facteurs qui contrôlent la qualité de l'eau (in : Unesco, 2004)

1.4 Origines des éléments de la qualité de l'eau souterraine

L'eau pluviale est légèrement acide du fait de sa teneur en dioxyde de carbone (CO₂) dissous. Pendant son infiltration dans le sol et le sous-sol, cette eau se charge en ions issus des formations traversées et des minéraux rencontrés, par conséquent elle acquiert des propriétés physiques et chimiques qui caractérisent la nappe considérée (Beauchamp, 2006). Lorsque les eaux souterraines s'écoulent dans les roches, leurs minéraux se dissolvent graduellement, atteignant rarement leur limite de solubilité. Leur concentration dans un aquifère d'eau souterraine reflète généralement le temps de résidence de l'eau dans le sous-sol (tableau 1).

Dans l'aquifère, il s'établit un équilibre entre la composition chimique de l'eau et celle des roches: l'eau prend une minéralisation qui demeure stable dans le temps et sert à caractériser un faciès hydro-chimique.

* Dans les terrains cristallins (granitiques), sableux et gréseux -c'est à dire riche en minéraux siliceux et silicatés - les eaux sont douces: elles sont peu minéralisées mais acides et agressives pour les conduites

* Dans les réservoirs calcaires, les eaux sont dures, moyennement à fortement minéralisées en sels de calcium et magnésium; elles entartrent les conduites. Dans les réseaux karstiques, l'eau peut se charger de particules argileuses en suspension au cours des fortes précipitations.

* Au contact du gypse, l'eau se charge en sulfate de calcium et devient dure (séléniteuse) et impropre à la consommation.

* En bordure de mer, les aquifères peuvent être en contact avec l'eau de mer: échange au niveau du biseau salée, contamination de l'eau d'infiltration par les embruns salés. L'eau de la nappe devient plus ou moins saumâtre. L'invasion de la nappe d'eau douce par l'eau salée est accélérée par les pompages et le rabattement de la nappe.

* L'eau des nappes alluviales a une qualité qui dépend de celle de la nappe qui l'approvisionne et de celle de la rivière.

Tableau 1 : Le temps de résidences de l'eau dans les différents réservoirs

Réservoirs	Temps de résidence
Glaciers et calottes glacières	De 1900 à 9700 ans env.
Ensembles des eaux souterraines	Environ 100 ans
Océans	Environs 2500 ans
Lacs d'eau douce	Environ 17 ans
Cours d'eau	16 jours
Atmosphère	8 jours

Les constituants dissous réfléchissent:

- Le type de roches où l'eau a coulé à travers
- Les impacts de l'homme
- Le caractère du constituant et l'état de l'eau

Généralement la composition chimique de l'eau se partage en trois classes :

- Les ions majeurs ;

- Les ions mineurs ;
- Les oligo-éléments.

Le tableau 2 dessous résume les principaux constituants de l'eau et leurs origines.

Tableau 2: Sources des éléments majeurs de l'eau.

Les ions majeurs > 5 mg / l	Source
Calcium, Ca	principalement à partir de carbonates, de gypse, de feldspaths
Magnésium, Mg	feldspaths, olivine, pyroxène, amphiboles, mica, Mg-calcite
Sodium, Na	feldspaths, évaporites, échange de cations, eau de mer, déchets industriels
Potassium, K	feldspath, engrais, K- évaporites, glauconite
Siliceux acide, H_4SiO_4 , SiO_2	Silicates
Ammoniac, NH_4	pollution, dégradation de la matière organique, réduction de NO_3 , échange de cations
Sulfate, SO_4	dissolution du gypse et de l'anhydrite, oxydation de la pyrite, de l'eau de mer, des sels d'engrais transportés par le vent
Chlorure, Cl	éolienne eau de pluie, eau de mer et saumure, évaporite dépôts, pollution
Nitrate, NO_3	Dépôt à l'air libre, la pourriture des plantes fixatrices d'azote, l'oxydation de l'ammoniac ou contamination par l'azote organique
Carbonate, CO_2 , HCO_3 , CO_3	sol et de CO_2 atmosphérique, les roches carbonatées, l'oxydation des composés organiques, gaz volcaniques
Oxygène, O_2	Sol, gaz et atmosphère

Tableau 3: Les éléments mineurs

Constituants mineurs , 0,01 à 10 mg / l	Source
Aluminium, Al	argiles , feldspaths , amphiboles, micas
Bore , BO3	tourmaline, évaporites , eaux usées , eau de mer , volcanique les émissions
Fluorure , F	fluorite, quelques silicates, volcanique les émissions
Sulfure , H2S	pyrite, réduite sulfate , huile champ gaz , volcanique les émissions
Phosphate, PO4	apatite, engrais , eaux usées boues , dégradation des matières organiques matière
Fer , Fe	oxydes , sulfures , carbonates et argiles
Manganèse , Mn	oxydes et hydroxydes
Strontium, Sr	Carbonates
Acides biologique, principalement humique et fulvique	décomposition de matière biologique
Argon, Ar	Air
Méthane , CH4	Dégradation de la matière biologique dans des conditions réductrices intenses
Azote , N2	air, réduction de nitrate

Tableau 4: Les oligo- éléments.

Les oligo- éléments	
Constituants en trace, généralement <0,1 mg / l et généralement au-dessous du niveau de détection	Source
Arsenic, As	insecticides à l'arsenic, oxydation de la pyrite
Bromure , Br	évaporites , eau de mer , eau de pluie
Chrome , Cr	Contamination
Iodure , I	végétation marine , évaporites
Lithium, Li	altération des silicates
Uranium, U	minéraux dispersé qui contiennent l'uranium , résidus de moulin
Vanadium, V	pas bien connu
Zinc, Zn, cadmium, Cd	sulfures, déchets industriels, sels d'engrais PO ₄ , boue d'eau usées

1.5 Les paramètres de qualité de l'eau

1.5.1 Principaux paramètres de potabilité

La qualité d'une eau souterraine est souvent déterminée par un certain nombre de paramètres physiques et chimiques, déterminant à leur tour des propriétés organoleptiques aussitôt perceptibles pour l'utilisateur. Une teneur trop élevée d'un ou plusieurs composants chimiques cause des désagréments au consommateur (saveur, risques sanitaires) et aux canalisations (corrosion, entartrage...) L'eau est alors jugée impropre à la consommation (et à sa distribution) à moins de subir au préalable un traitement approprié (cas des eaux chargées en nitrates). (Beauchamp, 2006).

Les paramètres pris en compte sont:

- La dureté de l'eau qui correspond à sa concentration en calcium et magnésium
- Son pH qui dépend de la teneur en ions;
- Sa teneur en gaz dissous issus de l'atmosphère (O_2 et CO_2);
- Sa teneur en substances minérales dissoutes généralement sous forme ionique: anions (bicarbonates, chlorures, sulfates, nitrates, fluorures) et cations (calcium, magnésium, sodium, potassium, fer, manganèse, ammonium);
- Sa turbidité, produite par des matières en suspension (argiles) dans les aquifères karstiques. D'autre part, une teneur élevée d'un élément chimique peut être l'indice d'une pollution par d'autres substances toxiques: les résidus de pesticides accompagnent généralement la migration des nitrates d'origine agricole à la nappe (atrazine, simazine employées en particulier comme désherbants).

A ces paramètres physico-chimiques s'ajoutent des paramètres microbiologiques souvent déterminants dans les aquifères calcaires.

Les paramètres qui déclassent une nappe pour l'eau potable ou impliquent un traitement correcteur pour sa potabilisation sont dans la pratique: la dureté, le pH, la teneur en sulfates, la turbidité, la teneur en Fe, Mn et F.

1.5.1.1 La dureté

La dureté totale d'une eau est le produit de la présence des sels dissouts de calcium et de magnésium qu'elle contient, on distingue deux types de duretés: une dureté dite carbonatée qui correspond à la teneur en carbonates et bicarbonates de Ca et Mg et une dureté non carbonatée produite par les autres type de sels.

La dureté se mesure par le titre hydrotimétrique exprimé en °F (degré français); 1 °F correspond à 10 mg de carbonate de Ca dans 1 litre d'eau. Des valeurs faibles correspondent à des eaux douces, dont le TH est compris entre 5 et 20 °F. Les eaux dures ont un titre compris entre 20 et 35 °F.

La dureté de l'eau influe essentiellement sur l'état des canalisations et des appareils de chauffage, et sur le lavage du linge. Une eau dure donne des dépôts de tartre dans les canalisations, les bouilloires et chauffe-eau, ainsi que dans les filtres des robinets. D'autre part, ces dépôts carbonatés ont un effet bénéfique en protégeant les conduites de la corrosion. Ces eaux dures pourront être adoucies par le distributeur ou par l'utilisateur (échange d'ions sur résine dans l'industrie ou chez le particulier).

1.5.1.2 Le pH

Le pH de l'eau influence l'équilibre physico-chimique, surtout l'équilibre calco-carbonique et par conséquent l'action de l'eau sur les carbonates (attaque ou dépôt). Le pH est alcalin dans les eaux carbonatées et acide dans les eaux des aquifères sableux ou granitiques. De ce fait le pH est corrigé selon les cas par élimination du CO₂ dissous en excès ou par correction de la dureté carbonatée.

1.5.1.3 La turbidité

Elle occasionne des désagréments dans l'aspect de l'eau et sa saveur (goût de terre). La turbidité peut être importante dans les aquifères karstique. Les pics de turbidité suivent les fortes précipitations; La vitesse de circulation de l'eau dans le réseau souterrain en crue ne permet pas leur décantation; de plus des particules déposées précédemment sont arrachées aux cavités et augmentent la charge en suspension que l'on retrouve à l'exutoire.

1.5.2 Origine et les impacts de quelques constituants communs :

1.5.2.1 Le Calcium (Ca^{2+})

C'est l'élément le plus abondant des métaux alcalino-terreux, dérivé de presque toutes les roches (sédimentaires, ignées, métamorphiques), Principalement à partir de la calcite ($CaCO_3$) et du gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) qui sont communs dans les roches sédimentaires (le calcaire est ~ 10% de roches sédimentées).

1.5.2.2 Le Magnésium (Mg^{2+})

Il est rencontré dans de nombreux minéraux, par ex. dolomite ($CaMg (CO_3)_2$) magnésite ($MgCO_3$) et argiles, peut être introduit à l'eau à partir des exploitations minières, se produit dans des réservoirs souterrains de saumure. Il contribue également à la dureté qui inhibe le moussage du savon.

1.5.2.3 Le Sodium (Na^+)

Le Sodium est un élément très répandu dans la nature, on le trouve dans les feldspaths, les évaporites et les argiles, il est le deuxième élément le plus abondant dans l'eau de mer après les chlorures, il représente 30% de la masse totale des ions dissouts. Le Sodium est très mobile souvent associé aux chlorures et aux bromures et indique souvent un impact humain: par exemple : le dégivrage des routes, adoucisseurs d'eau, élimination des déchets animaux, lixiviats des sites d'enfouissement...etc.

1.5.2.4 Le Potassium (K^+)

Il dérive des feldspaths potassiques et les micas, il constitue un composant important d'engrais, sa présence est d'une grande importance pour la santé du sol, des plante, la croissance et la nutrition animale. Le potassium est souvent associé au chlorure et au bromure.

1.5.2.5 Les Sulfates (SO_4^{-2})

La source naturelle la plus importante est le gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), peut avoir des origines anthropiques à partir de l'usage des engrais et l'épandage des déchets animaux, le drainage minier acide sous l'exposition de la pyrite à l'oxygène et à l'eau produit de l'acide

sulfurique, les sulfates peuvent aussi avoir une origine atmosphérique dus à la combustion de combustibles fossiles.

1.5.2.6 Les Orthophosphates (PO_4^{3-})

Le phosphore est généralement présent sous forme d'orthophosphate, les principales sources sont:

- les eaux usées et les fosses septiques à partir des phosphates organiques dans les déchets corporels et les résidus alimentaires ;
- déchets animaux ;
- détergents et engrais ;
- Les décharges industrielles, les phosphates sont ajoutés à l'eau pour empêcher la formation d'oxydes de fer ou de carbonates de calcium ;
- les incendies de forêt dus à l'érosion des sols.

1.5.2.7 Les Chlorures (Cl^-)

Le chlore sous forme de Cl_2 est hautement toxique, il est utilisé dans les désinfectants, la production de papier (eau de javel), les antiseptiques, les colorants, les insecticides, les peintures, les produits pétroliers, les plastiques et les solvants. Les Chlorures (Cl^-) est un sel résultant de la combinaison de chlore gazeux et d'un métal ($NaCl$, $MgCl_2$) la plupart sont très solubles dans l'eau, les principales sources sont: les roches contenant des chlorures, rejets agricoles, eaux usées industrielles, déchets de puits de pétrole, effluents des usines de traitement des eaux usées, dégivrage des routes... etc.

1.6 Contamination des eaux souterraines

1.6.1 Introduction

L'eau souterraine n'est pas toujours une source vierge d'eau potable qui ne peut pas être polluée, car la pollution des eaux souterraines est couramment présente, en raison de son lien étroit avec les activités de l'homme. Comme il a été évoqué précédemment que toutes les activités humaines, tous les types d'installations ou de structures installées par l'homme représentent des sources de pollution. Pendant des siècles, l'homme dispose ses déchets en les jetant dans des cours d'eau, en les stockant sur ou dans le sol ou par diverses méthodes. Chaque jour, de grandes quantités et variétés de substances nocives est régulièrement

introduite dans les formations souterraines et qui finiront à atteindre les aquifères. Ainsi, la pollution des eaux souterraines comme toute autre forme de pollution, est devenu un défi que le monde civilisé doit faire face.

1.6.2 L'interaction eau de surface et eau souterraine

Les eaux souterraines et les eaux de surface sont très liées dans le cycle hydrologique. Dans les zones à climats arides et semi-arides contrairement aux zones humides, le lien est indirect, car elles sont habituellement séparées par une zone non saturée épaisse. Les prélèvements excessifs ou la contamination de l'un des deux systèmes aquatiques vont probablement, affecter l'autre.

Selon [Woessner \(2000\)](#), à grande échelle la plupart de l'échange hydrologique, entre les eaux de surface et les eaux souterraines, dans n'importe quel environnement est contrôlée par :

- L'ampleur et la distribution des propriétés hydrauliques (conductivité hydraulique, transmissivité et le coefficient d'emmagasinement);
- La géométrie et la position du chenal du cours d'eau dans la plaine alluviale;
- L'élévation relative du niveau de l'eau dans le cours d'eau de la nappe ;
- La relation du plan d'eau de surface et le niveau de la nappe phréatique adjacente, modifiée par la perméabilité de l'aquifère ;
- Le contexte climatique : la région à pluviosité abondante favorise la recharge dans les nappes aquifères ce qui provoque des fluctuations rapides du niveau piézométrique des eaux souterraines.

1.6.3 Contamination des eaux souterraines

La contamination est l'introduction de composants biologiques, physiques, et chimiques dans le système environnemental à un rythme tel que l'environnement ne puisse s'en accommoder par dispersion, décomposition, recyclage ou en les stockant sous une forme inoffensive. Dans ce cas, le contaminant occasionne un dégât structurel ou fonctionnel du système environnemental et peut causer aussi un dommage à la santé humaine. Toute activité de développement (urbanisation, activité industrielle, agricole, et exploitation minière) de l'homme génère des contaminants qui ont un impact à la fois sur les eaux de surface et les eaux souterraines. La contamination des systèmes d'eau de surface a un impact direct sur l'écosystème aquatique. D'autre part, lorsque des contaminants pénètrent

dans le système des eaux souterraines, ils «s'atténuent» dans le système pendant une longue période. Selon la nature des polluants et les conditions physico-chimiques des aquifères, soit les contaminants se dégradent en composants inoffensifs, soit ils sont conservés ou transportés vers des nappes d'eau souterraine qui sont en contact avec les écosystèmes aquatiques, terrestres ou côtiers, comme les lacs, les rivières, les zones humides, les estuaires et l'océan (Vaessen et Brentführer, 2015).

1.6.3.1 L'urbanisation:

La croissance démographique est toujours accompagnée par un besoin accru en eau pour ses différents usages ce qui induit une forte pression sur l'exploitation des eaux souterraines à l'échelle mondiale (Land, 2003; Burke et Moench, 2000).

En plus les populations urbaines quotidiennement rejettent de grandes quantités de déchets solides et liquides et qui génèrent d'énormes volumes d'eaux usées contenant des matières plastiques, des produits chimiques, de la graisse et de l'huile, des métaux, verre, papier, déchets organiques, etc. Cela constitue alors en l'absence de systèmes de contrôle et de suivi une énorme source de pollution diffuse aux aquifères d'eau souterraine.

1.6.3.2 Activité Industrielle

Comme l'urbanisation, toute activité industrielle est génératrice de déchets solides et liquides qui sont produits pendant les processus de fabrication en particulier les déchets chimiques et nucléaires qui peuvent être toxiques, corrosifs ou réactifs, Bien que la plupart des industries possèdent des installations de traitement, mais de nombreuses petites industries n'en ont pas. S'ils sont mal gérés, ces déchets peuvent occasionner la pollution des eaux souterraines dont une grande partie des populations dépendent. Parmi les déchets issus de l'activité industrielle on peut citer quelques exemples: les produits chimiques, les huiles, les solvants, les déchets radioactifs ...etc.

1.6.3.3 Exploitation minière

La prospection et l'exploitation des ressources minérales et énergétiques est dans la plus part des cas connectées directement avec les ressources hydriques souterraines, impliquant des activités qui peuvent affecter potentiellement dans ces zones, les ressources en eau souterraine que ce soit en quantité ou en qualité. Ce qui accuse l'exploitation minière d'être souvent associée à la pollution chimique des nappes. Dans les exploitations minières

qu'elles soient actives ou abandonnées Le principal polluant est le drainage minier acide qui est généralement riche en métaux lourds. On cite l'exemple de l'oxydation des minéraux sulfurés, tels que la pyrite, produit de l'eau très acide qui dissout alors les métaux lourds et les porte dans les milieux aquatiques, y compris les eaux souterraines.

1.6.3.4 Exploitation agricole

L'agriculture a des effets directs et indirects sur la qualité des eaux souterraines. Les impacts directs incluent la dissolution et le transport de quantités excessives d'engrais, de pesticides, d'herbicides, des antibiotiques, des hormones et les matériaux associés, et les modifications hydrologiques liés à l'irrigation et le drainage.

Les impacts indirects incluent les changements dans les interactions eau-roche dans les sols et les nappes aquifères causés par une concentration accrue des principaux ions et des métaux. De nombreuses études indiquent que les pratiques agricoles ont conduit à la contamination par les nitrates (NO_3^-) et par les pesticides des eaux souterraines à des concentrations localisées dans les aquifères peu profonds. Une agriculture durable est l'un des plus grands défis à atteindre dans les économies en développement rapide en Afrique. Selon la FAO, la durabilité implique que l'agriculture non seulement, assure un approvisionnement alimentaire, mais que ses effets sur la santé humaine, environnementaux, socio-économiques soient reconnus et pris en compte dans les plans nationaux de développement. Cependant, ce n'est pas la priorité dans les zones pauvres puisque l'attention se focalise sur l'atteinte de la sécurité alimentaire. Les contaminants potentiels des eaux souterraines dus à l'activité agricole sont :

1.6.3.5 Nutriments

Le risque lié aux nutriments tels que l'azote et le phosphore, atteignant les eaux souterraines, dépend de la méthode d'application des éléments nutritifs et de leur étendue, le type de plantation et le type de sol. Le phosphore est très peu soluble dans l'eau, et atteint rarement la nappe, sauf dans les sols très perméables. En revanche, l'azote est soluble dans l'eau et rapidement se transforme en nitrate, qui peut contaminer la nappe phréatique, sauf si elle est utilisée par les plantes. Des niveaux élevés de nitrates peuvent conduire à l'eutrophisation des plans d'eau.

1.6.3.6 Les pesticides

sont plus susceptibles de s'infiltrer dans les sols sableux qui contiennent peu de matière organique. L'absorption et la décomposition de pesticides est inefficace dans les sols sableux contenant peu de matière organique, car il y a moins de microbes, et le lessivage peut être rapide à travers les grandes pores du sol. Comme les pesticides sont conçus pour tuer les parasites, son utilisation excessive aura un impact profond sur les personnes qui consomment les eaux souterraines sous-jacentes des zones agricoles.

1.6.3.7 Les micro-organismes

vivent dans l'appareil intestinal animal et humain et sont déversés dans les excréments et le fumier. Quand ils atteignent les eaux de surface, ils peuvent causer des maladies chez les humains et le bétail. L'eau souterraine est largement protégée contre ce type de contamination en raison des processus physique (filtration), chimiques (adsorption) et biologiques (disparition naturelle).

1.7 Etats de connaissance sur la qualité des eaux souterraines

1.7.1 Problématique de l'eau et l'irrigation

L'agriculture irriguée est le consommateur majeur d'eau au monde et une source importante de contamination diffuse (Ongley, 1996; Tanji et Kielen, 2002). L'agriculture mondiale représente désormais 70 pour cent de l'eau utilisée, et la superficie mondiale irriguée a augmenté de plus de six fois au cours du siècle dernier, passant d'environ 40 millions d'hectares en 1900 à plus de 260 millions d'hectares en 1999 (Postel, 1999)

Aujourd'hui, 40 pour cent de la nourriture dans le monde provient de 18 pour cent des terres arables qui sont irriguées. Les zones irriguées augmentent de près de 1 pour cent par an et la demande en eau d'irrigation augmentera de 13.6 pour cent en 2025 (Rosegrant et Cai, 2002). D'autre part, 8 à 15 pour cent des réserves d'eau douce seront détournés à l'agriculture et pour répondre à la demande accrue pour l'usage domestique et industriel. En outre, l'efficacité de l'irrigation est très faible, puisque seulement 55 pour cent de l'eau d'irrigation est utilisée par les cultures (Figure 5). A cet effet, pour pallier la pénurie d'eau d'irrigation, il est essentiel d'augmenter l'efficacité d'utilisation de l'eau et d'utiliser les eaux marginales (récupéré, le sérum physiologique, le drainage) pour l'irrigation.

Le manque d'eau dans les régions arides et semi-arides, devient une contrainte majeure pour le bien-être économique et le développement régional durable. Ces régions déficitaires sont caractérisées par des déséquilibres spatio-temporels importants entre la demande et d'approvisionnement, des stratégies et des directives pour la gestion de l'eau sont devenus fortement nécessaires pour la formulation et la mise en œuvre de la gestion intégrée et durable des ressources en eau (Karousakis et Koundouri, 2006).

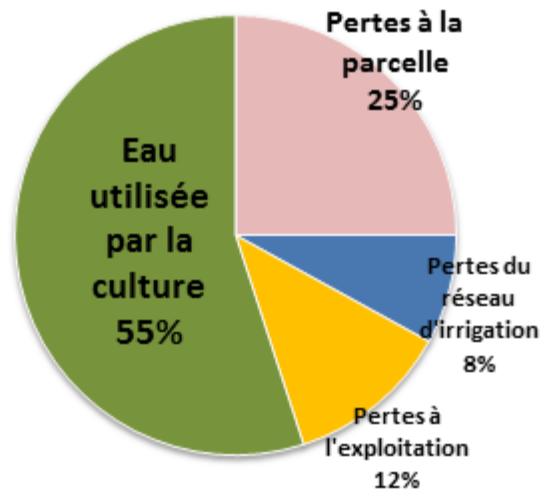


Figure 5: Répartition de l'eau d'irrigation.

L'utilisation durable de l'eau est devenue primordiale pour l'agriculture dans les zones à pénurie d'eau. De par les déséquilibres entre la disponibilité et la demande, la dégradation de la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines, prend de l'ampleur d'une année à l'autre. Ainsi, dans des conditions de rareté, des efforts considérables ont été consacrés au fil du temps à adopter des politiques visant à accroître l'efficacité de l'eau, fondée sur l'affirmation que plus peut être réalisé avec moins d'eau, grâce à une meilleure gestion, qui se réfère généralement à l'amélioration de l'allocation des ressources et /ou de l'efficacité de l'eau d'irrigation. Le premier est étroitement lié à une tarification adéquate, tandis que le second dépend du type de technologie de l'irrigation, les conditions environnementales et sur la programmation de l'arrosage.

Il est bien connu que le rendement des cultures augmente avec la disponibilité en eau dans la zone racinaire, jusqu'à ce que «le niveau de saturation», au-dessus duquel il n'y a que peu d'effet (Hillel, 1997). La courbe spécifique de réponse du rendement, des cultures dépend de divers facteurs, comme les conditions météorologiques et le type de sol. Ainsi que la réduction des intrants agricoles tels que les engrais et les pesticides, par conséquent,

il est difficile pour un agriculteur de dire à un moment donné s'il y a un déficit hydrique ou non, comme l'eau surabondante ne provoquent généralement pas de mal, les agriculteurs ont tendance à «jouer la sécurité» et augmenter la quantité d'irrigation, surtout lorsque les coûts associés sont faibles.

1.7.2 L'eau souterraine pollution-santé-irrigation

L'importance des ressources en eaux souterraines ne doit pas être sous-estimée car cette ressource représente environ 90 pour cent des ressources en eau douce du monde, facilement disponibles et quelque 1,5 milliards de personnes en dépendent pour l'eau potable. En plus des pénuries quantitatives de l'eau résultant du déséquilibre entre l'offre et la demande, la rareté de l'eau dans les régions arides et semi-arides est encore aggravée par la détérioration de la qualité de l'eau causée par la pollution ponctuelle ou non ponctuelle. (Karousakis et Koundouri, 2006).

L'eau souterraine est l'eau stockée dans le sous-sol et les formations rocheuses sous la surface de la terre. Il s'agit de la principale source d'eau potable pour de nombreuses communautés et la source secondaire pour les autres. L'eau souterraine est largement utilisée pour l'irrigation, elle est également une source importante d'eau pour les rivières et les ruisseaux, surtout pendant les longues périodes de sécheresse.

Cette ressource est reliée à toutes les autres formes de l'eau dans l'environnement à travers le cycle hydrologique, ces connexions rendent la menace de contamination de l'eau de surface, une menace aussi pour la qualité des eaux souterraines. Les activités qui se déroulent à la surface de la terre sont les principaux responsables de la pollution des eaux souterraines. Par exemple, la pollution des eaux souterraines peut se produire en raison de déversements accidentels et la mauvaise élimination des produits pétroliers et solvants industriels, l'application excessive d'engrais, les pesticides, les déchets alimentaires et les déchets animaux sur la surface du sol, et l'utilisation de systèmes septiques dans des endroits inadaptés. Comme les eaux souterraines sont généralement éloignés et inaccessibles, il est difficile ou impossible de les nettoyer, une fois qu'elles deviennent polluées, les méthodes de leurs dépollution, tels que l'isolement de la zone contaminée, le pompage et le traitement de l'eau contaminée, ne sont pas toujours couronnées de succès et quel que soit le succès, les tentatives pour dépolluer les eaux souterraines sont toujours très chers (Vigil,2003).

La menace de contamination des eaux souterraines est actuellement un sujet de préoccupation d'ordre mondial même dans des pays développés, aux États-Unis par exemple, les eaux souterraines de plusieurs régions, sont contaminées par des substances inorganiques, tels que les nitrates, que l'on retrouve dans les eaux usées, les déchets animaux, les engrais azotés et les déchets de transformation des aliments. La contamination par les nitrates est un problème dans l'Iowa, le Kansas, le Minnesota, le Nebraska et le Dakota du Sud. Les estimations de l'agence de protection de l'environnement révèlent que, dans ces régions, un sur quatre puits privé a des niveaux excessifs de nitrates. Des concentrations élevées de nitrate provoquent deux problèmes de santé primaires : Le premier, chez les nourrissons ayant reçu de l'eau ou une formule contenant de fortes concentrations de nitrates peuvent développer une maladie appelée méthémoglobinémie, qui peut être mortelle, le deuxième, les concentrations élevées de nitrates posent un risque potentiel de cancer pour la population en général. L'organisme transforme les nitrates ingérés en composés cancérigènes appelés nitrosamines. Les chercheurs ont constaté que les nitrosamines causent le cancer chez les animaux de laboratoire. Ils sont en train de rechercher la relation entre les concentrations élevées de nitrates et le cancer chez les humains (Vigil, 2003).

L'un des problèmes les plus graves en matière de qualité des eaux souterraines est la salinisation rapide des ressources en eau, la contamination d'origine anthropique est la cause majeure de la salinisation de l'eau et la dégradation de sa qualité, par l'infiltration des effluents d'eaux usées, les déchets industriels et les flux de retour d'eau d'irrigation.

Kass et al.,(2004), a montré que dans les aquifères phréatiques, l'irrigation par les eaux souterraines provoque le recyclage des sels et leur accumulation dans l'aquifère. Les sels sont accumulés dans le sol et balayé à travers la zone non saturée de l'aquifère, le recyclage de l'eau de l'aquifère comme source pour l'irrigation produit une tendance inverse. L'eau douce riche en Calcium, ainsi que celui qui est libéré à partir de la dissolution de la matrice de carbonate de la zone non saturée, provoque la libération du sodium dans la phase liquide d'où un grand rapport Na/Cl qui caractérise l'eau qui va recharger la nappe phréatique.

En plus de l'augmentation de la salinité, un enrichissement significatif de nitrate dans l'ensemble de la nappe phréatique peu profonde objet de son étude. Où l'eau douce est utilisée pour l'irrigation, ou dans les champs non irrigués, les engrais pourraient être la principale source de ces nitrates.

Les résultats obtenus dans cette étude ont mis l'accent sur l'importance du contrôle du niveau et de la qualité des eaux souterraines comme un indicateur sensible de la quantité et de la dynamique de la pollution anthropique des nappes phréatiques, et fournit la possibilité de prédire le devenir de la contamination diffuse (non ponctuelle).

Dans le même contexte, [Barros et al., \(2012\)](#), concluent que les sels (TDS total dissolved solids, généralement exprimés par la conductivité électrique, CE) sont l'un des principaux contaminants induits par l'irrigation dans les milieux arides et semi-arides, en raison de l'altération des minéraux qui augmente les concentrations de sels et de charges dans les eaux de drainage ([Aragüés et Tanji, 2003](#), [El-Ashry et al, 1985](#))

En effectuant un bilan des sels, dans un périmètre irrigué équipé d'un système de drainage, l'auteur a conclu que la stratégie de gestion qu'il faut adopter pour minimiser la contamination par les sels contenus dans les eaux de drainage, est d'accroître les performances du système d'irrigation, par la modernisation du gravitaire moins efficace vers le localisé qui est plus efficace.

Dans la même problématique, au nord-ouest de la Chine, une étude a été menée par [Dajun et al, \(2011\)](#), à travers son article qui a concerné une nappe alluviale libre dont la profondeur de sa surface piézométrique varie de quelques mètres à 170 m, dans une zone à climat semi-aride en Chine, où l'agriculture irriguée prend une part très importante, et l'eau de rivière en constitue la source principale. Durant plusieurs campagnes d'analyses d'échantillons prélevés des puits (octobre 2002, juin-juillet 2003 et mars-juillet-septembre 2004), en étudiant les différents paramètres, l'auteur affirme que la recharge de l'aquifère dépend fortement de l'eau des rivières et de l'eau d'irrigation. Le processus d'infiltration de l'eau de rivière et l'eau d'irrigation joue un rôle important dans la modification de la chimie de l'eau naturelle, en particulier le processus de mélange, la recharge se compose d'une composante naturelle et une composante anthropique. La recharge naturelle est constituée principalement d'eau des précipitations neigeuses formées à l'amont du bassin versant, et occasionnellement à des précipitations locales qui sont négligeables, comme indiqué par les données des isotopes O_{18} et H_2 . La composante anthropique comprend les flux de retour d'eau d'irrigation

De même [Zhao-Zhong et al. \(2005\)](#), a mis le point sur la contamination des nappes phréatiques par les nitrates et les sels induits par les retours d'eau d'irrigation, dans un périmètre d'irrigation « Hetao » situé dans une région à climat aride en Chine. L'essentiel de ce travail est que, dans la région objet de cet article, les grandes quantités d'eau et

d'engrais azoté qui sont appliquées sont à l'effet que toute irrigation va déplacer une grande quantité de nitrates au-dessous de la zone racinaire des cultures. L'irrigation d'automne a causé une forte contamination par des nitrates aux eaux souterraines et il y a environ un total de $24,5 * 10^6$ kg N lessivés dans les périmètres irrigués du district d'irrigation de Hetao, la CE a été augmenté de 1,36 à 1,73 dS /m au cours de l'irrigation d'automne, indiquant une plus forte concentration de sels dissous dans l'eau souterraine.

L'eau du sol et la salinité sont des facteurs cruciaux qui influencent la production agricole dans les régions arides, dans le but de réduire les niveaux de salinité dans la zone racinaire et d'augmenter la disponibilité en eau pour les cultures de printemps suivants (Meng et Yang, 2002). Il a été rapporté que l'irrigation exagérée provoque généralement la lixiviation de quantités importantes de NO_3^- dans la zone racinaire, surtout pendant la saison de non-croissance (Ritter, 1989).

Dans un autre scénario basé sur l'occupation des terres irriguées en relation avec la contamination des nappes phréatiques par les nitrates. Shufeng et al., (2010), sur la base des travaux antérieurs qui ont montré que les concentrations de NO_3^- dans les eaux souterraines ont été en hausse de 1 à 3 mg/l par an, au cours des deux dernières décennies à travers le monde entier (Zhu, 1995) et que les excès de nitrates dans les eaux souterraines peuvent provoquer une méthémoglobinémie du nourrisson et du cancer gastrique humain (Cuello, 1976; Fraser, 1979). De même Yen et al. (1996) a accusé l'utilisation des terres et les propriétés de l'aquifère d'être les principaux facteurs affectant la concentration en nitrates dans les aquifères proches peu profonds, aussi Lichtenberg et Shapiro (1997) ont montré que les caractéristiques hydrologiques jouent un rôle important dans la contamination par les nitrates des eaux souterraines.

Comme le système d'information géographique (SIG) a été utile pour déterminer la variabilité des eaux souterraines dans l'espace et le temps, Liu et al. (2001) ; Vinten et Dunn (2001) ont évalué les effets de l'utilisation des terres sur les changements temporels de la qualité des eaux de puits dans une zone désignée comme vulnérable aux nitrates en utilisant des techniques SIG. Le SIG a également été utilisé pour évaluer le processus de contamination et de la distribution spatiale des concentrations de nitrates dans les eaux souterraines d'une région à haut rendement au nord de la Chine (Liu et al., 2005).

Shufeng Chen et al. à travers cette étude et moyennant le SIG a décelé, les impacts du changement d'utilisation des terres et des ressources en eau d'irrigation sur la contamination par les nitrates des eaux souterraines peu profondes, dans la région de

Huantai dans la province de Shandong, en Chine. L'essentiel de ce travail est que les concentrations en nitrates en 2002 et 2007 ont été cartographiées à travers la région étudiée, en les comparant à ceux de l'occupation des sols pour les mêmes périodes. Font ressortir que la moyenne de concentration de NO_3^- en 2002 et 2007 étaient 8.08 et 14.68 mg/l, respectivement, ce qui indiquait qu'il y avait une hausse significative de 2002 à 2007. Il a été constaté aussi que l'utilisation des terres et les modes d'irrigation influencent la concentration en nitrates dans les eaux souterraines peu profondes dans la région d'étude, qui dépassaient la norme de potabilité dans les champs de légumes, tandis que les plus faibles concentrations de NO_3^- ont été trouvées dans les vergers et les systèmes d'arbres à croissance rapide. Il a été conclu aussi que l'irrigation par les eaux usées augmente énormément la concentration des nitrates dans les eaux souterraines et que les légumes, ainsi que les systèmes de culture légumes, rotation blé-légume, blé et coton, favorisent l'augmentation des nitrates dans les eaux souterraines accompagnée d'irrigation provenant des puits.

1.7.3 Sur la nappe alluviale de Tébessa

La nappe alluviale de la « merdja » est l'un des aquifères qui a bénéficié de beaucoup d'études, qui ont porté sur la qualité des eaux sous l'influence des facteurs anthropiques et géo-climatiques. [Djabri et al. \(2008\)](#) en combinant la méthode de DRASTIC (pour l'évaluation de la vulnérabilité d'une nappe à la pollution) avec le rapport caractéristique (Sr/Ca) a montré l'influence des formations gypsifères sur la salinité des eaux, il en conclut à travers une cartographie que les zones les plus exposées à la pollution sont celles limitrophes à oued el kébir qui draine la plaine de Tébessa et à son affluent Oued Chabro qui draine la zone de Hammamet. Dans le même contexte de la vulnérabilité ; [Djabri et al. \(2014\)](#), par l'utilisation des outils statistiques (analyse en composantes principales), thermodynamiques et la méthode STUYZAND basée sur les chlorures, a conclu que la minéralisation des eaux de la Merdja a été influencée dans le temps sous l'effet de la sécheresse. [Sedrati et Djabri \(2014\)](#) ont aussi combiné la méthode DRASTIC avec la méthode d'indexation sur la même zone, qui accuse à son tour les facteurs anthropiques telles que les activités agricoles, les rejets d'eau usée et les formations triassiques, d'être des sources potentielles de la dégradation de la qualité des eaux souterraines. Les mêmes auteurs et sur la même région [Sedrati et Djabri, 2014](#), pour identifier les principaux processus impliqués dans l'augmentation de la pollution en appliquant le modèle

DRASTIC, ont utilisé deux méthodes : i) la méthode proposée par [Tolga et al. \(2009\)](#) pour les eaux d'irrigation ; ii) et celle proposée par [Neubert et al. \(2008\)](#) pour les eaux destinées à l'alimentation en eau potable. Les deux méthodes sont basées sur la géochimie (ions Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-) et la conductivité, comparées à l'information hydrogéologique. Les cartes de sensibilité obtenues ont révélé des zones qui coïncident presque parfaitement avec celles des fortes activités anthropiques.

[Rouabhia et al. \(2010\)](#) à travers une campagne de mesure et d'analyses hydrochimiques effectuée en décembre 2008, a conclu que La composition chimique de l'eau n'est pas seulement influencée par les pratiques agricoles, mais aussi par l'interaction avec les sédiments alluviaux et que la dissolution des évaporites représente une partie des concentrations de Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , Mg^{2+} et Ca^{2+} et d'autres processus, tels que la précipitation de la calcite et la dé-dolomitisation contribuent également à la chimie des eaux souterraines de la plaine de Tébessa. Concernant les nitrates. [Fehdi et al. \(2016\)](#), à travers les analyses hydrochimiques et bactériologiques des eaux de la région, il a constaté que l'origine des nitrates dépassent de loin les seuils fixés par l'organisation mondiale de la santé (OMS), et que les fortes concentrations en cet ion sont provoquées par les activités agricoles qui utilise les engrais azotés, il en est de même pour la dégradation de la qualité biologique enregistrée, qui est aussi liée à cette activité et aux rejets d'eaux usées domestiques non traités.

[Derias \(2015\)](#) s'est intéressé à la salinité des eaux de la merdja et leurs aptitudes à l'irrigation moyennant la classification américaines de [Richards \(1954\)](#) basée sur l'étude de la variation du SAR (Sodium Adsorption Ratio) en fonction de la conductivité électrique. Il conclut que La forte salinité constatée à travers la zone d'étude est provoquée par la baisse du niveau de la nappe phréatique qui pose un problème sérieux pour l'irrigation et l'approvisionnement en eau domestique et que la plupart des échantillons d'eau souterraine ont été de qualité C3S1-C4S1 avec un risque élevé de salinité et un faible risque de sodicité, en plus l'auteur ajoute qu'à travers un traitement statistique des données hydrochimiques par analyse en composantes principales, ils résultaient deux facteurs liés à la salinité et à la pollution.

D'après [Seghir \(2008\)](#), l'interprétation des analyses hydro chimique effectuées durant deux campagnes (2005 et 2006) à travers la plaine de Tébessa et Hammamet; a décelé une forte salinité des eaux souterraines avec trois faciès dominants qui ont été observés, l'un bicarbonaté calcique dans les points d'eau proches des bordures Sud en contact avec les

formations calcaires, et les autres points ont des faciès chloruré sodique et sulfaté calcique, caractérisant les points du centre et du Nord de la région étudiée. En outre l'étude de la répartition spatiale des éléments chimiques en rapport avec le contexte géologique de la région montre que l'origine de la salinité est liée principalement à la dissolution de trois types de formations :

- Evaporitiques des affleurements triasiques existants au niveau de Dj. Djebissa et aux pieds SE de Dj Belkif à la limite NW de la plaine ;
- Carbonatées aux bordures SW de la plaine ;
- Alluvionnaires au centre de la plaine.

Gherieb (2011), a conclu que les variables qui interviennent le plus dans la dégradation de la qualité des eaux souterraines de la nappe alluviale de Tébessa sont tous de nature géologique, et que les résultats de l'analyse en composantes principales ont montré que les chlorures, les sulfates et le sodium présentent des concentrations élevées dans les puits situés à l'Est de la plaine et d'un degré moindre pour ceux qui sont situés au centre, ce qui a été expliqué par le lessivage des sels pendant la période humide et à l'évaporation durant les périodes sèches .

1.8 Conclusion

A la lumière de cette synthèse bibliographique, il ressort que le système aquifère de la plaine de Tébessa dite la « Merdja » a fait l'objet de plusieurs investigations et d'études par différents auteurs et institutions. Les premiers travaux ont traité beaucoup plus l'aspect géologique et hydrogéologique du système aquifère; notamment sa géométrie, sa lithologie et ses principaux paramètres hydrodynamiques. Compte aux derniers travaux, constituent l'aval des premiers et concernent l'évolution de la qualité de l'eau de ce système aquifère et sa vulnérabilité à la pollution anthropique et sa contamination endogène d'origine géo-climatique. La majorité de ces travaux ont débouchés à des résultats qui témoignent sur la fragilité de cette nappe à la pollution d'origine agricole, urbaine et industrielles, ainsi qu'au changement de la qualité hydro-chimique due aux conditions géo-climatiques qui sévissaient dans la région. Les résultats évoqués dans la présente synthèse vont servir comme base et une référence pour mieux aborder la problématique traitée par la présente thèse.

Chapitre II:

Cadre général

Chapitre II: Cadre général

2.1 Contexte géographique

La zone d'étude se situe entre 35 ° 4'30 'de latitude nord et 35 ° 40' de latitude nord et 7 ° 7'E et 8 ° 20'E de longitude au nord-est de l'Algérie (figure 6). Cette plaine est à la fois urbaine dans les parties Sud et Est (Hammamet, Tébessa et Bekkaria) et rurale dans la partie Nord. La plaine est une zone plate bordée par des massifs montagneux, où l'altitude varie de 1712 m (le pic de Jebel Doukkane) à 700, la plaine de Tébessa est limitée au nord par les monts de de douar Gouray de la commune de Boulhaf Eddir, et à l'Est Djebels Djebissa de la commune de Bekkaria. la ligne de crêtes formée par Dj. Stah, Dj. Doukkane, Dj. Anoual et Dj. Bouroumane constitue la ligne de partages des eaux, au sud-ouest on trouve la plateau de Chéria , au sud Est la plaine d'El-Ma-Labioud.

2.2 Contexte topographique

La plaine de Tébessa au plan topographique (figure 7) est sous forme de cuvette, plus ou moins plate à l'intérieur entourée de massifs montagneux, l'altitude varie de 1712 m qui est le sommet le plus haut de la région (Djebel Doukkane) à 700 m qui est l'altitude la plus basse de la plaine. La courbe hypsométrique (Figure 8) montre que les dénivelés raides (relief montagneux) ne représentent que 10 à 15% de la surface de la zone d'étude et le reste soit 85 à 90 % est une plaine (d'où son appellation « plaine cultivée de Tébessa).

Calcul de la dénivelée spécifique D_s

Selon la classification de l'O.R.S.T.O.M. (Tableau 5. In: Laborde, 2000) du point de vue relief, le sous bassin versant dont la plaine de Tébessa occupe sa majeure partie, appartient à la classe R5 « Relief assez fort », cette classification est basée sur le calcul La dénivelée spécifique notée D_s qui ne dépend que de l'hypsométrie (Dénivelé (D) = H5% - H95 %) et de la forme du bassin versant (l/L).

$$D_s = D \sqrt{l/L}$$

Où : D est la dénivelé H5%-H95% obtenu à partir de la courbe hypsométrique (m); L : Longueur de rectangle équivalent (km); l : Largeur du rectangle équivalent (km).

