

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

KASDI MERBAH-OUARGLA UNIVERSITY
UNIVERSITE KASDI MERBAH- OUARGLA



جامعة قاصدي مرباح-ورقلة
Année 2019

Faculté des Hydrocarbures, des Energies Renouvelables et des Sciences de
la Terre et de l'Univers

Département des Sciences de la Terre et de l'Univers

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

**Étude de la qualité des eaux souterraines et
vulnérabilité à la pollution d'une nappe
superficielle à l'extrême Est algérien :
Cas de la région de Tébessa**

Option : **Hydrogéologie**

Par : **Louiza BOUCHAGOURA**

Devant le Jury

Président :	Imed Eddine NEZLI	Pr.	Univ. Kasdi Merbah, Ouargla.
Encadreur :	Mohamed DJIDEL	Pr.	Univ. Kasdi Merbah, Ouargla.
Examineurs :	Fethi MEDJANI	MCA	Univ. Kasdi Merbah, Ouargla.
	Sofiane LABAR	Pr.	Univ. Chadli Bendjedid, El Tarf.
	Nafaa BRINIS	MCA	Univ. Mostefa Ben Boulaïd, Batna.
	Lamine SAYAD	MCA	Univ. Badji Mokhtar, Annaba.

ملخص

تعتبر دراسة جودة المياه في الطبقة الجوفية الغرينية في حوض تبسة ضرورية لتقييم جودة الهيدروكيميائية واستخداماتها وأصل ملوثها. وبالتالي، الفهم الدقيق لسلوك طبقة المياه الجوفية، وضعفها وأصل تمعدن المياه باستخدام الأدوات الجيوكيميائية التي يمكن أن تؤدي إلى المعلومات ذات الصلة حول عمليات التمدن، كيمياء المياه تحت الأرض واستخداماتها. أظهرت النتائج أن المياه الجوفية مالحة بواجهات كيميائية سائدة "كبريتات المغنيسيوم". سمحت العلاقات التي أقيمت بين تركيزات العناصر الرئيسية بتوصيف أفضل للمياه الجوفية المدروسة، وخاصة طريقة الحصول على التمدن. يحدث هذا الأخير بشكل أساسي بسبب المعادن التبخرية (الجبس، الأنهدريت والهاليت) والتي تكون قليلة التشبع وقد تذوب أكثر، مما يؤدي إلى زيادة في التركيز الكلي. في حين أن المعادن كربونات مفرطة التشبع وتميل إلى التعجيل. يوضح تطور مستويات النترات تدهور الحالة الطبيعية للمياه الجوفية بسبب التلوث المرتبط بالنشاط الزراعي من خلال الاستخدام المفرط للأسمدة. على الرغم من هذا التنوع الكيميائي، فإن الماء مناسب عمومًا للاستهلاك البشري، باستثناء الآبار الواقعة بالقرب من المزارع. بالإضافة إلى ذلك، أكثر من 50 ٪ من العينات يمكن استخدامها للري.

الكلمات المفتاحية: شبه جاف، الحوض الهيدروغرافي، العرضة للتلوث، الاستشعار عن بعد، نظم المعلومات الجغرافية، الهيدروجيوكيمياء.

Abstract

The study of the water quality of the alluvial aquifer of the Tebessa basin is necessary to assess the hydrogeochemical quality, its uses and the origin of its pollutant. Thus, a thorough understanding of the behaviour of aquifers, their vulnerability and the origin of water mineralization using geochemical tools can lead to relevant information on mineralization processes, groundwater chemistry and their uses.

The results show that the groundwater is saline with a dominant chemical facies "Magnesium sulphate". The relationships established between the concentrations of major elements allowed for a better characterization of the waters of the aquifer studied, in particular the mode of acquisition of mineralization. The latter is mainly caused by evaporite minerals (gypsum, anhydrite and halite) which are under-saturated and can dissolve further, thus increasing the overall concentration. While carbonate minerals are supersaturated and tend to precipitate. The evolution of nitrate levels shows a deterioration of the natural state of groundwater by pollution linked to agricultural activity through the excessive use of fertilisers. Despite this chemical diversity, water is generally safe for human consumption, with the exception of wells near farms. In addition, more than 50% of the samples can be used for irrigation.

Keywords: semi-arid, watershed, vulnerability, remote sensing, GIS, Hydrogeochemistry.

Résumé

L'étude de la qualité de l'eau de l'aquifère alluvial du bassin de Tebessa est nécessaire pour évaluer la qualité hydrogéochimique, ses utilisations et l'origine de son polluant. Ainsi, une compréhension approfondie du comportement des aquifères, de leur vulnérabilité et de l'origine de la minéralisation de l'eau à l'aide d'outils géochimiques qui peut mener à des informations pertinentes sur les processus de minéralisation, la chimie des eaux souterraines et leurs utilisations.