Pour le sous bassin versant de la région étudiée $D= 300 \text{ m}$; $L= 108.6 \text{ km}$; $l=14.5 \text{ km}$ d'où $Ds= 109.5$

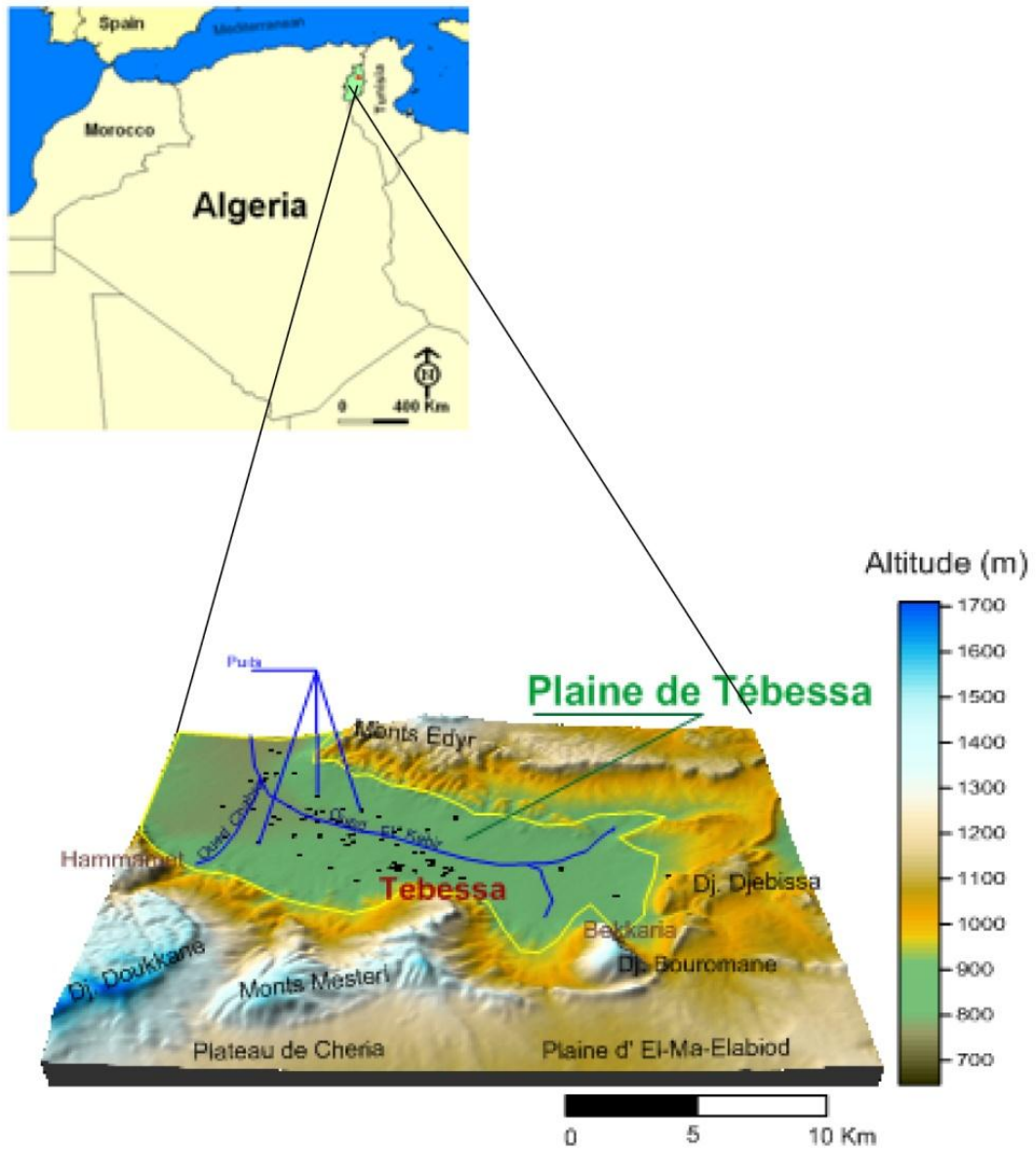


Figure 6 : Présentation et situations de la région d'étude.

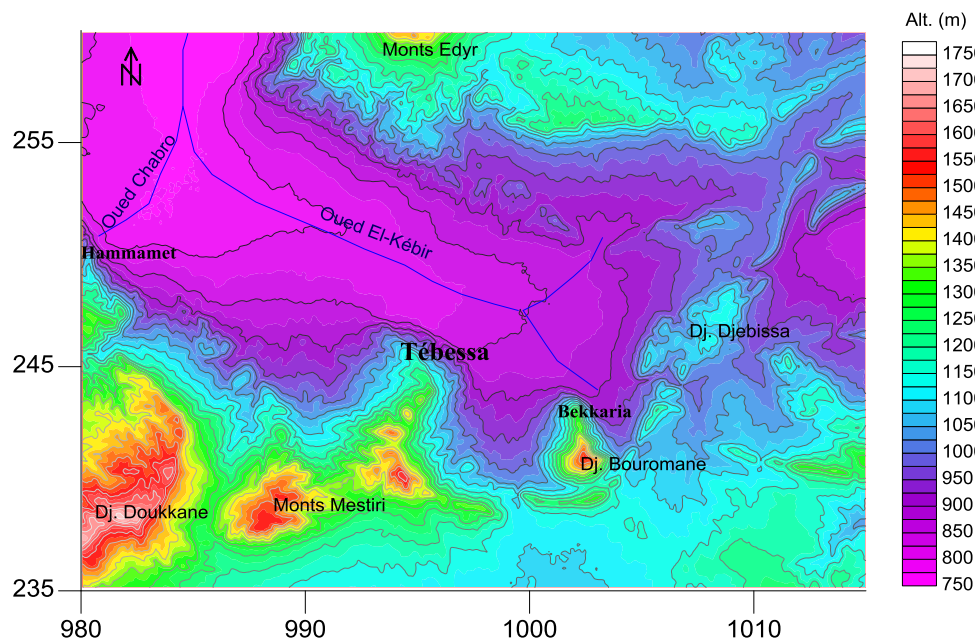


Figure 7: Carte topographique de la zone d'étude (coordonnées kilométriques Lambert, équidistance 50 m).

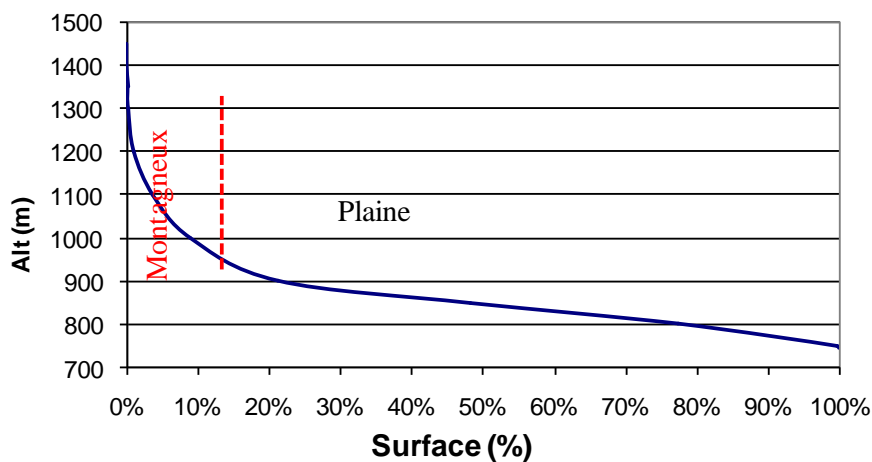


Figure 8: Courbe hypsométrique de la plaine de Tébessa.

Tableau 5: Classification OSTRM (Source: Laborde, 2000).

Classe		Dénivelé spécifique (Ds)
R1	Relief très faible	Ds < 10 m
R2	Relief faible	10 m < Ds < 25 m
R3	Relief assez faible	25 m < Ds < 50 m
R4	Relief modéré	50 m < Ds < 100 m
R5	Relief assez fort	100 m < Ds < 250 m
R6	Relief fort	250 m < Ds < 500 m
R7	Relief très fort	500 m < Ds

2.3 Le sol

D'après la carte des sols de la région dessinée par Jaseix-Bellon (1948) la zone d'étude fait partie des hauts plateaux steppiques, caractérisée par des sols calcaires aux piedmonts (accidentée) et en bordure de la plaine suivis par des sols calciques (pente modérée), ensuite on trouve un manteau de type alluvial basique autour de Oued El-Kébir (figure 9), qui constitue l'étendue de la plaine cultivée de la « Merdja ».

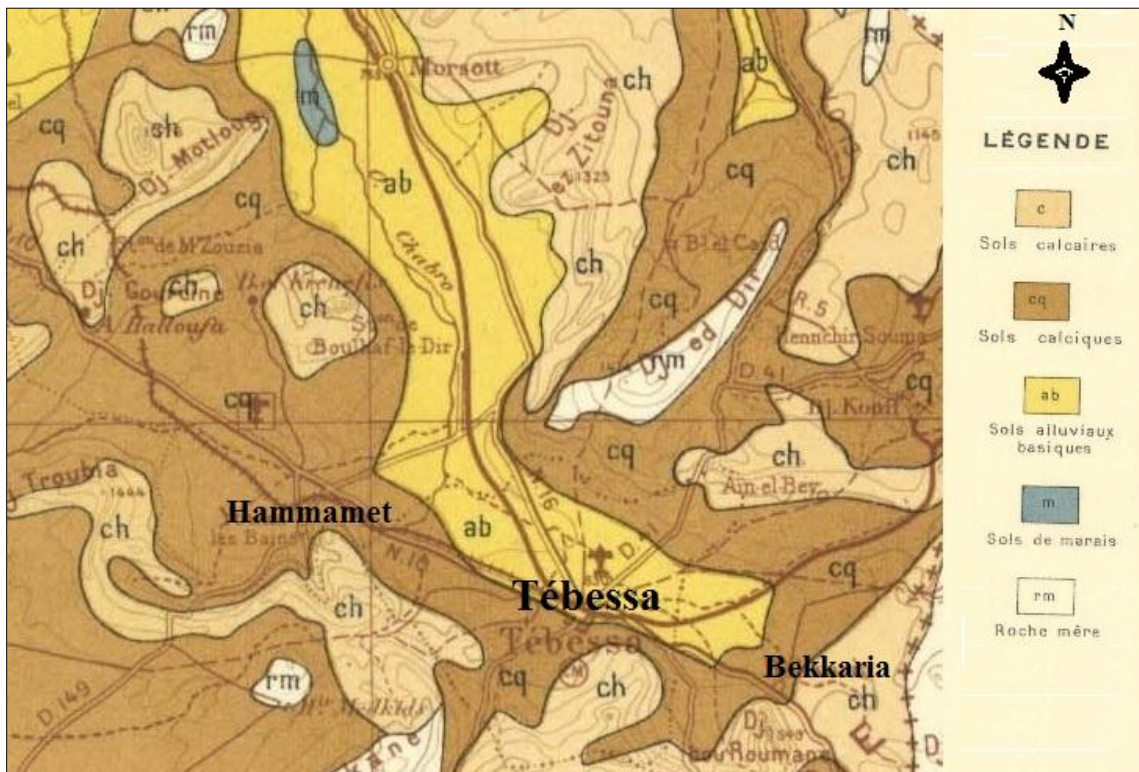


Figure 9 : Extrait de la carte de sols de l'Algérie (1 : 500.000°, 1948)

2.4 Le couvert végétal

la plaine de Tébessa appartient au bassin versant de Madjerdah caractérisée par une couverture claire, caractéristique de l'étage bioclimatique dont elle appartient, les montagnes et les piedmonts en bordure de la plaine sont occupés par la ceinture verte réalisée dans le cadre du barrage vert au années 70, à dominance pin d'Alep, suivi par des terres de parcours dans les zones caillouteuses; à l'intérieur dans les terres plates et accessibles pour les machines agricoles c'est la céréaliculture qui domine (figure 10).

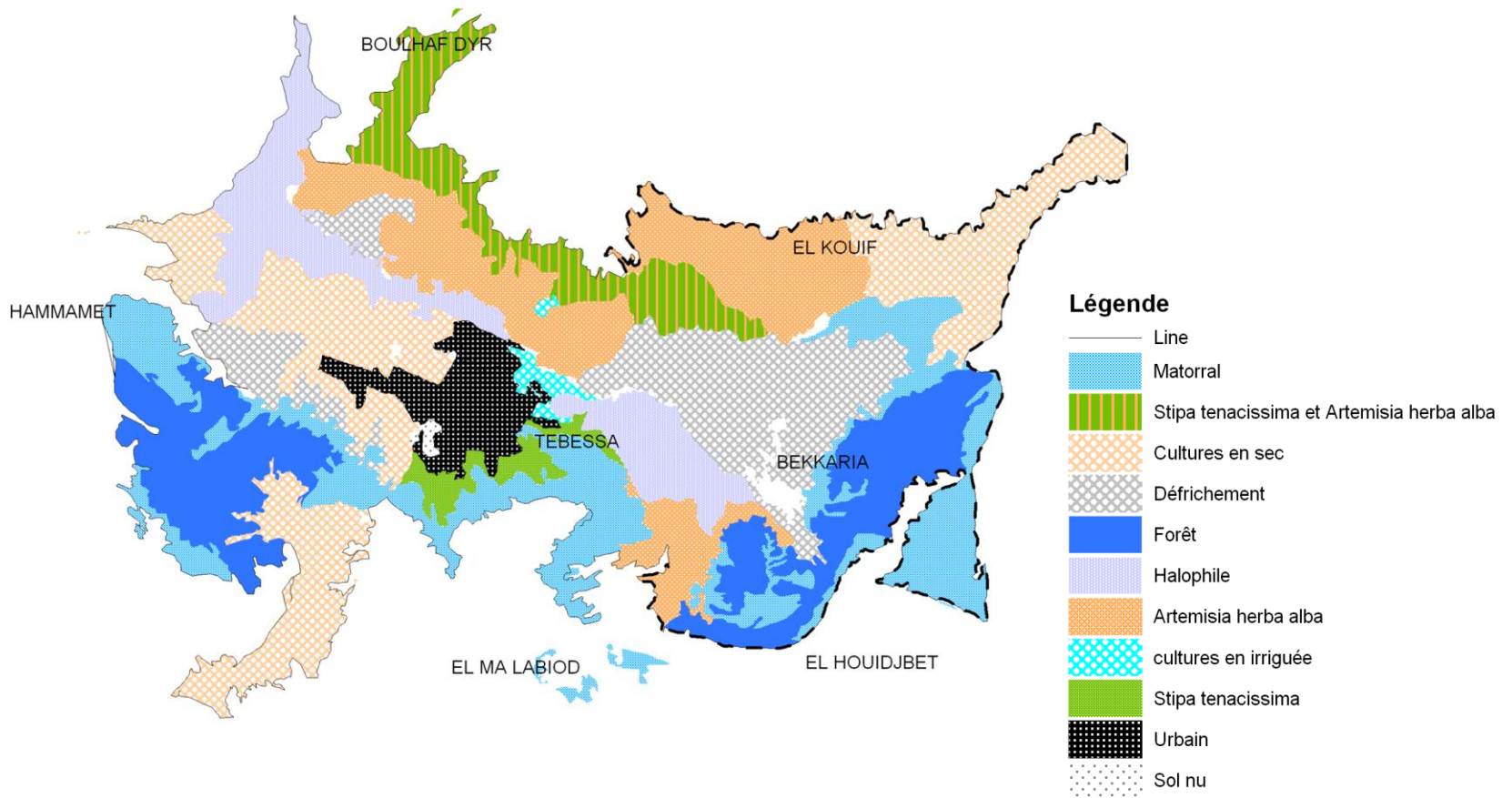


Figure 10: Carte de la végétation de la zone d'étude. Source : HCDS-2005.

2.5 Contexte économique :

La région de Tébessa de par sa situation frontalière avec la Tunisie, est à forte vocation agropastorale connue à l'échelle nationale par son cheptel ovin et ses vastes étendus de parcours steppiques qui constituent la principale source de revenu des populations rurales, la sécheresse qui a sévit pendant les décennies précédentes a entraîné un déficit important en matière d'alimentation du cheptel ce qui a poussé la multiplication des aires irriguées surtout avec l'émergence du programme nationale de développement agricole et rural (PNDAR) fondé en général sur la mobilisation des ressources en eau souterraine et ce pour atteindre l'objectif qui est l'extension de la superficie agricole utile (SAU) par la mise en valeur en irriguée des terres. La plaine de Tebessa est limitrophe au centre urbain de Tebessa qui représente le centre économique de toute la région.

Dans Toute la région d'étude, on trouve quelques vestiges archéologiques qui témoignent de conditions biogéographiques différentes du milieu, à des époques reculées.

On dénombre ainsi des sites néolithiques, dénommés escargotières, à cause de l'importance considérable des tests d'escargots d'eau douce. Ces sites se développaient en bordures des lacs existant à l'époque capsienne.

Des sites romains plus récents et plus considérables marquent le paysage, et comprennent notamment des vestiges d'anciennes huileries, rappelant l'importance de la culture de l'olivier. La richesse de la région était remarquable, puisqu'elle était appelée par les romains, la « région du blé ».

2.6 Contexte Hydrographique

La région d'étude appartient au bassin versant de Oued-Chabro, est drainée par l'Oued Kébir (figure 11 et tableau 6) à écoulement vers le nord, il est considéré comme limite administrative pour plusieurs communes qui les traverse, il prend naissance à l'est de la plaine entre El-Kouif (rive nord) et Bekkaria (rive sud) qui constitue l'amont du sous bassin versant, ensuite il parcourt au milieu de la plaine sur une distance de 13 km environs pour rejoindre l'affluent Oued Ain Chabro qui draine la région de Hammamet, où il traverse entre la commune de Boulhaf Edyir au nord et les communes de Tebessa, Hammamet et Bir D'hab au sud, pour atteindre son l'exutoire du sous bassin versant à la commune d' El-Aouinet.

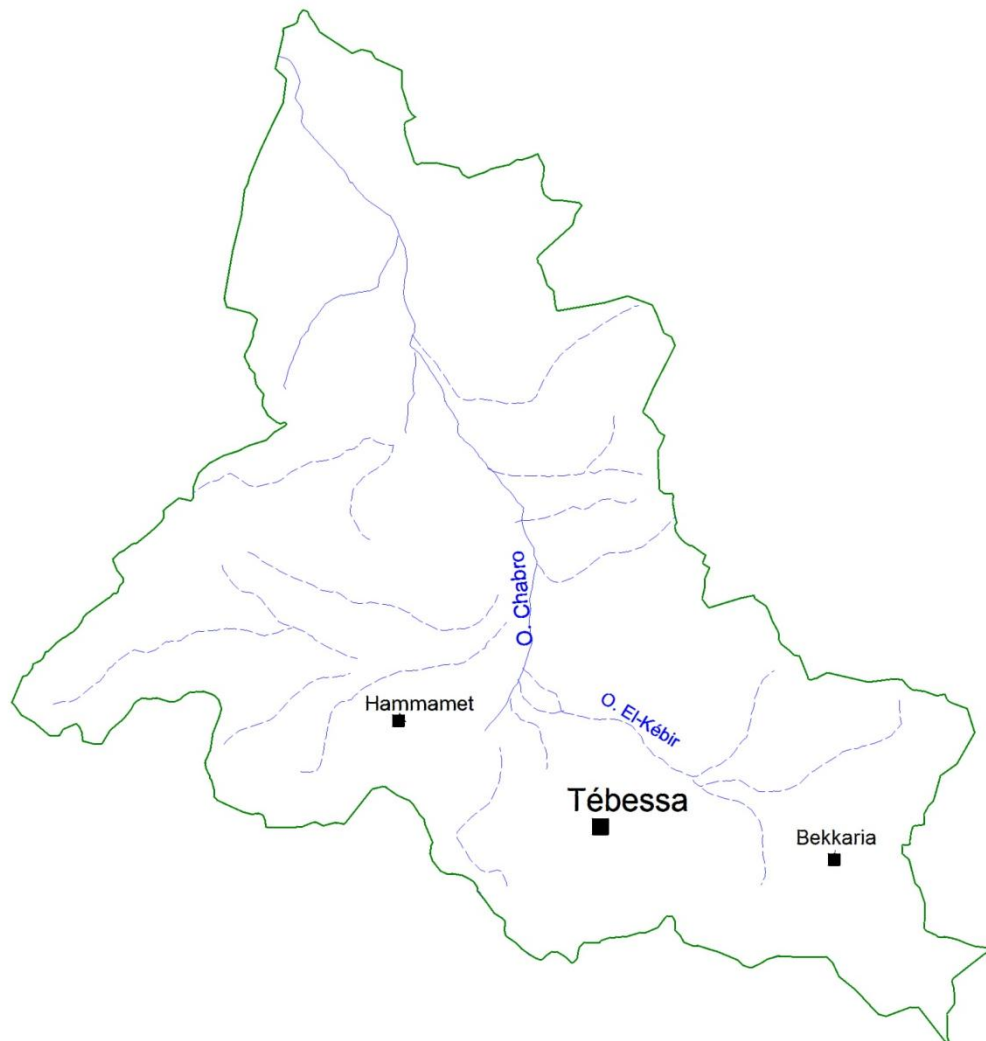


Figure 11: Réseau hydrographique.

Tableau 6 : Caractéristiques morpho-métrique du sous bassin versant.

N région	N BV	N S/BV	Oued	Surface (km ²)	Périmètre (km)	Long chevelu (km)
4	12	1203	O. Chabro	1571.12	246.11	810.53
K	Long. Re	Larg. Re	Dd	Hmin (m)	Hmax (m)	Hmoy (m)
1.74	108.59	14.47	0.52	700.00	1700.00	1150.00

2.7 Situation sur l'irrigation

Pour dresser une situation sur l'irrigation à travers la zone; une étude qui mérite d'être exploitée, réalisée en 2009 par un bureau d'études français (SOGREAH), sous la tutelle du ministère des ressources en eau (MRE), qui avait pour but, de faire l'inventaire

et le développement des petites et moyennes infrastructures hydrauliques dans la région de Tebessa ; les données enregistrées concernant la région sont résumées dans le tableau 7.

Tableau 7: SAU irriguée et infrastructures de petite et moyennes hydrauliques "inventaire et développement" de la plaine de Tébessa (MRE) juin 2009

Commune	Source d'eau		Type d'infrastructure				Les cultures pratiquées (ha)		
	Eau Souterr	Eau de surf.	Nb puits	Nb Forage	Nb sources	Nb mot Pomp	Fourrag.	Légum.	Arbo.
Bekkaria	199	15	17	19	1	24	80	29	110
Boulhaf edyr	270	dix	60	37	1	74	122	24	143
Hammamet	113	59	42	5	2	42	12	42	138
Tébessa	140	5	50	2	1	50	70	37	50
Kouif	118	12	22	14	1	28	50	dix	69
Total	840	101	191	77	6	218	334	142	510

Cette étude a conclu que les ressources en eau souterraine sont modérément exploitées, avec un taux d'utilisation d'environ 17% de ressources renouvelables, mobilisé par l'irrigation à partir d'un potentiel estimé à 22 M m³ (millions de mètres cubes). Par conséquent, la variante de la surexploitation des ressources en eau souterraine est exclue. Mais, il est à signaler en ce qui concerne la superficie irriguée que lors de nos investigations de terrains, nous avons constaté que d'importantes superficies agricoles occupées par la céréaliculture de la plaine de Tébessa sont irriguées par les motopompes à partir des eaux de l'oued El-Kebir fortement chargés par les eaux usées (figure 12). Les forages et les puits sont utilisés pour irriguer les cultures maraîchères et les vergers, en tant que fermes familiales traditionnelles, généralement fertilisées avec du fumier organique.

2.8 Population, eau potable et assainissement

La plaine de "Merdja" est bordée par la concentration urbaine. La plus importante est Tébessa au Sud avec (238 000 habitants), suivi au NE par El- Kouif et Bekkaria (19000 13000 hab. respectivement), puis Hammamet au sud-ouest (24000 hab.) et au nord par la commune de Boulhaf- edyr (4400 hab.). Toutes les concentrations urbaines citées utilisent le système fluvial pour rejeter les eaux usées sans traitement préalable (figure 13). Les tendances démographiques ont fait remarquer que la région est classée à forte croissance démographique (tableau 8), à l'exception de Bekkaria et de Boulhaf edyr. Entre 2001 et 2010 la population de la commune de Tébessa a passé de 178000 à 238000 habitants avec

un écart de 60000 hab. ce qui est important. Cette situation induit en parallèle une augmentation de l'approvisionnement en eau pour les usages domestiques, industriels et autres. Selon les services hydrauliques de la ville de Tebessa, le volume d'eau souterraine mobilisée à partir de l'aquifère de la plaine est d'environ 6.3 M m³ / an (million de mètres cubes par an), représentant 28% du potentiel. En plus, le volume théorique des eaux usées est estimé à 80% de ce volume ce qui représente 5 M m³/an .



Figure 12: Photo qui montre l'utilisation de l'eau usée pour irriguer une parcelle d'orge à la plaine de Tebessa (prise le 01/01/2009)

Tableau 8: Evolution démographique.

Communes	RGPH	RGPH	Taux croissance	Rang de 1541	années			
	1998	2008			2001	2006	2009	2010
Tébessa	161440	196537	3,3	269	177956	209321	230736	238350
Bekkaria	7551	9917	4,53	113	86244	10763	12293	12850
Hammamet	15879	20148	3,4	250	17554	20749	22938	23718
El- Kouif	15777	17319	1,56	999	16527	17857	18706	18998
Boulhaf edyr	4200	4741	0,38	1423	42481	43294	43789	4395,6
TOTAL	204847	248662	-	-	224910	263019	289051	298310



Figure 13: Photo de Oued El-Kébir pollué par les eaux usées (prise le 31/01/2008).

2.9 Conclusion

La plaine de Tébessa en général représente un exemple de point de convergence de plusieurs facteurs : socio-économiques, édaphiques et géo-climatiques qui pèsent malheureusement, à cause de la mauvaise gestion, sur les ressources en eau de la région, notamment sur la ressource en eau souterraine de cette plaine. L'irrigation de par sa consommation croissante en volume d'eau, si elle est mal gérée et incontrôlée comme il est le cas pour la zone objet de la présente étude, constitue une source de pollution provenant de l'usage des engrais azotés, de fumier organique, et des eaux non conventionnelles. La croissance démographique induit toujours une augmentation des déchets ménagers, surtout pour la cas de la ville de Tébessa et de ses chefs-lieux de communes environnantes (Hammamet au nord-ouest et Bekkaria au sud-est) sur l'axe du sous bassin versant de Oued-Chabro où ce dernier constitue un échappatoire facile pour déverser les eaux usées sans aucun traitement préalable. L'industrie aussi est génératrice de déchets polluants. A

tout cela s'ajoutent la désertification et les conditions climatiques défavorables qui ne cessent d'alerter sur les conséquences d'un éventuel changement climatique.

Chapitre III:

Aperçu climatique

Chapitre III: Aperçu climatique

3.1 Introduction

Dans cette partie, nous nous sommes intéressés aux principaux facteurs, indispensables pour l'établissement du bilan hydrique, tels que, les précipitations, la température et l'évapotranspiration. Du fait que la plaine de Tébessa appartient à l'étage bioclimatique méditerranéen semi-aride, Celui-ci est caractérisé par un maximum pluvieux principal en automne et un autre, moins important, au printemps. L'été est une longue période sèche et chaude avec des orages parfois violents. Cette région souffre alors d'un important déficit en eau, car de par sa situation géo-climatique se conjuguent l'intensité de l'évaporation et l'augmentation des besoins de la population et de l'agriculture. L'agriculture n'est donc envisageable que grâce à un important apport d'irrigation.

3.2 Les précipitations

La Précipitation est la chute de l'eau depuis l'atmosphère jusqu'à la surface de la terre, Quoiqu'elle est la plus facile à mesurer elle constitue la principale donnée, qui ne peut être mise à coté dans n'importe quelle étude hydrologique. Les précipitations sont le facteur indispensable des régimes hydrologiques, car elles constituent la matière première des écoulements (Roche, 1963). Elles constituent aussi l'un des processus hydrologiques les plus variables. D'une part, elles sont caractérisées par une grande variabilité dans l'espace (à l'échelle régionale, locale et continental) et d'une grande variabilité aussi dans le temps à l'échelle annuelle qu'à celle d'un événement pluvieux (Musy, 2005). Cette variabilité spatiotemporelle est beaucoup prononcée dans les régions arides et semi-arides (Wheater et al. 2008).

A l'échelle globale l'évaporation des océans est la source principale (environ 90%) de l'humidité atmosphérique pour la précipitation. L'évaporation continentale contribue seulement à environ 10% de l'humidité atmosphérique pour les précipitations. Les formes courantes de précipitations sont le brouillard (gouttelettes d'eau de diamètre inférieur à 0,5 mm), la pluie (gouttes d'eau de 0,5 mm à 6,0 mm), la neige (cristaux de glace se combinant

pour former des flocons), le grésil (utilisé par les Canadiens pour décrire les gouttes d'eau de pluie, tombant dans l'air à des températures de congélation ou inférieures, se transformant en gouttes de pluie gelées) et la grêle (précipitations sous forme de boules de glace de plus de 8 mm de diamètre). La plupart des précipitations sont généralement sous la forme de pluies. Par conséquent, les termes précipitations et pluies sont considérés comme synonymes. L'intensité des pluies, c'est-à-dire les précipitations liquides, exprimés généralement en mm/h, sont considérées comme légères lorsqu'elles atteignent 2,5 mm / h, modérées lorsque les précipitations sont comprises entre 2,5 mm / h et environ 7,5 mm / h et lourdes lorsque si l'intensité est plus élevée à environ 7,5 mm / h. (Asawa, 2006).

3.2.1 Equipement de la région

La région de Tébessa est contrôlée de plus d'une douzaine de stations parmi lesquelles nous nous sommes intéressés qu'à la station de Tébessa et à titre indicatif 08 stations avoisinantes qui se situent hors du bassin versant, le tableau 9, ci-dessous donne leurs situations géographiques et les principales caractéristiques en matière d'équipement. La station de Tébessa sise à l'aéroport demeure la station la plus importante d'où la plus part des études y faisaient référence surtout en ce qui concerne la disponibilité des données climatiques.

Tableau 9: Caractéristiques des stations pluviométriques.

Station	Code	Coordonnées		Altitude (m)	Appareil	Mis en service
		X	Y			
Tébessa	12.03.01	991.900	247.200	890		1943
El Ma El Abiod	06.28.02	997.620	225.150	1030	PV/PG	01.01.74
Mcht. E'Zouiria	06.28.07	997.750	230.000	1058	PV	01.03.74
Ain Khangha	06.28.06	985,250	236,850	1330	PV	02.11.73
Ouled M'Hamed	06.28.04	980,850	235.000	1335	PV	01.09.73
Chéria	06.23.01	959,200	231,100	1087	PV+PG	1971
Bir Mokaddem	06.23.03	946,300	242,600	1156	PV	1972
Ain Troubia	06.23.07	963,250	250,910	1252	PV	1972
Ain Babouche	06.23.08	954,100	241,800	1175	PV	1974

3.2.2 Précipitations annuelles et interannuelles

La précipitation est un facteur fondamental pour caractériser le climat d'une région. L'étude des précipitations inter-annuelles dans notre région montre une grande variation dans l'espace à l'échelle de 15 années (1993-2008). Le tableau 10 donne les valeurs

moyennes inter-annuelles des pluviométries mesurées au sein de la station de Tébessa et les quelques stations avoisinantes. La plaine de Tébessa s'avère la plus arrosée avec une moyenne inter-annuelle de 331 mm, suivie de Chéria avec 305 mm.

Tableau 10: Précipitations moyenne inter-annuelles (1993-2008) de Tébessa et quelques stations avoisinantes.

Stations	Précipitation moyenne inter-annuelle (mm)
Tébessa	331.6
EL Ma EL Abiod	204.37
E'Zouiria	229.68
Ouled M'Hamèd	220.03
El Khangua	241.15
Bir Mokadem	123.5
Ain Troubia	237.6
Ain Babouche	169.9
Chéria	305.7

3.2.2.1 Détermination de la lame d'eau moyenne précipitée

Ils existent plusieurs méthodes qui permettent l'estimation des précipitations moyennes à l'échelle d'un bassin versant parmi lesquelles on cite la moyenne arithmétique, moyenne utilisant le polygone de THIESSEN, et la moyenne qui fait appel aux isohyètes. Les travaux antérieurs ont montré qu'il existe une légère différence qui semble insignifiante (Rouabhia, 2004) pour l'emploi d'une telle ou telle méthode dans la région étudiée, en plus la station de Tébessa n'appartient pas au même bassin versant des autres stations avoisinantes (réf. Tableau 11) c'est pour cette raison nous allons nous contenter d'utiliser la méthode la plus simple et rapide qui est la moyenne arithmétique des précipitations des stations pour chaque sous bassin versant dont elles appartiennent.

Tableau 11: Précipitations moyennes inter-annuelles (1993–2008).

Sous bassins	Oued Chéria 06.23				Oued Oum Ksob 06.28				12.03
Stations	El Ma El Abiod	E'Zouiria	O led. M'Hamèd	A. Khengua	Bir Mokadem	Ain Troubia	Ain Babouche	Chéria	Tébessa
P (mm)	198,1	233,2	201,8	233,6	123,5	237,6	169,9	305,7	331.6
Moy (mm)	216.7				209.2				331.6

Nous remarquons sur le tableau 11 que la plaine la plus arrosée sur la période considérée est celle de Tébessa avec une lame de 331.6 mm avec un écart de 25.9 mm par rapport à la moyenne annuelle de la plaine de Chéria (305.7 mm) et 133.5 par rapport à celle d'El Ma El Abiod (198.1), ce dernier est très important malgré que les deux plaines sont limitrophes et la distance qui sépare les deux stations pluviométriques n'est que 22.7 km. La carte ANRH des précipitations annuelles pour une période de trente ans allant de 1965 à 1995 (cf. figure14) fait apparaître que la région étudiée se situe entre les deux isohyètes 200 et 300 mm et l'isohyète 250 mm semble être le plus représentatif de la région, cette valeur est très proche de la moyenne calculée à l'échelle des trois sous-bassins versants qui est de l'ordre de 252.5mm.

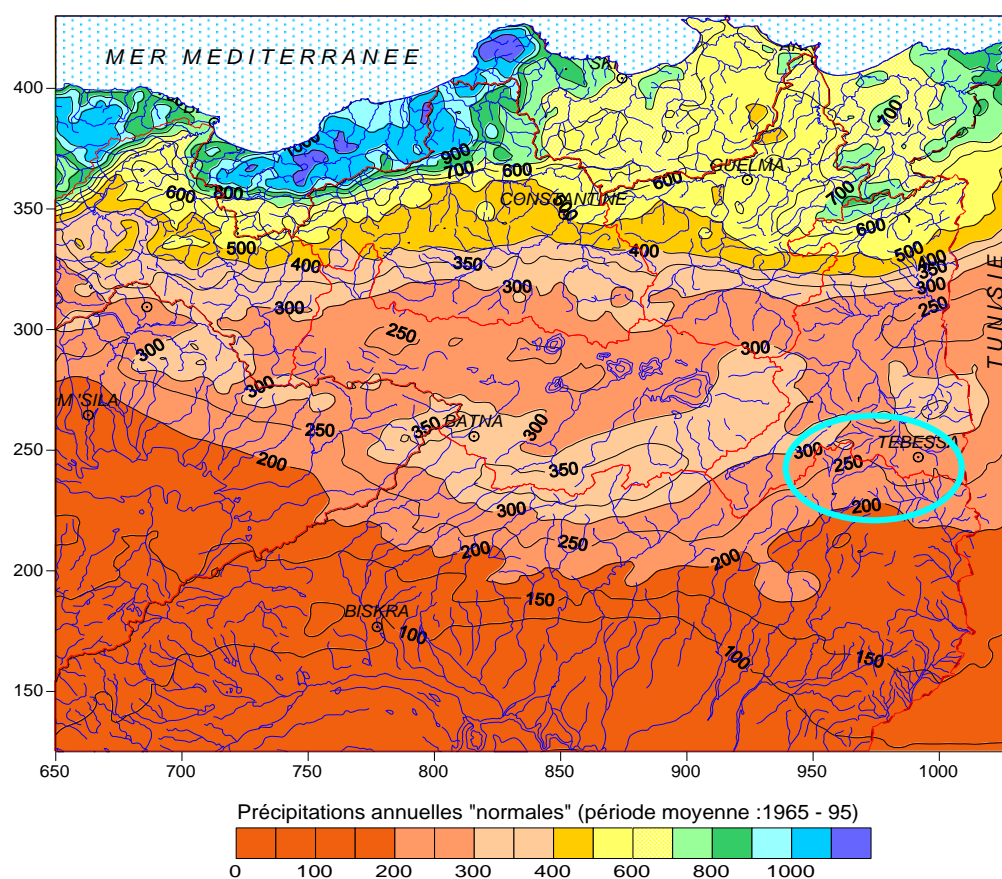


Figure14: Carte des précipitations annuelles du Nord-Est de l'Algérie - ANRH

3.2.2.2 Précipitations mensuelles

Pour mettre un aperçu sur la variation des précipitations mensuelles à l'échelle de la région nous avons choisis trois stations représentatives sur le plan situation géographique qui sont celle de Tébessa, El Ma El Abiod et de Chéria, le tableau 12, montre

les précipitations moyennes mensuelles pour chaque station sur 15 années d'observation allant de 1984 à 1999:

Tableau 12: Distribution mensuelle des précipitations annuelles (1984-1999).

Station	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUIL	AOU	TOT	MAX	min
Tébessa	46,5	29,2	33,2	24,7	30,4	18,3	39,0	27,3	38,7	24,7	<u>14,5</u>	33,0	359,6	46,5	14,5
El-Malab.	21,9	32,0	19,6	12,8	16,9	8,5	18,6	13,9	18,5	24,1	9,4	<u>7,8</u>	204,2	32,0	7,8
Chéria	33,9	34,2	25,9	18,8	24,4	20,5	31,6	17,5	34,2	30,9	<u>10,9</u>	<u>22,9</u>	305,7	34,2	10,9
Moyenne	34,1	31,8	26,2	18,8	23,9	15,8	29,8	19,6	30,5	26,6	<u>11,6</u>	21,3	289,8	34,1	11,6

Les valeurs en **surbrillance** représentent les moyennes du mois le plus humide et celles soulignées du mois le plus sec.

On y observe que les précipitations maximales sont marquées au mois de septembre avec une moyenne de 34.1 mm, alors que le mois le plus sec est juillet avec 11.60 mm, nous remarquons aussi une tendance dans la répartition des précipitations à travers presque toute l'année sauf pour les mois d'août et septembre existe une variation considérable d'une station à une autre ceci est dû au caractère violent et intense durant cette période de l'année qui est une caractéristique typique du climat méditerranéen. La figure 15 ci-dessous donne les moyennes mensuelles des pluies cumulées de 1984 à 1999, qui fait apparaître une variation nette des précipitations d'un mois à l'autre, elles atteignent leur maximum en septembre puis diminuent pour atteindre le premier minimum en février, puis reprennent avec un deuxième maximum en mois de mars pour atteindre le deuxième minimum en mois de juillet.

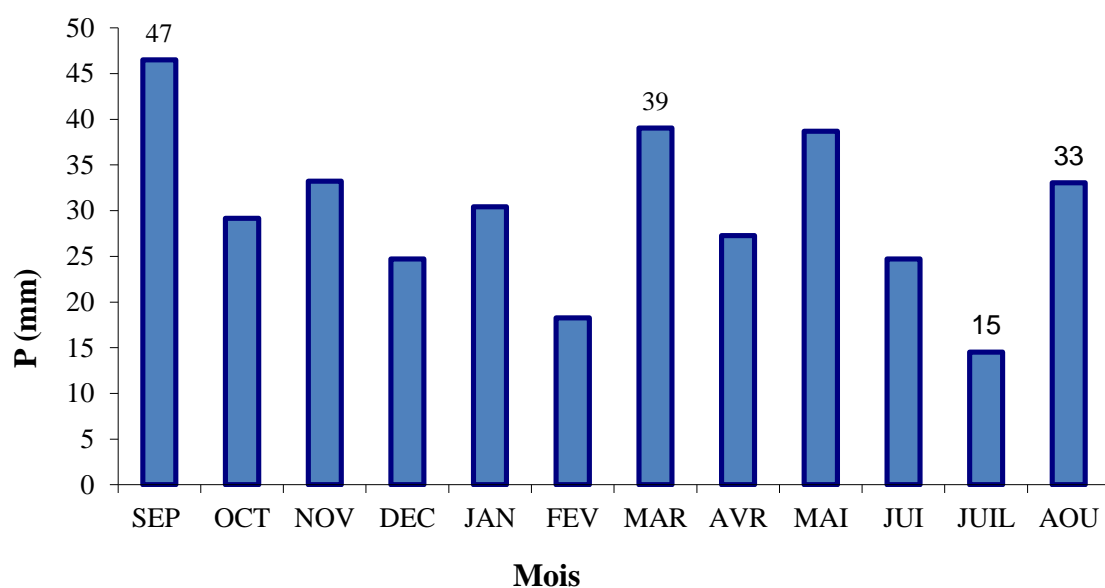


Figure 15: Variation des précipitations moyennes mensuelles à la station de Tébessa

3.2.3 Variation des précipitations interannuelles

Pour caractériser et identifier la sécheresse, plusieurs indices et méthodes sont utilisés.

Indice de l'écart à la moyenne (Em) est l'indice le plus utilisé pour estimer le déficit pluviométrique à l'échelle de l'année. L'écart à la moyenne est la différence entre la hauteur de précipitation annuelle (Pi) et la hauteur moyenne annuelle de précipitation (Pm).

$$Em = Pi - Pm (I)$$

L'application de cet indice sur l'historique des cumuls de précipitations annuelles enregistrées à travers la station météorologique de Tébessa, pour une longue période allant de 1931 jusqu'à 2017, représentés en histogramme et avec la moyenne mobile pour un pas de cinq ans d'intervalle (figure 16); fait apparaître que la fréquence des années sèches est prépondérantes par rapport aux années humides, cette dernière catégorie ne présente que des valeurs extrêmes d'une année à une autre, nous remarquons aussi deux périodes de sécheresse prononcées ; la première est celle des années 40 et la seconde des années 80 ; et deux périodes au cumul extrêmes (celles des années 70 et des années 2000) qui dépassent le seuil de 400 mm. La période des années 2000 ; celle qui coïncide avec la période d'échantillonnage (2001, 2006, 2009, et 2010) va servir pour expliquer l'influence des précipitations sur la qualité des eaux souterraine de la région considérée. Le Tableau 13 fait apparaître trois années (2002 à 2004 et 2009) à forte pluviosité avec des cumuls qui dépassent le 400 mm qui sont des valeurs extrêmes, l'année la plus sèche est celle de 2000 (208 mm) suivie par l'année 2006 (258 mm) et deux années à pluviosité moyenne (2007 et 2010). Mais il faut signaler aussi l'antécédent de l'année 2001; sur la figure 16 nous remarquons, que les périodes des années 80 et la fin des années 1990, sont caractérisés par des sécheresses prononcées. Donc la campagne 2001 qui est une année à forte pluviosité a coïncidé avec la fin d'une période de sécheresse. Tandis qu'au contraire la campagne de 2006 marque la fin d'une période à pluviosité extrême et retour à la normale.

Tableau 13: Précipitations interannuelles (2000-2010).

Année	2000	2001	2002	2003	2004	2006	2007	2009	2010
H (mm)	208	534	597	543	504	258	390	428	370

3.2.4 La neige

Les précipitations solides (neige), sur le versant Nord peuvent être importantes. Il n'existe malheureusement pas de relevés récents systématiques. D'après [Seltzer \(1946\)](#) la région se situe dans la zone d'enneigement moyen au sol de 5 à 10 jours par année.

Ce phénomène a un rôle important si on considère la superficie des crêtes qui bordent les différentes plaines, la fonte de la neige favorise au maximum l'infiltration des eaux au sous-sol par rapport au ruissellement de surface ce qui représente un apport considérable en matière de recharge des nappes souterraines.

3.3 Les températures

Ce paramètre est un facteur très important dans l'évaluation du déficit d'écoulement, qui entre dans l'estimation du bilan hydrologique. Le climat méditerranéen se traduit par des étés chauds et des hivers doux.

3.3.1 Température mensuelle :

Les températures moyennes mensuelles sur une période de 15 années (1984–1999) enregistrées à la station de Tébessa représentés dans le tableau 14, font apparaître un hiver doux et un été chaud et des grands écarts entre les minimas et les maximas (figure 17) surtout en été ce qui est une caractéristique typique du climat méditerranéen semi-aride. La température moyenne annuelle est environ 16 °C. On note que la température moyenne mensuelle la plus élevée est celle du mois de juillet (26.7°C) alors que la température la plus basse est celle du mois de janvier (6.0 °C).

Tableau 14: distribution des températures moyennes mensuelles

T°/Mois	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUIL	AOU	TOTAL	min	Max	Moy
Maximum	29,1	21,7	16,0	11,5	10,2	12,2	16,0	20,7	25,1	31,0	34,7	34,0	262,2	10,2	34,7	21,9
minimum	16,0	11,2	6,6	3,0	1,8	2,6	4,6	7,2	11,3	15,8	18,7	18,3	117,1	1,8	18,7	9,8
Moyenne	22,6	16,5	11,3	7,3	6,0	7,4	10,3	14,0	18,2	23,4	26,7	26,2	189,7	6,0	26,7	15,8
Ecart	13,1	10,5	9,4	8,5	8,4	9,6	11,4	13,5	13,8	15,2	16,0	15,7	145,1	12,1	13,1	10,5

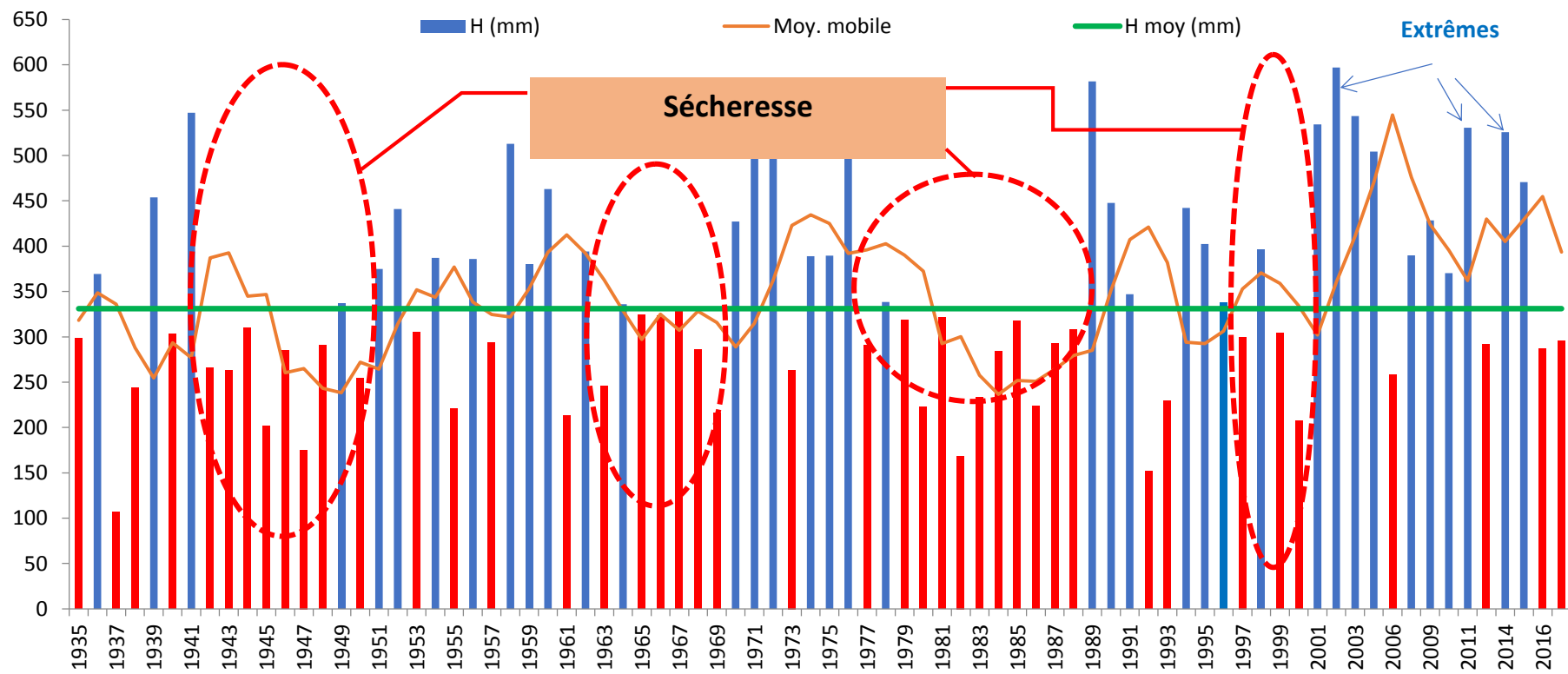


Figure16: Fréquence des années sèches et des années humides, station de Tébessa 1935-2017

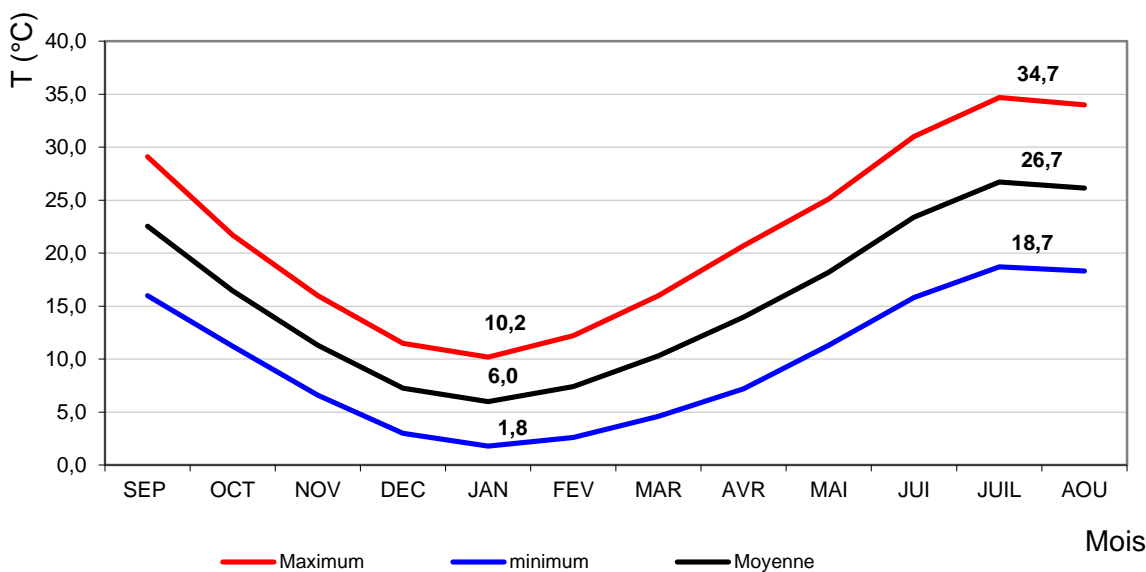


Figure17: Distribution mensuelle des températures à la station de Tébessa (Source FAO).

3.3.2 Températures moyennes annuelles

A l'échelle annuelle, les variations sont peu importantes et relativement stables, cependant on peut apprécier une augmentation générale des températures à l'échelle d'une période de 33 années (1983-2016) d'observation à la station de Tébessa (figure 18) traduisant le réchauffement climatique qui a sévit depuis plus d'une décennie à travers la planète.

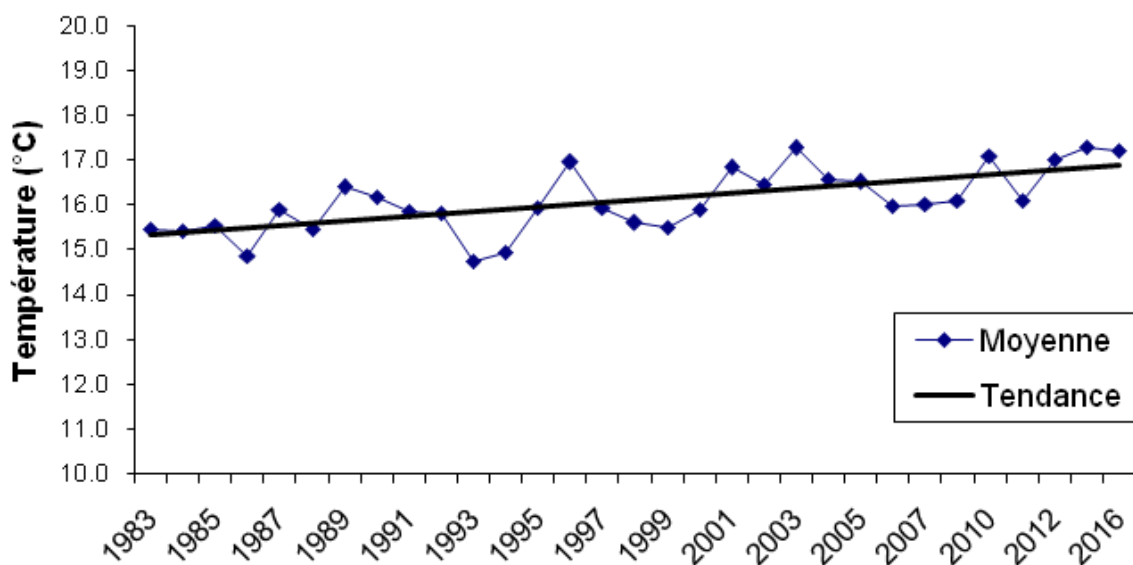


Figure 18 : Variation interannuelle des températures à la station de Tébessa (1983-2016)

3.4 Détermination des indices climatiques

La classification des climats à travers le calcul d'un indice numérique appelé communément indice d'aridité, a toujours été un sujet de recherche dans le domaine de la climatologie. Il en ressort une multitude d'indices et de formules destinées à la caractérisation du climat d'une région donnée, certains sont basés sur des critères climatologiques, d'autres biogéographiques. Parmi tous ces indices, les plus connus restent ceux de [Bagnouls et Gaussen \(1953 à 1957\)](#), d'[Emberger \(1955\)](#), et de [De Martonne \(1926 à 1941\)](#).

3.4.1 Diagramme Pluvio-thermique

Il a été mis au point par [Bagnouls et Gaussen \(1957\)](#). Pour eux la période sèche est celle où le total moyen des précipitations du mois est inférieur ou égal au double de la température moyenne ($P < 2T$) et vice versa, sur ce principe le diagramme est établi en portant les précipitations et les températures en fonction des mois de l'année tout en prenant en considération que sur l'échelle des ordonnées $P=2*T$.

L'établissement des diagrammes pluvio-thermique pour la station de Tébessa (figure 19) nous révèle que les périodes sèches emportent sur les périodes humides (2 à 4 mois humides contre 8 à 10 mois secs avec la remarque que l'écart entre les températures et les précipitations est d'autant plus grand durant les périodes sèches par rapport à celui des périodes humides.

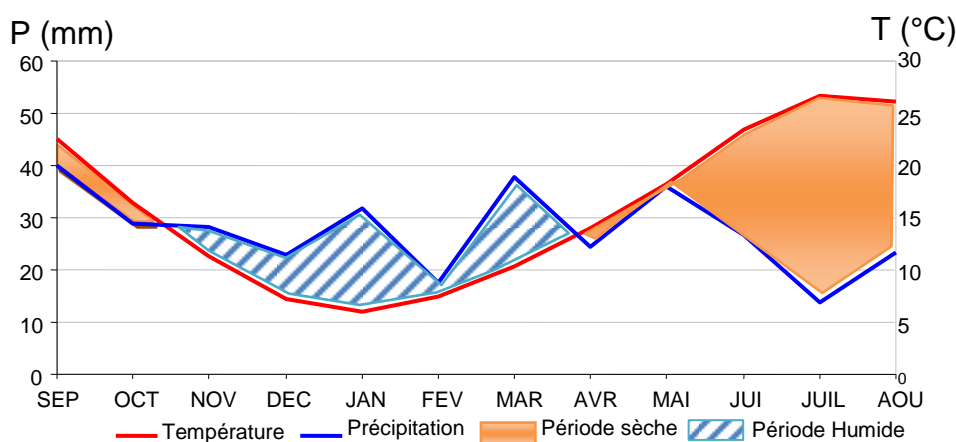


Figure19: Diagramme pluvio-thermique de la station de Tébessa

3.4.2 Climagramme d'Emberger (fig)

Pour déterminer les types de climat de la zone méditerranéenne, [Emberger \(1955\)](#) a proposé la détermination d'un quotient pluviométrique Q. Ce quotient dépend de la précipitation moyenne annuelle et les moyennes des températures minima et maxima, respectivement des mois les plus froids et les plus chauds.

$$Q = \frac{P}{\frac{M + m}{2} \cdot (M - m)} \cdot 1000$$

P : Précipitation moyenne annuelle (mm)

M : moyenne des maxima du mois le plus chaud (en degrés kelvin)

m : moyenne des minima du mois le plus froid (en degré kelvin).

A partir de ces données Emberger a établi un climato-gramme où chaque station est représentée par ses coordonnées en portant en abscisse m (minima en °C du mois le plus froid) et en ordonnées son quotient pluviométrique **Q**.

Le calcul de ce quotient (Q) pour la station de Tébessa donne les valeurs suivantes :

$$Q = \frac{315.0}{(307.8 + 274.9) / 2 \cdot (307.8 - 274.9)} \cdot 1000 = 32.8\%$$

D'après cette valeur on peut dire que la région de Tébessa (figure 20) possède un climat semi-aride.

3.4.3 l'indice d'aridité de DE MARTONNE

L'indice de l'aridité (I) est un indicateur quantitatif du degré du manque d'eau présente à un endroit donné ([Oliver, 2006](#)). L'indice de [De Martonne \(1942\)](#) est appelé indice d'aridité qui se calcule par la formule :

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

P : précipitation moyenne annuelle (mm).

T : température moyenne annuelle (C°).

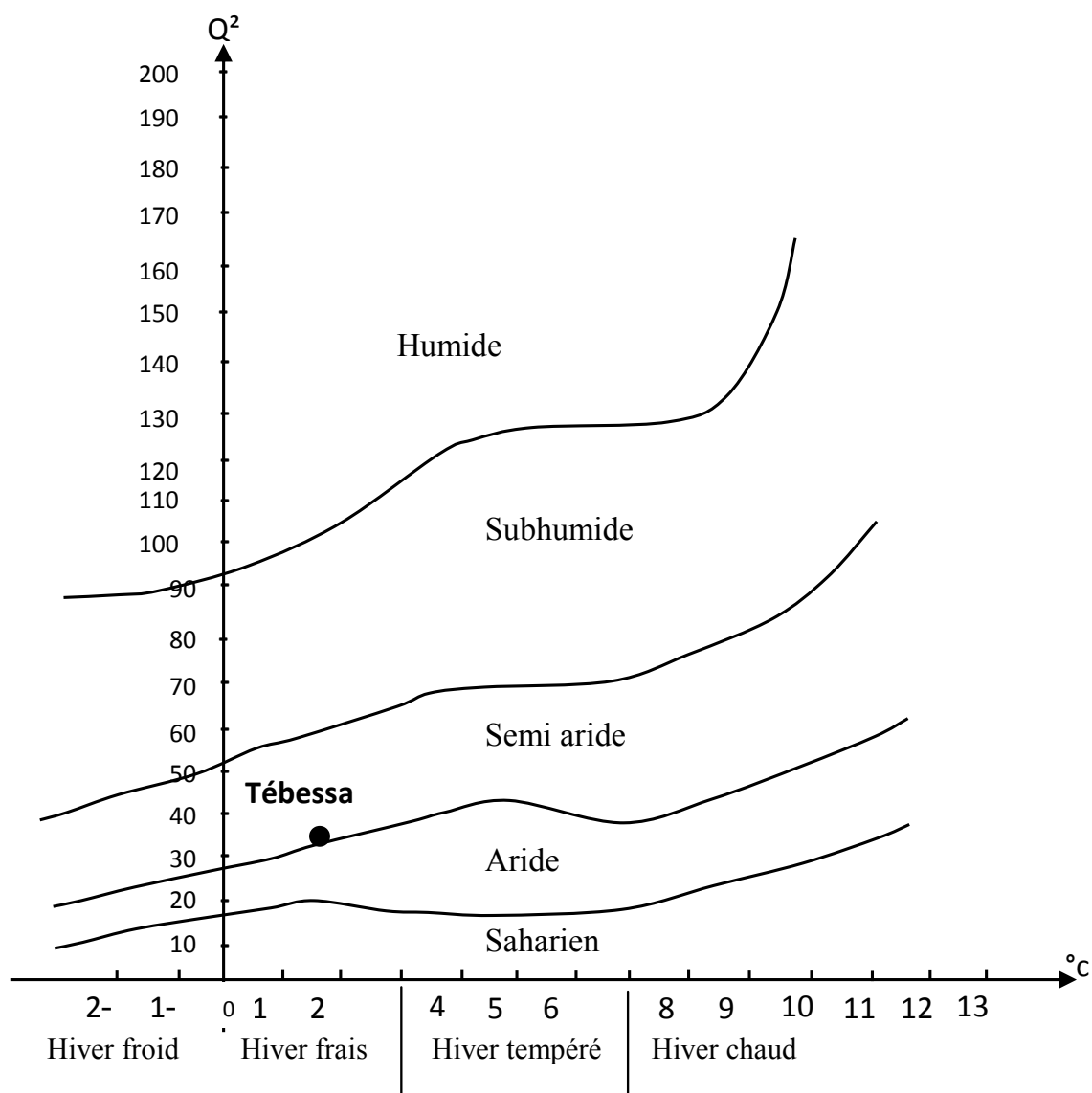


Figure 20: Climatogramme d'Emberger.

- $I < 5$: climat hyperaride
- $5 < I < 7,5$: climat désertique
- $7,5 < I < 10$: climat steppique
- $10 < I < 20$: climat semi-aride
- $20 < I < 30$: climat tempère.

Le tableau 15 montre la température moyenne annuelle, la précipitation moyenne annuelle, et l'indice d'aridité calculés pour la station de Tébessa pour la période considérée de 1984 à 1999. Nous remarquons à travers la valeur obtenue de l'indice d'aridité que la région appartient au climat semi-aride (Figure 21), ce qui est conforme à ce qui est connu pour la zone.

Tableau 15: Résultats du calcul de l'indice d'aridité pour la zone d'étude.

Station	Température (°C)	Précipitation (mm)	Indice d'aridité (I)	Climat
Tébessa	15,4	331,6	13.0	Semi aride

3.1 Evapotranspiration

La conversion de l'eau de l'état liquide à l'état de vapeur s'appelle l'évaporation. L'évaporation nécessite de l'énergie - environ 540 cal / cm³ d'eau (2,45 MJ / kg). La recherche a montré que le taux d'évaporation dépend principalement de la température, de l'énergie solaire, de la vitesse du vent, du déficit de pression de vapeur et de l'énergie advectée. L'énergie d'évaporation provient principalement du rayonnement solaire et du vent. L'évaporation est une composante majeure du cycle hydrologique (Borrelli, 2006).

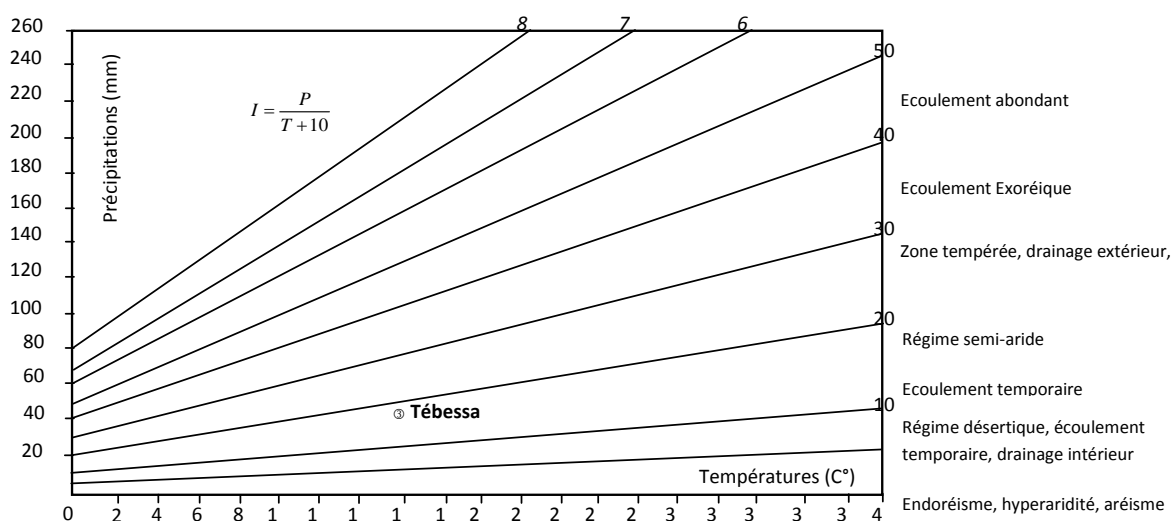


Figure 21: Abaque de l'indice d'aridité annuel de De Martonne (1923).

Suivant l'auteur (Allen et al 1998) l'ET est définie comme étant le processus par lequel l'eau est perdue à partir de la surface du sol et de la plante sous forme d'évaporation et de transpiration. Selon (Schoeller, 1962), l'évapotranspiration est la somme de l'eau utilisée, dans une région donnée, par la croissance de la végétation pour sa transpiration et la constitution de ses tissus et de l'eau évaporée du sol, de la neige, de la pluie retenue par le feuillage et cela dans un temps donné. Donc, l'évapotranspiration est définie comme étant l'ensemble des pertes par transformation de l'eau en vapeur, autrement dit, c'est la somme de l'évaporation (phénomène physique), et la transpiration de la couverture végétale (phénomène biologique). Les besoins en eau des plantes se composent de l'évaporation et

de la transpiration. Vu que ces deux processus sont influencés par les mêmes facteurs climatiques et qu'il est difficile de les séparer quantitativement, on les regroupe sous le terme « Evapotranspiration » (ET).

L'évapotranspiration en milieu semi-aride représente une composante majoritaire du cycle hydrologique (Hernandez, 2000). Pilgrim et al. (1988) rapportent que l'évapotranspiration recycle 80% des précipitations en milieu semi-aride et 95% en région aride. L'évaporation du sol nu a souvent un poids supérieur à la transpiration des plantes du fait que la plus grande partie du sol est nu et d'une couverture végétale souvent discontinue et peu abondante. L'évapotranspiration joue donc un rôle majeur et ne peut pas être négligée sous ce type de climat. (Chaponniere, 2005).

Les facteurs qui conditionnent l'évapotranspiration sont nombreux et mal connus, on en citera quelques-uns, à savoir les facteurs climatiques :

- La température de l'air.
- La vitesse et turbulence du vent.
- Le degré d'insolation.
- L'humidité relative de l'air.
- · Les facteurs géographiques :
- L'état de la surface évaporante du sol.
- L'altitude.
- Les facteurs biologiques :
- Les espèces végétales.
- La profondeur des racines.

On peut distinguer trois notions dans l'évapotranspiration (Musy, 2005) :

- L'évapotranspiration de référence (ET₀) ou évapotranspiration potentielle (ETP), est défini comme l'ensemble des pertes en eau par évaporation et transpiration d'une surface de gazon de hauteur uniforme, couvrant totalement le terrain, en pleine période de croissance, recouvrant complètement le sol et abondamment pourvue en eau.
- L'évapotranspiration maximale (ETM) d'une culture donnée est définie à différents stades de développement végétatif, lorsque l'eau est en quantité suffisante et que les conditions agronomiques sont optimales (sol fertile, bon état sanitaire, ...).

- L'évapotranspiration réelle (ETR) est la somme des quantités de vapeur d'eau évaporées par le sol et par les plantes quand le sol est à son humidité spécifique actuelle et les plantes à un stade de développement physiologique et sanitaire réel.

La mesure de l'ETP peut être effectuée par le bilan hydrique du sol en utilisant des lysimètres ou bien des formules semi-empirique. La méthode de Penman-Monteith très recommandée par la FAO (Allen et al., 1998; méthode FAO-56).

3.1.1 La formule de Penman :

Penman est un physicien Britannique qui a développé le modèle théorique de l'évaporation à partir d'un plan d'eau en 1948 (Davie, 2008). La méthode de Penman, également connue sous le nom de méthode combinée (Penman, 1948) et plus tard simplifiée par Penman en 1963. La version originale a employé la durée d'ensoleillement pour estimer le rayonnement (Jensen et al., 1990).

La forme générale de l'équation de Penman est :

$$ET_0 = \frac{R_n \cdot \Delta + \frac{\rho \cdot c_p \cdot \delta e}{r_a}}{\lambda(\Delta + \gamma)}$$

Où :

ET_0 : évapotranspiration de référence calculée par la relation de Penman [mm/s],

R_n : rayonnement net [W/m²],

Δ : pente de la courbe de pression de vapeur à la température moyenne de l'air [kPa/C°],

ρ : densité de l'air à pression constante [kg/m³],

c_p : capacité thermique de l'air humide [kJ/kg/C°],

δe : différence entre la pression de vapeur saturante e_s [kPa] et la pression de vapeur effective dans l'air e_a [kPa] ($\delta e = e_s - e_a$),

r_a : Résistance aérodynamique [s/m] (descripteur météorologique traduisant le rôle des turbulences atmosphériques dans le processus d'évaporation),

λ : Chaleur latente de vaporisation de l'eau [MJ/kg],

γ : Constante psychrométrique [kPa/C°].

Cette formule est une des plus rigoureuses, à condition d'introduire la valeur correcte de tous les paramètres; ce qui n'est pas aisé compte tenu la difficulté de réunir tous les paramètres nécessaires, ce qui est le cas pour la région étudiée, c'est pour cette raison la formule de Penman fait l'objet de plusieurs modifications visant à la rendre simple comme la formule de Turc, FAO-Penman.

Dans ce contexte nous avons opté l'utilisation de trois formules empiriques afin d'en dégager les différences susceptibles d'exister pour l'emploi de telle ou telle formules.

3.1.2 Formules de FAO-Penman-Monteith

La méthode Penman-Monteith est une contribution majeure à la méthode de Penman, qui n'a pas été développée à l'origine pour les calculs de l'ET de la culture de référence (Monteith, 1965; Jensen et al., 1990; Allen et al., 1998; Allen et al., 1989)

En 1990, une assemblée d'experts et de chercheurs a été organisée par la FAO avec la collaboration de la Commission Internationale pour l'Irrigation et le Drainage et l'Organisation Météorologique Mondiale, pour réviser les méthodologies de la FAO quant à la détermination des besoins en eau des cultures et ébaucher la révision et l'actualisation des procédures employées.

Le panel d'experts recommanda l'adoption de la méthode combinée de Penman-Monteith comme nouvelle procédure standard pour le calcul de l'évapotranspiration de référence et indiqua les procédures pour calculer les différents paramètres. La méthode FAO Penman-Monteith fut développée en définissant la culture de référence comme une culture hypothétique, d'une hauteur supposée de 0.12 m, avec une résistance de surface de 70 s.m-1 et un albédo de 0.23, très proche de l'évapotranspiration d'une grande surface de gazon de hauteur uniforme, en croissance active, avec un approvisionnement en eau convenable. La méthode surmonte les limitations de la méthode de Penman utilisée

antérieurement par la FAO, et donne des résultats plus cohérents avec les données observées mondialement d'utilisation réelle de l'eau par les cultures. (www.fao.org).

À partir de l'équation originale de Penman-Monteith et des équations de la résistance aérodynamique et de surface, la méthode FAO Penman-Monteith (FAO, 1998) pour estimer ETo peut être exprimée:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

Où:

- **ETo** évapotranspiration de référence [mm jour-1],
- **Rn** rayonnement net à la surface de la culture [MJ m-2 jour-1],
- **G** densité de flux de chaleur dans le sol [MJ m-2 jour-1],
- **T** température journalière moyenne de l'air à une hauteur de 2 m [°C]
- **U2** vitesse du vent à une hauteur de 2 m [m s-1],
- **es** pression de vapeur saturante [kPa],
- **ea** pression de vapeur réelle [kPa],
- **es-ea** déficit de pression de vapeur saturante [kPa],
- Δ pente de la courbe de pression de vapeur saturante [kPa °C-1],
- γ constante psychrométrique [kPa °C-1].

L'évapotranspiration de référence, ETo, fournit un standard auquel:

- l'évapotranspiration à différentes périodes de l'année ou d'autres régions peut être comparée;
- l'évapotranspiration d'autres cultures peut être reliée.

L'équation utilise des mesures climatologiques standard de rayonnement solaire (insolation), température de l'air, humidité et vitesse du vent. Pour assurer la précision des calculs, les mesures climatiques doivent être faites à 2 m (ou converties à cette hauteur) au-dessus d'une surface vaste de gazon couvrant le sol et non limitée en eau.

En vérité on ne peut atteindre une prédiction parfaite de l'évapotranspiration pour toutes situations climatiques par aucune équation basée sur des données climatiques, en raison des simplifications dans la formulation et des erreurs dans la mesure des données. Il est probable que des instruments de précision, en conditions environnementales et biologiques parfaitement contrôlées, puissent montrer occasionnellement une déviation entre l'équation FAO Penman-Monteith et des mesures réelles d' E_{To} d'un gazon. Cependant, l'assemblée d'experts s'accorda pour utiliser la définition de la référence hypothétique sur laquelle est basée l'équation FAO Penman-Monteith, comme définition de l' E_{To} d'un gazon lors de la détermination des coefficients culturaux.

L'équation FAO Penman-Monteith est une représentation proche et simple des facteurs physiques et physiologiques gouvernant le processus d'évapotranspiration. En utilisant la définition FAO Penman-Monteith pour E_{To} , les coefficients culturaux peuvent être calculés en chaque site de recherche en reliant l'évapotranspiration mesurée de la culture (E_{Tc}) avec E_{To} calculée, à savoir $K_c = E_{Tc}/E_{To}$. Dans l'approche du coefficient cultural, les différences de couvert végétal et de résistance aérodynamique par rapport à la culture hypothétique de référence sont prises en compte par le coefficient cultural lui-même. Le facteur K_c représente un regroupement des différences physiques et physiologiques entre les cultures et la définition de référence.

Seule la station de Tébessa dispose des données suffisantes pour le calcul de l'ETP par cette formule (tableau 16), extraites de la base de données du site internet de la FAO.

Tableau 16: Caractéristiques climatiques enregistrées à la station de Tébessa.

Mois	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Humid %	Vitesse du vent (km/jrs)	Insolation (h)	Radiation (MJ/m2.jour)	T° moyenne
S	29,1	16,0	53	138	8,9	19,4	22,55
O	21,7	11,2	63	147	7,1	14,1	16,45
N	16,0	6,6	69	147	6,5	10,8	11,3
D	11,5	3,0	73	173	6,2	9,3	7,25
J	10,2	1,8	71	147	6,3	10,1	6
F	12,2	2,6	68	190	6,8	12,9	7,4
M	16,0	4,6	65	156	7,6	16,9	10,3
A	20,7	7,2	56	156	8,3	20,5	13,95
M	25,1	11,3	56	156	8,9	22,8	18,2
J	31,0	15,8	49	147	10,5	25,6	23,4
J	34,7	18,7	44	156	11,3	26,5	26,7
A	34,0	18,3	47	130	10,6	24,2	26,15
Année	21,9	9,8	60	154	8,3	17,8	15,8

3.1.3 Formule de L. TURC mensuelle

La formule de Turc, qui dérive en la simplifiant de la formule de Penman, ne nécessite que la connaissance des températures de l'air et de la radiation globale ou de la durée d'insolation. Cette formule est la suivante :

$$ETP = 0,40 \cdot \frac{T}{T + 15} (I_g + 50)$$

Où :

T : Température moyenne mensuelle en C° du mois considéré, (sous abri).

I_g : rayonnement solaire global (cal.cm-2.j-1), mesuré au pyranomètre.

* Si l'humidité relative de l'air pendant le mois considéré est inférieure à 50%, on introduit un terme de correction K qui sera ensuite multiplié par l'ETP du mois.

$$K = 1 - \frac{(50 - hr)}{70}$$

Où: hr est l'humidité relative.

- Si l'on ne dispose pas d'un pyranomètre pour mesurer I_g, ce paramètre peut être estimé à partir des mesures de la durée d'insolation donnée par l'héliographe.

$$I_g = I_{gA} \cdot \left(0.18 + 0.62 \cdot \frac{h}{H} \right)$$

Où :

- H durée théorique d'insolation en heures par mois.
- h durée réelle d'insolation en heures par mois.
- I_{gA}: rayonnement extraterrestre (cal.cm-2.j-1) donné par les tables d'Angot, d'après la formule d'Angström, fonction de la latitude et de la saison

3.1.4 Formule de THORNTHWAITE

La formule de Thornthwaite permet d'estimer l'évapotranspiration potentielle à l'échelle mensuelle en un lieu en fonction des températures moyennes mensuelles et de la latitude de ce lieu Si l'estimation est exprimée en mm, la formule de Thornthwaite s'écrit :

$$ETP = 16. \left(\frac{10T}{I} \right)^\alpha . F(\lambda) \text{ en (mm)}$$

$$\alpha = \frac{16}{100} I + 0,5 \quad \text{Où : } i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1,514} \quad \text{et } I = \sum_{j=1}^{j=12} i_j$$

T : températures moyennes mensuelles en °C

I : indice thermique annuel

i : indice thermique mensuel

F (λ) : facteur de correction intégrant la durée d'insolation et le nombre de jours du mois.

Cette formule est bien adaptée aux climats à précipitations régulières (océanique, équatorial), mais ne convient pas aux climats à saison sèche marquée (J. Mudry, 2000) tel est le cas de notre région d'étude

3.2 Résultats de calculs de l'ETP

Au vu des résultats obtenus par l'usage des différentes formules pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle à l'échelle de notre région d'étude mentionnée dans le tableau 17, représenté par la figure 22 nous remarquons que Les formules de Turc et FAO-Penman donnent des valeurs semblables par rapport à celles de Thornthwaite à l'échelle mensuel et annuel, cette dernière sous-estime donc l'etp.

Tableau 17: Résultats de calcul de l'ETP par les formules de Thontwaite, Turc

Mois	P (mm)	T (°C)	ETP_THORT	ETP_TURC	ETP_PENM
S	39,9	22,6	109,6	129,2	135,0
O	29,0	16,5	55,8	84,5	89,9
N	28,3	11,3	24,4	55,3	54,0
D	22,9	7,3	10,8	36,7	39,0
J	31,9	6,0	8,2	34,3	39,0
F	17,6	7,4	12,4	48,7	50,4
M	37,8	10,3	28,4	75,7	80,6
A	24,5	14,0	53,4	106,1	114,0
M	36,0	18,2	96,0	133,3	145,7
J	26,6	23,4	147,8	169,8	174,0
J	13,8	26,7	184,6	198,8	204,6
A	23,3	26,2	166,2	145,9	179,8
Année	331,6	15,8	861,6	1218	1306,0

3.1 Bilan hydrique

Le bilan hydrique exprime le processus que peut suivre une quantité d'eau arrivant au sol par précipitation avant de retourner à l'atmosphère. Il permet le calcul de la répartition des précipitations reçues par la surface du sol (Castany G. 1968). Cette méthode est utilisée pour les climats sub-humide et semi-aride, basée sur la notion de réserve d'eau facilement utilisable (RFU). On admet que cette réserve d'eau stockée dans le sol qui est reprise par l'évapotranspiration est de l'ordre de 100 mm en moyenne (Laborde, 2000).

3.1.1 Bilan simplifié selon THORNTHWAITE

Cette méthode est basée sur la notion de réserve en eau facilement utilisable (notée par la suite RFU). On admet que le sol est capable de stocker une certaine quantité d'eau (la RFU); cette eau peut être reprise pour l'évaporation par l'intermédiaire des plantes.

La quantité d'eau stockée dans la RFU est bornée par 0 (la RFU vide) et RFU max (capacité maximale de la RFU qui est de l'ordre de 0 à 200 mm suivant les sols et sous-sols considérés, avec une moyenne de l'ordre de 100 mm). On admet que la satisfaction de l'Etp a la priorité sur l'écoulement, c'est-à-dire qu'avant qu'il n'y ait d'écoulement, il faut avoir satisfait le pouvoir évaporant ($E_{tp} = E_{tr}$). Par ailleurs, la complétion de la RFU est également prioritaire sur l'écoulement (J.P. Laborde, 2000).

3.1.1.1 Résultats de calculs du bilan hydrique de Thornthwaite

Dans cette partie on considère que le bilan hydrique sera établi sans prise en compte des apports artificiels (irrigation).

En utilisant l'ETP moyenne mensuelle calculée par les deux formules (Thornthwaite et Turc) pour la période 1984-1999, les tableaux 18 et 19 synthétisent respectivement les résultats pour chaque formule, qui font apparaître que le bilan hydrique (BH) est déficitaire quel que soit la formule utilisée, mais avec l'utilisation de la formule de TURC le BH est plus que le double (-647 mm) par rapport à celui avec la formule de THORNTHWAITE (-290 mm). Parce que l'ETP par l'usage de cette formule a été sous-estimée comparativement à celles de Penman et Turc.

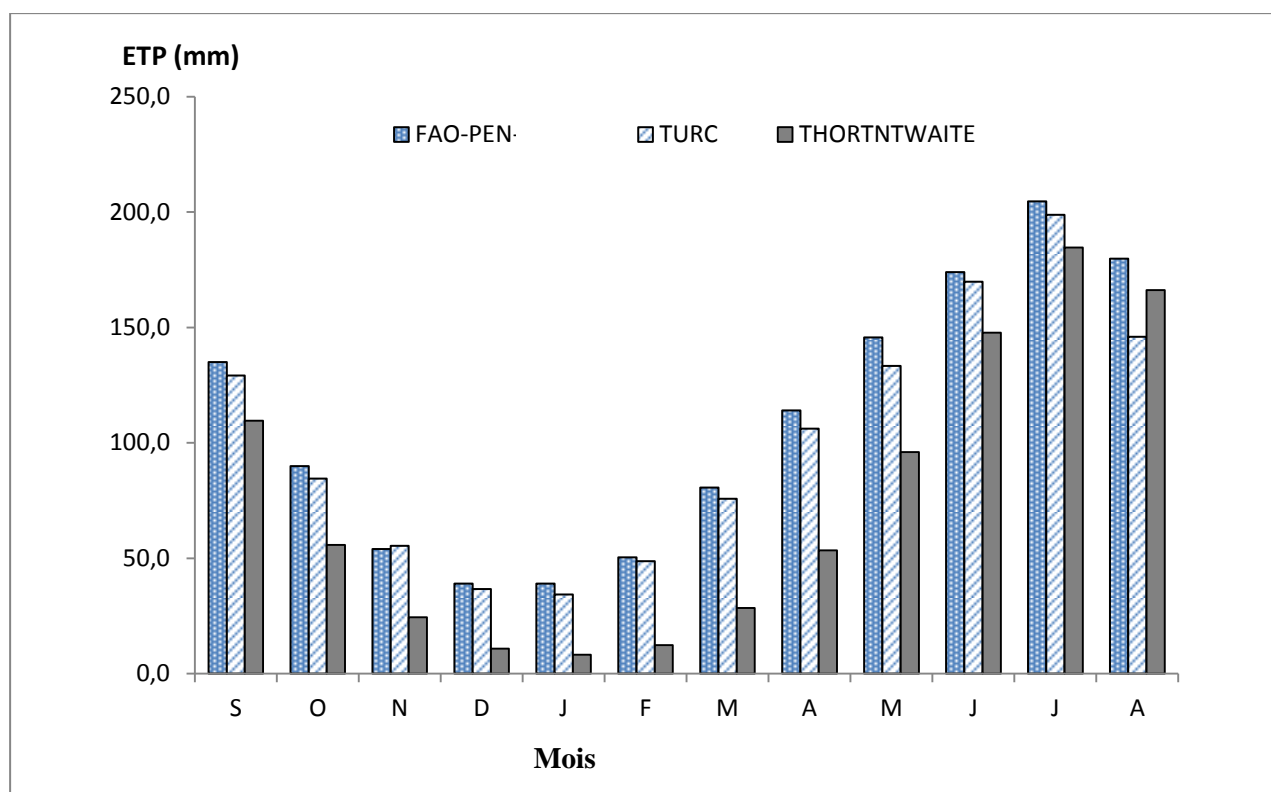


Figure 22: Variation mensuelle de l'évapotranspiration potentielle à la station de Tébessa calculée par les trois méthodes Thornthwaite, Turc et FAO-Penman-Monteith.

Tableau 18: Bilan hydrique avec ETP de Thornthwaite pour une année à forte pluviosité (2000-2001) à la station de Tébessa.

Mois	ETP _{Penm} (mm)	P (mm)	BH (mm)	RFU (mm)	ETR (mm)	Def. (mm)	Exc (mm)
septembre	107.5	34.1	-73.4	0.0	34.1	-73.4	0.0
octobre	59.5	40.5	-19.0	0.0	40.5	-19.0	0.0
novembre	28.0	75.0	47.0	47.0	28.0	0.0	0.0
décembre	12.5	28.5	16.0	63.0	12.5	0.0	0.0
janvier	9.7	127.0	117.3	100.0	9.7	0.0	80.3
février	13.5	10.3	-3.2	100.0	13.5	0.0	77.1
Mars	28.7	9.7	-19.0	100.0	28.7	0.0	58.1
Avril	51.1	25.8	-25.3	100.0	51.1	0.0	32.8
Mai	88.0	42.8	-45.2	87.6	88.0	0.0	0.0
Juin	135.6	23.9	-111.7	0.0	111.5	-24.0	0.0
Juillet	172.1	60.5	-111.6	0.0	60.5	-111.6	0.0
Août	155.5	93.0	-62.5	0.0	93.0	-62.5	0.0
TOTAL	861.6	571.1	-290.5	845.9	571.1	-290.5	248.3

A l'issu des résultats obtenus du calcul du bilan hydrique de THORNTWAITE à travers la région étudiée nous remarquons sur la figure 23, que pour une année à pluviosité moyenne le bilan hydrique est déficitaire à la longueur de l'année, c'est-à-dire que toutes les précipitations qui tombent finiront par retourner à l'atmosphère sous forme

d'évapotranspiration, induisant un déficit agricole important et considérable sur toute la longueur de l'année. Tandis que pour une année à pluviosité extrême le bilan hydrique est positif de novembre à janvier (tableau 18) et à novembre et à janvier (tableau 19) avec

Tableau 19: Bilan hydrique pour une année à forte pluviosité (2000-2001) avec ETP de TURC à la station de Tébéssa

Mois	ETP Turc	P	BH	RFU	ETR	Def	Exc
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
septembre	129.2	34.1	-95.1	0.0	34.1	-95.1	0.0
octobre	84.5	40.5	-44.0	0.0	40.5	-44.0	0.0
novembre	55.3	75.0	19.7	19.7	55.3	0.0	0.0
décembre	36.7	28.5	-8.2	11.5	36.7	0.0	0.0
janvier	34.3	127.0	92.7	100.0	34.3	0.0	4.2
février	48.7	10.3	-38.4	65.8	48.7	0.0	0.0
mars	75.7	9.7	-66.0	0.0	75.5	-0.2	0.0
avril	106.1	25.8	-80.3	0.0	25.8	-80.3	0.0
mai	133.3	42.8	-90.5	0.0	42.8	-90.5	0.0
juin	169.8	23.9	-145.9	0.0	23.9	-145.9	0.0
juillet	198.8	60.5	-138.3	0.0	60.5	-138.3	0.0
Août	145.9	93.0	-52.9	0.0	93.0	-52.9	0.0
TOTAL	1218.3	571.1	-647.2	201.1	571.1	-647.2	4.2

l'emploi de la formule ETP de Thorntwaite et celle de Turc respectivement ; ce qui laisse à supposer que durant cette période la recharge de la nappe avait eu lieu. Les figures 24 et 25 illustrent cette situation sous forme de graphique.

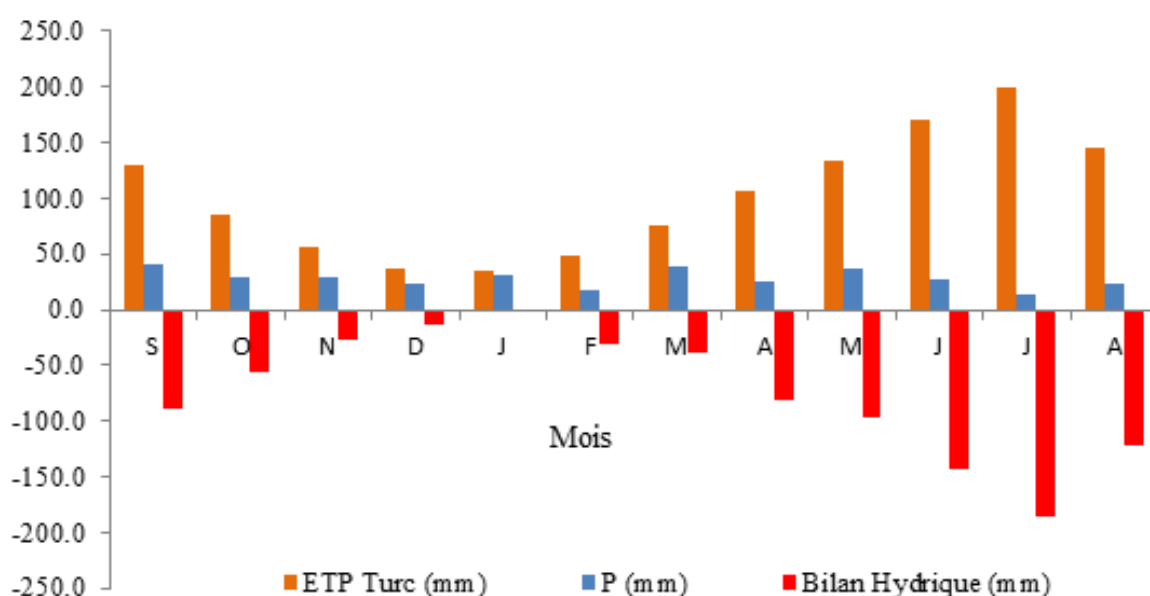


Figure 23: Bilan hydrique avec ETP de TURC, pour une année à pluviosité moyenne.

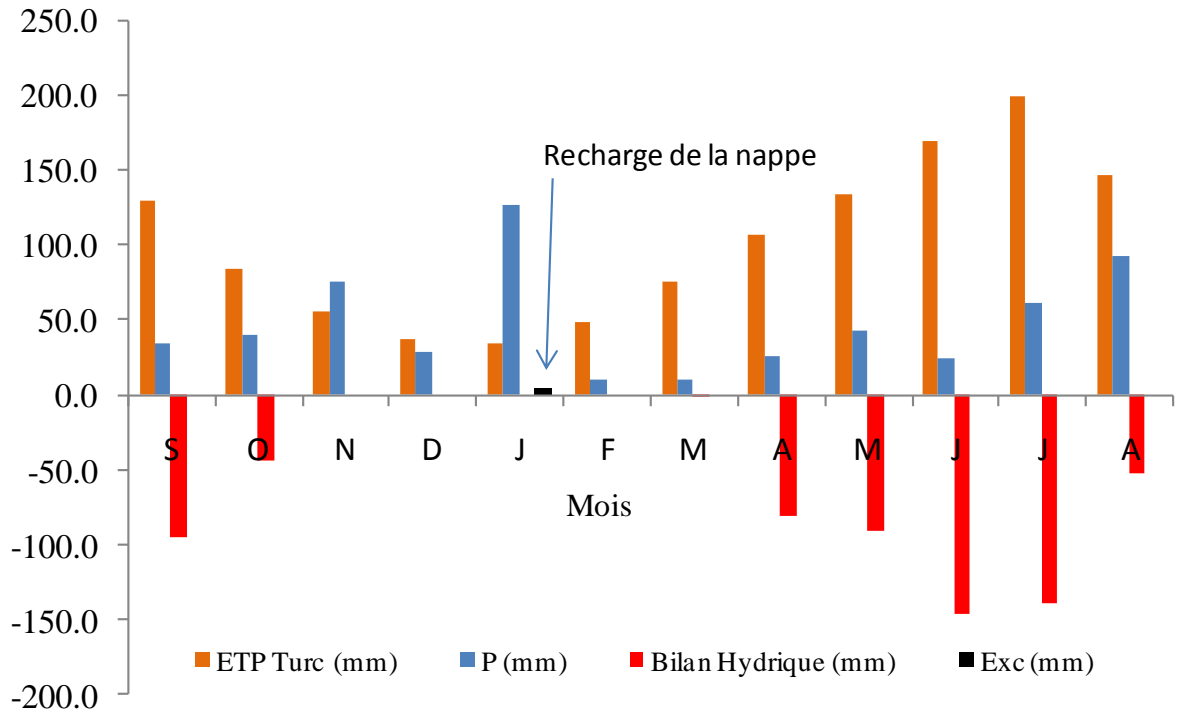


Figure 24: Bilan hydrique avec ETP de TURC pour une année à forte pluviosité (2001-2002).

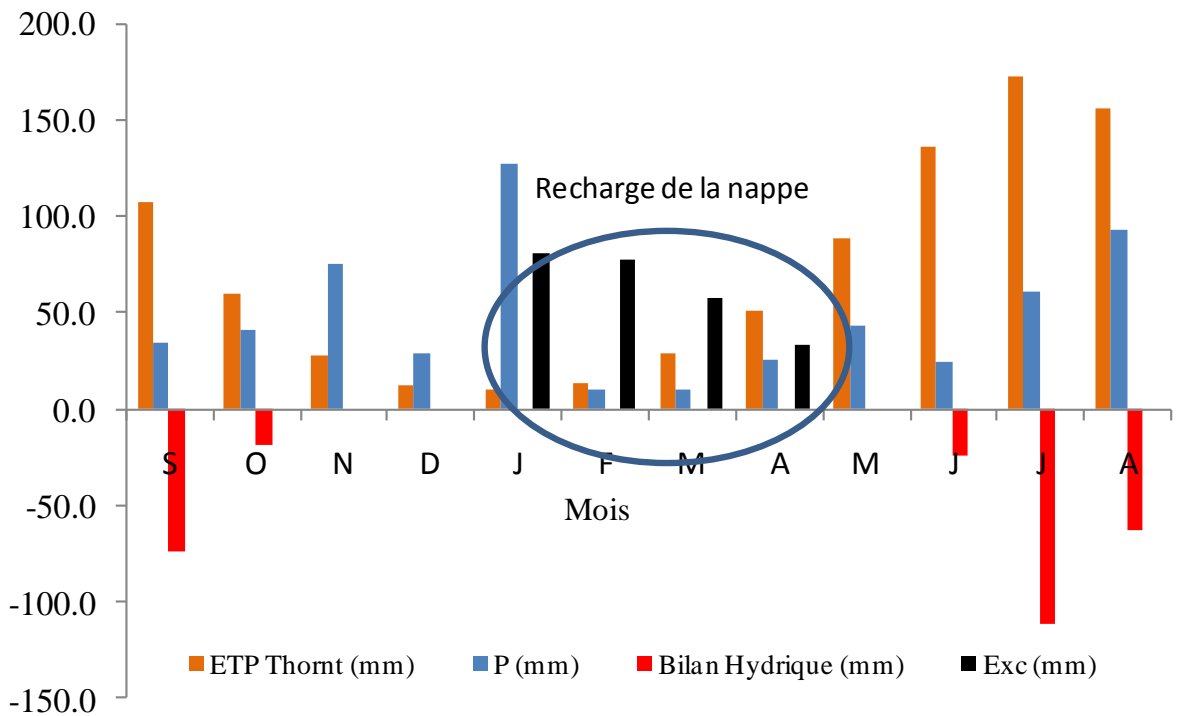


Figure 25: Bilan hydrique avec ETP de THORNTWAITE pour une année à forte pluviosité.

3.2 Conclusion

A travers l'étude climatique à l'échelle de la région étudiée nous avons remarqué que les précipitations sont très variables dans le temps, les températures présentent une légère augmentation progressive traduisant le réchauffement climatique qui constitue l'ordre du jour actuel des météorologues du monde entier, la région fait partie de l'étage bioclimatique semi-aride confirmée par le calcul de l'indice d'aridité de De Martonne, à travers le diagramme pluvio-thermique les périodes sèches sont plus longues et emportent beaucoup sur les périodes humides, l'évapotranspiration potentielle est importante à l'échelle de la région est fait plus que quatre fois l'évapotranspiration réelle traduisant un déficit agricole très important. A l'issue du calcul du bilan hydrique, il ressort que la recharge de la nappe aura lieu essentiellement dans des conditions extrêmes de fortes précipitations.

Chapitre IV:

Aperçu géologique

Chapitre IV:

Aperçu géologique

4.1 Introduction

La région d'étude, est située à la limite de la frontière Algéro-Tunisienne constituée essentiellement par des calcaires allongés selon un axe SW-NE, et séparés par une dépression (plaine cultivée de Tébessa, de remplissage quaternaire (figures 26-27). La région de Tébessa fait partie de la structure autochtone Nord-aurésienne (Aures Nememcha) de l'atlas saharien (Durozoy, 1956 ; Bles, 1969 ; Fleury, 1970 ; Vila, 1994 ; Kowalski et al., 1996, 1997) Elle est constituée essentiellement des formations carbonatées représentées par d'importantes couches calcaires marneuses et de marnes d'âge Crétacé à Tertiaire. Certaines de ces formations sont apparentes au niveau des bordures de la plaine de Tébessa. Un important dépôt alluvionnaire Mio-Plio-quaternaire qui repose en discordance avec les formations précédentes et forme ainsi le remplissage de la plaine. Cette formation est observable surtout au niveau des piedmonts accidentés. A l'Est une formation triasique diapirique disloquant des formations sous-jacentes au niveau du Djebel Djebissa.

Cette structure est due aux jeux de deux phases tectoniques ayant affectées la région.

4.2 Stratigraphie-lithologie

D'après la carte géologique détaillée de Tébessa (Durozoy, 1954) et la bibliographie ; la géologie de la région se distingue par deux grands ensembles :

- Les affleurements de bordures de plaines, d'âge Crétacé, constituent le premier ensemble.
- Les formations d'âge Quaternaire, qui forment l'étendue de la plaine étudiée, et constituent le second ensemble.

Ces deux ensembles constituent une série stratigraphique incomplète, (absence des formations éocènes par endroits) dont la lithologie et la répartition, d'après la carte géologique détaillée de Tébessa (Durozoy, 1956), la stratigraphie de la région s'étend du Trias au Quaternaire, de haut en bas se résume comme dans le tableau 20 et la figure 26, d'après Dubourdiou 1956, 1959; David 1956; Madre 1969; Thibieroz et Madre 1976;

Chikhi 1980; Otmanine 1987; Bouzenoune 1993; Salmi-Laouar, 2004), représente la colonne stratigraphique synthétique de la région de Tébessa.

Tableau 20: Récapitulatif des formations géologiques de la région de Tébessa d'après la carte géologique 1/ 200.000e.

Code sur la carte	Désignation
A :	éboulis actuels
a² :	Alluvions actuels
q² :	Limons récents
a¹ :	Alluvions anciennes
q^{1c} :	Croute calcaire
qⁱ¹ :	Alluvions anciennes de piémonts argileuses
qⁱ² :	Alluvions anciennes de piémonts caillouteuses
q^{ii(1,2,3)} :	matériel d'épandage ancien en terrasses (1.éboulis 2. Gros éboulis 3. Cônes de déjection)
q^{iiic} :	cailloutis ancien du Dj. Djebissa
q^{iii(1,2)} :	Plio-quaternaire (villafranchien) 1. Argile rouge 2. Conglomérats.
P^{s,e} :	Pliocène s. sable quartzeux e. Blocs de calcaire éocène
m³ :	miocène sup
m²⁻¹ :	miocène moy et inf
eⁱ⁻ⁱⁱⁱ :	éocène moy et inf (lutétien et yprésien)
e^{iv} :	éocène inf. (Thanétien)
ec :	éocène inf. et créacé sup (Dano-montien et Maestrichtien sup)
c^{9b} :	Maestrichtien moy
c^{9a} :	Maestrichtien inf
c⁹⁻⁸ :	Maestrichtien inf et Campanien
c⁸ :	Campanien
c^{7(I)} :	Emschérien (Santonien et Coniacien) I . Bancs de calcaires à lumachelles
c^{6c} :	Turonien sup
c^{6b} :	Turonien moy
c^{6a} :	Turonien inf
c^{5b} :	Cénomaniens sup
c^{5a} :	Cénomaniens moy
c^{4b} :	Cénomaniens inf sommet
c^{4a} :	Cénomaniens inf base
c3 :	Vraconciens-Albiens sup
c2 :	Albiens inf
c1 :	zone de Clansayes
ci :	Aptiens sup
cii :	Aptiens moy et inf
t(1,2) :	trias argiles bariolées gypseuses 1. Calcaires roux et dolomies 2. Calcaires et dolomies gris en plaquettes.

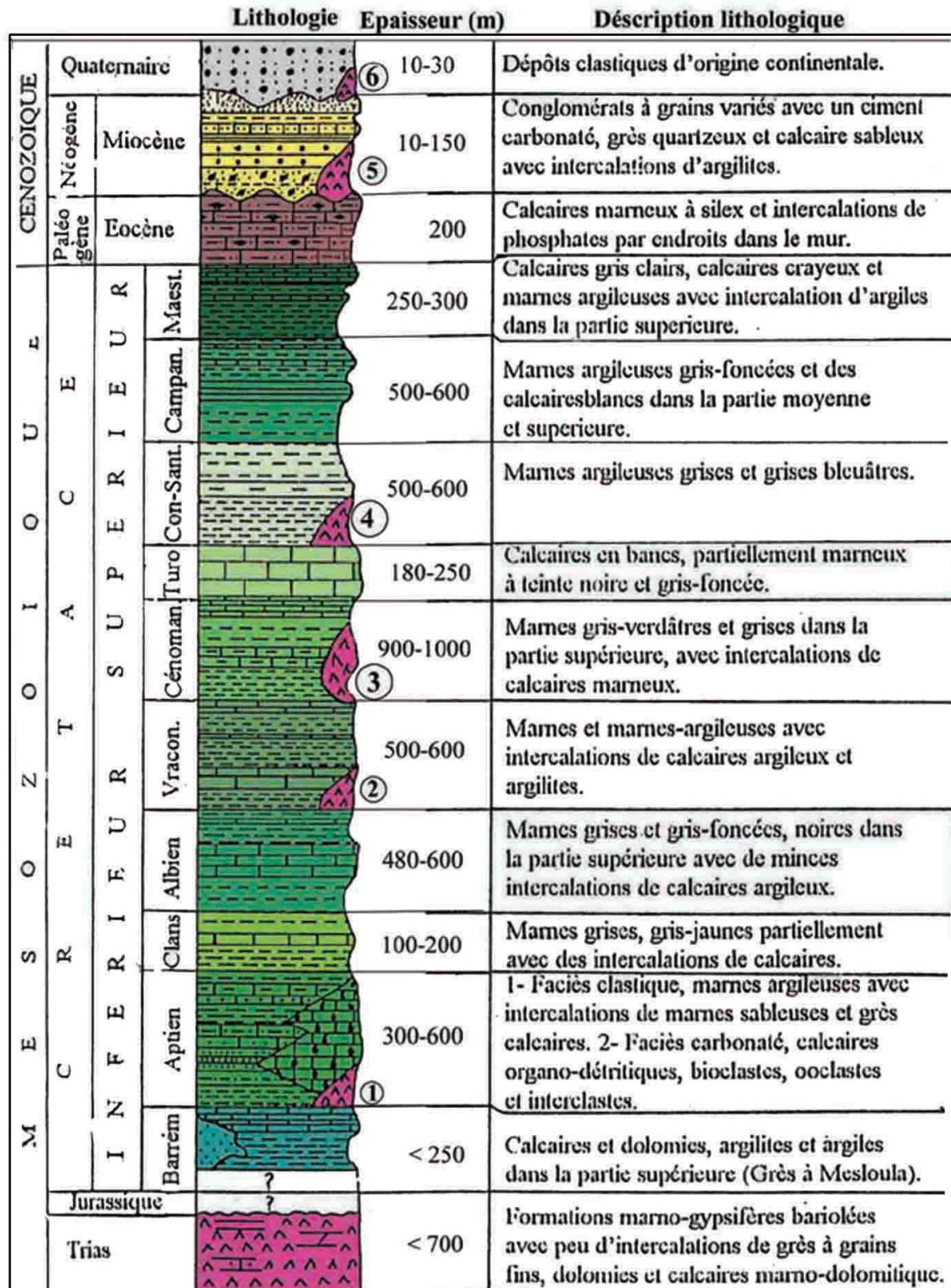


Figure 26: Colonne stratigraphique synthétique de la région de Tébessa. In Lessaad, 2011 (D'après : Dubourdiou 1956)

4.2.1 Le secondaire

4.2.1.1 Le Trias

Les formations les plus importantes de cet étage affleurent dans la zone Sud-Ouest de la région à Dj. Djebissa, sur une bande orientée NE-SW sur environ 80 Km de longueur ils représentent les terrains les plus anciens connus dans "la zone de diapirs" de la région de Tebessa. En raison de leur importance minière ont depuis toujours, fait l'objet d'une attention particulière. Son épaisseur est évaluée à plus de 1000 mètres (Rouvier et al., 1985; Pohl et al., 1986), souvent évaporitique sans sel, mais selon Perthuisot (1994) ils a signalé la présence du sel en profondeur dans les diapirs. Le Trias affleure sous forme d'extrusions et occupe généralement le cœur des structures anticlinales (Perthuisot et Rouvier, 1992; Aoudjehane et al., 1992). Au cours de cette période géologique s'est déposée une puissante série de dépôts évaporitiques et argilo-gypsifères (Chevenine et al., 1989) , formée de marnes bariolées a gypse, de dolomies, de calcaires dolomitiques noirs en plaquettes.

4.2.1.2 Le Crétacé

4.2.1.3 L'Aptien

L'épaisseur de cette formation varie entre 100 et 170 mètres. Les affleurements qui datent de cet étage occupent le flanc nord de Djebel Bouroumane. Il est présent sous deux formes, il est soit calcaire ou marneux, le premier surmonte l'Aptien marneux et renferme le plus souvent des milioles, des rudistes et des lamellibranches (Chikhi-Aouimeur, 1980) et une abondance de quartz automorphe, ce sont des calcaires et de dolomies d'épaisseur moyenne de 400 m (aptien moyen et inférieur) surmontées par des calcaires massifs gris ou roux avec des intercalations de quelques mètres de marnes et de marno-calcaires d'épaisseur moyenne de 70m (aptien supérieur). Le second peut atteindre 450 m d'épaisseur présenté par des gros bancs massifs et épais de calcaires bréchiques à ciment dolomitique, de calcaires graveleux et bioclastiques a Orbitolines et de Mollusques.

4.2.1.4 Albien

Cet étage affleure et occupe le flanc sud et sud-est de Djebel Bouroumane, sous deux formes, de bancs calcaires bruns, épais, très durs à *Ostrea Latissima*, et de bancs de

calcaires à rudistes, (Albien supérieur). Et d'un ensemble de calcaires et marno-calcaires gris en plaquettes et en petits bancs avec présence de nombreuses empreintes d'Ammonites et de Bélemnites, l'épaisseur de cette formation avoisine 150m (Albien inférieur)

4.2.1.5 Cénomanién

C'est une série de marnes jaune parfois grise et de bancs calcaires lumachelliques l'épaisseur atteint les 500m. Il affleure au flanc Est de Dj. Ozmor et au Sud-Est de Dj. Djebissa. La faune est très abondante (Ostréa, Exogyra, Cardita)

4.2.1.6 Turonien

Il affleure largement au Sud de la plaine, il constitue le versant Est de Dj. Djoua, le versant Nord-Est de Dj. Ozmor et le versant Ouest de Dj. Anoual. Constitué de calcaire marneux gris en petits bancs à sa base d'épaisseur ne dépasse pas les 70m. Au-dessus, c'est une assise massive de calcaires beiges et de dolomies ou de calcaires dolomitiques.

4.2.1.7 Le Campanien

Le Campanien (inférieur et supérieur) est caractérisé par une série de marnes grises en profondeur qui deviennent verdâtres dans sa partie superficielle, cette formation est présente en bordure du bourrelet montagneux qui limite la plaine, son épaisseur varie de 300 à 400 m.

4.2.1.8 Le Maestrichtien

Le Maestrichtien est une formation de calcaire massifs qui occupe principalement le sud-ouest de la plaine (plateau de Chéria) où son épaisseur moyenne atteint 250 mètres on le trouve aussi au nord dans djebel edyr il est aussi représenté par des éboulis au pied des reliefs en bordure de la plaine.

4.2.2 Tertiaire

4.2.2.1 Le Danien-Eocène inférieur

Représenté par des marnes argileuses noirâtres d'une épaisseur de 100 à 150 m

4.2.2.2 Eocène moyen

D'une épaisseur moyenne de 50 mètres, est constitué d'une alternance de calcaire dur, de craie, de marnes plus ou moins calcaire avec divers minéraux phosphatés, l'ensemble de ses couches est extrêmement siliceux. La silice s'est individualisée sous forme de rognons de silex dans les bancs calcaires. C'est de manière générale, ce qui caractérise la présence de ces formation dans la région d'étude. Il affleure dans la partie nord de la plaine à Djebel Edyr.

4.2.2.3 Miocène

Les formations de cet âge sont absentes à travers la zone d'étude, mais abondante à la plaine d'El-Ma El-Abiod où se sont représentées par des grès et sables qui sont directement transgressifs sur les calcaires maestrichtiens.

4.2.2.4 Le Pliocène

C'est une formation qui recouvre largement les calcaires éocènes au Nord de la plaine et les calcaires Maestrichtiens du côté Nord-Est, constituée par des argiles rouges et des conglomérats sableux quartzeux, les sables quartzeux existent dans la partie Est de la plaine et peuvent atteindre 400m d'épaisseur.

4.2.3 Le Quaternaire

Cette formation constitue un manteau alluvial qui représente le remplissage du fossé d'effondrement de Tébessa de l'amont à l'aval. C'est le faciès dominant à travers la zone d'étude qui occupe une surface importante principalement à l'intérieur de la plaine et aux pieds des montagnes. Les dépôts quaternaires sont d'origine continentale et sont distribués dans les parties basses des reliefs et couvrent des surfaces importantes (plaines et vallées actuelles). Ils sont formés de croûtes calcaires, limons éboulis, cailloutis et poudingues. La puissance du Quaternaire varie entre 10 et 30 m (Dubourdiou, 1956). Les formations lithologiques qui peuvent être distinguées sont les formations actuelles, les formations anciennes et le Plio-Quaternaire:

4.2.3.1 Formations actuelles et récentes:

- **Alluvions actuelles.** Ils caractérisent les berges des affluents en bordure de la plaine, les plus importantes se trouvent aux berges de Oued Ain Chabro sud-ouest. Les oueds recourent les formations sur lesquelles ils traversent provoquant des dépôts alluvionnaires tout au long de leurs trajets.
- **Limons récents :** ils sont développés surtout dans la grande vallée de l'Oued kébir, dans la Merdja de Tébessa, des dépôts de gypse alluvionnaire font l'objet d'exploitations locales.
- **Croûtes calcaires :** n'affleure que peu à travers la plaine, près de la ville de Tébessa du côté ouest. Ce sont des dépôts superficiels provoqués sous l'effet de l'évaporation de l'eau chargée de calcaire, développé surtout sur les alluvions caillouteuses anciennes.

4.2.3.2 Formations anciennes :

- **Alluvions anciennes :** On les rencontre à l'amont de l'Oued Oglat el Rbaïb en allant vers El-Kouif, qui s'individualisent sous forme de basses terrasses de l'oued et se raccordent généralement à des formations anciennes occupant latéralement de plus grandes surfaces ainsi que de niveaux localement discernables.
- **Alluvions anciennes de piedmont :** Elles occupent toute les de bordure de la plaine de Tébessa, ce sont des formations de piedmonts, en amont caillouteuses (à partir des calcaires maestrichtiens à l'ouest et au NE, éocènes au Nord, turoniennes à l'Est, enfin d'éléments très divers aux flancs du Dj. Djebissa. Ce sont, la plupart du temps, des cônes de déjection et argileuses en aval (constituées à partir des marnes sénoniennes à l'ouest et au NE de Tébessa, dano-montiennes au NO, cénomaniennes au SE).
- .
- **Matériel d'épandage ancien en terrasse :** Il est composé de cailloutis et d'argiles, peu épais en générale (sauf à l'Ouest de Tébessa dans la région du Chabet el Hallouf), sur les marnes crétacées.
- **Matériel d'épandage ancien : éboulis et cônes de déjection.**
Ils sont rencontrés souvent aux bordures et aux pieds des formations calcaires sous trois formes :
 - a. Eboulis et cônes de déjection anciens, ravinés par les oueds actuels
 - b. Gros éboulis, amas de blocs, souvent énormes, de calcaires maestrichtiens paraissant, disloqués et en cours d'altération sous l'action de l'érosion ;

c. Cônes de déjection rougeâtres, formés d'esquilles calcaires bien cimentées, empruntées exclusivement aux reliefs maestrichtiens au pied desquels ils se trouvent (Dj. Mestiri, Chabet el Hmara, Ksar Tebinet). Un pendage vers l'amont est parfois bien visible. Il peut s'agir, soit du rejet récent d'accidents de la bordure du fossé d'effondrement, soit de mouvements de solifluxion sur les marnes

- **Cailloutis anciens du Dj. Djebissa** : Ils sont caractéristique du Dj. Djebissa, généralement accrochés sur les argiles à gypse du Trias ou sur les marnes cénomaniennes dans cette zone.

Plio-Quaternaire (villafranchien) : la partie la plus importante de cette formation affleure à Kodiet Karmassa et Henchir Ben Aoua en allant vers Annaba. Elle est constituée d'argile rouge (O. Oglat Rbaïb ; O. Kébir ; Kt el Kramassa ; O. Serdiess); et de conglomérats (contreforts E du Dj. Djebissa).

4.3 Tectonique

La tectonique de la région a permis à travers les études antérieures, de mettre en évidence la chronologie de la sédimentation, du plissement, du diapirisme et de la fracturation ainsi que, localement, les stades consécutifs d'effondrement du fossé de Tebessa (Figure27-28).

4.3.1 Les Phases de l'orogénèse

Cette région a été le siège des cinq phases de l'orogénèse alpine (Kowalski et al., 2002):

4.3.1.1 La phase compressive fin-lutétienne :

Cette phase est caractérisée par une contrainte maximale d'orientation N 320-330°E. qui se manifeste par des plis d'orientation atlasique N 50°-60°E très visibles sur les cartes géologiques d'El-Aouinet (Dozet et al., 1985), de Meskiana (Kuscer et al., 1985) et de Morsott (Bles, Fleury., 1970), mais a cause de la superposition des phases ultérieures elles sont moins visibles sur la carte géologique de Tébessa (Durozoy, 1956). Elle se manifeste clairement au Sud-Ouest de Tébessa (Vila.,1995).

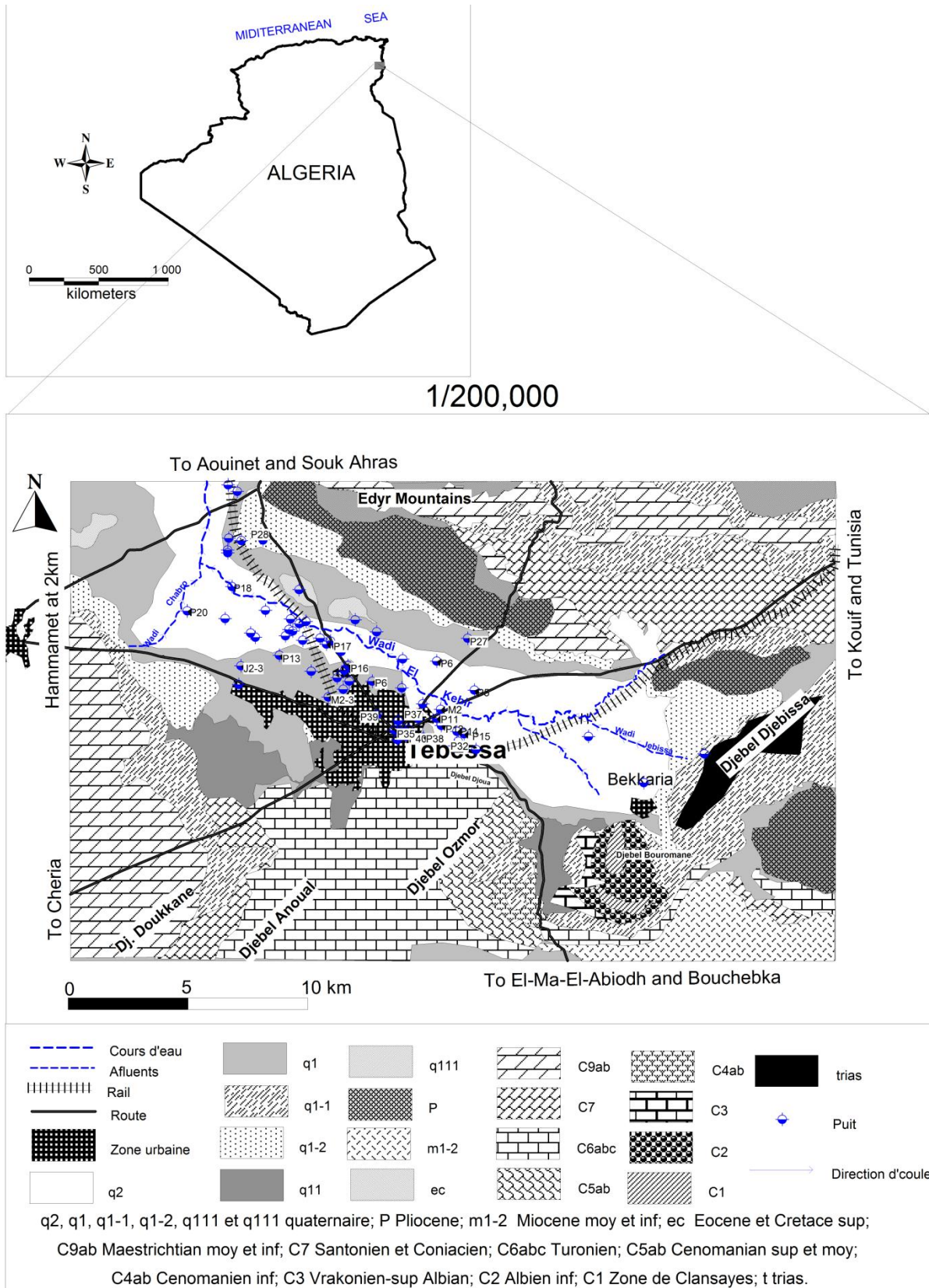


Figure 27: Esquisse géologique de la plaine de Tébessa.

4.3.1.2 La phase distensive du Miocène Inférieur :

Cette phase, au cours du Langhien-Serravallien et Tortonien, est responsable du développement et de la formation du bassin d'El Ma Labiod, ainsi que celui des Oulad Soukies. La distension miocène a facilité le diapirisme dans le fossé des Oulad Soukies, à Djebel Ouenza, à Djebel Boukhadra et dans la zone entre Djebel Belkif et Hameimat.

4.3.1.3 La phase compressive du Miocène Supérieur :

En accord avec Vila (1980), les dernières manifestations de la compression miocène vers le sud, ont été observées dans les monts de la Haute Medjerda. Elle ne se manifeste que dans la zone de Sebkhia Sellaoua et plus au Nord.

4.3.1.4 La phase compressive du Pliocène Inférieur :

Elle est responsable de la formation des plis orientés N90°-110°S, avec une contrainte maximale N 0°-20° E, sur la carte de Tebessa (l'anticlinal de Bled Tebaga, le synclinal de Draa Es Snouber, l'anticlinal de Bir Salem et les réplissements de l'anticlinal fini-Lutétien de Bouroumane. avec la formation de l'anticlinal de Bouroumane-Tella-Djebel Anoual). Sur la carte de Meskiana On observe aussi la formation du synclinal de Draa Snouber. L'effondrement du fosse de Morsott provoquée par la composante senestre de la contrainte N0°-20°E au cours du stade distensif, était accompagné par le percement du diapir de Belkif- Hameima (diapirisme mio-pliocène), qui s'effondrait partiellement dans le fossé. La composante dextre facilitait la réactivation du diapirisme du Djebel Djebissa, qui se manifestait comme un diapirisme sous-marin à l'Aptien-Albien, provoquant la réduction drastique du profil Aptien-albien de ce Djebel (Vila, 1994).

4.3.1.5 La phase compressive du Pliocène Supérieur :

Cette phase découle de l'anticlinal de Djebel Belkif, le synclinal Faid Al Obbiz (Morel 1957) et l'anticlinal d'Oued Annba-Djebel Stah. Ces plis, orientés N 160-170 E sont formés par la contrainte maximale N 80 E et détectés par Bles (1969) à El Kouif. Elle est responsable de la formation des structures plissées parallèles au fossé de de Morsott. La composante dextre de cette contrainte est responsable du fossé d'effondrement de Tébessa lie avec le renversement et l'effondrement d'une partie du Pliocène inférieur (une partie de l'anticlinal du Bled Tebaga, et du synclinal draa Snouber).

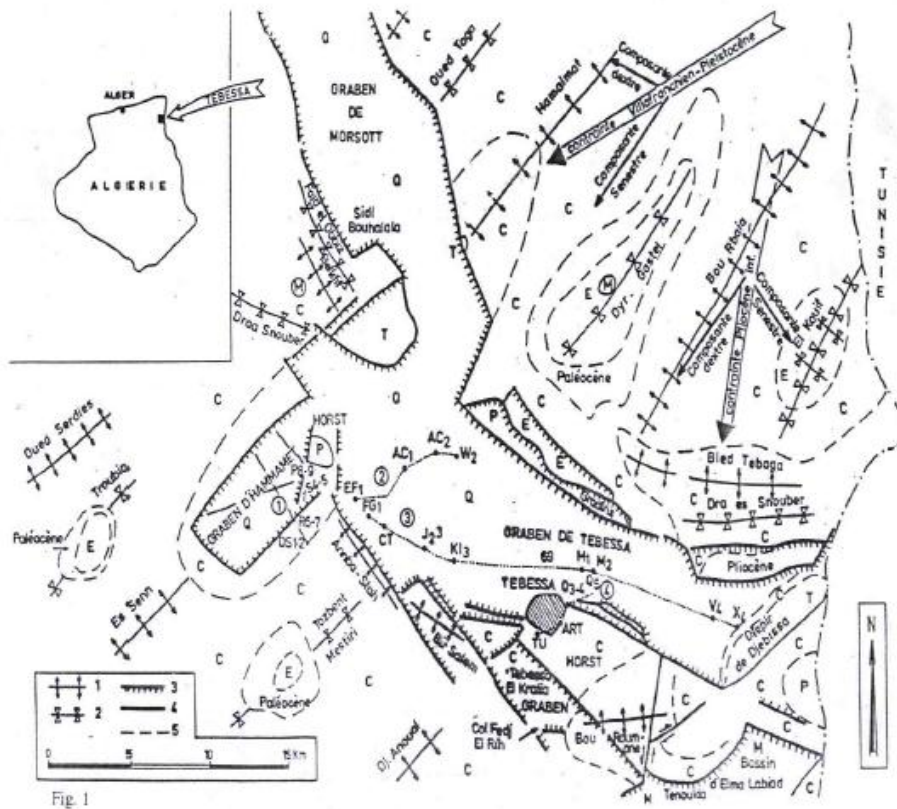


Figure 28: Esquisse tectonique des environs de Tébessa, (W.M.Kowalski et al., 1997) (T :Trias,C :Crétacé,E :Éocène,M :Miocène,P :Pliocène,Q :Quaternaire, OS1, EF1 : symboles des forages,1-4 :numéros des profils

4.4 Géomorphologie

4.4.1 Introduction

La plaine de Tébessa correspond à un grand fossé d'effondrement qui recoupe orthogonalement des plis anticlinaux et synclinaux d'axes NE-SW. Les grands accidents disloquant ces structures, ont donné à la région sa physionomie actuelle. La plaine est entourée de part et d'autres par deux grands ensembles d'affleurements calcaires, séparés par des dépressions (figure29).

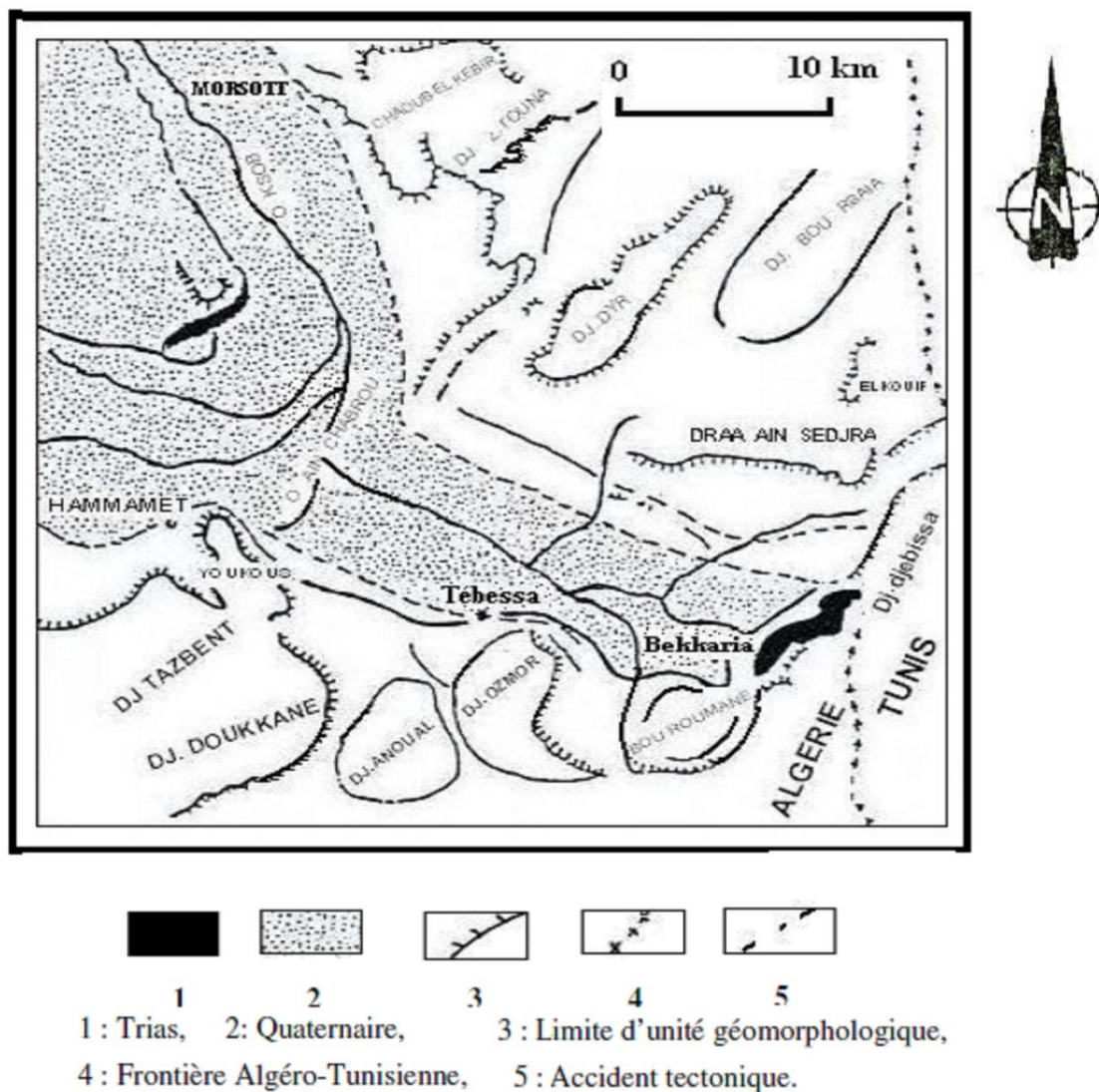


Figure 29: Croquis géomorphologiques de la région de Tébessa (D'après Thomas, 1974)

4.4.2 Les monts septentrionaux

Le passage des hautes plaines de Mellegue aux monts de Tébessa se manifeste par le rétrécissement des plaines et par l'accentuation des unités géomorphologiques tel que le val perche d'Edyr et celui de Bou Rbaia. La majorité des plis dans cette bordure septentrionale sont tranches par des failles transversales NW-SE.

4.4.3 Les monts méridionaux

Au sud, le fossé d'Ain Chabro tranche les monts de Nememcha, interrompant les formes du relief qui possédaient, auparavant, une certaine symétrie. Le relief devient de plus en plus complexe à l'Est de Djebel Doukkane ; la barrière orientée E-W s'incline vers le

Nord-Est ou elle ferme la plaine de Tebessa. Cette barrière se présente en petits massifs tels que Djebel Anoual, Djebel Azmor, Djebel Bouroumane et celui de Djebissa.

4.5 Conclusion

D'après les résultats des études géologiques antérieures, cet aperçu géologique a permis de conclure que les différentes phases tectoniques qu'avait connu la région d'étude ont donné une structure très faillée et ont mis en évidence les différentes entités géomorphologiques constituées essentiellement de:

- Formations triassique de Djebel Djebissa à l'Est de la plaine constituées d'argiles greso-calcaires à gypse, représente l'ensemble le plus ancien de la région de Tébessa ;
- Remplissage puissant d'âge plio-quadernaire au centre du fossé d'effondrement de Tebessa, qui fait le siège d'un des grands réservoirs en eaux souterraines dans la région ;
- Des formations carbonatées en bordure de la plaine datant du maestrichtien au Sud-Ouest et au Nord-Est, turoniennes à l'Est.

Chapitre V :

Aperçu hydrogéologique

Chapitre V:

Aperçu hydrogéologique

5.1 Introduction

Sur la base des cartes et les coupes géologiques combinés avec les colonnes stratigraphiques des forages réalisés à travers la région, leurs profondeurs, l'altitude topographique, et la mesure des niveaux piézométriques, des coupes hydrogéologiques et des cartes piézométriques ont été établis afin de comprendre le mécanisme de circulation de l'eau souterraine dans le système aquifère de la plaine de Tébessa.

5.2 Géométrie des aquifères

La plaine de Tébessa a été couverte par deux importantes prospections géophysiques la première en 1970 réalisée par la Compagnie Générale de Géophysique (CGG) et la seconde par Stroy Export Brague (SEB) en 1978. L'étude a fait l'objet de plus de 570 sondages électriques vertical (SEV), orientés SW-NE, espacés de 1km et de ligne AB 2000 et 6000 m, ce qui fait une profondeur d'investigation de 350 et 1000 mètres, les objectifs tracés de ces prospections étaient :

- De déterminer les lentilles à lithologie grossière et la reconnaissance des zones à forte salure ;
- Connaître la profondeur et la nature du substratum ;
- Connaître les grands accidents de bordures qui accompagnent le fossé d'effondrement.

La figure 30 illustre la répartition spatiale des profils géophysiques réalisés par la CCG en 1970, qui ont servis pour dresser des coupes synthétiques représentatives des formations prospectées (Figures. 31-34). Sur chacun des profils on donne la répartition spatiale des résistivités regroupées en trois horizons P1, P2 et P3 qui se suivent et se superposent d'une manière irrégulière (Djabri, 1987), sur les profils géophysiques réinterprétés par GOLE et RICARD en 1975, on constate une alternance des couches résistantes avec des couches non résistantes.

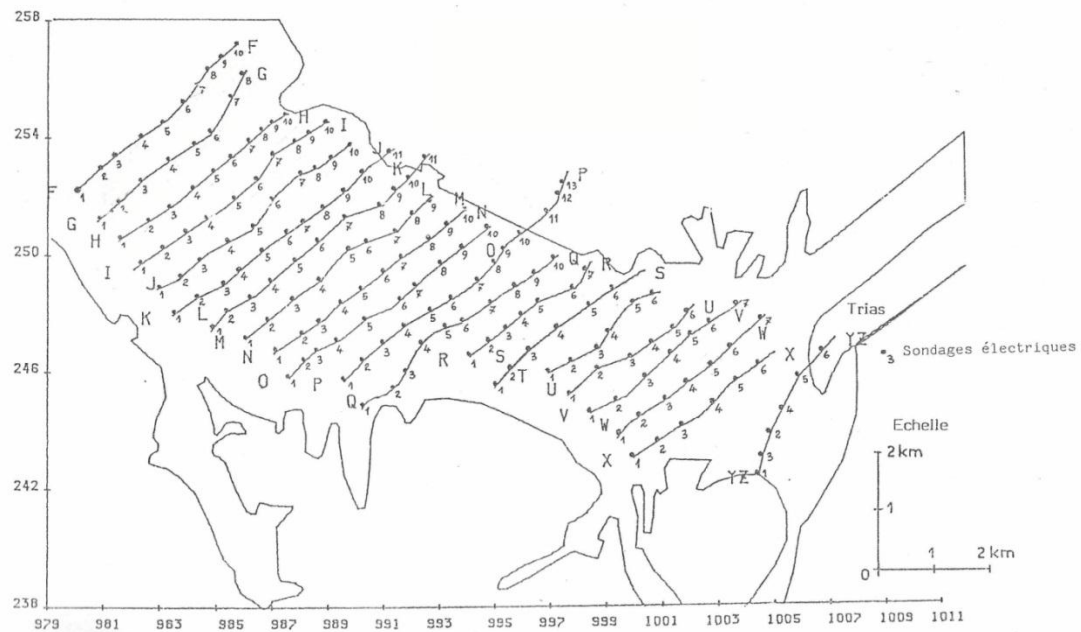


Figure 30: Localisation des profils électriques à la plaine de Tébessa (CGG, 1970 in : Djabri, 1987)

- A Ain Chabro (figure 31) : on constate que les zones résistantes (perméables) minces au centre (125 m) deviennent épaisses (227 m) et bien marquées sur les bordures de la plaine, sur les profils géophysiques on trouve rarement la succession P1,P2,P3 mais on trouve surtout P3 ce qui nous permet de dire qu'il s'agit probablement de cailloutis calcaires ou de galets.
- A Tébessa (figure 32) : dans cette partie la succession des trois horizons existe, la géologie est représentée par des cailloutis calcaires, des graviers calcaires ou des sables, dans la partie centrale on observe des résistivités très basses pouvant s'expliquer par l'existence d'un niveau évaporitique.
- A Bekkaria (figure 33): comme à Tébessa la succession des trois horizons est bien marquée, représentés sous forme d'électro-bancs, du point de vue géologique on distingue des calcaires, des sables, des graviers et des galets.

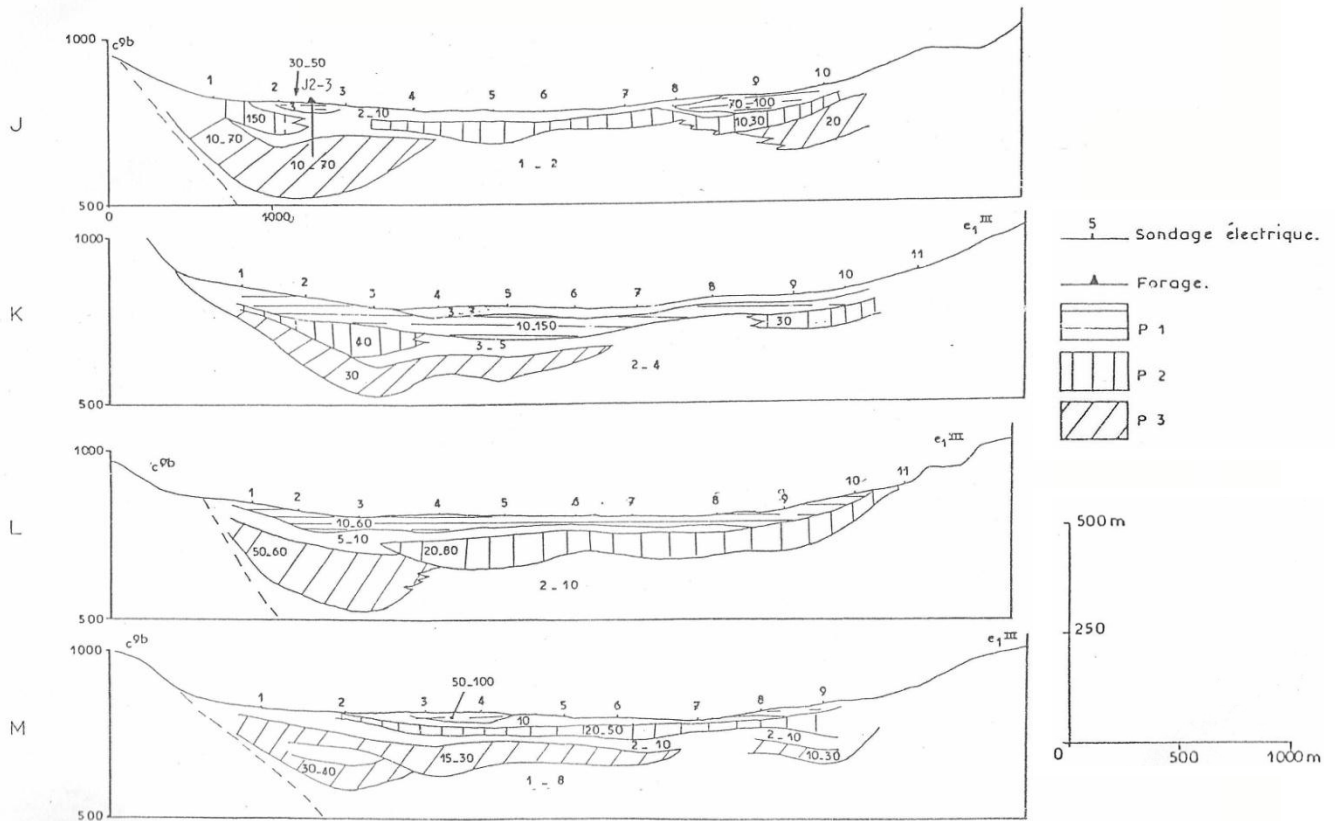


Figure 31: Coupes géo_électriques à travers la plaine de Tébessa selon les profils (J,K,L et M) (in Djabri L. 1987).

C'est à l'issue de ces travaux géophysiques que les formations aquifères de la plaine de Tébessa ont pu être identifiées et des forages ont été réalisés, exploitant les formations alluviales de la zone (figure 31). Sur cette base le système aquifère de la plaine de Tébessa est formé essentiellement par un manteau alluvial d'âge quaternaire (Djabri, 1987 ; Rouabhia, 2004-2009) composé d'une alternance d'argile et de sables ou de cailloutis calcaires d'une épaisseur qui varie entre 10 et 400 m encaissé dans un bassin d'effondrement d'âge plio-quaternaire, ouverte vers le Nord-Ouest, les calcaires Turoniens, Maestrichtiens et Campaniens constituant les reliefs en bordures Nord Est et Sud de la plaine, forment également d'importants aquifères.

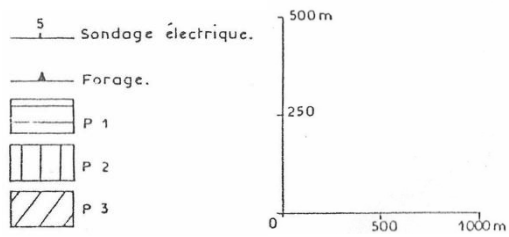
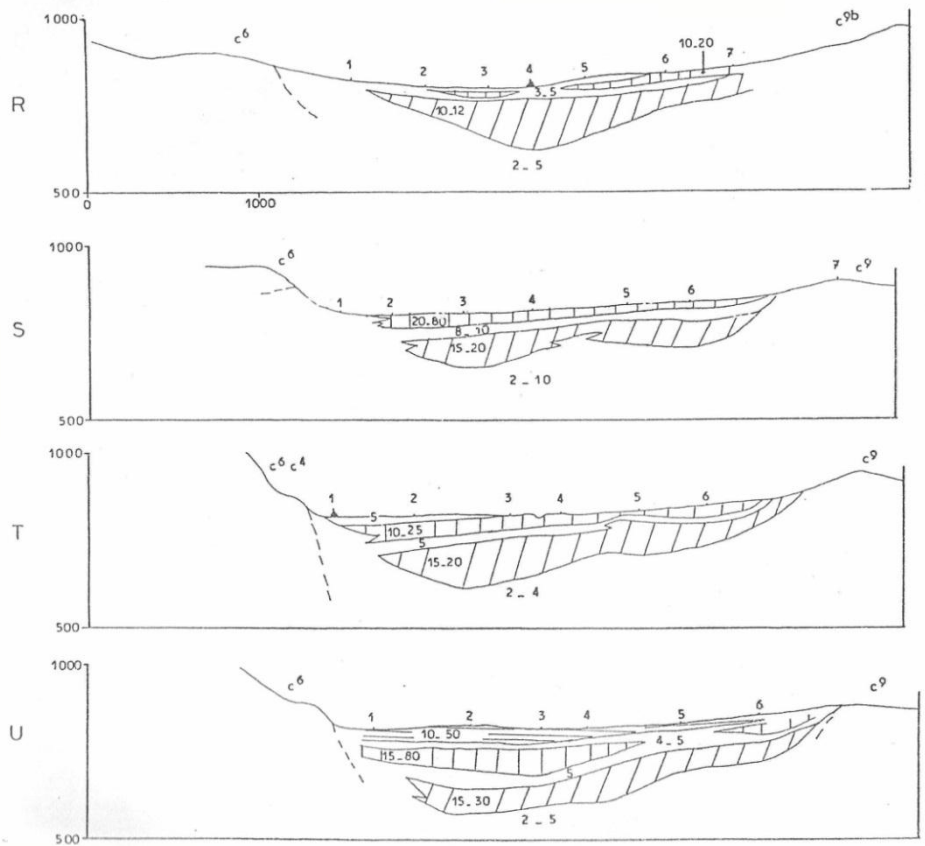


Figure 32: Coupes géo-électriques à travers la plaine de Tébessa selon les profils (R,S,T etU) (in Djabri, 1987).

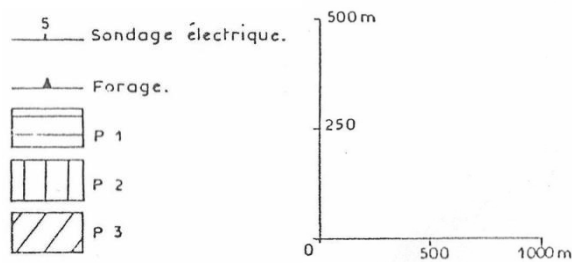
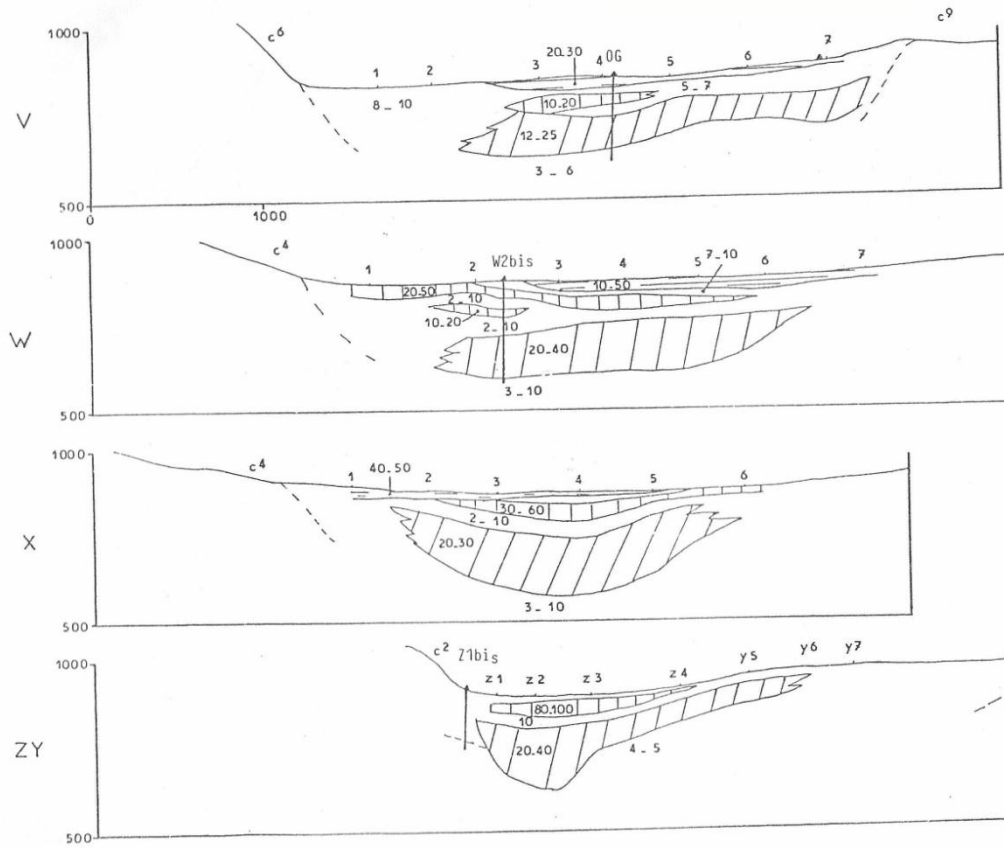
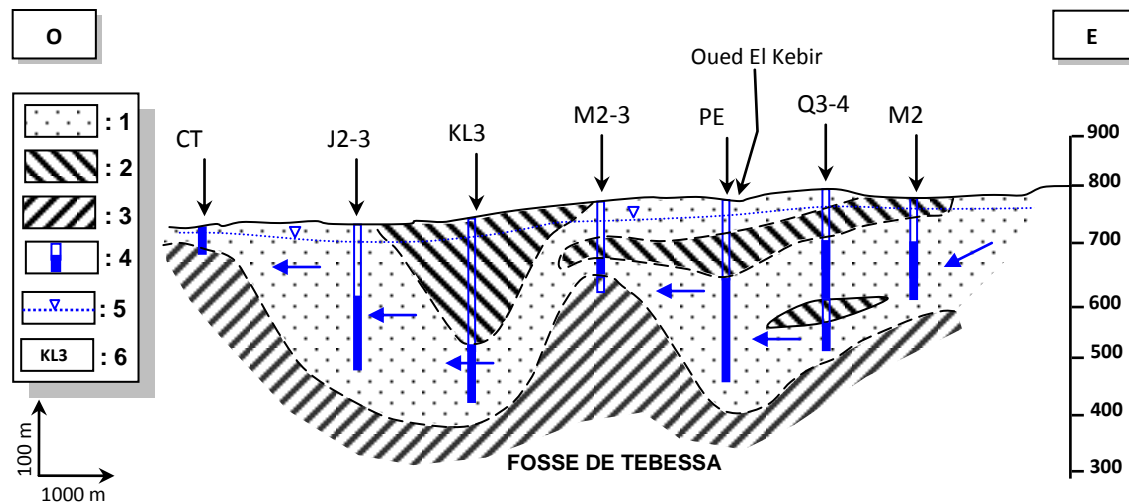


Figure 33: Coupes géo-électriques selon les profils (V,W et X)



1 : zone perméable (marno calcaire, cailloutis calcaires, grès et gravier). 2 : zone imperméable (argiles et marnes). 3 : substratum marneux. 4 : partie crépinée du sondage. 5 : niveau piézométrique. 6 : nom du

Figure 34 : Coupe hydrogéologique à travers la plaine de la Merdja.

(in: Rouabhia et al. 2009)

5.3 Conditions aux limites

Pour comprendre le fonctionnement hydraulique on examine les conditions aux limites de l'aquifère, ainsi la figure 35 représente une synthèse des travaux antérieurs (Djabri, 1987; Rouabhia, 2004-2009 ; Zereg, 2010 ; Lakhneche, 2012 ; Belmiloud, 2010 ; Gherieb, 2011), qui représente les conditions aux limites caractérisant le système aquifère de la zone objet de la présente étude. Le sens d'écoulement de l'eau souterraine suit celui de Oued el-Kébir sur un axe Sud-Est Nord-Ouest, l'aquifère est caractérisée par une limite à flux entrant à l'Est, au Nord et au Sud-Est. Une limite à flux sortant est située à l'Ouest. Au sud, la limite est à flux entrant qui constitue la limite la plus importante en matière de recharge de la nappe, car dans cette partie l'aquifère est en contact direct avec les formations carbonatées qui représente aussi un autre système aquifère voisin.

5.1 Etudes paramètres hydrodynamiques

La connaissance des paramètres hydrodynamiques notamment le niveau piézométrique est d'une importance fondamentale dans l'hydrogéologie. Le niveau des eaux souterraines de l'aquifère peut être utilisé pour plusieurs raisons ; la plus importante est la construction d'une carte piézométrique qui est nécessaire afin de connaître l'extension de l'aquifère, la

direction et la vitesse de l'écoulement des eaux souterraines, ainsi que leur zones d'accumulation.

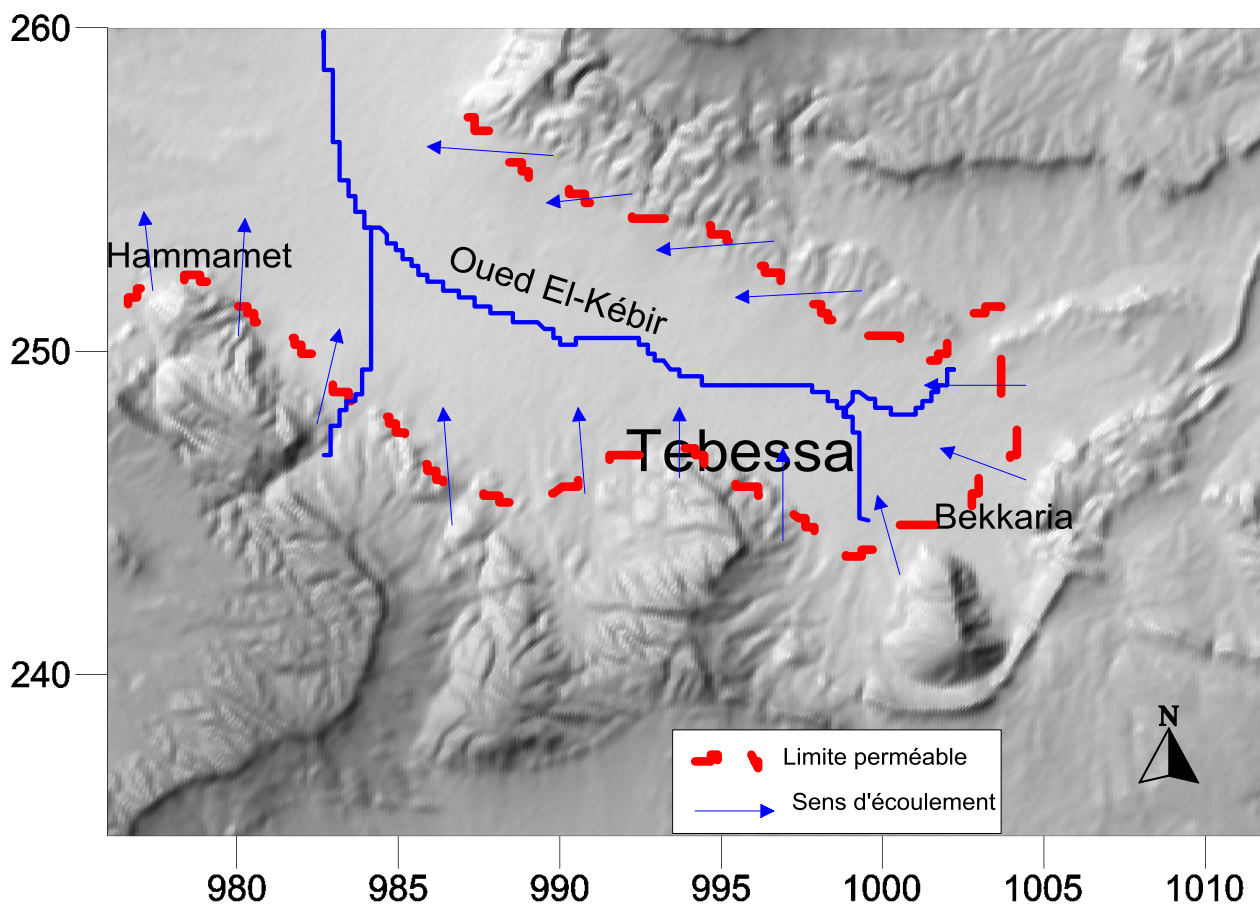


Figure 35: Carte des conditions aux limites.

5.1.1 Répartition des paramètres hydrodynamiques.

Des essais de pompage ont été effectués par les services de la direction de l'hydraulique de la wilaya Tébessa sur les forages destinés à l'alimentation en eau potable à travers la plaine de Tébessa, le dépouillement des données relatifs à ces essais cités par Djabri, 1987; Rouabhia, 2004-2009, nous a permis d'établir les cartes de perméabilité et de transmissivité en se basant sur les résultats obtenus pour les forages d'AEP (cf. tableau 21). Pour le coefficient d'emménagement, selon les services des ressources en eaux de la wilaya de Tébessa (DRE); les essais de pompages n'ont pas aboutis à l'estimation de ce paramètre vu le manque de piézomètres de contrôle et le coût très considérable que nécessite cette opération.

Tableau 21: Listes des forages d'AEP.

Forage	X(Km)	Y(Km)	T (m ² /s).10 ⁻³	K(m/s).10 ⁻⁵
YS4-5	976.717	253.36	0.84	0.88
EF1	980.341	253.288	4.25	3.03
FG2	980.705	252.669	4.55	4.55
E2-3	981.366	253.506	2.96	3.74
F3	981.846	254.706	0.89	1.11
AC1	982.685	253.76	1.15	0.76
CT	982.713	251.105	0.25	-
J2-3	984.177	250.923	2.8	2.94
KL3	986.041	250.123	0.52	0.4
M2-3	987.906	249.54	0.24	0.33
N69	990.026	248.74	0.8	0.47
Q5-6	990.828	247.612	1.3	0.92
FTA1	991.969	249.613	0.91	0.95
Q5	993.029	249.031	0.43	0.34

5.1.1.1 Carte de transmissivités:

L'examen de la carte de la répartition des transmissivités (figure 36) fait apparaître deux remarques importantes : La transmissivité (T) augmente du Nord-Est vers le Sud-Ouest d'une manière générale, avec la remarque de deux zones où la transmissivité prend des valeurs importantes, la première se situe au Sud-Ouest du côté de Hammamet, où T dépasse $4,0 \cdot 10^{-3}$ m²/s qui constitue la zone la plus favorable et productive du point de vue intérêt hydrogéologique, d'où l'existence des forages les plus importants qui desservent la ville de Tébessa en eau potable (EF1, FG2 et E2-3). La seconde zone se situe au Sud-Est, près de la ville de Tébessa, elle est d'une moindre importance par rapport à la précédente, T prend des valeurs entre 0.8 et $1,3 \cdot 10^{-3}$ m²/s (cas des forages N69, FTA1 et Q5-6). Les deux zones se trouvent en bordures des calcaires ce qui nous indique sur la puissance du réservoir dans les deux zones d'où leurs importance hydrogéologique.

5.1.1.2 Carte de la répartition de la perméabilité :

La carte de la répartition de la perméabilité (figure 37) fait apparaître que la perméabilité tout comme la transmissivité, évolue de la même façon à travers la plaine, avec l'existence de deux zones où la Perméabilité (K) prend des valeurs importantes, la première se situe aussi au Sud-Ouest où T dépasse 3 à $4 \cdot 10^{-5}$ m/s et la seconde au Sud-Est

5.2 Conclusion :

L'aperçu hydrogéologique a montré que la région étudiée est composée principalement d'un système aquifère très important surtout au centre de la plaine de Tebessa d'âge plio-quadernaire, caractérisé par une couverture marneuse superficielle, suivit de sables et cailloutis calcaires en profondeur, le sens d'écoulement des eaux souterraines suit le sens d'écoulement du cours d'eau, les massifs montagneux au sud et au sud-ouest qui sont en contact avec cet aquifère constituent des limites perméables qui jouent un rôle dans la recharge de la nappe, ce qui traduit leur importance hydrogéologique à l'échelle locale.

Deuxième Partie

Chapitre VI :

Matériels et méthodes

Chapitre VI:

Matériels & méthodes

6.1 Acquisition de données chimiques

6.1.1 Procédures d'échantillonnage

Idéalement, le programme d'échantillonnage pour une étude géochimique des eaux souterraines recueillera le nombre minimum d'échantillons nécessaires pour avoir une couverture spatiale adéquate de la zone étudiée. La tâche fondamentale est d'obtenir des échantillons représentatifs et caractéristiques de l'aquifère et de les analyser avec un minimum de changement dans leurs compositions. Les composés volatils et réduits sont les plus sensibles aux défauts des procédures d'échantillonnage et de conservation. Les mauvaises procédures qui peuvent rendre les résultats peu fiables comprennent l'obtention d'échantillons d'eau dans un tubage ou d'un puits à écoulement transversal, l'utilisation de bouteilles sales ou réactives, l'absence d'étanchéité à l'air pour empêcher l'aération ou le dégazage, le manque de la conservation des constituants non stables, la contamination des échantillons avec les matériaux utilisés dans la construction des puits (cuvelage, ciment, boue de forage ou autres additifs), le manque de filtration adéquate des particules de l'échantillon et le temps de stockage prolongé.

Avant de commencer l'échantillonnage des eaux souterraines, les chimistes du laboratoire qui effectueront l'analyse devraient être consultés pour obtenir des conseils sur la taille de l'échantillon et les techniques de conservation à utiliser sur le terrain. Le manuel concis sur les techniques analytiques pour l'eau publié par APHA-AWWA-WPCF est d'une grande utilité. Les composés volatils doivent être collectés dans des bouteilles de gaz. Les échantillons pour l'analyse des cations dissous doivent être recueillis dans des bouteilles en plastique, acidifiés à pH 1-2 pour éviter la précipitation après l'échantillonnage et la sorption dans la bouteille.

L'alcalinité (concentration en bicarbonate) et le pH doivent de préférence être mesurés immédiatement au champ, en même temps que la température et la conductivité électrique, puisque ces deux paramètres changent rapidement après l'échantillonnage. L'aération de l'échantillon d'eau souterraine donne lieu à l'entrée d'O₂ et à l'oxydation associée des

espèces réduites dissoutes, et le CO_2 dissous s'échappe lorsque la pression partielle du CO_2 dissous est supérieure à la pression atmosphérique.



Figure 38: Kit multiparamètres de terrain.

6.2 Analyse de l'eau souterraine

6.2.1 Composants inorganiques

Une analyse des eaux souterraines peut aller d'une valeur pour un seul composant à une longue liste de mesures inorganiques, organiques et biologiques. La sélection des constituants à analyser est déterminée à la fois par l'objectif global de l'enquête et par le but spécifique de l'analyse chimique et biologique. En raison de la complexité de nombreux problèmes divers pour lesquels des analyses peuvent être utiles, il n'y a pas d'analyse «standard». Par exemple, la suite de constituants inorganiques pour la prospection géochimique est sensiblement différente des constituants utilisés pour surveiller une décharge ou pour déterminer les effets de la diagenèse minérale. Cependant, le point de vue conventionnel est qu'une analyse inorganique standard consiste en la détermination des quatre principaux cations (calcium, magnésium, sodium et potassium) et des trois principaux anions (bicarbonate, sulfate, chlorure) ainsi que du pH, de la conductivité électrique et température. S'il existe une contamination anthropique, le nitrate doit également être déterminé. L'aluminium devient de plus en plus important lorsque le pH est de 6 ou moins. Le Fe dissous et le Mn peuvent être présents en tant qu'espèces principales

dans les eaux souterraines anaérobies. L'ammonium, F, PO₄, H₂S et CH₄ sont d'importance secondaire; leur analyse est souvent cruciale pour résoudre l'évolution de la qualité des eaux souterraines le long des lignes d'écoulement. Un critère pour une analyse précise est que la différence entre la somme des cations et la somme des anions est inférieure à 5% de la somme des deux. Cependant ce critère ne vérifie que les ions majeurs, et ne garantit pas que les espèces mineures aient été correctement analysées.

Le prélèvement d'un échantillon d'eau est une opération délicate à laquelle le plus grand soin doit être apporté ; il conditionne les résultats analytiques et l'interprétation qui en sera donnée. L'échantillon doit être homogène, représentatif et obtenu sans modifier les caractéristiques physico-chimiques de l'eau (gaz dissous, matières en suspension, etc.) (Rodier et al., 2009) Trente-huit (38) échantillons ont été prélevés pendant la période humide de deux campagnes Nov.2001 (n = 24 échantillons) et Jan.2006 (n = 14 échantillons) soit du même forage d'irrigation ou du plus proche (Figure 26); les analyses physiques et hydro-chimiques ont porté sur la conductivité électrique (EC) et six ions majeurs (calcium (Ca²⁺), magnésium (Mg²⁺), sodium (Na⁺), chlorure (Cl⁻), sulfate (SO₄²⁻), et les bicarbonate HCO₃⁻). D'autre part, pour les nitrates (NO₃⁻), 71 échantillons ont été collectés et analysés (24 en novembre 2001, 14 en janvier 2006, 19 en janvier 2009 et 14 en décembre 2010). La méthode d'échantillonnage est imposée par la condition de terrain, car il n'y a pas assez de points pour couvrir toute la zone d'étude, pour obtenir un échantillonnage parfait. (Des échantillons ont été recueillis après pompage pendant quelques minutes pour éliminer l'eau stockée dans la colonne de forage, chaque échantillon a été immédiatement filtré sur des filtres de 0,45 µm et introduit dans des bouteilles en polyéthylène (250 cm³). EC est mesurée in situ à l'aide d'un conductimètre. Tous les échantillons ont été conservés dans une glacière à une température inférieure à 4°C puis transférés au laboratoire et conservés dans un réfrigérateur à une température inférieure à 4°C jusqu'à analyse (cette tâche est accomplie dans le laboratoire de l'Entreprise Nationale du Fer et du Phosphate (FERPHOS) situé à Tebessa. L'analyse des constituants chimiques: calcium, magnésium, sodium, chlorure, sulfate et nitrate a été réalisée en utilisant des méthodes standards telles que suggéré par l'American Public Health Association (APHA, 1989, 1995). Ca²⁺, Mg²⁺ et Cl⁻ ont été analysés par titrages volumétriques. Les concentrations de Ca²⁺ et Mg²⁺ ont été estimées par titrimétrie en utilisant 0,05 N EDTA et 0,01 N et celles de titrage Cl⁻ par AgNO₃. Bicarbonate (HCO₃⁻) par titrage avec HCl. Les concentrations de Na⁺ ont été obtenues à l'aide d'un photomètre à flamme (modèle:

Systronics) et de sulfate (SO_4^{2-}) par turbidimétrie [17]. Le nitrate (NO_3^-) a été analysé par colorimétrie avec un spectrophotomètre UV-visible [18].

6.2.2 Constituants organiques

En raison de la contamination anthropogénique croissante avec des micro-éléments organiques (pesticides, hydrocarbures pétroliers, hydrocarbures chlorés, etc.), il devient de plus en plus important d'obtenir des échantillons d'eau souterraine pour la détermination des composés organiques. La première étape vers l'obtention d'un aperçu de l'état des eaux souterraines en ce qui concerne la détermination des composés organiques de la quantité totale de carbone organique dissous (COD). Les composés courants qui composent le COD comprennent les acides gras, les substances humiques, les hydrates de carbone, les acides aminés et les acides uroniques.

Les matières organiques sont fréquemment présentes dans les précipitations, les eaux souterraines, les cours d'eau, les rivières, les lacs et l'eau de mer. Une enquête bien menée expliquera comment et pourquoi la demande chimique en oxygène DCO varie dans le temps et l'espace et quels processus ont contrôlé ces variations. Les principes de la géochimie organique de l'eau sont de plus en plus appliqués à cette fin. La DCO a peu de valeur diagnostique lorsqu'il s'agit de micro-contaminants organiques.

Il existe des procédures analytiques spéciales pour les micro-éléments volatiles et non volatiles. En premier lieu, on peut distinguer trois grands groupes d'intérêt:

- Les hydrocarbures chlorés associés aux installations de nettoyage à sec, à l'industrie métallurgique, industrie chimique et domaines militaires ;
- Les hydrocarbures pétroliers (y compris les composés BTEX, benzène, toluène, l'éthylbenzène et les xylènes) liés aux stations-service, à l'industrie pétrochimique, les sites d'exploitation de pétrole brut et de gaz naturel et les zones militaires,
- Les pesticides, herbicides, fongicides, qui représentent un groupe extrêmement large de composés principalement liés aux activités agricoles.

6.2.3 Bactéries, virus et activité microbienne

Les microbes dans le sous-sol sont étudiés soit pour déterminer si des bactéries pathogènes et des virus sont présents dans les eaux souterraines, soit pour déterminer le rôle de l'activité microbienne dans les processus à redox prédominant. Si possible, l'eau

souterraine doit être prélevée dans des conditions stériles afin d'éviter toute contamination de la surface du sol.

Il existe des techniques de routine pour l'analyse des micro-organismes pathogènes. Les procédures d'isolement et les dénombrements sur plaque sont souvent à la base de l'identification et du comptage des bactéries présentes.

Le rôle des microorganismes dans le contrôle de la qualité des eaux souterraines est de plus en plus démontré, en particulier leur potentiel de dégradation des contaminants organiques. Les microorganismes et l'activité microbienne ont été étudiés de deux manières différentes: l'activité microbienne est caractérisée par des incubations et une analyse temporelle du composé, ou les micro-organismes sont cultivés, isolés, etc. Il faut prendre en compte que ces dernières analyses ne sont pas complètement représentatif de la population microbienne souterraine, car la culture est sélective et que la plupart des espèces bactériennes n'ont pas été identifiées. Au lieu d'étudier les eaux souterraines, il peut être intéressant d'étudier les microorganismes dans une matrice solide, mais le spectre des microorganismes des eaux souterraines n'est pas identique à celui de la matrice solide et des résultats biaisés seront obtenus lors de la caractérisation des eaux souterraines.

6.3 Évaluation des données chimiques sur les eaux souterraines

6.3.1 Procédure générale

Les données chimiques sur les eaux souterraines sont interprétées pour déterminer d'où viennent les ions, comment ils atteignent leur concentration, quelle est leur forme et leur comportement, où ils vont et à quelle vitesse.

Les principales activités sont:

- déterminer les caractéristiques d'équilibre minéral de l'eau à l'aide de modèles spécifiques;
- afficher la distribution spatiale des concentrations chimiques afin de comprendre les contrôles hydrogéologiques sur les variations chimiques à l'intérieur d'un aquifère ou les différences chimiques entre les aquifères;
- identifier les réactions chimiques de contrôle;
- interpréter les analyses de l'eau en termes de contrôles hydrologiques, géologiques et anthropiques;

- modélisation de la réaction chimique pour prévoir les changements chimiques dans l'aquifère pendant l'exploitation.

Les données sur la qualité des eaux souterraines peuvent être utilisées pour valider indépendamment les hypothèses avancées pour expliquer le fonctionnement physique du système d'eaux souterraines. Les hypothèses sur les temps de résidence, les voies d'écoulement et les débits peuvent être vérifiées en utilisant des données hydrogéochimiques en combinaison avec des données sur les isotopes.

Les données chimiques, minéralogiques et lithologiques de l'aquifère sont d'une grande importance lors de l'interprétation des données sur la qualité des eaux souterraines. Cette information doit être recueillie lors du forage des puits, des piézomètres, etc.

6.3.2 Caractérisation de la qualité des eaux souterraines

Une première évaluation de la qualité de l'eau souterraine est de savoir si l'eau est fraîche, saumâtre ou salée. De nos jours, la quantité de sels dissous s'exprime le plus souvent de l'une des manières suivantes:

- La conductivité électrique (CE) de l'eau exprimée en S/cm ou en $\mu\text{S} / \text{cm}$ (10^{-6} S/cm) pour l'eau douce, ou en mS / cm (10^{-3} S / cm) pour l'eau salée; où S représente Siemens (anciennement appelé mho), l'inverse de la résistance exprimée en ohm (Ω);
- Salinité, où le total des solides dissous est exprimé en parties par mille de l'unité huit de l'eau, par exemple, l'eau de mer normale a une salinité d'environ 35 ‰;
- Matières solides dissoutes totales (MDT), résidu d'évaporation à 105 ° C ou 180 ° F. Une classification de l'eau basée sur les TDS est donnée au tableau 22.

Tableau 22: Classification de l'eau selon TDS.

Classification	TDS (mg/l)
Eau douce	< 1000 à 2000
Eau saumâtre	1000 à 20.000
Eau salée	20.000 à 50.000
Eau très salée	> 50.000

L'étape suivante consiste à évaluer les constituants individuels. Seules environ une douzaine des quelque cent éléments chimiques sont normalement analysés dans des échantillons d'eau. Au fil des années, les hydro-géochimistes ont été guidés dans leur choix

de constituants significatifs par la concentration relative d'un élément particulier et sa signification physiologique, agricole, industrielle ou géochimique. Dans les eaux souterraines (tableau 23), les concentrations sont intermédiaires entre les précipitations et l'eau des océans. L'eau de pluie n'est pas de l'eau pure et dans certaines zones côtières ou désertiques, la charge chimique des précipitations atmosphériques peut contribuer de manière significative au caractère chimique des eaux souterraines.

La chimie de l'eau de pluie dépend de facteurs tels que la distance au vent de la côte ou des lacs et des sols salés, l'intensité du vent, la période de pluie dans la tempête, la distance entre les villes et les centres industriels.

La composition chimique de l'eau océanique moyenne (tableau 23) est typique de l'océan ouvert, non concentré par évaporation ni dilué par l'eau douce provenant du débit des rivières ou des eaux souterraines. Dans les aquifères côtiers, l'intrusion de l'eau de mer peut modifier considérablement la composition chimique de l'eau souterraine et entraîner des processus chimiques dans l'eau saline et la zone de dispersion.

Tableau 23: Valeurs comparatives entre la composition chimique de l'eau souterraine par rapport aux eaux de pluie et celle des eaux de mer. (Source : UNESCO, 2004)

	Valeurs moyennes des eaux souterraines	Valeurs moyennes des eaux de mer	Eau de pluie dans une zone côtière
pH	5.5 – 9	8.2	4.1 – 5.6
Ca	10 – 200	400	0.1 – 2
Mg	0.1 – 100	1,350	0.05 – 0.2
Na	1 – 300	10,500	0.1 – 1
K	0.1 – 20	380	0.08 – 0.3
NH ₄	0 – 5	<0.5	0.1 – 2.3
Fe	0 – 10	0.01	0 – 0.2
Mn	0 – 2	0.002	0 – 0.02
SiO ₂	10 – 30	6.4	–
HCO ₃	80 – 400	142	0
SO ₄	10 – 100	2,700	0.4 – 8
Cl	1 – 150	19,000	0.25 – 2
NO ₃	0 – 50	<0.5	0.3 – 4
F	0.1 – 2	1.3	0.03 – 0.1
Br	< 5	65	–
B	< 2	4.6	–

En plus des précipitations et de l'eau de mer, les sources d'ions proviennent de la dissolution des minéraux, des réactions de sorption et de la dégradation des matières organiques dans les zones saturées et insaturées.

6.3.3 Traitement statistique et présentation des données

L'interprétation statistique des données hydrogéologiques n'a pas reçu beaucoup d'attention par le passé. La raison principale en est probablement le fait que le débit des eaux souterraines et le transport de la pollution sont régis par des équations différentielles paraboliques ou elliptiques, contrairement aux eaux de surface où les processus stochastiques jouent un rôle majeur.

6.3.3.1 Statistiques de base:

Le terme «statistiques de base» comprend généralement diverses interprétations statistiques, telles que: moyenne, mode, médiane, écart-type, erreur-type, covariance corrélations, probabilités, test-t et analyse de la variance. L'estimation de ces paramètres est d'une grande utilité soit pour la réduction ou pour avoir une idée sur l'ensemble des données statistiques (Kachigan, 1986; Runyon et Haber, 1976; Kendall et Stuart, 1979)

6.3.3.2 Paramètres de position

Les paramètres de position (mode, médiane, moyenne) permettent de savoir autour de quelles valeurs se situent les valeurs d'une variable statistique. Ces paramètres sont désignés par des paramètres de tendance centrale car il s'agit d'un nombre clé autour duquel les observations sont réparties telle que la moyenne arithmétique.

6.3.3.3 Moyenne arithmétique :

C'est le quotient \bar{X} de la somme d'une série d'observations par leur nombre.

Pour une série brute x_1, x_2, \dots, x_n ,

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i$$

6.3.3.4 Paramètres de dispersion

Les paramètres de dispersion (étendue, intervalle interquartile,) sont calculés pour les variables statistiques quantitatives. Ils ne donnent pas une information complète sur une

variable statistique X : en effet, deux variables qui ont la même moyenne peuvent se présenter avec des dispersions très différentes.

6.3.3.5 *L'étendue :*

C'est un paramètre de dispersion qui mesure la différence entre la plus grande valeur (Max) et la plus petite (min) des observations d'une série de données. Ce paramètre nous aide à mesurer la fourchette de variation de la variable mesurée.

6.3.3.6 *La variance :*

Mesure la dispersion par rapport à la valeur moyenne, c'est la moyenne des carrés des écarts à la moyenne :

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

6.3.3.7 *Ecart-type :*

C'est la racine carrée de la variance, ce paramètre nous donne une idée sur la variabilité des paramètres mesurés :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Une distribution aura un écart-type d'autant plus faible (proche de 0) qu'elle sera ramassée autour de la moyenne, avec des valeurs très peu différentes les unes des autres.

Les résultats d'un grand nombre de ces tests et paramètres peuvent être incorporés dans un diagramme unique, appelé «diagramme en boîte ou en moustaches». Une boîte à moustaches représente habituellement 3 à 5 cinq caractéristiques statistiques pour chaque variable (figure 39). Les points centraux représentent la moyenne, la médiane ou le mode des variables. Autour de ces points, des boîtes sont construites qui montrent les limites supérieures et inférieures d'une statistique. Enfin, les lignes qui se prolongent comme des moustaches au-dessus et au-dessous des cases reflètent généralement les écarts-types ou

minima et maxima des variables. Les boîtes à moustaches sont généralement reconnues pour leur utilité dans les statistiques comparatives visuelles pour les variables fréquemment mesurées.

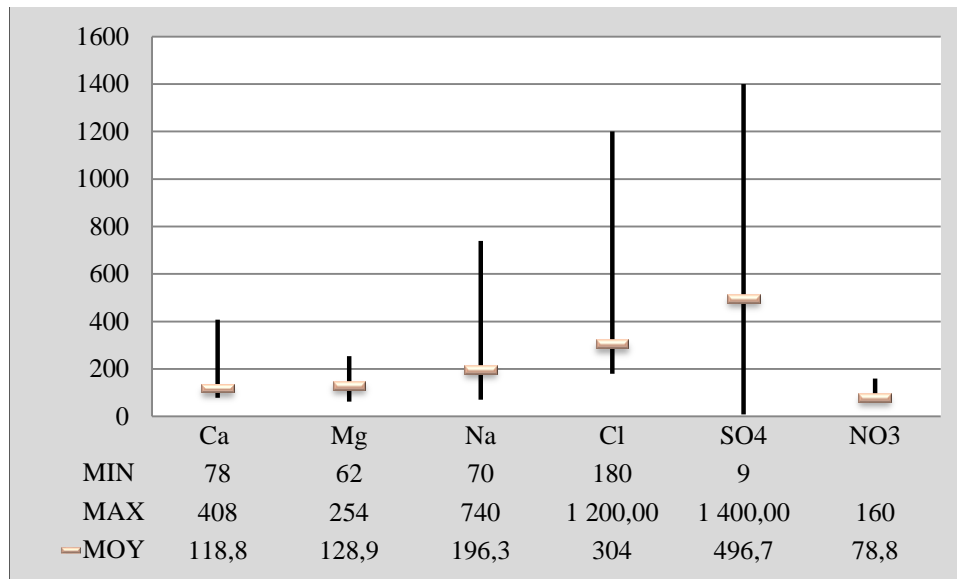


Figure 39: Kit diagramme en moustaches des paramètres statistiques d'un échantillon d'eau.

6.3.3.8 La covariance :

Ce paramètre mesure la corrélation entre deux variables aléatoires. On appelle covariance de deux variables statistiques X et Y sur les mêmes n individus le nombre :

$$\text{cov}(X, Y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i y_i \right) - \bar{x} \bar{y}$$

"Moyenne des produits moins le produit des moyennes"

Ce nombre est positif si X et Y ont tendance à varier dans le même sens, et négatif si elles ont tendance à varier en sens contraire.

Si les données sont groupées en (x_i, y_i) d'effectifs n_i ,

$$\text{cov}(X, Y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^K n_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^K n_i x_i y_i \right) - \bar{x} \bar{y}$$

6.3.3.9 Coefficient de corrélation (linéaire) :

Les corrélations entre les variables peuvent être établies en calculant des coefficients de corrélation. Ceci est particulièrement utile pour étudier la chimie de l'eau et

l'interdépendance des constituants dans les eaux. Le coefficient de corrélation entre deux variables statistiques X et Y sur les mêmes individus est le nombre :

$$r(X, Y) = \frac{\text{cov}(X, Y)}{s_X s_Y}$$

où $\text{cov}(X, Y)$ est la covariance entre X et Y, et $s_X s_Y$ les écarts-types de X et Y.

Ce coefficient est toujours compris entre -1 et +1. S'il est proche de +1 ou -1, X et Y sont bien corrélées, c'est-à-dire qu'elles sont liées entre elles par une relation presque affine ; le nuage de points est presque aligné le long d'une droite (croissante si $r = +1$, décroissante si $r = -1$). S'il n'y a aucun lien entre X et Y, ce coefficient est nul, ou presque nul.

6.3.4 Représentations graphiques des résultats

Il est généralement plus pratique de présenter les résultats sous forme graphique pour faciliter la compréhension des échantillons d'eau analysés. Au cours des années, les géochimistes ont développé un certain nombre de graphiques personnalisés pour l'analyse et la présentation des données géochimiques qui sont particulièrement utiles dans les études hydrogéologiques.

Il y a plusieurs méthodes de présentation graphique qui incluent le graphique à barres, le camembert, le diagramme de [Schoeller \(1962\)](#), le diagramme de piper etc. Par exemple diagramme à barres et camembert sont bons pour un petit nombre de données chimiques, alors que les diagrammes de [Piper \(1944\)](#) et de Schoeller conviennent à la présentation des résultats pour un grand nombre de données.

6.3.4.1 Diagrammes hydrochimiques spécialisés

Au fil des ans, de nombreuses expositions spéciales présentant des données hydrochimiques significatives ont été conçues. Parmi ceux-ci, six affiches se distinguent par leur clarté et leur signification. Ce sont le Piper ([Piper, 1944](#)), Richards «ou Riverside » ([Richards, 1954](#)), Schoeller ([Schoeller, 1962](#)) et Stiff ([Stiff, 1951](#)). Tous ces diagrammes sont des affichages multivariés, prenant simultanément en compte huit variables, projetant souvent ces variables en un seul point sur les diagrammes. Des exemples de diagrammes de Piper, de Stiff, de Schoeller et de Richards, avec leurs procédures de traçage, sont inclus dans les figures 40, 41, 42 et 43.

6.3.4.2 Diagramme de Piper

C'est le graphique le plus utilisé et efficace pour afficher des données qui contient trois composantes dominantes (figure 40), dont chacune est généralement exprimée en pourcentage du total des trois. Par exemple, les analyses d'un échantillon d'eau souterraine peuvent être tracées sur un graphique trilinéaire pour montrer les pourcentages relatifs des trois cations. De même, plusieurs échantillons peuvent être tracés sur le même graphique trilinéaire, et les tendances, les groupements et les schémas de mélange peuvent facilement être observés. Une fois tracés, les échantillons peuvent ensuite être classés ou regroupés. [Vacher \(2005\)](#) propose une revue de l'utilisation des graphiques trilinéaires en géosciences.

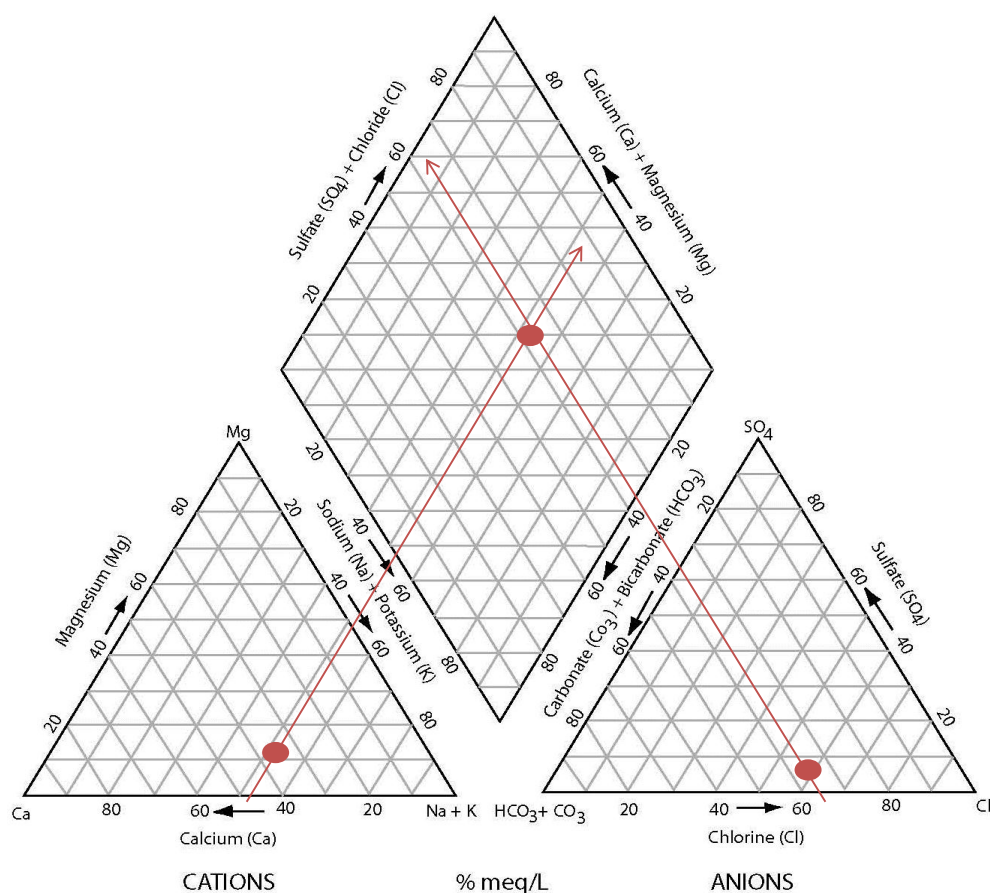


Figure 40: Diagramme Piper.

Les cations et les anions sont représentés par des tracés triangulaires séparés. Les apex du tracé des cations sont le calcium, le magnésium et le sodium plus le potassium. Les sommets du tracé d'anions sont les sulfates, les chlorures et les carbonates plus hydrogencarbonate. Les deux points sur les deux triangles sont ensuite projetés sur un

diamant. Le diamant est une transformation matricielle du graphique des anions (sulfate + chlorure / anions totaux) et des cations (sodium + potassium / cations totaux)

Le diagramme de piper est approprié pour comparer la composition ionique d'un ensemble d'échantillons d'eau, mais ne se prête pas à des comparaisons spatiales. Pour les applications géographiques, le diagramme de Stiff et le diagramme de Maucha sont plus applicables, car ils peuvent être utilisés comme marqueurs sur une carte. Le codage couleur de l'arrière-plan du diagramme de Piper permet cependant de lier les diagrammes et les cartes de Piper. Les échantillons d'eau montrés sur le diagramme de Piper peuvent être groupés en faciès hydrochimiques : Les triangles de cation et d'anion peuvent être séparés dans des régions basées sur le ou les cations ou anions dominants ; ainsi leur combinaison crée des régions (faciès) dans la partie en forme de losange (diamant) du diagramme. Plusieurs logiciels sont disponibles pour dessiner le diagramme de piper. Par exemple. Diagramme, Aquachem, Workbench, Geochemist etc. Ce qui est plus important, c'est l'interprétation du diagramme.

Avantages :

- De nombreuses analyses d'eau peuvent être tracées sur le même diagramme.
- Peut être utilisé pour classifier les eaux par faciès hydrochimiques.
- Peut être utilisé pour identifier le mélange des eaux.
- Peut suivre les changements à travers les relations spatiales et temporelles.

Inconvénients

- Les concentrations sont normalisées.
- Ne peut pas facilement accueillir les eaux où d'autres cations ou anions peuvent être importants.

6.3.4.3 Diagramme de Stiff

Le diagramme stiff (figure 41), est une représentation graphique d'analyses chimiques, d'abord développée par H.A. Stiff en 1951. Il est largement utilisé par les hydrogéologues et les géochimistes pour afficher la composition ionique majeure d'un échantillon d'eau. Une forme polygonale est créée à partir de quatre axes horizontaux parallèles s'étendant de chaque côté d'un axe vertical vertical. Les cations sont portés en milliéquivalents par litre sur le côté gauche de l'axe zéro, un sur chaque axe horizontal, et les anions sont tracés sur

le côté droit. Ces graphiques sont utiles pour faire une comparaison visuelle rapide entre l'eau de différentes sources à savoir :

- pour aider à visualiser les eaux ioniquement liées à partir desquelles un trajet d'écoulement peut être déterminé, ou;
- si le chemin d'écoulement est connu, montrer comment la composition ionique d'un plan d'eau change dans l'espace et / ou le temps.

La figure 41 illustre le diagramme de Stiff typique. Il est créé en traçant les concentrations des cations à gauche de l'axe central et des anions à droite. Les points sont connectés pour former la figure. Lorsque l'on compare des diagrammes entre différentes eaux, il est important de préparer chaque diagramme en utilisant les mêmes espèces ioniques, dans le même ordre, sur la même échelle. le diagramme de Stiff contrairement à celui de Piper, se prête pour des comparaisons spatiales, donc peut être utilisé comme marqueurs sur une carte,.

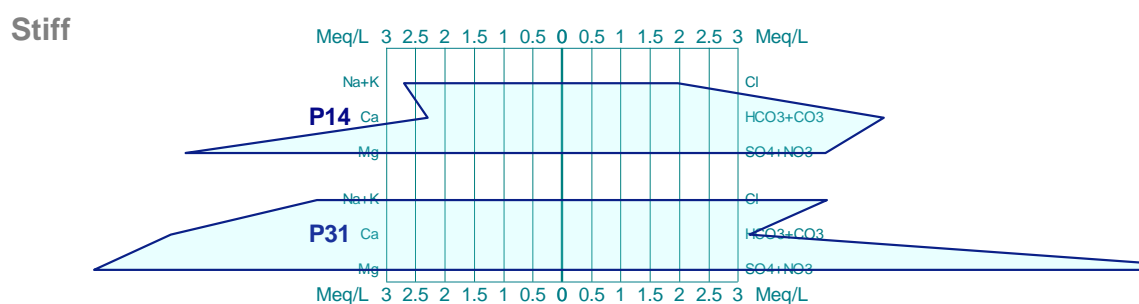


Figure 41: Diagramme de Stiff.

Avantages

- Peut aider à visualiser les eaux ioniquement liées à partir desquelles un trajet d'écoulement peut être déterminé, ou;
- Si le chemin d'écoulement est connu, montrer comment la composition ionique d'un plan d'eau change dans l'espace et / ou le temps.

Inconvénients

- Une seule analyse par graphique.

6.3.4.4 Diagramme de Schöeller-Berkaloff

Le diagramme de Schoeller (figure 42) est un diagramme semi-logarithmique des concentrations des principaux constituants ioniques dans l'eau (SO_4 , HCO_3 , Cl , Mg , Ca , Na / K) en équivalents par million par kg de solution (mEq / kg). Les concentrations de chaque

ion dans chaque échantillon sont représentées par des points sur six lignes équidistantes et les points sont reliés par une ligne. Le diagramme donne la concentration absolue, mais la ligne donne également le rapport entre deux ions dans le même échantillon. Si une ligne reliant deux points représentant des concentrations ioniques dans un seul échantillon est parallèle à une autre ligne rejoignant un deuxième ensemble de concentrations d'un autre échantillon, le rapport de ces ions dans ces échantillons sont égaux.

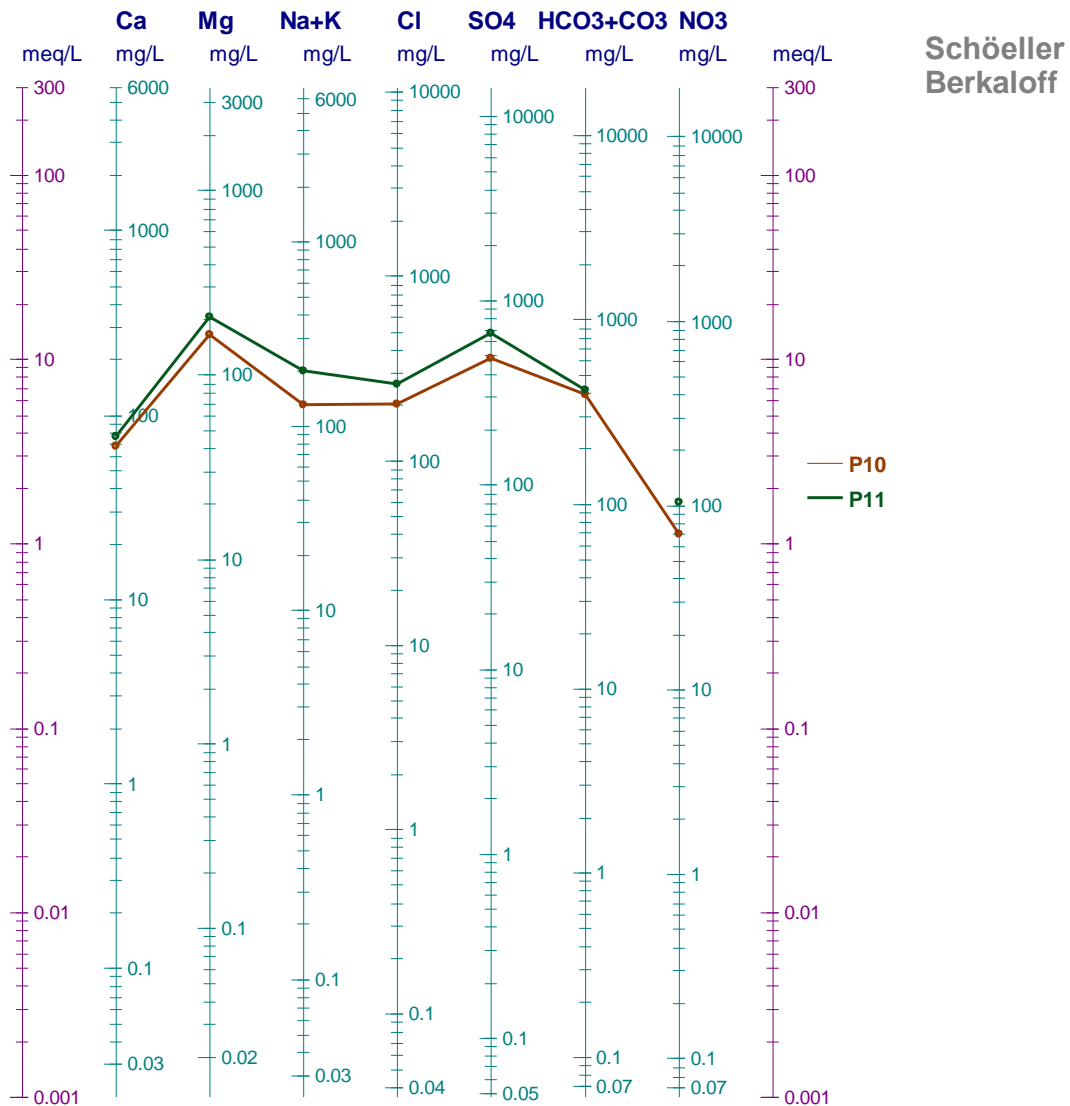


Figure 42: Diagramme de Shoeller Berkaloff.

6.3.4.5 Qualité d'eau d'irrigation (diagramme de Richards)

Les particules de sol adsorbent et retiennent les cations sur leurs surfaces. L'adsorption des cations se produit à la suite des charges électriques à la surface des particules du sol. Alors que les cations adsorbés sont combinés chimiquement avec les particules du sol, ils

peuvent être remplacés par d'autres cations présents dans la solution du sol. La réaction par laquelle un cation en solution remplace un cation adsorbé est appelé échange de cationique. Les cations de sodium, de calcium et de magnésium sont toujours facilement échangeables. Les autres cations, comme le potassium et l'ammonium, peuvent être maintenus à certaines positions sur les particules dans certains sols de sorte qu'ils sont échangés avec beaucoup de difficulté et, par conséquent, sont réputés être fixés (Richards, 1954).

Les cations (ions chargés positivement) attachés aux particules d'argile dans le sol sont appelés cations échangeables, ce qui signifie qu'un type d'ion adsorbé sur la particule d'argile peut être changé pour un autre type. Les cations qui jouent un rôle dans les problèmes de salinité sont le calcium (Ca^{2+}), le sodium (Na^+) et le magnésium (Mg^{2+}). Le sodium échangeable peut être excessif s'il domine sur les surfaces d'argile, et s'il est le cas, l'argile peut gonfler, rendant le sol moins perméable et arrêter ou empêcher la lixiviation du sel. La mauvaise aération subséquente et l'imperméabilité qui en résulte peut réduire la croissance des plantes. C'est donc important d'obtenir une mesure du potentiel de l'eau d'irrigation ou l'eau du sol de diminuer la perméabilité. Malheureusement, il est difficile de mesurer directement les ions échangeables sur les particules d'argile, mais il existe une forte relation entre le pourcentage de sodium échangeable (pourcentage des sites d'échange disponibles dans les argiles occupées par le sodium) et le taux d'adsorption de sodium (SAR) de l'eau du sol. Le SAR est donc utilisé comme indice pour déterminer le potentiel de danger du sodium car il est facile de le déterminer (Hanson et al., 2006).

Le diagramme de Richards est l'un des diagrammes les plus utilisés pour qualifier la souhaitabilité d'une eau à être utilisée pour irriguer les cultures. Ce diagramme (figure 43) est essentiellement utilisé pour évaluer le risque de salinisation des sols par les eaux d'irrigation. Il utilise pour cela la conductivité électrique (CE) et l'indice d'adsorption de sodium (SAR en anglais) aussi appelé "pouvoir alcalisant" qui est une mesure du risque de la sodisation du sol causé par l'irrigation. Le diagramme est découpé en quatre classes de salinité (axe des abscisses) et quatre classes de risques de sodisation (axe des ordonnées).

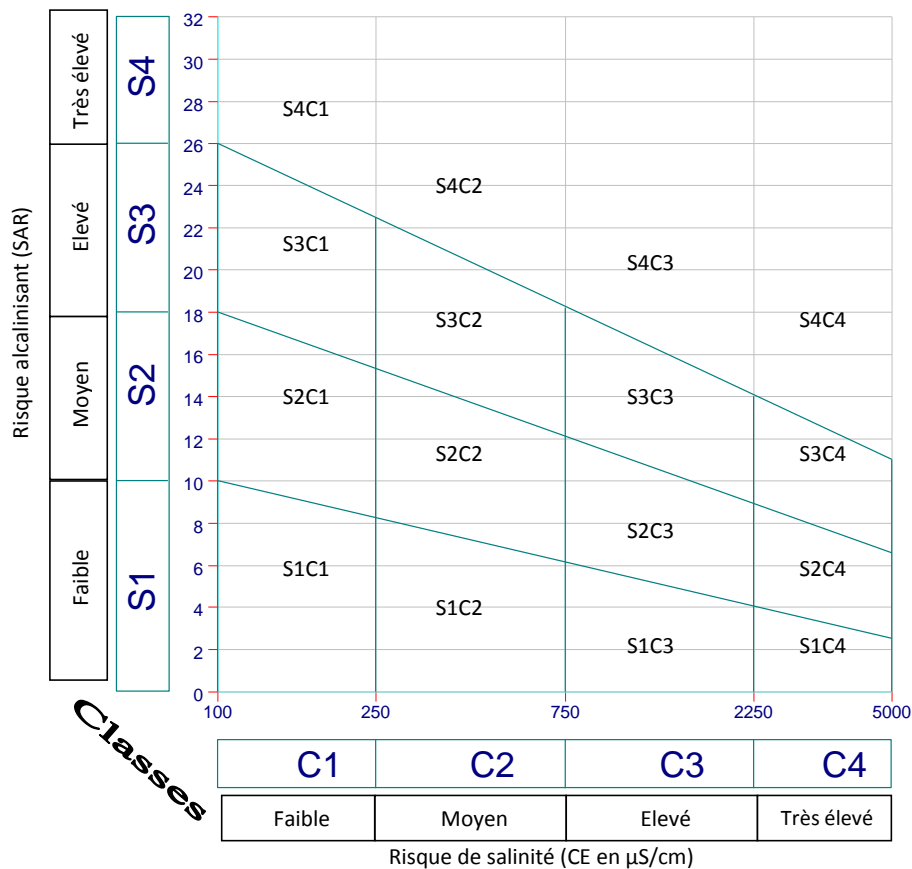


Figure 43: Diagramme de Richards.

Le diagramme de Richards (figure 43) fait apparaître seize classes caractéristiques de la qualité des eaux destinées à l'irrigation, les plus importantes sont quatre qui sont:

- Classe S1C1 : eau à salinité faible (C1) convenable pour l'irrigation de toutes les cultures avec faible risque (S1) d'accumulation des sels sauf pour les sols à faible perméabilité.
- Classe S2C2 : eau de salinité moyenne (C2), convenable pour l'irrigation avec précaution (S2) d'une dose de lessivage des cultures semi résistantes.
- Classe S3C3 : eau à salinité élevée (C3) ne convient pas aux sols à faible capacité de drainage (S3), les cultures doivent être résistantes.
- Classe S4C4 : Eau à salinité très élevée (C4), ne convient pas à l'irrigation sous conditions ordinaires, pour lesquelles soit utilisée un drainage adéquat doit être mis en place pour des cultures résistantes.

6.3.5 Statistiques multi-variées et méthodes d'interpolation géostatistique

6.3.5.1 Analyses en composantes principales (ACP)

L'analyse en composantes principales (ACP) a également été appliquée au traitement de ces données chimiques. Bien que l'ACP soit une méthode exploratoire et descriptive, le but de ce traitement est d'identifier les principaux facteurs contrôlant la chimie des eaux souterraines (Dagnelie, 2006). L'ACP est l'une des techniques d'analyse statistique à plusieurs variables, portant sur au moins deux variables, qui est largement utilisée dans le domaine de l'hydrogéologie et plus précisément en hydrochimie.

Cette méthode statistique multivariée a été largement appliquée pour étudier les phénomènes de l'environnement (Anazawa, 2005; Güler, 2004; Belkhiri, 2010, Ghodbane 2016, Bencer, 2016), cet outil a été utilisé avec succès pour étudier les processus hydrogéochimiques (Duffy, 2001 ; Khedidja, 2014). Elle produit une synthèse graphique des liens entre variables n et des ressemblances entre les individus (échantillons) par rapport aux vecteurs de ces variables. Les graphiques sont construits à partir de la matrice des corrélations, et représente graphiquement les liens entre les différentes variables et les facteurs choisis. Ces graphiques sont projetés dans un cercle de rayon 1. Plus la coordonnée de la variable est forte (proche de 1 ou -1) sur un facteur, plus la variable a de liens avec ce facteur. La position des variables est donc déterminée par leurs coordonnées selon les facteurs. Plus deux variables sont proches, plus leur lien est censé être fort. Cette méthode a été adoptée dans de nombreuses études hydrogéochimiques (Blavoux et Mudry, 1985; Lasne, 1992; Muet, 1985; Maqsoud, 1996). Son efficacité est supérieure à d'autres méthodes telles que les diagrammes en barres de Collins, en camembert de Stiff, de Schoeller et de Piper (Güler *et al.*, 2002).

6.3.5.2 L'interpolation géostatistique

La géostatistique est une section de statistiques appliquées développée par Matheron(1971), et qui traite de l'estimation et de la modélisation de l'utilisation spatiale de variables régionalisées, qui se situent entre des variables aléatoires et des variables complètement déterministes (Ahmed, 2007). Les méthodes d'interpolation géostatistique, telles que le krigeage, estiment les valeurs inconnues à partir de données prises à des emplacements spécifiques. Le krigeage est un meilleur estimateur linéaire sans biais, qui peut s'appliquer pour décrire et modéliser des configurations spatiales, prédire des valeurs

à un emplacement non échantillonné et évaluer l'incertitude associée aux valeurs estimées aux emplacements non échantillonnés (McCoy, 2004).

Le krigeage simple a été appliqué pour interpoler les cartes prédictives des paramètres de qualité des eaux souterraines ainsi qu'à l'élaboration des cartes piézométriques dans des emplacements non échantillonnés.

Deuxième Partie

Chapitre VII :

Résultats et interprétations

Chapitre VII :

Résultats & interprétations

7.1 La Piézométrie

7.1.1 Évolution de la Piézométrie.

Les eaux souterraines sont le moyen de transport de toute substance minérale ou organique, c'est d'après l'écoulement qu'on peut reconnaître les zones vulnérables ou contaminées.

Tableau 24: Evolution de la profondeur du plan d'eau de la nappe de Tébessa dans quelques piézomètres.

Date de mesure	N° piézomètre	Profondeur du plan d'eau (m)
14/04/2007	1	28.2
09/12/2007	1	27.5
03/01/2008	1	27.1
14/04/2007	2	15.4
19/12/2007	2	15.8
13/01/2008	2	15.4
12/02/2008	2	15.7
18/04/2008	2	15.4
14/04/2007	3	51.1
28/07/2007	3	50.6
23/12/2007	3	52.9
08/01/2008	3	52.8
19/01/2007	4	79.2
23/04/2007	4	81.0
28/07/2007	4	82.2

7.1.2 Etablissement des cartes piézométriques:

La connaissance de l'état piézométrique par l'établissement des cartes de sa variation dans le temps et dans l'espace est d'une grande importance dans le cadre de la présente étude. Les cartes piézométriques permettent de mettre en évidence le comportement général de la nappe, de caractériser son gradient naturel, ses directions d'écoulements préférentiels et aussi la comparaison entre les états durant une période considérée afin de vérifier les changements importants que peuvent subir les écoulements d'une nappe à

l'échelle temporelle. Dans ce contexte les états de déc. 2001 et celui de jan. 2006 feront l'objet de cette section.

7.1.2.1 Inventaire des points d'eau

Les points d'eau échantillonnés en novembre 2001 et janvier 2006 ayant servis à la fois pour l'établissement des cartes piézométriques et les analyses hydro-chimiques de l'aquifère de Tébéssa. La figure 44 illustre leur répartition, il est à remarquer que la majorité des points d'eau se situent dans la partie sud de la zone d'étude, ceci est lié à son importance hydrogéologique d'être en contact avec les formations carbonatés, ainsi qu'à leur accessibilité par des puits peu profonds.

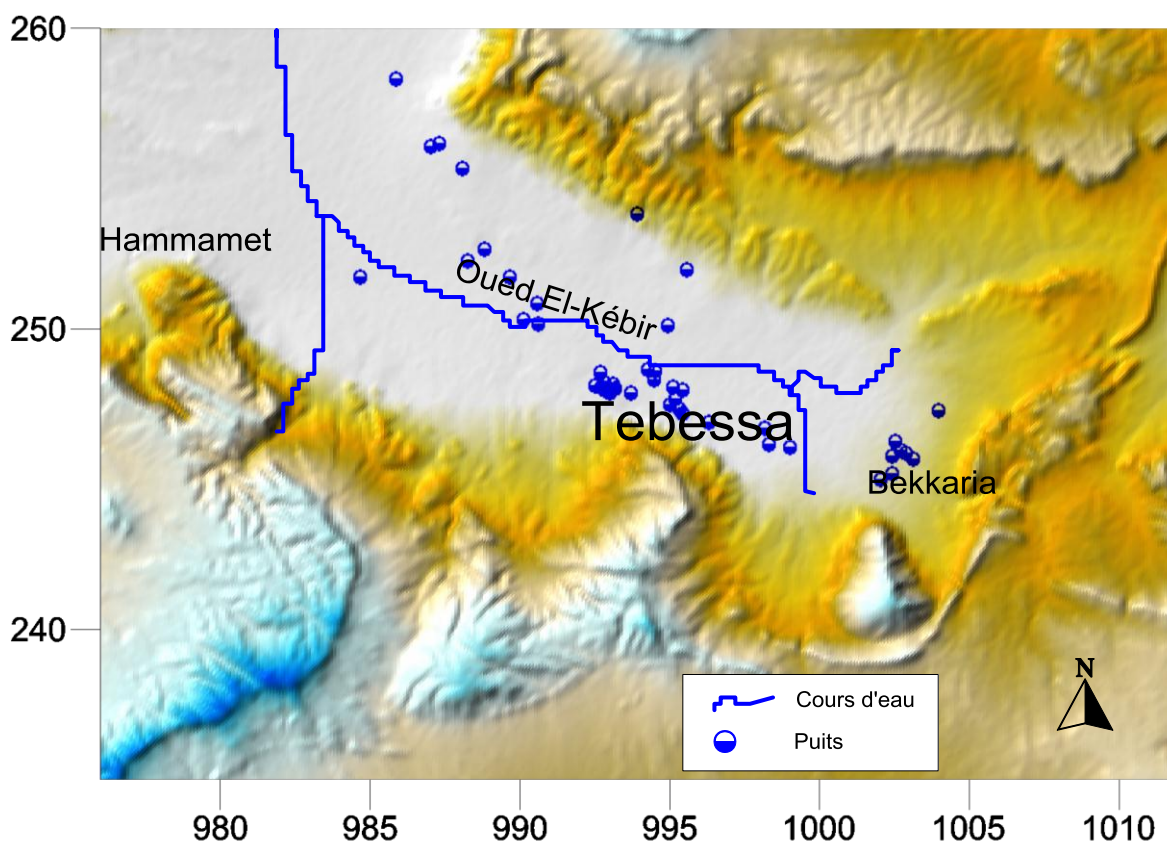


Figure 44 : Inventaire des points d'eau à travers la région d'étude.

7.1.2.2 Carte piézométrique. Décembre 2001.

L'état piézométrique de décembre 2001 (figure 45), dans le secteur amont et au sud Est, le niveau de la nappe est plus élevé de près de 50 m par rapport au secteur aval, la

nappe s'écoule à peu près perpendiculairement à l'axe de Oued El-Kébir selon une direction SE-NW. Cet état fait apparaître l'existence d'une zone où les lignes de courant divergent, limitrophe aux formations carbonatées du Sud-Est de la plaine, traduisant ainsi l'influence des apports latéraux qui se manifestent de manière visible au pied du versant Nord du Djebel Doukkan qui constitue une limite perméable favorisant l'alimentation de la nappe à partir des calcaires maestrichtiennes, cette situation provoque un gradient hydraulique important qui témoigne d'un fort battement dans cette zone qui représente une zone de transition entre deux aquifères (carbonaté-alluvial). Nous remarquons aussi sur la figure 46 un rabattement qui se contraste en une dépression de l'ordre de 20 m, située près de la ville de Tébessa avec un niveau piézométrique de 810 m ; ce rabattement est dû essentiellement aux pompages continus à partir des forages d'AEP. Pour la partie aval de la nappe la piézométrie présente un état d'une relative homogénéité marqué par un gradient faible où les courbes iso-pièzes sont plus ou moins espacées.

7.1.2.3 Carte piézométrique : Janvier 2006

L'état piézométrique de janvier 2006 (figure 46) comparativement à l'état de novembre 2001, dans le secteur amont (Tébessa-Bekkaria) présente des différences sur l'allure des courbes iso-pièzes, en 2006 sont plus espacés traduisant ainsi un gradient plus faible que celui de 2001. Tandis qu'à l'aval dans le secteur Tébessa Hammamet, sur l'axe de Oued-El-Kébir ; un rabattement très important qui se distingue de l'ordre de 40 m dans la zone qui est exploitée par les forages alimentant la ville de Tébessa en eau potable et qui sont en pompage continu, provoquant ainsi un gradient important qui constitue une menace de contamination pour la nappe. La coupe hydrogéologique (Figure 34) montre que la profondeur de la nappe varie entre 25 et 30 m, ce niveau d'eau près de la surface provoque une dégradation des eaux de l'aquifère alluvionnaire par les différents agents externes (pollution anthropique, évaporation, etc.). D'une manière générale en dehors de cette importante dépression, à l'amont comme à l'aval nous remarquons une baisse du niveau piézométrique de l'ordre de 10 m par rapport à l'état de 2001. En conclusion l'état de janvier 2006 qui devrait être considérée comme une période à haute eaux, témoigne d'une baisse du niveau piézométrique résultant de la surexploitation de la nappe par les forages de l'AEP et en plus la période de 2006 a coïncidé avec le pic du programme FNRDA où d'importants nombre de points d'eau ont été réalisées à des fins agricoles.

7.1.2.4 Battement de la nappe

Le battement d'une nappe mesure l'amplitude entre le niveau le plus bas et le plus haut, à cet effet pour bien illustrer les différences du niveau piézométrique entre l'état de décembre 2001 et celui de janvier 2006, il est nécessaire d'établir la carte du battement de la nappe entre ces deux périodes. La figure 47 représente le résultat de cette opération. De façon générale, les zones de fort battement correspondent soit à des zones d'alimentation ou à des zones de surexploitation. Les premières (d'alimentations) sont situées au sud de la plaine, plus précisément en bordure des calcaires maestrichtiennes, caractérisées par des courbes serrées qui témoignent d'une importante alimentation qui commence à avoir lieu; alors que les zones de surexploitation sont proches des limites de la vallée de Oued El-Kébir où siègent la majorité des captages d'AEP. Dans le secteur amont et au centre de la plaine le battement est de l'ordre de 30 à 40 m Tandis que pour le secteur aval, il atteint les 60 m.

7.1 Evaluation de la qualité des eaux destinées à l'irrigation

Sur la base des méthodes destinées à évaluer la qualité des eaux destinées à être utilisées pour irriguer les cultures, basées essentiellement sur l'évaluation du risque de salinisation des sols ; une cartographie a été proposée dans ce sens. La démarche adoptée, était de faire une superposition de deux cartes : celle du SAR et celle de la conductivité électrique (CE), avec la prise en considération des classes de variations de chacun des deux paramètres telles qu'elles sont décrites par le diagramme de [Richards \(1954\)](#).

L'examen visuel des cartes du risque de salinisation des sols par les eaux d'irrigation (figures 48 à 51), fait apparaître que le pouvoir alcalinisant (SAR) est faible pour les quatre campagnes de mesures (2001, 2006, 2009 et 2010) et que toute la zone se classe dans la fourchette S1 (SAR entre 0 et 10) ; C'est-à-dire que le risque d'imperméabilisation des sols est faible, tandis que le risque d'accumulation des sels exprimé par les quatre classes de la conductivité électrique (C1, C2, C3 et C4), il varie de : 1) moyen (C2 ; EC entre 250 et 750 $\mu\text{s}/\text{cm}$) dans la majorité de la zone d'étude (2001, 2006 et 2010), cette classe d'eau peut être utilisée à l'irrigation avec la nécessité d'appliquer une dose de lessivage pour empêcher l'accumulation des sels ; 2) élevé (C3 ; EC entre 750 et 2250 $\mu\text{s}/\text{cm}$) à même très élevé (C4 ; EC entre 2250 et 5000 $\mu\text{s}/\text{cm}$) comme il est le cas pour l'état de 2009.

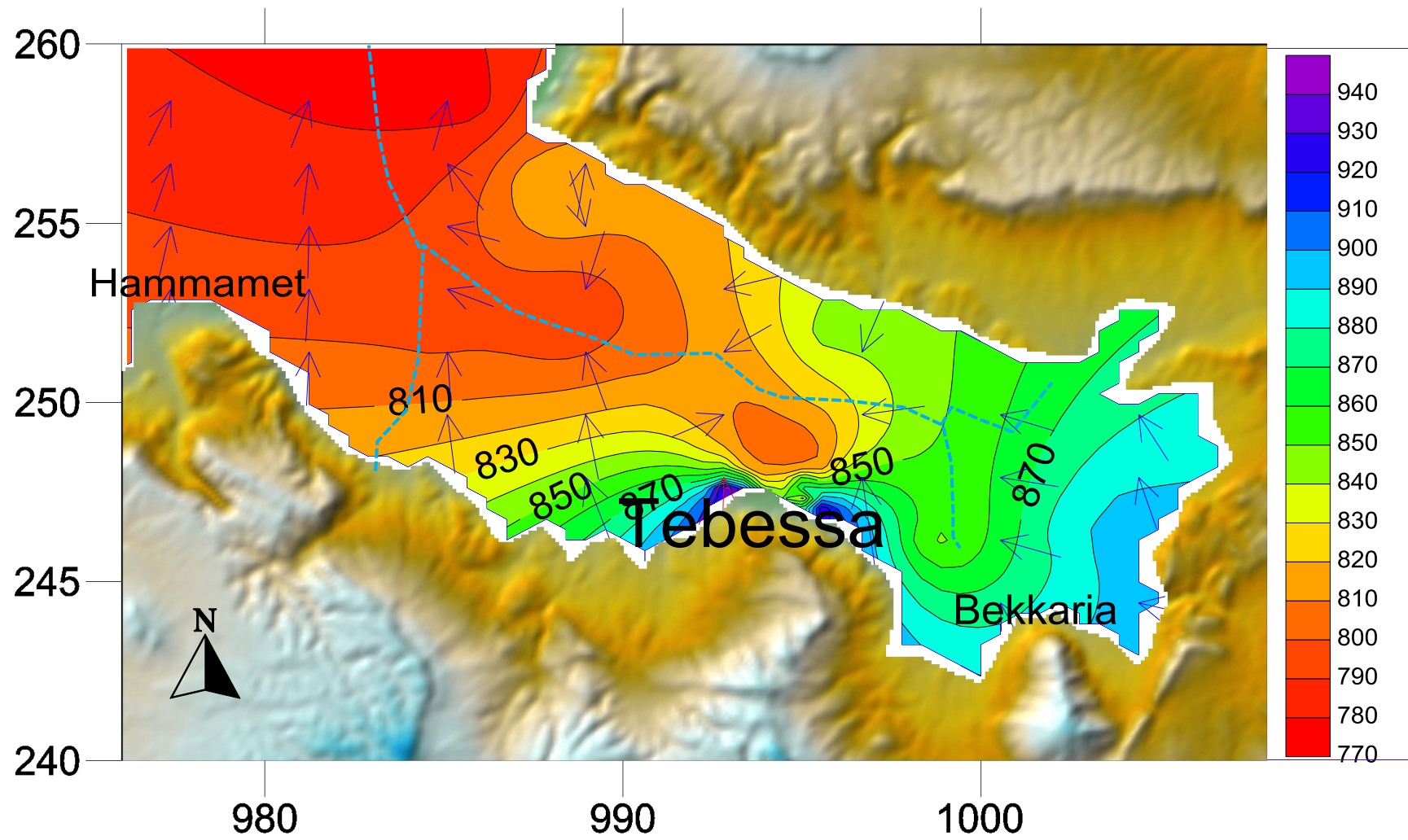


Figure 45:Etat piézométrique de la Merdja en Décembre 2001.

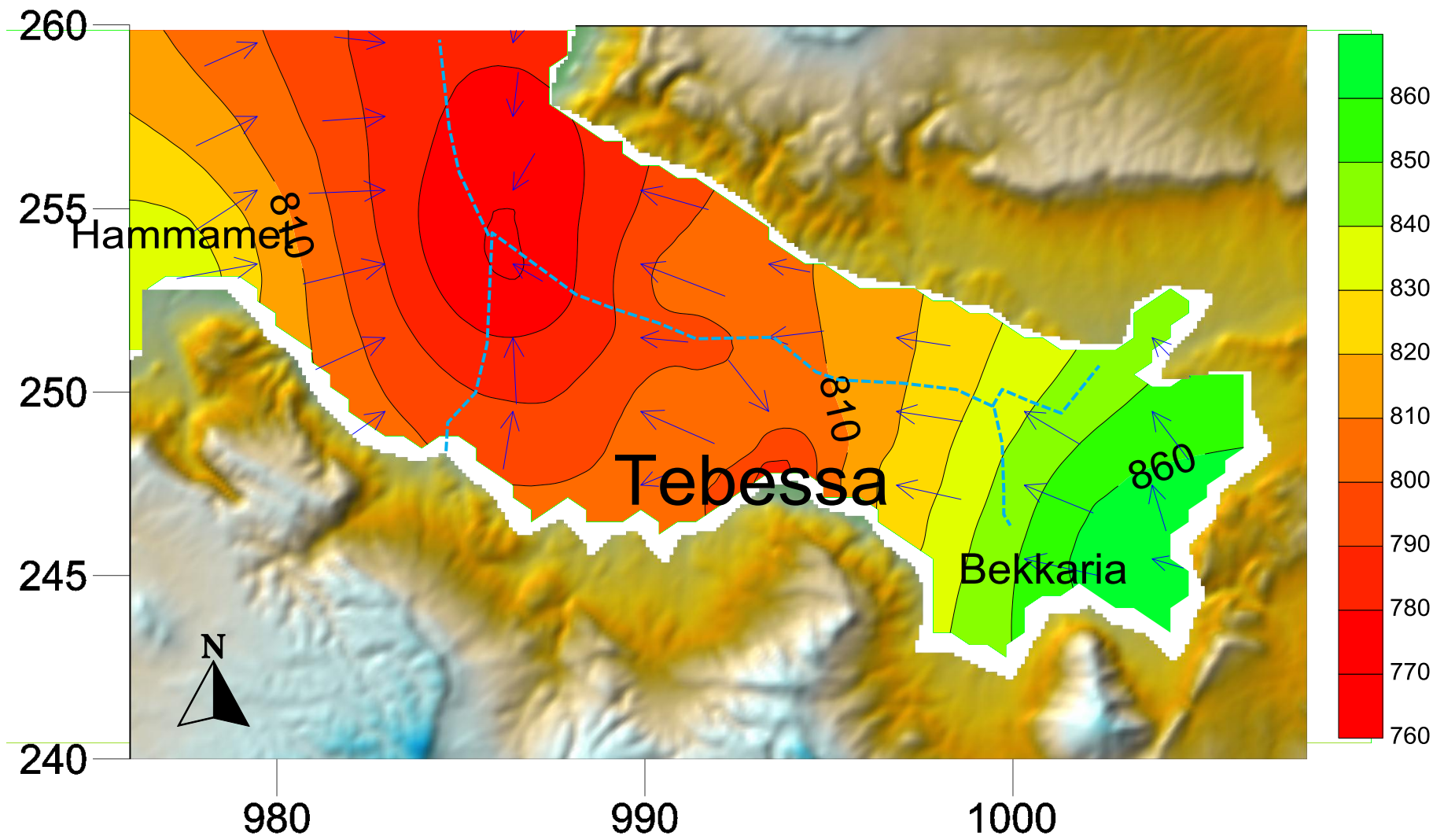


Figure 46 : Etat piézométrique de la Merdja en janvier 2006.

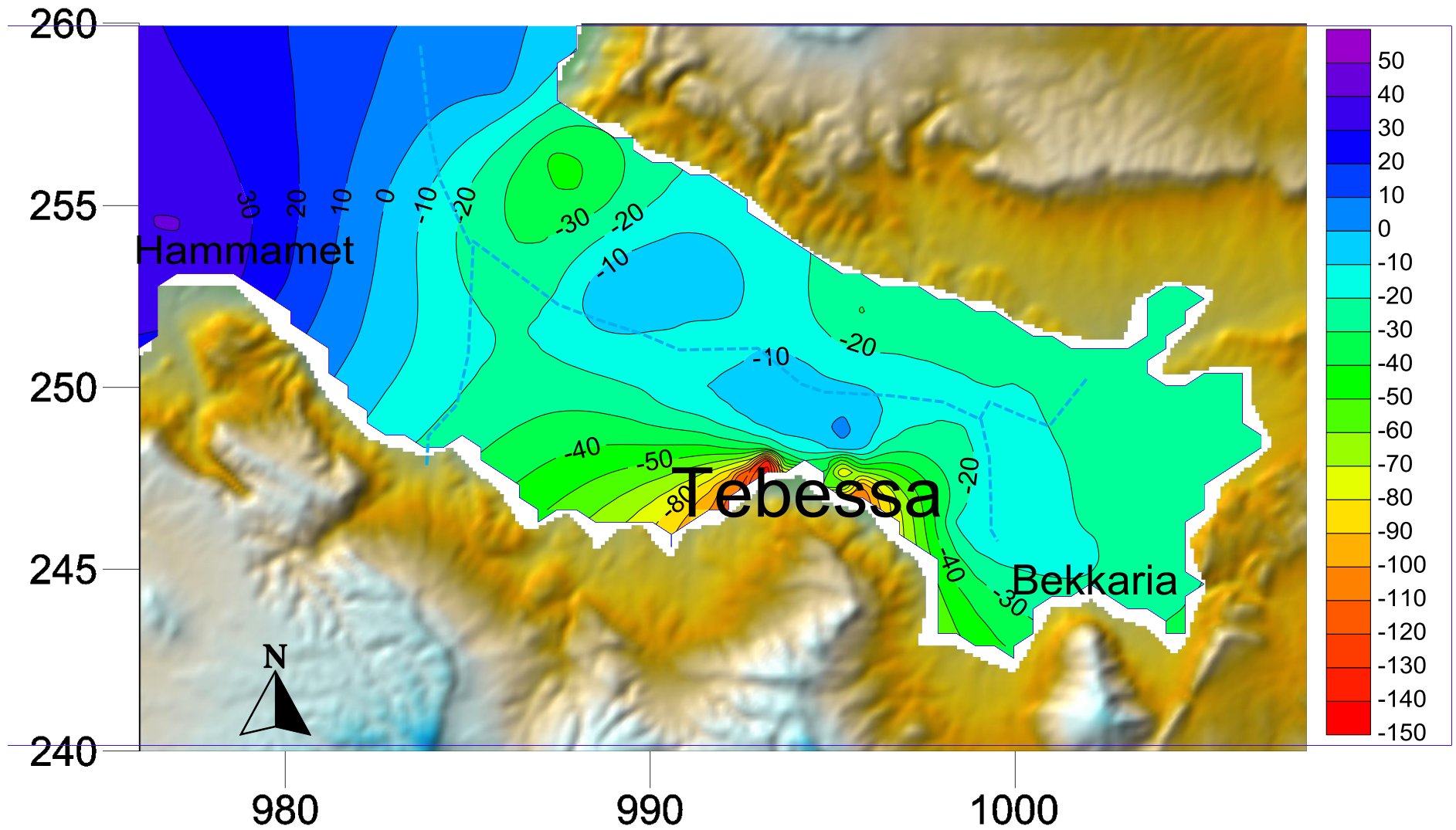


Figure 47 : Battement de la nappe de la Merdja entre déc. 2001 et jan. 2006.

Les eaux de classe C3 peuvent être utilisées avec un maximum de soin, sur des sols drainants ou avec un système de drainage adéquat ; tandis que les eaux de classe C4, sont à éviter pour irriguer les cultures et ne peuvent être utilisées qu'à des conditions spéciales. Le niveau élevé de la conductivité électrique (CE) est strictement lié à la salinité de l'eau, ce qui représente l'un des principaux problèmes en particulier dans les zones arides et semi-arides méditerranéennes où les stress abiotiques ont un impact négatif sur la croissance et le rendement des cultures, qui appauvrissent les sols et polluent les eaux souterraines. (Datta et De Jong, 2009 ; Lvits et al., 2013) ; Qadir et al., 2014). Donc l'utilisation des eaux souterraines de la plaine de Tébessa pour l'irrigation est permise à condition de respecter les recommandations ci-dessus.

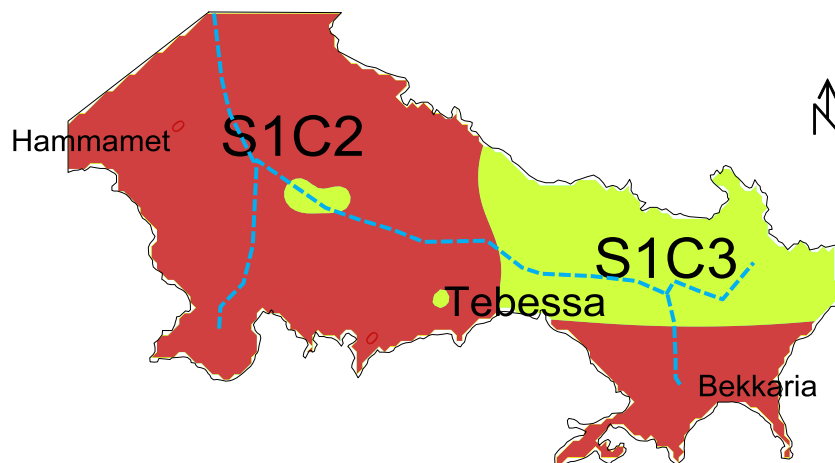


Figure 48: Carte du risque de salinisation des sols (nov. 2001).

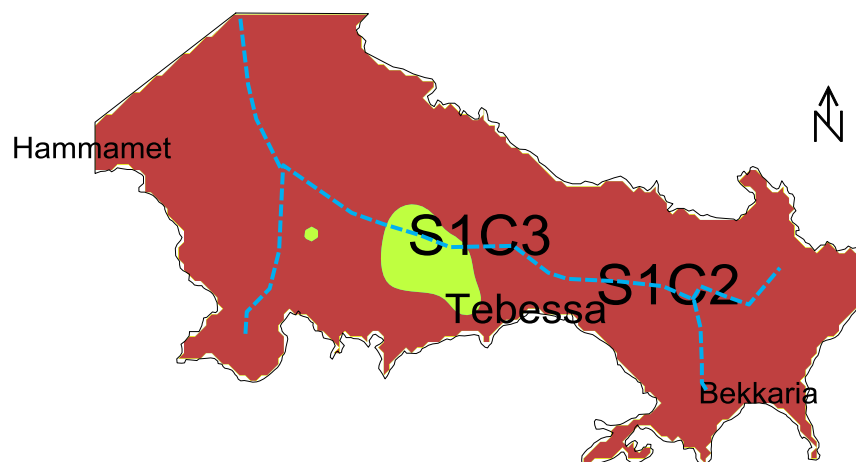


Figure 49: Carte du risque de salinisation des sols (jan. 2006).

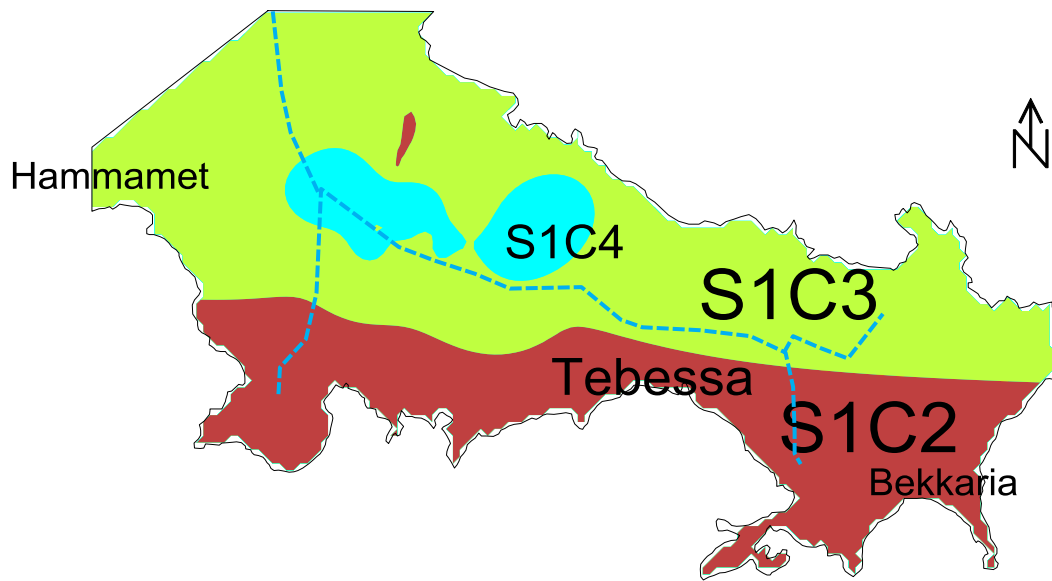


Figure 50: Carte du risque de salinisation des sols (jan. 2009).

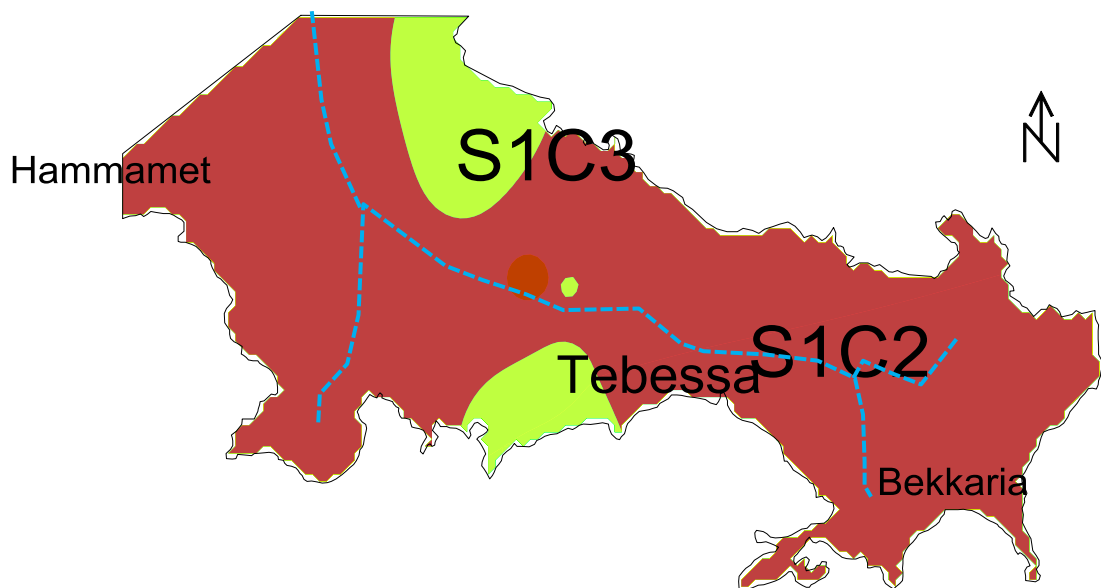


Figure 51: Carte du risque de salinisation des sols (déc. 2010).

7.2 Hydrochimie générale

Les principales statistiques descriptives des paramètres physico-chimiques dans les eaux souterraines ont été présentées dans le tableau 25 (a et b). Les résultats obtenus à travers la

zone d'étude, rejoignent les mêmes tendances et le diagnostic conclu dans des études antérieures (Rouabhia et al., 2004; Boutera et al., 2012; Rouabhia et al., 2009a; Rouabhia et al., 2009b); à travers deux campagnes de terrain (2001 et 2006), a permis de mettre en évidence, l'évolution temporelle de l'hydro-chimie dans la plaine de Tebessa. Les résultats obtenus montrent que les valeurs de la moyenne de la conductivité électrique (tableau 25) varient de 866,0 à 4,781 $\mu\text{S cm}^{-1}$ en novembre 2001 et de 806,0 à 3534 $\mu\text{S cm}^{-1}$ en janvier 2006. En référence à Davis et Dewiest (1966) et Freeze et Cherry (1979), les eaux souterraines sont classées en eaux saumâtres (1000 à 10000 mg/l). Les valeurs plus élevées de CE pour les eaux souterraines sont un indicateur de concentrations ioniques plus élevées, probablement en raison des activités anthropogéniques intenses dans la région et à des conditions géologiques d'altération (acquisition des concentrations élevées en minéraux dissous) d'après Dinka et al. (2015).

Comprendre la qualité de l'eau souterraine est un enjeu important car il détermine son aptitude à la consommation humaine, domestique, agricole et industrielle ; et ce sur la base des normes internationales, (WHO, 2011) et les normes nationales (JORA, 2011).

($\text{Na}^+ + \text{K}^+$) variait de 62 mg/l à 740 mg/l en novembre 2001 et de 38 à 391,2 mg/l en janvier 2006 (tableau 25-a). Respectivement, 25% et 14,3% des échantillons dépassaient la concentration maximale acceptable de Na^+ pour l'eau potable (200 mg/l).

Ca^{2+} variait de 46 mg/l à 408 mg/l en novembre 2001 et de 93,5 mg/l à 445 mg/l en janvier 2006. Par conséquent, 75% et 100% des échantillons dépassaient la concentration maximale acceptable de Ca^{2+} pour eau potable (75 mg/l). Mg^{2+} variait de 78 mg/l à 254 mg/l en novembre 2001 et de 40,6 mg/l à 88,3 mg/l en janvier 2006 (tableau 25-a); respectivement, 100% et 28,6% des échantillons dépassaient la concentration maximale acceptable de Mg^{2+} pour l'eau potable (50 mg/l). Cl^- variait de 70 mg/l à 1 200 mg/l en novembre 2001 et de 21,8 mg/l à 710 mg/l en janvier 2006 (tableau 25-a). 20,8% et 21,4% des échantillons dépassaient la concentration maximale acceptable de Cl^- pour l'eau potable (500 mg/l). SO_4^{2-} variait de 180 mg/l à 1400 mg/l en novembre 2001 et de 145,6 mg/l à 302,4 mg/l en janvier 2006. 58,3% et 0% des échantillons dépassaient la concentration maximale acceptable de SO_4^{2-} pour l'eau potable (400 mg/l). En effet, des concentrations élevées sont observées pendant la période de novembre 2001, qui coïncide avec la fin de la période de sécheresse. Cependant, la période de janvier 2006 est caractérisée par des concentrations plus faibles en raison de la forte période de précipitations. Des concentrations plus élevées de Na^+ , Cl^- et SO_4^{2-} dans la zone étudiée sont liées à

l'interaction eau-roche et à la dissolution de halite, pyrite et sels minéraux apparentés, lessivage des roches et des minéraux de la couche supérieure par l'érosion, processus d'oxydation et les activités anthropiques (Dinka et al., 2015; Niakaronov et Brazhnikova, 2012).

Tableau 25: Récapitulatif des résultats d'analyses hydro-chimiques.

a. Statistique de base des résultats d'analyse hydrochimiques (tous les valeurs sont en mg/l, sauf, EC en $\mu\text{S cm}^{-1}$)								
Paramètres	EC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	
Novembre 2001 (n=24, Balance Ionique moyenne=2%)								
Minimum	866	46	78	62	70	180	183	
Moyenne	1,770	118	128	196	304	496	330	
Maximum	4,781	408	254	740	1,200	1,400	580	
Ecart type	1,050	74	47	184	310	304	94	
Janvier 2006 (n=14, Balance Ionique moyenne= 5%)								
Minimum	806	93	40	38	21	145	174	
Moyenne	1,573	179	62	140	289	237	288	
Maximum	3,534	445	88	391	710	302	445	
Ecart type	775	85	16	102	211	43	89	
b. Statistique de base des résultats d'analyse des nitrate (mg/l) et la CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)								
Campaign	Novembre 2001		Janvier 2006		Janvier 2009		Decembre 2010	
	NO ₃ ⁻	EC	NO ₃ ⁻	EC	NO ₃ ⁻	EC	NO ₃ ⁻	EC
Minimum	9	866	18	806	11	1,800	1	398
Moyenne	79	1,770	59	1,573	31	4,705	18	1,425
Maximum	160	4,781	120	3,534	63	15,700	49	2,859
Ecart type	45	1,050	27	775	14	3,856	14	934

La concentration moyenne en novembre 2001 (tableau 25-a) montre que l'ordre d'abondance des principaux cations est Na⁺ > Mg²⁺ > Ca²⁺ et que l'abondance des anions majeurs est SO₄²⁻ > HCO₃⁻ > Cl⁻. Cependant, en janvier 2006, l'abondance des principaux cations est Na⁺ > Ca²⁺ > Mg²⁺ et les principaux anions sont HCO₃⁻ > Cl⁻ > SO₄²⁻. Ceci met en évidence un changement de faciès des faciès salifères en novembre 2001 en un faciès mixte (salifère et carbonaté) en janvier 2006. Ceci est en relation avec le phénomène de dissolution des minéraux pendant la période pluvieuse.

La concentration de nitrate dans les échantillons d'eau souterraine de novembre 2001 (tableau 25-b) varie de 9 mg/l à 160 mg/l avec une valeur moyenne de $78,8 \pm 44,9$ mg/l. Dans les échantillons de janvier 2006, il varie de 18 mg/l à 120,1 mg/l avec une moyenne

de $59,5 \pm 26,9$ mg/l. Dans les échantillons de janvier 2009, il varie de 11 mg/l à 63,4 mg/l avec une moyenne de $36,6 \pm 13,9$ mg/l. Dans les échantillons de décembre 2010, il varie de 1,2 mg/l à 49,3 mg/l avec une moyenne de $17,6 \pm 13,6$ mg/l. La concentration d'azote dans les eaux souterraines provient de la biosphère (Saleh et al., 1999). La moyenne des concentrations de nitrates en novembre 2001 et en janvier 2006 dépasse la valeur normalisée (50 mg/l) recommandée par l'OMS (WHO, 2011) et le JORA (2011) et inférieure aux normes de janvier 2009 et décembre 2010. Comme la plupart des zones d'étude est intensivement irrigué, les engrais restent la source de la concentration élevée de nitrate dans certaines régions.

7.3 Evolution du faciès hydro-chimique:

Le diagramme de Piper (Piper, 1944) montre une stabilité globale du type d'eau entre 2001 et 2006. La majorité des échantillons sont situés dans le losange supérieur (figure 52). Cependant, les triangles de cations et d'anions illustrent les changements visibles dans le temps. Pour les anions (2001), 30% dominance avec les sulfates, 55% pas d'anions dominants et 15% dominance chlorures. Pour les cations, 40% des échantillons où Mg domine, 55% sans cation dominant et 5% avec Na. En 2006, toujours pour les anions 50% Cl, 36% sans anion dominant et 14% avec les bicarbonates, pour les cations 21% Ca, 71% sans cation dominant et 7% Na. Cette situation conduit à une augmentation temporelle des chlorures de 15% à 50% et une diminution des anions sulfatés de 30% à aucun anion dominant. . Le diagramme montre également qu'une diminution de Mg de 40% à aucun cation dominant, associée à une augmentation de 21% de Ca, est liée probablement à l'échange cationique de Na avec Ca et / ou Mg. L'apparition des bicarbonates provient des affleurements carbonatés de la région de Tebessa.

7.1 Ratios ioniques

L'interaction entre les eaux souterraines et les roches encaissantes environnantes est considérée comme l'un des principaux processus responsables de la chimie observée des eaux souterraines dans la plaine de Tebessa (Rouabhia et al., 2009a). Dans le tableau 25,

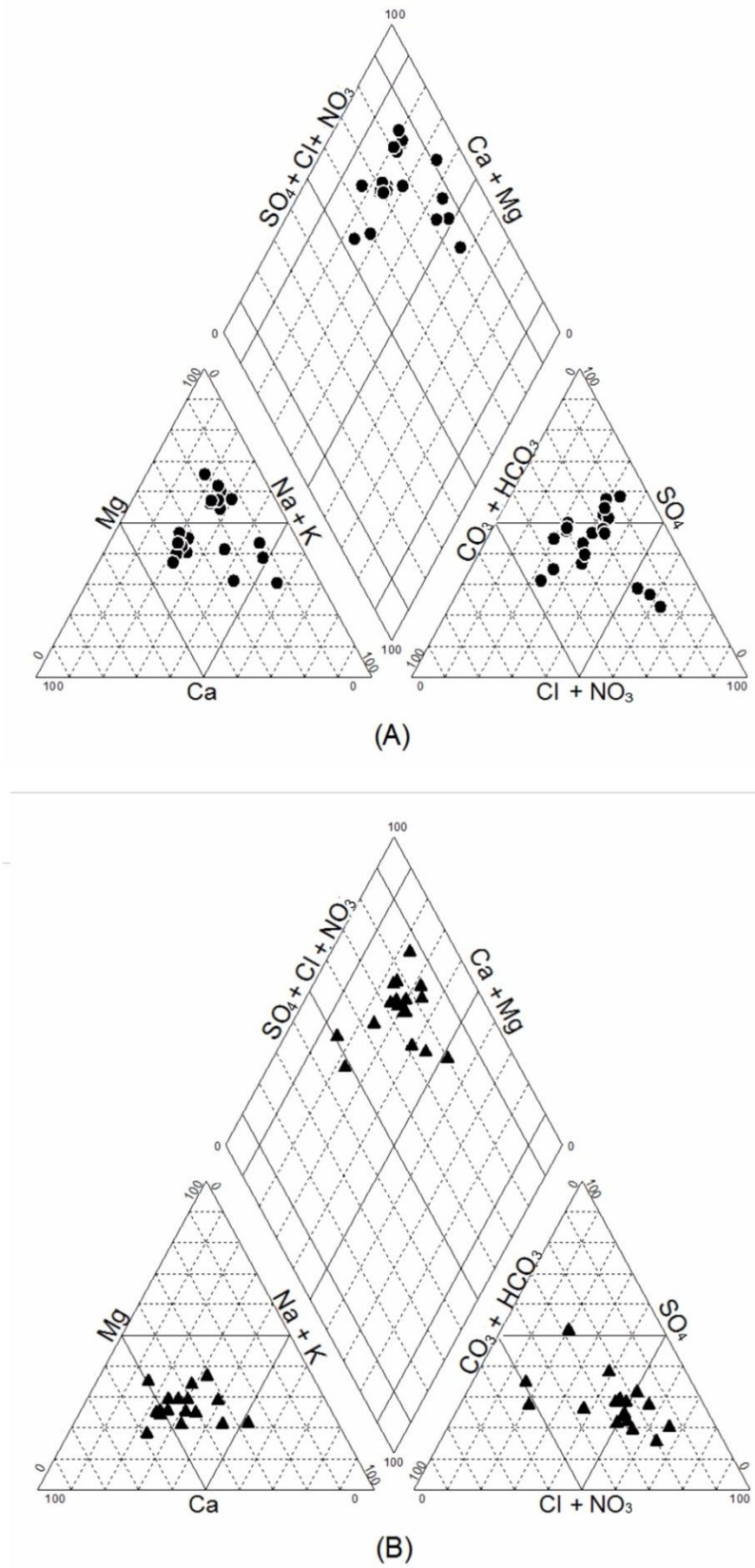


Figure 52: Diagramme de Piper. (A) Novembre 2001 ; (B) Janvier 2006.

les sulfates, les chlorures, le sodium et la CE sont en excès, il est donc essentiel de vérifier l'existence d'une relation possible entre leurs rapports ioniques. Le rapport de conductivité Cl: SO₄ vs CE ; permet de déterminer la manière dont évolue la dissolution des évaporites (halite et gypse), en fonction de la conductivité électrique, (Kumar et al., 2014), il est également associé à la salinisation et à l'apparition de sels résiduels dans les aquifères.

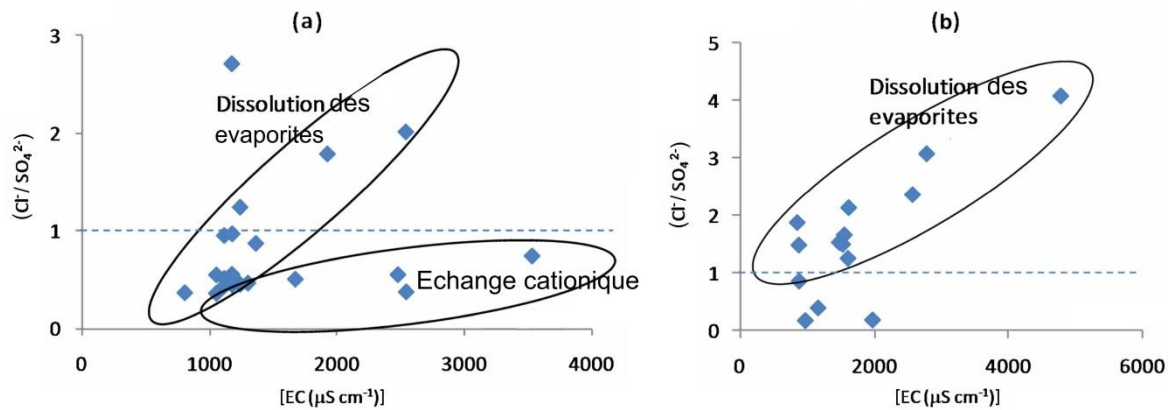


Figure 53: Evolution du rapport Cl:SO₄, (a) nov. 2001 et (b) jan. 2006).

L'évolution de ce rapport montre qu'en janvier 2006 (figure 53 b) par rapport à novembre 2001, l'ion salifère prédomine, se manifestant par un rapport supérieur à l'unité et avec une tendance d'évolution avec la CE. Tandis que ce rapport en novembre 2001 figure 53 a) montre une tendance avec la CE dans une partie, mais dans l'autre partie il n'y a pas de tendance entre Cl: SO₄ et CE. Cette situation est induite dans le premier cas par la dissolution de roches évaporitiques accompagnée dans le second cas par les échanges cationiques.

7.2 Cartographie hydro-chimique:

7.2.1 Evolution de la salinité

La salinité exprimée en conductivité électrique (CE) est l'un des principaux contaminants induits par l'irrigation dans les régions arides et semi-arides (Debieche, 2002), en raison de l'altération minérale qui augmente les concentrations en sels et les charges dans les eaux de drainage (Borros et al., 2012). Dans le cas de Tebessa, le scénario de la salinité (figures 54 e, f, g et h) présente une évolution bidimensionnelle:

Dans l'espace: l'état de 2001 fait apparaître que la CE augmente de l'amont vers l'aval. En 2006 est différent, la CE est uniforme dans toute la région, à part près de la ville de Tebessa, elle a tendance à augmenter. En 2009, l'augmentation est remarquable, cette

situation est fortement liée aux rejets d'eaux usées, généralement caractérisés par une forte salinité. En 2010, la CE est homogène dans toute la zone.

Dans le temps: entre 2001, 2006 et 2010, la CE est variable, montrant une diminution de 2001 à 2006 et une augmentation en 2009 dans la partie aval de la plaine, suivie d'une reprise de l'état en 2010. La fréquence des pluies joue également son rôle dans l'évolution temporelle de la CE par le processus de la recharge de la nappe.

7.2.2 Evolution des nitrates

Les concentrations de nitrates dans les eaux souterraines sont en hausse de 1 à 3 mg/l par an au cours des deux dernières décennies dans le monde entier (Aragües et Tanji, 2003). Le principal polluant dans les eaux souterraines de la plaine de Tebessa est les nitrates. La forte concentration de cet élément est due à l'utilisation des eaux usées dans l'irrigation (Boutera et al., 2011). L'examen de l'évolution de ce polluant (Figure 55) fait apparaître ce qui suit :

- **Dans l'espace** ; d'une manière générale, il y a deux types de pollution. Le premier est la pollution ponctuelle, suivant la direction du d'écoulement et caractérisée par des concentrations supérieures au seuil de potabilité recommandé par l'OMS (50 mg/l) représenté par des isolignes rouges fermées (Figure.55-a,b et c), apparentes en aval de la ville de Tebessa, mis à part pour l'état de décembre 2010 (figure 55-d), la concentration est inférieure à ce seuil. Le deuxième type est la pollution diffuse (non ponctuelle), mais en dessous du seuil de 40 mg/l, il couvre la majeure partie du territoire, en raison probablement du retour d'eau d'irrigation et à l'usage des fosses septiques dans les zones rurales.
- **Dans le temps** ; l'évolution temporelle (figures 55-a,b,c et d) permet d'observer une diminution significative des nitrates, apparente en janvier 2009 et décembre 2010. Cela semble être l'effet de chasse naturel provoqué par les précipitations et témoigne d'une recharge de l'aquifère. Une succession de trois bonnes années pluvieuses (2003, 2004 et 2005) reflète le rôle de l'antécédent pluviométrique sur la qualité des eaux souterraines. Cet antécédent avant janvier 2001 n'était que de 75,0 mm entre juillet et octobre, ce qui n'a pas d'effet significatif. En effet, une pluie d'environ 640,0 504,0 et 278,0 mm enregistrée

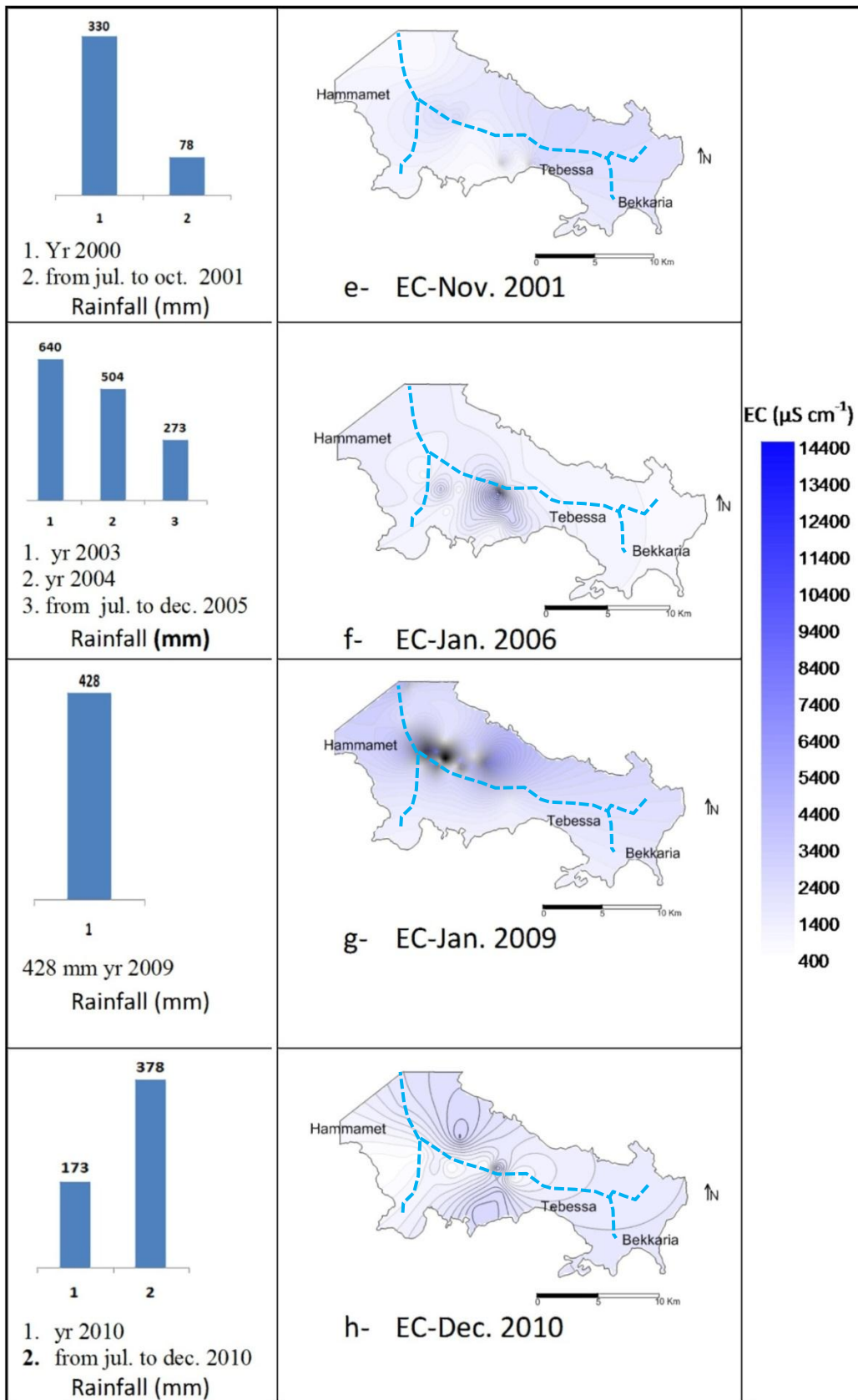


Figure 54: Evolution de la salinité.

respectivement en 2003, 2004 et de juillet à décembre 2005 met en évidence un processus de nettoyage progressif des nitrates de l'amont vers l'aval dans la zone d'étude.

7.2.3 L'évolution des sulfates

La présence de sulfate dans les eaux souterraines de la région est principalement due à l'altération des roches sédimentaires telles que le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et l'anhydrite (CaSO_4) (Belkhiri et al., 2012). En présence d'eau, ces roches, par dissolution, libèrent l'ion SO_4^{2-} dans la solution du sol qui finira par atteindre l'aquifère. Dans la zone d'étude, les formations du Trias en amont de la plaine constituent une source potentielle de sulfate. En faisant l'ion prédominant, avec une moyenne pour les quatre campagnes, de 496.7, 237.2, 482.1 et 167.5 mg/l respectivement. La cartographie de sulfate montre une tendance croissante, dépassant le seuil du goût d'eau potable, acceptée par l'OMS (WHO, 2011) pour cet élément (500 mg/l). Cette situation est également induite par la grande variabilité des résultats et l'effet d'extrapolation généré par le krigeage, notamment à la frontière nord et à l'est de la plaine, où le nombre de forages est limité. Les campagnes de 2001 et de 2009 montrent une situation où toutes les eaux souterraines sont affectées par des concentrations élevées de sulfate (figures 52-a et 52-c) et, dans une moindre situation ceux de 2006 et 2010 (voir figures 52-b et 52-d). Pour l'évolution spatiale, la partie centrale et le nord-est de la plaine sont les plus affectés par de fortes concentrations de sulfate. Ceci est fortement lié à la dissolution du gypse des roches du Trias.

7.2.4 Evolution du sodium

Selon l'OMS (WHO, 2011), le seuil du goût pour le sodium est de 200 mg/l et est classé dans «Aucune valeur indicative sur la santé n'a été fixée». Rouabhia et al. (2009) a rapporté que des niveaux élevés de Na^+ dans la plaine de Tebessa sont liés à la recharge de l'aquifère, à partir des formations calcaires latérales et des argiles quaternaires par échange de cations. La cartographie du Na^+ (figure 57) de novembre 2001 illustre une tendance similaire avec le sulfate. L'évolution spatiale montre une augmentation de la concentration de sodium de la partie centrale autour de la ville de Tebessa et le long de l'oued El-Kebir au nord-est, qui dépasse la moyenne de 190 mg/l, et semble être la zone la plus touchée. En janvier 2006, la situation est plus faible qu'en 2001, par conséquent les concentrations de sodium sont autour de la moyenne de 140 mg/l.

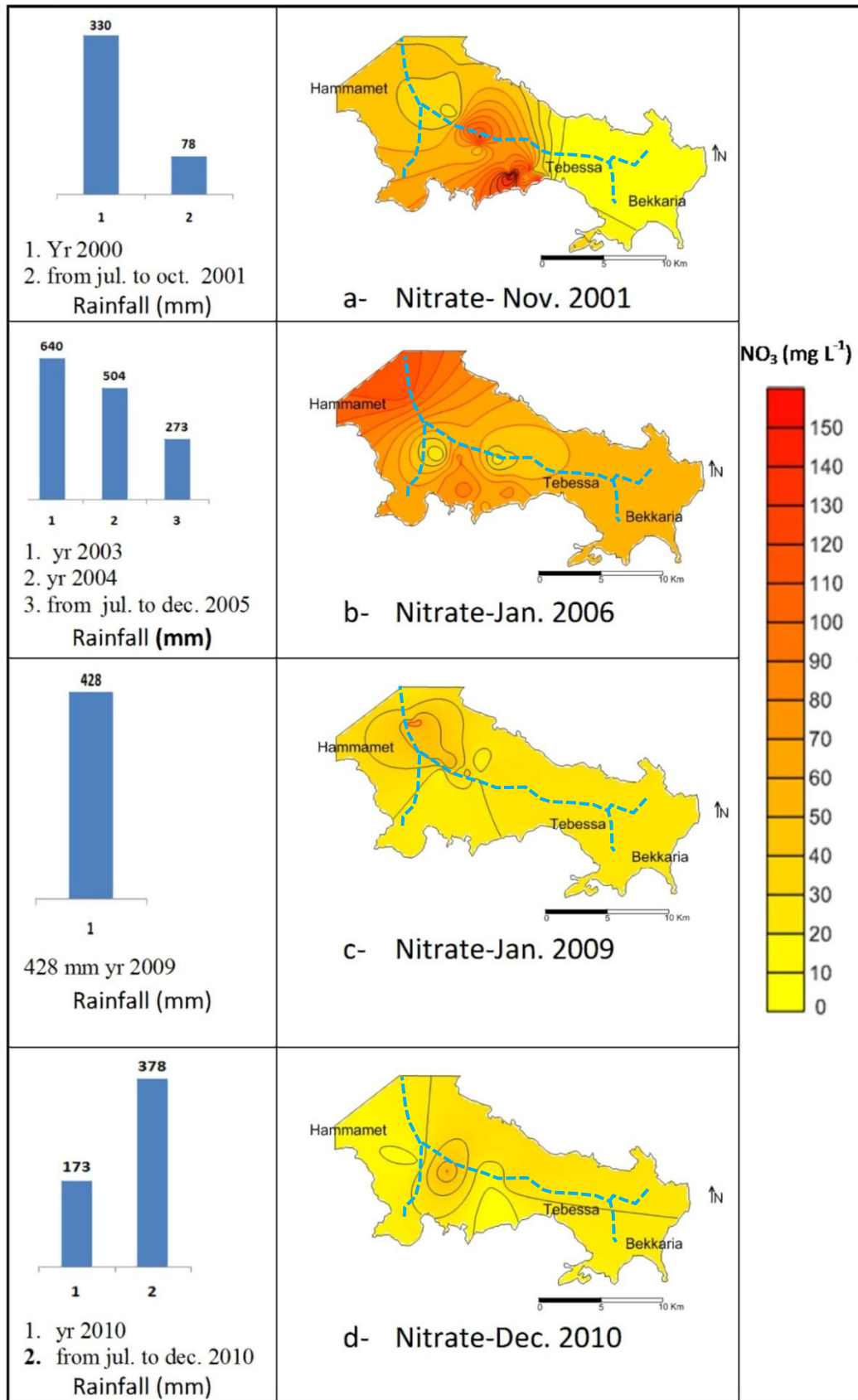


Figure 55: Evolution des nitrates.

Cette situation pourrait être interprétée comme le résultat d'une importante recharge de l'aquifère qui aurait eût lieu entre 2001 et 2006, due à une succession de trois années pluvieuses 2003 (640,0 mm), 2004 (504,0 mm) et 2005 (273,0 mm) de juillet à décembre.

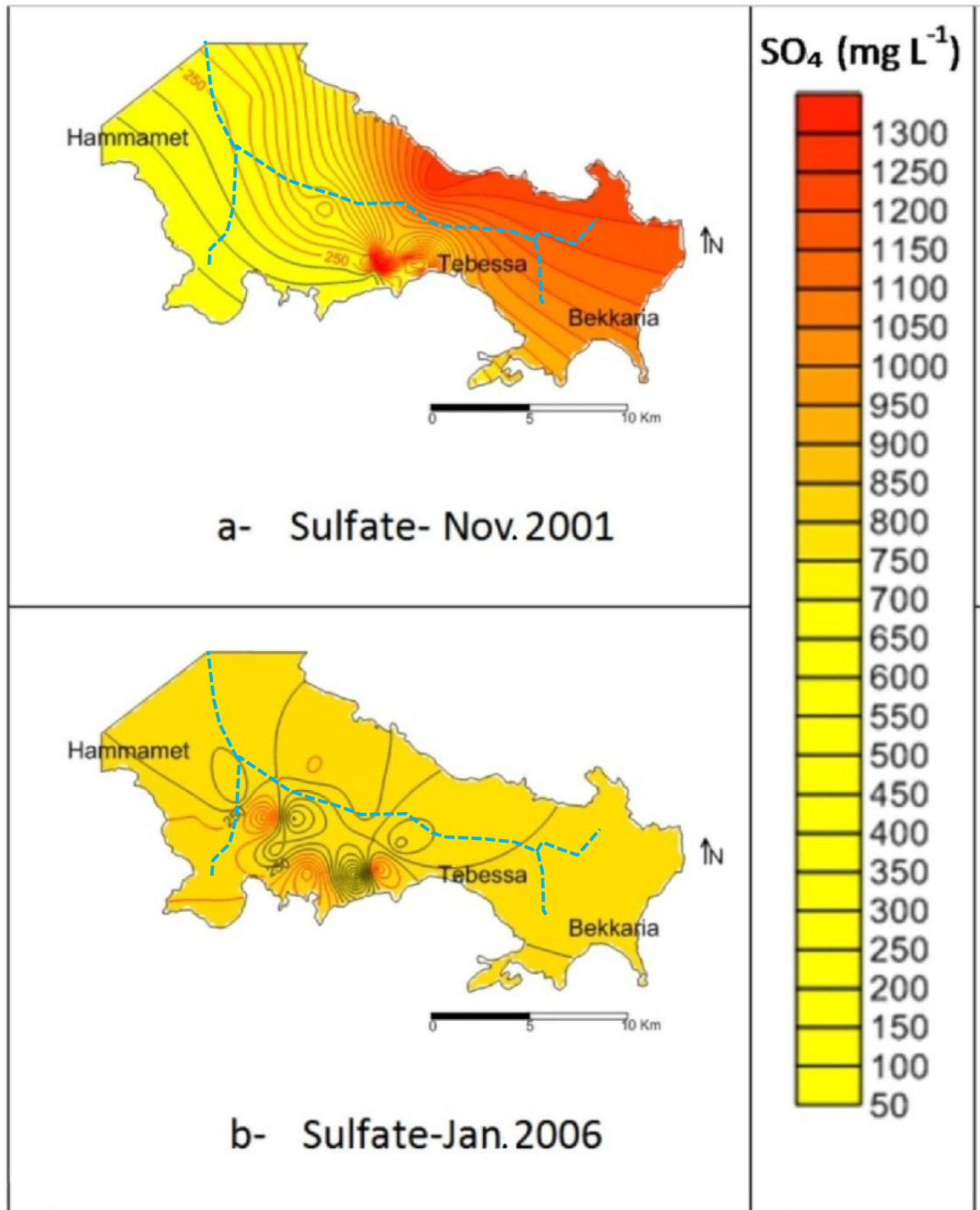


Figure 56: Evolution des sulfates.

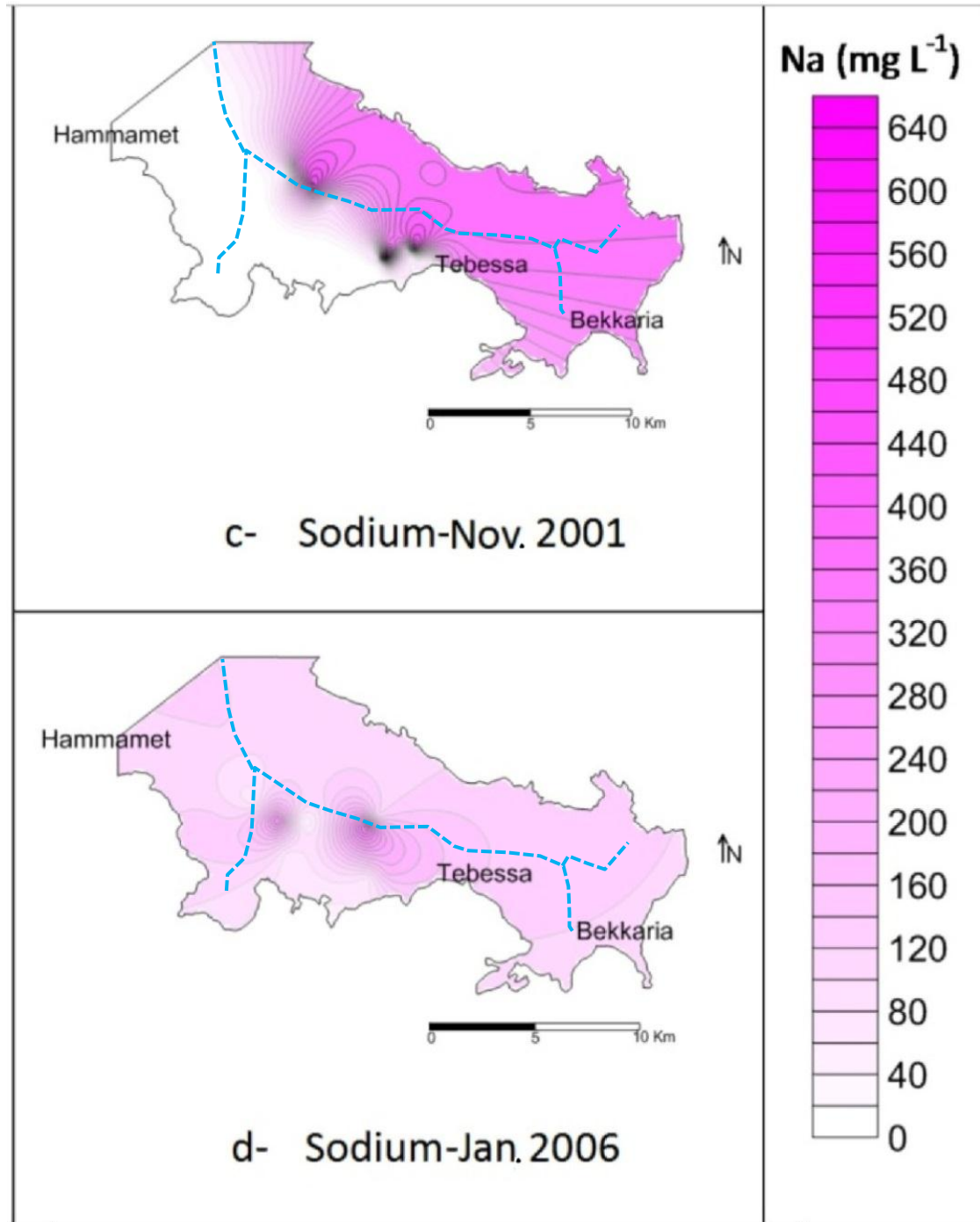


Figure 57: Evolution du Sodium.

7.3 Analyses statistiques

7.3.1 Corrélacion de Pearson

Les études de corrélation entre différentes variables sont des outils très utiles dans la promotion de la recherche et l'ouverture de nouvelles frontières de la connaissance. La méthode d'analyse de corrélation à deux variables est appliquée pour décrire le degré de

relation entre deux paramètres hydrogéochimiques. Un coefficient de corrélation élevé (r) près de + 1 ou -1 reflète une bonne relation entre deux variables et sa valeur autour de zéro signifie aucune relation entre elles à un niveau significatif de $p < 0,05$. Plus précisément, on peut dire que les paramètres montrant $r > 0,7$ sont considérés comme fortement corrélés alors que r entre 0.5 et 0.7 montre une corrélation modérée (Manish et al., 2006). Dans cette étude, les variables de qualité de l'eau ont été regroupées en utilisant la corrélation de Pearson. Cette matrice de coefficients de corrélation pour la zone est donnée dans le tableau 26.

Tableau 26: Matrice des coefficients de corrélation de Pearson des deux campagnes (2001 et 2006).

Variables	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	CE
Ca ²⁺	1.00							
Mg ²⁺	<u>0.54</u>	1.00						
Na ⁺ +K ⁺	0.45	0.27	1.00					
HCO ₃ ⁻	<u>0.79</u>	<u>0.54</u>	0.26	1.00				
Cl ⁻	0.26	0.19	<u>0.95</u>	0.30	1.00			
SO ₄ ²⁻	0.38	<u>0.68</u>	<u>0.65</u>	0.18	<u>0.53</u>	1.00		
NO ₃ ⁻	0.15	0.05	-0.03	0.05	0.02	<u>0.61</u>	1.00	
CE	0.44	<u>0.54</u>	<u>0.55</u>	<u>0.60</u>	<u>0.56</u>	<u>0.78</u>	0.16	1.00

*Les valeurs soulignées représentent les corrélations significatives.

La salinité représentée par la CE montre une corrélation modérée à fortement positive avec tous les éléments salifères (Cl⁻, SO₄²⁻ et Na⁺ + K⁺) et avec les éléments carbonates (Mg²⁺ et HCO₃⁻). Ceci laisse prévoir que la salinité est beaucoup liée aux éléments salifères et carbonatés. Cette liaison a été montrée en utilisant les rapports molaires des composants carbonatés et ceux d'évaporites. L'influence des carbonates et des évaporites est représentée par deux groupes distincts (figure 58). Soulignant que la salinité est stable en fonction des carbonates mais elle augmente en fonction de l'évaporation. Une corrélation fortement positive est observée entre Ca-Mg-HCO₃-SO₄, indiquant que la plupart des ions sont impliqués dans diverses réactions physicochimiques, telles que l'oxydoréduction et l'échange d'ions dans le système aquifère des eaux souterraines (Udayalaxmi et al., 2010). Cette analyse montre également une forte corrélation entre Na-Cl, SO₄-NO₃. La première est attribuée à l'effet de lessivage et de dissolution des sels solubles du Trias (Freeze et Cherry, 1979). La seconde forte corrélation entre SO₄²⁻ et NO₃⁻ est liée à l'utilisation d'engrais, de même cette liaison est reconnue comme une pollution anthropique généralement identifiée dans les zones urbaines, industrielles (en raison des rejets d'eaux usées) et à forte activité agricole (Udayalaxmi et al., 2010).

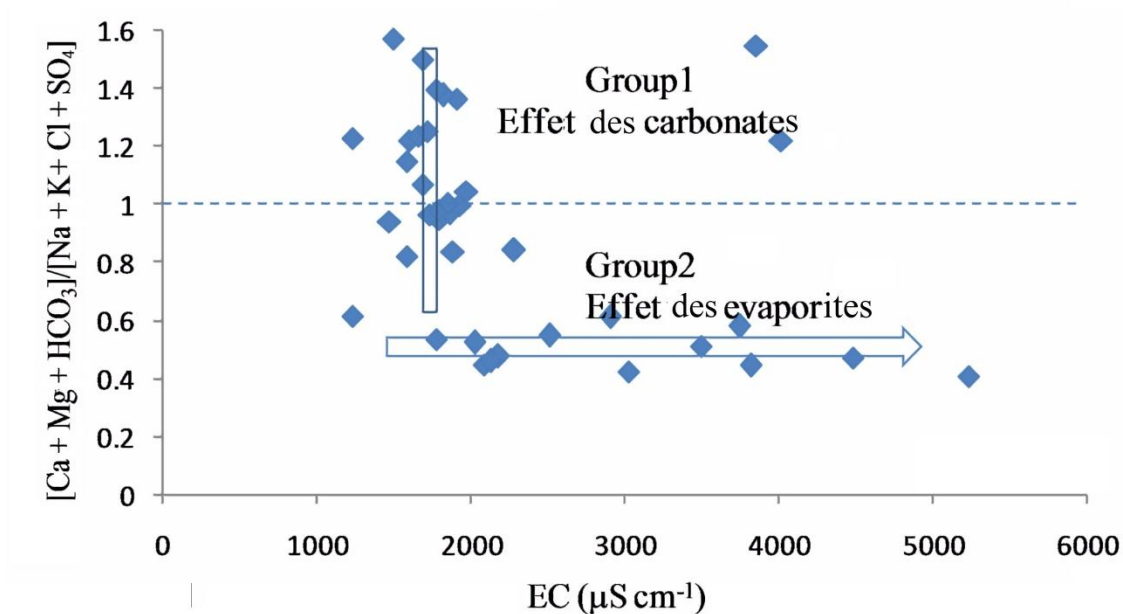


Figure 58: Evolution du rapport entre les ions carbonatés et les évaporites en fonction de la CE.

7.3.2 Les ACP

Il est bien connu dans la littérature, que la qualité des résultats de l'ACP dépend de la taille de l'échantillon, plus le nombre d'observations est grand, plus les résultats sont représentatifs et vice versa. [Shaukat et al. \(2016\)](#) ont conclu qu'un échantillon de 40 ou 50 enregistrements est acceptable dans les études environnementales et écologiques pour trouver les premiers éléments nécessaires pour résumer et explorer les données multivariées. De plus, dans de nombreuses études à travers le monde, l'ACP est réalisée avec une petite taille d'échantillon, comme [Selvakumar et al. \(2017\)](#) (20 échantillons), [Maqsoud et al. \(2004\)](#) (25 échantillons), [Yahya et al. \(2017\)](#) (34 échantillons), [Jacintha et al. \(2017\)](#) (18 échantillons). Par conséquent, pour consolider les résultats ci-dessus, une ACP a été réalisée.

Les paramètres de qualité de l'eau ont été regroupés en deux périodes: une période post-humide (janvier 2006) et une période post-sèche (novembre 2001). L'ACP a été réalisée en utilisant 8 variables (EC, Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , Na^+ , K^+ , Cl^- , NO_3^- et SO_4^{2-}) pour 38 échantillons d'eau. Le poids factoriel, la variance de chaque facteur, le pourcentage et le pourcentage cumulé de variance des deux scores factoriels sont donnés dans le tableau 27. Deux facteurs expliquant 71% de la variance totale sont obtenus sur la base des critères de sélection des facteurs (valeurs propres > 1,0).

Tableau 27 : Contributions des variables après rotation du varimex.

Variables	F1	F2
Ca ²⁺	<u>0.58</u>	0.49
Mg ²⁺	<u>0.73</u>	-0.54
Na ⁺ +K ⁺	<u>0.96</u>	0.00
HCO ₃ ⁻	<u>0.60</u>	-0.17
Cl ⁻	<u>0.93</u>	0.12
SO ₄ ²⁻	<u>0.73</u>	-0.30
NO ₃ ⁻	0.03	<u>0.78</u>
EC	<u>0.64</u>	0.54
Valeurs propres	3.90	1.19
Variabilité (%)	55.52	15.42
Cumul (%)	55.52	70.94

Les valeurs soulignées sont significatives.

Le facteur 1 explique 55,52% de la variance totale et a de fortes corrélations positives avec tous les paramètres sauf NO₃⁻. Ce facteur reflète la signature d'une recharge naturelle de l'eau et de l'interaction eau-roche. L'eau relativement profonde (jusqu'à 10 m de profondeur) est en équilibre avec l'environnement géologique qui provoque la dissolution des minéraux dans les roches environnantes.

Le facteur 2 explique 15,42% de la variance totale de l'ensemble de données et a une forte corrélation positive avec NO₃⁻. Ce facteur reflète la signature des activités anthropiques telles que les rejets d'eaux usées domestiques et l'usage des engrais (Dragon, 2006). Qui sont les principales sources de nitrates et ont été identifiées par Cao et al. (2012). Les engrais constituent le principal processus qui détériore la qualité régionale des eaux souterraines.

La graphique des individus met en évidence l'effet temporel entre 2001 et 2006, les échantillons (P13, P16, P37, P39, P40 et M2-3) de la campagne 2006 occupent le côté gauche de F1; caractérisé par une faible minéralisation (figure 59). F1 s'oppose à P37 (l'échantillon le plus minéralisé et nitré en 2001), respectivement 3534 µS cm⁻¹ et 160 mg/l à la même en 2006, respectivement 1176 µS cm⁻¹ et 70 mg/l. L'axe factoriel F1 montre que la minéralisation ponctuelle élevée observée dans la cartographie de la CE, occupe le côté positif de l'axe pour les deux campagnes. F2, montre qu'à la fois les concentrations faibles (P15, P18 et P19) et élevées (P32, P33, P35 et P37) de nitrate et de calcium concernent les échantillons de novembre 2001.

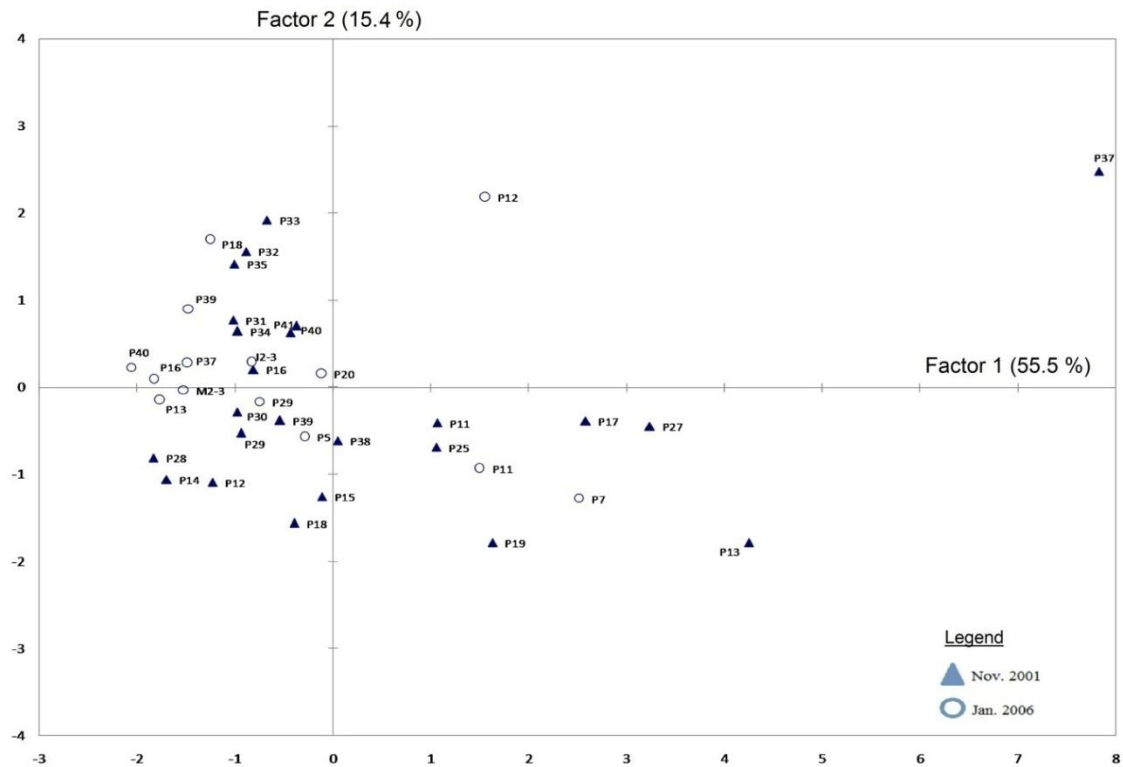


Figure 59: Distribution des individus sur les axes factoriels.

7.4 Conclusion

L'étude de la piézométrie dans le temps et dans l'espace, étant donné que cet aquifère est le principal réservoir pour l'AEP, nous a montré que le niveau piézométrique est instable conséquence des pompages excessifs et continus. Et que malgré que l'état de novembre 2001 coïncide avec la fin d'une période sèche et celui de janvier 2006 avec la fin d'une période humide ; nous avons remarqué que l'état de 2001 sur le plan niveau piézométrique, présente un niveau plus élevé que celui de 2006.

L'évaluation de l'acceptabilité à l'irrigation des eaux souterraines de la plaine de Tébessa, a montré que d'une manière générale ils peuvent être utilisés mais avec la prise en considérations de certaines précautions telles que l'application des doses de lessivage ou un drainage adéquat.

La comparaison entre l'hydrochimie des eaux analysées et les normes mondiales a montré que de nombreux échantillons dépassent en grande partie les valeurs recommandées par l'OMS. Le diagramme trilineaire de Piper a été utilisé pour classer les eaux en types chimiques et illustrer les variations de leur composition. Une stabilité

temporelle relative du type d'eau (chlorure ou sulfate associé au calcium et au magnésium) est enregistrée sur le diagramme de 2001 et 2006; cependant, les triangles de cations et d'anions illustrent un changement visible dans le temps. L'étude des rapports ioniques résume les interactions entre les eaux souterraines et les roches encaissantes environnantes de l'aquifère de la «Merdja». Entre 2001 et 2006, le rapport ($\text{Cl}^- : \text{SO}_4^{2-}$) met en évidence la dissolution des évaporations et l'échange de cations.

La cartographie des nitrates et la CE a montré leur évolution à deux échelles: dans l'espace, des concentrations anormales en aval des zones urbaines (Tebessa, Hammamet et Bekkaria) sont apparentes, ce qui accuse des rejets d'eaux usées et constitue une menace sérieuse pour la qualité des eaux souterraines. Si l'évolution du sulfate et du sodium, à ce stade, semble beaucoup plus naturelle (géologique), elle prend son origine dans la dissolution des formations triasiques. A l'échelle de temps, il y a une diminution des nitrates et la CE, en raison de leur mobilité sont fortement influencés par les périodes de précipitations. La corrélation de Pearson fait apparaître que la salinité représentée par la CE montre une corrélation modérée à fortement positive avec tous les ions de sel et avec les carbonates. Le rapport molaire des composants carbonatés sur ceux évaporitiques en fonction de la CE met en évidence cette relation et laisse prédire que la salinité est beaucoup plus associée aux espèces salifères qu'au carbonatées. Des corrélations fortes entre $\text{Na}^+ + \text{Cl}^-$, SO_4^{2-} et NO_3^- ont été mises en évidence, la première est connue comme l'effet de la dissolution des sels triasiques, la seconde est liée à l'utilisation d'engrais, aux rejets d'eaux usées et au fumier organique. Qui accuse les activités agricoles, urbaines et industrielles. Ces conclusions sont consolidées par les résultats du PCA.

Conclusion générale et recommandations

Conclusion générale et recommandations

La région de Tébessa de par sa situation frontalière avec la Tunisie, est à forte vocation agropastorale au point où les spécialistes du domaine la désignent comme le fleuron du mouton de l'Est Algérien. Cette place qu'elle occupe fait qu'elle soit l'objet de plusieurs investigations, dont le présent travail fait partie. L'étude des impacts de l'irrigation en tant qu'activité anthropique et les conditions naturelles qui règnent, sur la qualité des eaux souterraines de la plaine de Tébessa, située au Nord-Est Algérien nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

La revue de la littérature a évoqué selon des études antérieures, que l'aquifère peu profond de la plaine de Tébessa subit des fluctuations saisonnières de sa qualité, provoquées principalement par des activités anthropiques principalement liées à l'activité agricole. Le présent travail avait comme objectif de comprendre comment l'irrigation et les conditions locales et naturelles influencent cette précieuse ressource, à des échelles temporelles et spatiales, en analysant la tendance d'évolution des paramètres hydrochimiques de cet aquifère.

La zone d'étude fait partie d'une grande région agro-pastorale. La sécheresse qui a caractérisé la décennie 1990-2000 a entraîné une pénurie importante d'aliments pour le bétail. Cette situation a provoqué une augmentation des superficies irriguées, en particulier après l'émergence du Fonds national de développement agricole (dans les années 2000) basé sur l'extension des zones irriguées qui dépendait beaucoup sur la mobilisation des ressources en eaux souterraines. En outre, Oued El-Kebir qui draine la plaine est également utilisé pour l'irrigation, bien que son débit de base provient principalement des effluents d'eaux usées non traitées de la ville de Tébessa, Bekkaria et Hammamet.

Au plan climatique ; la région a un climat semi-aride avec des précipitations annuelles moyennes allant de 250 à 300 mm. La température mensuelle moyenne varie de 6 ° C (en janvier) à 37 ° C (en juillet) et caractérise deux périodes: une période de sécheresse chaude (d'avril à octobre) qui l'emporte sur une période froide et humide (de novembre à mars). Sur la base des données disponibles de la station de Tébessa et ceux des quelques stations avoisinantes nous a permis de dégager les éléments suivants :

- Que les précipitations sont très variables dans le temps, les températures présentent une légère augmentation progressive traduisant le réchauffement climatique
- La région fait partie de l'étage bioclimatique semi-aride confirmée par le calcul de l'indice d'aridité de Martonne ;
- A travers le diagramme pluvio-thermique les périodes sèches sont plus longues et emportent beaucoup sur les périodes humides ;
- Et que l'ETP est importante à l'échelle de la région est fait plus que quatre fois l'évapotranspiration réelle traduisant un déficit agricole très important.
- A l'issue du calcul du bilan hydrique de Thornthwaite, il ressort que la recharge de la nappe aura lieu uniquement dans des conditions extrêmes de fortes précipitations.

Au plan géologique et hydrogéologique ; la plaine de Tébessa correspond à un fossé d'effondrement comme il a été reporté dans la plus part des études géologique et géomorphologique. La région est une plaine plate par rapport aux montagnes environnantes où l'altitude varie de 700 à 1712 m. Cette configuration avait été le siège d'un important remplissage d'âge quaternaire, qui maintien le système aquifère de la «Merdja». Cet aquifère est composé principalement par les dépôts alluviaux. L'épaisseur moyenne varie entre 10 et 400 m, exploité par des puits domestiques et des forages d'AEP, de profondeur allant de 10 m en amont à plus de 200 m en aval de la plaine. Les calcaires du Turonien, les affleurements du Campanien et du Maastrichtien constituent les limites montagneuses du nord-est et au sud. Djebel Djebissa (à l'est) est une formation triasique composée principalement d'argile rouge gypseuse.

L'évolution de la piézométrie dans l'espace et dans le temps entre deux périodes de hautes eaux (Déc. 2001 et Jan. 2006) mais l'une marque la fin d'une période post-sécheresse (2001) et la seconde marque la fin d'une période post-humide (2006), nous a montré que le niveau piézométrique est instable, conséquence des pompages excessifs et continus à partir des forages d'AEP. Cette instabilité s'est matérialisée sur les cartes piézométriques sous forme de dépressions. L'examen des cartes de battement de la nappe fait apparaitre des zones d'alimentations situées aux bordures sud de la plaine, surtout celles qui sont en contact avec les formations carbonatées.

L'évaluation de la qualité d'eau destinée à l'irrigation, par l'étude du risque de salinisation des sols, a permis de dresser une cartographie de ce risque en se basant sur la classification universelle reconnue en la matière. Les cartes obtenues ont permis de

conclure que les eaux souterraines de la région peuvent être utilisées pour irriguer les cultures, mais avec certaines restrictions pour les eaux dont la conductivité électrique dépasse certains seuils.

Au plan hydrochimique ; sur la base des traitements statistique de base, des rapports ioniques, les diagrammes, la cartographie et les statistiques multivariées des données recueillis à travers les quatre campagnes de terrain ; qui ont révélé des aspects hydrochimiques importants pour les eaux souterraines de la zone étudiée. D'où les principales conclusions sont les suivantes:

- L'étude des rapports ioniques montre que les ions halites tendent à dominer les gypsifères et que l'échange d'ions et la dissolution des évaporites jouent un rôle dans la chimie des eaux souterraines de Tébessa.
- Le diagramme de Piper a souligné que la qualité de l'eau souterraine de la zone d'étude, présente une stabilité temporelle relative du type d'eau (chlorure ou sulfate associé au calcium et au magnésium).
- La cartographie des nitrates et de la CE illustre son évolution à deux échelles; Dans l'espace, les concentrations urbaines constituent une menace sérieuse pour la qualité des eaux souterraines, qui accuse des rejets d'eaux usées, matérialisés par des concentrations anormales en aval de Tébessa, Hammamet et Bekkaria. À l'échelle du temps, nous avons constaté que l'évolution des nitrates et de la CE, en raison de leur mobilité, est fortement influencée par les périodes de fortes précipitations (années humides) qui sont à l'origine de la recharge de la nappe.
- Si l'évolution des sulfates est beaucoup plus naturelle (géologique), les formations du Trias à l'est de la plaine semblent être la principale source d'enrichissement par les ions sulfates.
- L'étude du rapport ionique entre les carbonates et les éléments évaporites en fonction de la CE révèle deux groupes distincts, l'un représente les carbonates, sans effet pour augmenter la salinité et l'autre représente l'effet de la dissolution des évaporites qui contribue à augmenter la salinité dans les eaux de la zone d'étude.
- L'ACP a met en évidence deux facteurs expliquant 71% de la variance totale, Le facteur 1 explique 55,52% de la variance totale et a de fortes corrélations positives sur avec tous les paramètres sauf NO_3^- . Ce facteur reflète la signature d'une recharge naturelle de l'eau et de l'interaction eau-roche. Le facteur 2 explique

15,42% de la variance totale de l'ensemble de données et a une forte corrélation positive avec NO_3^- . Ce facteur reflète la signature des activités anthropiques telles que les rejets d'eaux usées domestiques des zones rurales et l'usage des engrais azotés subventionnés dans le cadre du programme du soutien agricole initié par l'état.

Par conséquent, cette enquête confirme et s'aligne avec les résultats d'études antérieures selon lesquelles la menace de contamination des ressources en eau souterraine est devenue un fait qui doit être considéré par les différents secteurs, comme une menace sérieuse. La mentalité de l'utilisation des eaux usées pour irriguer les cultures et leur rejet dans la nature sans un préalable traitement doit être combattue, par l'installation de stations d'épuration dans les différents communes de la plaine de Tébessa, et par l'éducation, l'application et le renforcement des règlements juridiques régissant les ressources en eau. Les amendements chimiques et organiques des sols doivent être effectués hors des périodes des hautes eaux, et les doses d'irrigation doivent être calculées au prorata des besoins en eaux des cultures, pour limiter le transport des engrais vers la nappe phréatique.

Références bibliographiques

- A.Kass, I. Gavrieli, Y. Yechieli, A. Vengosh, A. Starinsky.** The impact of freshwater and wastewater irrigation on the chemistry of shallow groundwater: a case study from the Israeli Coastal Aquifer. *Journal of hydrology*. 2005 ;300 :314-331
- Agoumi A.** 2003 Vulnérabilité des pays du Maghreb face aux changements climatiques 'Besoin réel et urgent d'une stratégie d'adaptation et de moyens pour sa mise en œuvre'. *Perspectives des changements du climat*. Canada : IISD ; 2003.
- Ahmed S.** Application of Geostatistics in Hydrosociences. In: Thangarajan, M. (Ed.), *Groundwater* 321. Springer, Netherlands. 2007;78–111.
- Allen RG, et al.** Crop Evapotranspiration, Guidelines for Computing Crop Water Requirements, FAO 56; Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy, 1998; 300 pp.
- Allen RG, et al.** Operational estimates of reference evapotranspiration. *Agron. J.* 1989;81 (4):650–662.
- Anazawa K, Ohmori H.** The hydrochemistry of surface waters in andesitic volcanic area, Norikura volcano, central Japan. *Chemos.* 2005;59(5):605-615.
- Aoudjehane M, Bouzenoune A, Rouvier H, et al.** Halocinèse et dispositifs d'extrusion de Trias dans l'Atlas saharien oriental (NE algérien). *Géol. Méditerran.* 1992;19 (4):273-287.
- APHA.** Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. 17th ed. Washington, DC: American Public Health Association; 1989.
- APHA.** Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. 19th ed. Washington, DC: American Public Health Association; 1995.
- Aragüés R, Tanji KK.** 2003. Water quality of irrigation return flows In: Stewart BA, Howell TA, editors. *Encyclopedia of Water Science*, New York, USA: Marcel Dekker, 2003, p.502–506.
- Asawa GL.** Irrigation and water resources engineering. New Age International ; 2006.
- Bagnouls FR, GAUSSEN H.** Les climats biologiques et leur classification. In : *Annales de géographie*. Armand Colin, 2006 ; pp.193-220.
- Banwart SA, Gustafsson E, et al.** Hydrological and reactive processes during rapid recharge to fracture zone : the Aspö large scale redox experiment. *Applied geochemistry* 1999;14(7): 873-892.
- Barros R, Isidoro D, Aragüés R.** Three study decades on irrigation performance and salt concentrations and loads in the irrigation return flows of La Violada irrigation district (Spain) .*Agriculture Ecosystems and Environment*. 2012;15: 44-52

- Belkhiri L, Boudoukha A, Mouni L, Baouz T.** Application of multivariate statistical methods and inverse geochemical modeling for characterization of groundwater - A case study: Ain Azel plain (Algeria). *Geod.* 2010;159(3-4):390-398.
- Belkhiri L, Mouni L, Boudoukha A.** Geochemical evolution of groundwater in an alluvial aquifer: Case of El Eulma aquifer, East Algeria. *J African Earth Sci.* 2012;66–67:46–55.
- Belkhiri L, Mouni L, Sheikhy Narany T, Tiri A.** Evaluation of potential health risk of heavy metals in groundwater using the integration of indicator kriging and multivariate statistical methods. *Groundw Sustain Dev.* 2017;4:12-22.
- Belmiloud N.** Modélisation par SIG du potentiel de contamination par les nitrates dans la plaine du moyen Cheliff occidental. 2017. Thèse de doctorat.
- Bencer S, Boudoukha A, Mouni L.** Multivariate statistical analysis of the groundwater of Ain Djacer area (Eastern of Algeria). *Arab J Geosci.* 2016;9:248.
- Blavoux B, et Mudry J.** Influence des pluies estivales sur la qualité des réserves de l'aquifère karstique; rôle du sol et de l'épikarst dans la concentration des chlorures. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 1986, vol. 2, no 4, p. 667-674.
- Blés JL.** (1969): Contribution à l'étude des déformations cassantes de la feuille de Morsott (SE Constantinois – Algérie). Les microfracturations et leurs relations avec les failles et les plis. *Publications du Service Géologique de l'Algérie*, (Série N° 11), *Bulletin N° 39*, pp. 7-17.
- Board O.** Watershed Enhancement. Oregon watershed assessment manual. Prepared by Watershed Professionals Network. Salem. OR, 1999.
- Borrelli J.** Evaporation from Lakes and Large Bodies of Water. In *Encyclopedia of water science*, pp 318-320
- Boutera M, Rouabhia A, Lakhneche D, Zereg S.** Wastewater rejections impact on groundwater quality in semi-arid region. Case of Tebessa aquifer. *Geogr Tech.* 2012;1:19-27.
- Bouzenoune A.** (1993): Minéralisations péridiapiriques de l'Aptien calcaire: les carbonates de fer du gisement hématitique de l'Ouenza (Algérie Orientale). Thèse de Doctorat, Université Paris VI, 209 p.
- Burke JJ, Moench MH.** Groundwater and society: resources, tensions and opportunities. Themes in groundwater management for the twenty-first century. Department of International Economic and Social Affairs, Statistical Office, United Nations, 2000.

- Cao Y, Tang C, Song X, Liu C, Zhang Y.** Characteristics of Nitrate in Major Rivers and Aquifers of the Sanjiang Plain, China. *J Environ Monit.* 2012;14(10):2624–2633.
- Castany G.** Hydrogéologie: principes et méthodes. Paris: Dunod ; 1982.
- Chaponnière A.** Fonctionnement hydrologique d'un bassin versant montagneux semi-aride: cas du bassin versant du Rehraya (Haut Atlas marocain). 2005.
- Chen S, Wu W, Hu K, Li W.** The effects of land use change and irrigation water resource on nitrate contamination in shallow groundwater at county scale. *Ecol Complex.* 2010;7:131–138.
- Chevenine A., Popov Y., Douha Dj. et Benzeroual M.** (1989): Rapport sur les résultats de l'étude géologique complémentaire des feuilles 124 (Oued Kebarite), 125 (Ouenza), 150 (El Ouinet) et 151 (Boukhadra) pour la préparation à l'édition des cartes géologiques au 1/50.000. Partie 1, texte (1987-1988) O.R.G.M. Algérie (Rapport inédit).
- Chikhi-Aouimeur F.** (1980): Les Rudistes de l'Aptien supérieur de djebel Ouenza (algérie NE). Paléontologie, Contexte stratigraphique et paléogéographie. Thèse 3ème cycle, USTHB, Alger, 114 p.
- Clesceri LS, Greenberg AE, Eaton AD.** Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20th ed. Washington, DC: American Public Health Association; 1998.
- Cuello C.** Gastric cancer in Colombia: I. Cancer risk and suspect environmental agents. *J. Natl. Cancer Inst.* 1976;57:1015–1020
- Dagnélie P.** Theoretical and applied statistics. Volume 2: One-dimensional and two-dimensional inference. Edis. Boeck & Larcier, Brussels-Univ. 2006.
- Dajun Qin et al.** Assessing impact of irrigation water on groundwater recharge and quality in arid environment using CFCs, tritium and stable isotopes, in the Zhangye Basin, Northwest China. *Journal of hydrology* 2011;405:194-208.
- Datta KK, De Jong C.** Adverse effect of waterlogging and soil salinity on crop and land productivity in northwest region of Haryana, India. *Agric. Water Manag.* 2002;57:223–238. *Agronomy* 2018, 8, 23 13 of 15
- David L.** (1956): Étude géologique des monts de la haute Medjerda. Thèse Sci. Paris. Publ. Serv. Carte Géol. Algérie, N.S. Bull, n°11, 304p.
- Davie T.** Fundamentals of hydrology. 2nd edition, Taylor & Francis e-Library, 2008
- Davis SN, De Wiest RJM.** Hydrogeology. 1966.
- De Martonne E.** Nouvelle carte mondiale de l'indice d'aridité (Carte hors texte). In: *Annales de Géographie.* Armand Colin, 1942. p. 241-250.

- De Wiest RJM.** 1965. Geohydrology. John Wiley and Sons, New York, 366 pp.
- Debieche T.** Évolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle, Application à la basse plaine de la Seybouse - Nord-Est Algérien [Thèse de doctorat]. Doubs : University of Franche ; 2002.
- Dinka MO, Loiskandl W, Ndambuki JM.** Hydrochemical characterization of various surface water and groundwater resources available in Matahara areas, Fantalle Woreda of Oromiya region. *J Hydrol Reg Stud.* 2015;3:444-456.
- Djabri L, Hani A, Laouar R, et al.** Vulnérabilité des eaux à la pollution dans une zone à climat semi-aride : Région de Tébessa (extrême Est Algérien). *Bull. Serv. Géol. Nat.* Vol, 2008, vol. 19, no 2.
- Djabri L.** Contribution à l'étude hydrogéologique de la nappe alluviale de Tébessa «essai de modélisation » [DoctorateThesis]. France : Franche University; 1987
- Djabri L, Bouhsina S, Hani A.** Impacts of drought on water quality: the case of aquifers in eastern Algeria. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 2014;364:357-362.
- Dragon K.** Application of factor analysis to study contamination of a semi-confined aquifer (Wielkopolska Buried Valley aquifer, Poland). *J Hydrol.* 2006;331(1):272–279
- Drias T.** Hydrochemical characterization of alluvial aquifer of Tebessa-Morsott. Eastern Algeria. 2 nd ISCASE-2015 Dubai, 2015, p. 34.
- Dubourdiou G.** (1956): Étude géologique de la région de l'Ouenza (confins algéro-tunisiens). Thèse des Sciences, Paris, Publications du Service de la Carte Géologique de l'Algérie, Bulletin N° 10, Vol. 1, 659 p.
- Duffy CJ, Brandes D.** Dimension reduction and source identification for multispecies groundwater contamination. *J Contam Hydrol.* 2001;48(1-2):151-165.
- Durozoy G.** Carte géologique de l'Algérie à 1/50000, feuille n 206, Tebessa, avec notice explicative détaillée. Publications du Service de la Carte géologique de l'Algérie, Alger. 1956
- El-Ashry MT, Schilfgaard JV, Schiffman S.** Salinity pollution from irrigated agriculture. *Journal of soil and water conservation*, 1985;40(1):48-52.
- Emberger L.** Une classification biogéographique des climats. 1955.
- Fraser P.** Nitrate and human cancer: a review of the evidence. *Int. J. Epidemiol.* 1979;9:3–11.
- Freeze RA, Cherry JA. *Groundwater.* Prentice Hall, Englewood Cliffs. 1979

- Gangbazo G.** Gestion intégrée de l'eau par bassin versant: concepts et application. Québec, Québec: ministère de l'Environnement. 2004
- Ghodbane M, Boudoukha A, Benaabidate L.** Hydrochemical and statistical characterization of groundwater in the Chemora area, Northeastern Algeria. *Desalination and Water Treatment*. 2016;57(32):14858-14868.
- Ghrieb L.** Impact de la minéralisation des formations triasiques sur la qualité de l'eau et du sol en zone semi-aride, cas de la plaine Bekkaria-Tébessa (Extrême Nord-est Algérien). Doctorat de l'Université Badji Mokhtar Annaba, 175 p, 2011.
- Glynn PD, Plummer LN.** Geochemistry and the understanding of groundwater systems. *Hydrogeology Journal*. 2005;13:263-287.
- Goovaerts P.** Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *J Hydrol*. 2000;228(1-2):113-129.
- Güler C, Thyne GD.** Hydrologic and geologic factors controlling surface and groundwater chemistry in Indian Wells-Owens Valley area, southeastern California, USA. *J Hydrol*. 2004;285(1-4):177-198.
- Güler C, Thyne GD., Mccray JE, Turner A.** Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. *Hydrogeology journal*, 2002, vol. 10, no 4, p. 455-474.
- Gupta AK, Gupta SK, Patil RS.** Statistical analyses of coastal water quality for a port and harbour region in India. *Environ Monit Assess*. 2005;102(1-3):179-200.
- Hanson BR, Grattan SR, Fulton A.** Agricultural Salinity and Drainage, Revised edition. Division of Agriculture and Natural Resources. Publication 3375, University of California. 2006; pp.164.
- Hernandez M, Goodrich DC, Goff BF, W. G. Kepner WG, Edmonds CM and Jones KB.** Modeling Runoff Response to Land Cover and Rainfall Spatial Variability in Semiarid Watersheds, *Environmental monitoring and Assessment*, 2000;64:285-298.
- Hillel D.** 'Small-scale irrigation for arid zones: principles and options', FAO Technical Paper 2, Rome.1997
- Ivits E, Cherlet M, Tóth T, Lewinska KE, Tóth G.** Characterisation of productivity limitation of salt-affected lands in different climatic regions of Europe using remote sensing derived productivity indicators. *Land Degrad. Dev*. 2013;24:438-452.
- Jacintha TGA, Rawat KS, Mishra A, Singh SK.** Hydrogeochemical characterization of groundwater of peninsular Indian region using multivariate statistical techniques. *Appl Water Sci* 2017;7:3001-13.

- Jensen ME, Burman RD, Allen RG.** Eds. *Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements*; American Society of Civil Engineers: New York NY. 1990.
- Jermar MK.** *Water resources and water management*. Elsevier, 1987.
- Journal Officiel de la République Algérienne Démocratique et populaire n°18** du 18 mars 2011. DE n° 11–125 du 22 mars 2011 relatif à l'eau pour la consommation humaine.
- Kachigan SK.** *Statistical analysis: An interdisciplinary introduction to univariate & multivariate methods*. Radius Press, 1986.
- Karousakis K and Koundouri P.** *Water Management in Arid and Semi-Arid Regions Interdisciplinary Perspectives*, In; Koundouri P, Karousakis K, Assimacopoulos D, Jeffrey P and Manfred AL. 2006, *Water Management in Arid and Semi-Arid Regions*, Cheltenham, UK p03
- Karousakis K and Koundouri P.** A typology of economic instruments and methods for efficient water resources management in arid and semi-arid regions, In Phoebe Koundouri P, Karousakis K, Assimacopoulos D, Jeffrey P and Manfred AL. 2006, *Water Management in Arid and Semi-Arid Regions*. Cheltenham, UK p161
- Kendall MG, Stuart A.** *Functional and structural relationship. The advanced theory of statistics*, 1979;2:399-343.
- Kenneth M. Vigil PE.** *Clean Water An Introduction to Water Quality and Water Pollution Control. 2ed* Oregon State University Press. Corvallis. USA. 2003
- Khedidja A, Boudoukha A.** Risk assessment of agricultural pollution on groundwater quality in the high valley of Tadjenanet-Chelghoum Laid (Eastern Algeria). *Desalin Water Treat.* 2014;52(22-24):4174-4182.
- Kostas Chartzoulakis and Maria Bertaki.** Water use in agriculture on Mediterranean islands: present situation and future perspective In: Koundouri P, Karousakis K, Assimacopoulos D, Jeffrey P and Manfred AL. 2006, *Water Management in Arid and Semi-Arid Regions* Cheltenham, UK , p136
- Kowalski WM, Boudoukha A, Hemila ML, et al. Les stades d'effondrement du graben de Tébessa (confins Algéro-Tunisien) et la tectonique plicative Plio-Quaternaire. *Bull. Soc. Hist. Nat. Pays de Montbéliard*, 1997 ; p. 201-215.
- Kowalski WM, Boufaa K, et Pharissat A.** Les sédiments miocènes des environs de Tébessa (NE de l'Algérie) et leurs relations avec la tectonique. *Bull. Soc. Hist. Nat. Pays de Montbéliard*, 1996, p. 169-177.

- Kumar A, Kumar S T, Kumar SA.** Hydrogeochemical Investigation and Groundwater Quality Assessment of Pratapgarh District, Uttar Pradesh. *J Geol Soc India.* 2014;83:329-343
- Laborde JP.** Elements d'hydrologie de surface. UNSA, CNRS. 2000.
- Lambrakis N, Antonakos A, Panagopoulos G.** The use of multicomponent statistical analysis in hydrogeological environmental research. *Water Res.* 2004;38(7):1862-1872.
- Land F. A. O., et al.** Groundwater management: the search for practical approaches. FAO, 2003.
- Lasne E.** Etude du système hydrologique karstique des sources des Trois Fontaines (Saint-Loup de Gonois, Loiret). Contribution à la connaissance de la structure, du fonctionnement et de l'évolution de l'aquifère crayeux du Gâtinais (Sud est du Bassin de Paris). 1992. Thèse de doctorat. Thèse.
- Lenczewski M, Jardin P, et al.** Natural attenuation of trichloroethylene in fractured shale bedrock. *Journal of Contaminant Hydrology.* 2003;64(3-4): 151-168.
- Lichtenberg E, Shapiro LK.** Agriculture and nitrate concentrations in Maryland community water system well. *J. Environ. Qual.* 1997;26:145–153.
- Liu C, Yu J, Kendy E.** Groundwater exploitation and its impacts on the environment in the North China. *Water Int.* 2001;26 :265–272.
- Madre M.** Contribution à la l'étude géologique et métallogénique du djebel Ouenza (Est Algérien). Thèse de 3ème Cycle, Université de Paris.1969, 90 p.
- Manish K, Ramanathan AL, Rao MS, Kumar B.** Identification and evaluation of hydrogeochemical processes in the groundwater environment of Delhi, India. *Environ. Geol.* 2006;50(7):1025-1039.
- Maqsoud A, Veillette J, Bakalowicz M.** Hydrochemistry of the Esker Saint-Mathieu-Berry, Abitibi, Quebec. In: 57th Canadian Geotechnical Conference; 2004 Oct 24–26; Quebec, Canada.
- Maqsoud A.** Approche hydrologique et hydrochimique du caractère karstique éventuel d'hydrosystèmes souterrains de la craie du bassin de Paris. 1996. Thèse de doctorat. Lille 1.
- Matheron G.** La théorie de variables régionalisées et ses applications. Ecole nationale supérieure des mines de Paris 5.1971.
- McCoy J.** 2004. ArcGIS 9: Using ArcGIS Spatial Analyst. Esri Press.
- Monteith JL.** Evaporation and Environment; Cambridge University Press: Cambridge, 1965; 205–223.

- Muet P.** Structure, fonctionnement et évolution de deux systèmes aquifères karstiques du nord du Causse de Martel(Corrèze). 1985. Thèse de doctorat.
- Musy A.** Hydrologie générale. Page consultée le 30 avril 2018 de <http://echo.epfl.ch/hydrologie/>. 2005.
- Nikanorov AM, Brazhnikova LV.** Types and Properties of Water II: Water Chemical Composition of Rivers, Lakes and Wetlands. 2012.
- Ongley ED.** Control of water pollution from agriculture FAO Irrig and Drain Paper no 55, Rome, Italy. 1996 112 pp.
- Othmanine A.** Les minéralisations en fluorine, barytine, Pb, Zn et fer sidéritique autour du fossé de Tebessa-Morsott (Algérie). Relation entre paléogéographie aptienne, diapirisme, structure et métallogénie. Thèse de 3ème Cycle, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, France. 1987. 221 p.
- Penman HL.** Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. R. Soc. London, Ser. A 1948;193:120–146.
- Perthuisot V.** Structures et géométrie des diapirs maghrébins. Essai de synthèse. Mémoires du Service Géologique de l'Algérie, 1994 ;6 :153-159.
- Pilgrim DH, Chapman TC, and Doran DG.** Problems of rainfall-runoff modeling in arid and semiarid regions. *Hydrolog. Sci. J.*1988;33:379–400.
- Piper AM.** A graphic procedure in geochemical interpretation of water analyses. Trans Am Geophys Union 1944;25:914–928.
- Pohl W, Amouri M, Kolli O, et al.** A new genetic model for the North African metasomatic siderite deposits. *Mineralium Deposita.* 1986;21(3):228-233.
- Postel S.** Pillar of Sand - Can the Irrigation Miracle Last?, New York: WW Norton & Company Ltd Trade paperback edition. 1999.313 pages
- Qadir M, Quilléro E, Nangia V, Murtaza G, Singh M, et al.** Economics of salt-induced land degradation and restoration. *Nat. Resour. Forum.* 2014;38:282–295.
- Reyment RA, Jvreskog KG.** Applied Factor Analysis in the Natural Sciences. Appl Factor Anal Nat Sci. Cambridge Univ Press, Cambridge. 1996.
- Richards LA.** *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils.* Édité. US Department of Agriculture, Agricultural Handbook n° 60, Washington (USA). 1954. 160 p
- Roche M.** *Hydrologie de surface* (Gauthier-Villars ed.). Paris: ORSTOM. 1963.
- Rodier JBL, Merlet N, et al.** L'Analyse de l'eau 9e édition), Dunod, Paris 2009, 1526 Pages

- Rosegrant MW and Cai X.** ‘Global water demand and supply projections: results and prospects to 2025’, *Water International*. 2002;27:170–82
- Rouabhia A, Baali F, Fehdi C.** Impact of agricultural activity and lithology on groundwater quality in the Merdja area, Tebessa, Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 2010;3(3):307-318.
- Rouabhia A, Baali F, Hani A, Djabri L.** Impact des activités anthropiques sur la qualité des eaux souterraines d’un aquifère en zone semi-aride Cas de la plaine de la Merdja, Nord Est de l’Algérie. *Sécheresse*. 2009;20(3):279-85
- Rouabhia A, Baali F, Kherici N, Djabri L.** Vulnérabilité et risque de pollution des eaux souterraines de la nappe des sables miocènes de la plaine d’El MA EL Abiod (Algerie). *Sécheresse* 2004;15:347–352
- Rouabhia A, Fehdi Ch, Baali F, Djabri L, Rouabhia R.** Impact of human activities on quality and geochemistry of groundwater in the Merdja area, Tebessa, Algeria. *Environ Geol*. 2009;56:1259-1268.
- Rouvier H, Pertuisot V, Mansouri A.** Pb-Zn Deposits and salt-bearing diapirs in Southern Europe and North Africa. *Economic Geology*, 1985;80:666-687.
- Rowell DL.** *Soil Science Methods and Applications*. Wiley. New York: Longman Scientific & Technical; 1994.
- Runyon RP, Haber A,** *Fundamentals of Behavioral Statistics*, 3rd ed, Reading, Mass., Addison-Wesley. 2000
- Saleh A, Al-Ruwaih F, Shehata M.** Hydrogeochemical processes operating within the main aquifers of Kuwait. *J Arid Environ*. 1999;42:195–209
- Salmi-Laouar S, Laouar R, Boyce AJ, Zerdazi A, Arrouche Y.** Rapport isotopique du soufre de l’oxygène et du carbone dans le massif de Boujaber, NE algérien: Origine des minéralisations à Pb-Zn-Ba et source des fluides. *Bulletin du Service Géologique de l’Algérie*. 2004;15(1) :3-25.
- Schoeller H.** *Les eaux souterraines. Hydrologie dynamique et chimique. Recherche, exploitation et évaluation des ressources* Masson et Cie. Editions. 1962. 642 pages.
- Sedrati N, Djabri L, Chaffai H, et al.** Assessment of groundwater vulnerability by combining drastic and susceptibility index: Application to Annaba superficial aquifer (Algeria). In : *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing, 2016. p. 030012.
- Sedrati N, et Djabri L.** Contribution of hydrochemistry to the characterization and assessment of groundwater resources: the case of Tebessa alluvial aquifer

- (Algeria). Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences. 2014;364:458-463.
- Seghir K.** Vulnérabilité à la pollution, protection des ressources en eaux et gestion active du sous-système aquifère de Tébessa Hammamet (Est Algérien). 2008. Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar de Annaba.
- Seltzer P, Lasserre A., Grandjean A, et al.** Le climat de l'Algérie. Impr." La Typo-litho" et J. Carbonel, 1946.
- Selvakumar S, Ramkumar K, Chandrasekar N, Magesh N, Kaliraj S.** Groundwater quality and its suitability for drinking and irrigational use in the Southern Tiruchirappalli district, Tamil Nadu, India. *Appl Water Sci* 2017;7:411-20.
- Shaukat SS, Rao TA, Khan MA.** Impact of sample size on principal component analysis ordination of an environmental data set: effects on eigenstructure. *Ekologia* 2016;35:173–90.
- Shufeng Chen et al.** The effects of land use change and irrigation water resource on nitrate contamination in shallow groundwater at county scale. *Ecological Complexity*. 2010 ;7 :131–138
- SIGES Aquitaine.** Système d'information pour la gestion des eaux souterraines en Aquitaine, <http://sigesaqi.brgm.fr/>
- Stiff JR, Henry A, et al.** The interpretation of chemical water analysis by means of patterns. *Journal of Petroleum Technology*, 1951;3(10):15-23.
- Tanji, KK, Kielen, NC.** Agricultural drainage water management in arid and semiarid areas FAO Irrig Drain Paper no 61, Rome, Italy. 2002;188 pp.
- Thibiéroz J. et Madre M.** Le gisement de sidérite du Dj. Ouenza (Algérie) est contrôlé par un golf de mer aptienne. *Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle de l'Afrique du nord*. 1976;67 :3-4.
- Udayalaxmi G, Himabindu D, Ramadass G.** Geochemical evaluation of groundwater quality in selected areas of Hyderabad, A.P., India. *Indian J Sci Technol*. 2010;3(5):546-553.
- UN.** World population prospects: the 1994 revision. New York, USA: United Nations Population Division; 1995.
- UNESCO.** *International Glossary of Hydrology*. Paris. 1992. 413 pp.
- Vacher, HL.** Computational geology 29, quantitative literacy: Spreadsheets, range charts and triangular plots. *Journal of Geoscience Education*. 2005;53(3):324–333.

- Vaessen V, Brentführer R.** L'intégration de la gestion des eaux souterraines pour les Organismes de Bassins Transfrontaliers en Afrique - un manuel de formation produit par AGW-Net, BGR, IWMI, Cap Net, RAOB, et IGRAC. 2015
- Van DH, Solomon SJDK, et al.** Natural and temporal variation in groundwater chemistry in fractured, sedimentary rocks : scale and implications for solute transport. *Applied geochemistry* 2005;20:861–873.
- Vigil KM.** Clean water. As Introduction to Water Quality and Water Pollution Control, 2003.
- Vila JM.** Mise au point et données nouvelles sur les terrains triasiques des confins algéro-tunisiens: Trias allochtone « glacier de sel » sous-marins et vrais diapirs. *Mémoire du Service Géologique de l'Algérie*, 1994;6 :105-152.
- Vila JM.** La chaîne alpine de l'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens. These de Doctorat-es-sciences, Université Pierre et Marie curie. 1980.
- Vila JM.** Première étude de surface d'un grand " glacier de sel " sous-marin; l'est de la structure Ouenza-Ladjebel-Meridef (confins algéro-tunisiens); proposition d'un scénario de mise en place et comparaisons. *Bulletin de la Société géologique de France*, 1995;166(2) :149-167.
- Vinten AJA, Dunn SM.** Assessing the effects of land use on temporal change in well water quality in a designated nitrate vulnerable zone. *Science of the Total Environment*, 2001;265(1-3):253-268.
- Wheater H , Sorooshian S, Sharma KD.** Hydrological Modelling in Arid and Semi-Arid Areas. Cambridge university press. 2008
- WHO.** WHO Guidelines for drinking-water quality, 4th ed. Geneva, Switzerland: World Health Organization; 2011.
- Woessner WW.** Stream and fluvial plain ground water interactions: rescaling hydrogeologic thought. *Groundwater*. 2000;38(3):423-429.
- Yahya HSA, Jilali A, Mostareh MMM, Chafik Z, Chafi A.** Microbiological, physicochemical, and heavy metals assessment of groundwater quality in the Triffa plain (eastern Morocco). *Appl Water Sci* 2017;7:4497–512.
- Yen ST, Liu S, Kolpin DW.** Analysis of nitrate in near-surface aquifer in the midcontinental United States: an application of the inverse hyperbolic sine Tobit model. *Water Resour. Res.* 1996;32 :3003–3011.

- Zereg S.** Impact des retours d'eau d'irrigation sur la ressource en eau souterraine des régions semi arides, exemple des plaines de Tébessa, Chéria et El Ma El Abiod, Est Algérien (mémoire de magistère). Batna : University of Hadj Lakhdar ; 2010
- Zhao-Zhong Feng et al.** Soil N and salinity leaching after the autumn irrigation and its impact on groundwater in Hetao Irrigation District, China. *Agricultural Water Management*. 2005;71:131–143
- Zhu JG.** Present situation of nitrate pollution and study prospect. *Acta Pedol. Sin.* 1995 ;32 (1) :62–69.

Annexe

Productions scientifiques réalisées dans le cadre de la thèse :

- Auteurs dans l'ordre : Salah Zereg, Abderrahmane Boudoukha, Lahcen Benaabidate
- Titre : Impacts of natural conditions and anthropogenic activities on groundwater quality in Tebessa plain, Algeria
- Intitulé du journal : Sustainable Environment Research
- Année, volume et numéros de pages : 2018
- DOI : 10.1016/j.serj.2018.05.003
- ISSN : 2468-2039

Piézométrie de la plaine de Tébessa : Décembre 2001

N°	X	Y	Côte topo.	Profondeur	Niv. Piéz
1	973.15	253.25		17.6	
2	971.95	249.2		31.5	
3	971.4	250.8		26	
4	970.75	250.45		27.8	
5	975.65	255.45		5	
6	975.8	255.25		5	
7	975.15	255.75		5.2	
8	974.1	255.8		19.6	
9	974.3	256.1		19.5	
10	973.25	253.25		5.7	
11	984.65	251.75	798	5.6	792.4
12	994.25	248.65	808	4.6	803.4
13	994.45	248.35	806	4.4	801.6
14	994.5	248.6	807	4.6	802.4
15	995.1	248.1	820	4.2	815.8
16	995.4	248	820	2.6	817.4
17	990.55	250.85	810	9.1	800.9
18	989.65	251.75	801	1.4	799.6
19	988.25	252.3	790	4	786
20	988.8	252.7	790	1.2	788.8
21	1002	245	881	5.55	875.45
22	999	246.1	848	10.5	837.5
23	998.15	246.7	862	7	855
24	1003.1	245.7	890	31	859
25	1002.4	245.8	883	26.1	856.9
26	998.3	246.2	854	25	829
27	996.3	246.9	903	28	875
28	995.3	247.35	828	0.1	827.9
29	994.9	250.15	820	8.5	811.5
30	995.55	252	844	27.3	816.7
31	985.85	258.35	776	26.8	749.2
32	987.3	256.2	820		

33	988.05	255.35	818		
34	987	256.1	812		
35	990.6	250.2	818	9.1	808.9
36	990.1	250.35	815	10.7	804.3
37	995.4	247.2	935	11.4	923.6
38	995.15	247.7	935	16	919
39	995	247.5	830	3.75	826.25
40	992.75	248.1	831	3.75	827.25
41	992.8	248.25	850	3.1	846.9
42	992.5	248.15	843	5.52	837.48
43	992.7	248.1	850	3.8	846.2
44	993.08	248.2	838	2.4	835.6
45	993.15	248.05	840	3.5	836.5
46	993.7	247.87	828		
47	992.65	248.55	830	2.45	827.55
48	992.98	247.9	990	3.8	986.2
49	992.8	248	850	4.15	845.85
50	1002.85	245.9	889	29	860
51	1002.7	246	885	31.8	853.2
52	1003.95	247.3	891	19.45	871.55
53	1002.5	246.3	889	19.5	869.5
54	1002.4	245.2	883	24	859
55	993.9	253.85		12.7	
56	973.1	253.4		14.8	
57	973.35	254		21.7	
58	973	254.35		21.1	
59	973.3	254.25		21.1	
60	972.95	254.1		28.8	

Précipitations mensuelles et cumuls annuels à la Station de Tébessa

Année	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUIL	AOU	Total
82/83	21.7	14.2	11	4.5	3.9	6.3	12.4	15.2	19	23.3	24.5	24.1	180.1
83/84	20.7	17.3	9.2	9.7	7.7	7.4	9.2	11.8	17	24.2	28	25.9	188.1
84/85	21.5	15.9	10.8	5.7	4.7	6.7	9.3	15.3	18.9	22.5	27.1	26	184.4
85/86	21.6	15	12.2	7.2	6.1	6	8.5	13	17	23.1	26.1	25.1	180.9
86/87	20.6	14.5	12	6.4	5.4	10.4	8.3	14.2	16.9	25.1	27.7	25.6	187.1
87/88	20.4	15.7	13	8	6.3	8.1	9.4	13.7	19.9	22	25	26.8	188.3
88/89	21	16.6	10.2	6.4	6.3	7.7	8.8	14.3	16.7	24.3	26.7	27.9	186.9
89/90	23.6	19.3	10.7	10.5	8.2	7.4	9.9	14.8	20.5	22.5	28	26.7	202.1
90/91	20.6	18.2	11.6	5.8	5.4	7.2	11.5	13.7	18.2	20.9	25.6	26.1	184.8
91/92	22.2	15.5	13.4	10.7	6.1	10.4	10.4	12.7	17.2	25.1	24.2	22.5	190.4
92/93	24.1	20	11.5	5.5	5.5	6.8	11.6	10.4	14.2	21.9	26.3	25.6	183.4
93/94	21.8	16.7	10.6	5.5	4.7	6.7	9.4	11.8	16.3	20.9	23.9	25.7	174
94/95	21.9	18	12.1	7.8	5.2	5.6	8.7	13.9	19.2	24.8	26.8	27	191
95/96	22.3	19.1	11.1	7.7	7.5	8.9	11.9	11.8	21.9	24.2	27	28.6	202
96/97	23.6	16.7	13.2	8.1	5.7	10.3	9.2	12.7	20.1	22.9	27.1	24.6	194.2
97/98	21.1	16.3	11.3	9.8	9	6.3	10.1	12.4	18.2	20.8	25.9	26.6	187.8
98/99	20.3	15	12.4	10.2	8.7	9.3	9.3	1.2	20.4	26.6	27.5	25.2	186.1
99/00	20.5	17	11.8	8.5	7.2	8.2	9.8	15.1	17.7	24.6	27.8	25.7	193.9
00/01	23.2	15	10.2	6.3	7.1	5.8	10.2	14.9	22.1	25.8	26.2	28.9	195.7
01/02	23.6	19.2	11.1	7.1	4.1	7.8	11.7	16.1	21	22.4	27.5	26.8	198.4
02/03	22.1	15.9	12.8	9.4	8	7.5	15.6	14	19.6	25	28.4	27.1	205.4
03/04	22.3	21.1	11.8	6.8	6.3	9	12.5	15	19.4	25.1	26.6	24.9	200.8
04/05	21.2	17.8	12.2	8.8	6.9	6.1	10	14.1	18.9	25.2	29.2	27.4	197.8
05/06	21.5	19.6	12.3	7	6.9	9.6	11.2	12.8	15.9	22.4	26.2	27	192.4
06/07	20.8	20.5	10.2	8.1	4.5	4.9	11.2	14.2	21.1	23.7	28.5	25.9	193.6
07/08	21.8	16.9	11.7	7.8	6.6	7.9	9.9	12.5	18.6	23.5	26.4	26.2	
Moyenne	21.8	17.2	11.6	7.7	6.3	7.6	10.4	13.1	18.7	23.6	26.7	26.2	15.9
Min	20.3	14.2	9.2	4.5	3.9	4.9	8.3	1.2	14.2	20.8	23.9	22.5	12.3
Max	24.1	21.1	13.4	10.7	9.0	10.4	15.6	16.1	22.1	26.6	29.2	28.9	18.9