Les résultats montrent que les eaux souterraines sont salines avec un faciès chimique dominant "Sulfate de magnésium". Les relations établies entre les concentrations en éléments majeurs ont permis une meilleure caractérisation des eaux de l'aquifère étudié, en particulier le mode d'acquisition de la minéralisation. Cette dernière est principalement causée par les minéraux évaporitiques (gypse, anhydrite et halite) qui sont sous-saturés et peuvent se dissoudre davantage, entraînant ainsi une augmentation de la concentration globale. Alors que les minéraux carbonatés sont sursaturés et ont tendance à précipiter. L'évolution des teneurs en nitrates montre une détérioration de l'état naturel des eaux souterraines par une pollution liée à l'activité agricole par l'utilisation excessive des engrais. Malgré cette diversité chimique, l'eau est généralement propre à la consommation humaine, à l'exception des puits situés près des fermes. De plus, plus de 50 % des échantillons sont utilisables pour l'irrigation.

Mots clés : semi-aride, bassin versant, vulnérabilité, télédétection, SIG, Hydrogéochimie.

Dédicace

Je dédie cette thèse à :

La mémoire de mes chers parents et mes sœurs Leila et Zohour qui rêvaient de ce jour, je n'oublierai jamais leurs sacrifices, leurs endurance et leurs conseils prodigieux qui restent toujours dans mon esprit.

Que Dieu, le miséricordieux, les accueille dans son éternel paradis.

Mon époux, qui avec son dévouement et ses sacrifices ce travail a pu voir le jour. Mes très chers enfants Rayane, Kaouther et Abdenour, tout étonnés que leur maman ait enfin terminé sa thèse ! Je vous dédie ce travail en espérant que votre vie soit comblée de réussite et de succès.

Ma sœur Zineb, mes frères Ali et Zouhir qui m'ont toujours donné l'espoir d'aller de l'avant. A travers ce modeste travail je leur manifeste ma profonde affection et attachement.

Mes nièces et neveux, espérant pour eux une vie pleine de joie, de succès et de bonheur. Tous mes ami(e)s qui ont toujours été à côté de moi toutes ces années en particulier : Mohamed, Fethi, Nafaa, Zouhir, Abdelmalek, Zidane, Hichem, Siham, Souad, Zmel, Soraya, Khaoula, Denise, Lilia... que vous trouviez ici le témoignage de mes sentiments les plus sincères et ma profonde reconnaissance.

A tous ceux ou celles qui me sont chers et que j'ai omis involontairement de citer.

Louiza

Remerciement

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer mes profonds et sincères remerciements, avant tout, à Allah le tout puissant qui m'a donné le courage et la force pour mener à bout ce modeste travail.

Ma gratitude et mes respects à mon directeur de thèse Monsieur DJIDEL Mohamed pour avoir dirigé et suivi ce travail de recherche. C'est grâce à son encadrement exemplaire, ses amples conseils, ses aides précieuses et ses disponibilités permanentes que ce travail a pu être réalisé. Il ne m'est guère possible d'exprimer en quelques mots ce que je lui dois. Je garderai toujours un souvenir très vif de son dynamisme et sa grande compétence professionnelle et sa qualité humaine, j'en suis très flattée et amplement gâtée de vous avoir comme encadrant.

Mes sincères remerciements s'adressent aux membres du jury qui ont bien voulu accepter de lire et juger ce travail. Le Professeur Nezli Imed Eddine a bien voulu m'honorer en présidant ce jury, de même que les Professeurs Labar Sofiane, Brinis Nafaa, Medjani Fethi et Sayad Lamine qui ont bien voulu y siéger et enrichir le débat.

Tout d'abord, je salue la très importante contribution de Mr Medjani Fethi à ce travail, car tout au long de cette période il n'a cessé de me prêter son soutien scientifique et moral. Je le remercie aussi très sincèrement pour sa gentillesse, sa sympathie et son ambiance agréable.

De la même façon, je rends à Mr Brinis Nafaa un sincère hommage pour ses précieux conseils pratiques et son soutien total et sans faille dans les moments délicats, que seul un homme ayant des qualités humaines comme lui, peut amener à prodiguer. Je lui en suis infiniment gré.

Mes sincères remerciements vont également à mes collègues du département des sciences de la terre et de l'univers. Université de Ouargla.

Je réserve une attention redevable à mes ami(e)s et collègues de la faculté des sciences de la nature et de la vie. Université de Sétif.

Il est bon et juste d'évoquer l'appui moral ainsi que la sollicitude trouvée auprès de toute ma famille. Je tiens à exprimer mes sentiments les plus respectueux et ma profonde reconnaissance à ma très chère sœur Zineb, mes frères Ali et Zouhir, mon mari Yazid, mes très chers enfants Rayane, Kaouther et Abdenour, mes nièces et neveux, pour leur inestimables soutien Durant ces années.

Enfin, que tous ceux qui n'ont pas été cité dans ce travail tout en ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de cette œuvre, trouvent à travers celle-ci l'éclat de leur fierté et qu'ils sachent que je leur en suis reconnaissante.

Table des matières

TABLE DES MATIERES	VI
LISTE DES FIGURES	XI
LISTE DES TABLEAUX	XIII
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : DESCRIPTION GENERALE DE LA ZONE D'ETUDE	3
1. INTRODUCTION	3
2. SITUATION GEOGRAPHIQUE :	3
3. SITUATION ADMINISTRATIVE :	3
4. APERÇUS SOCIO-ECONOMIQUE :	4
4.1. Agriculture :	4
4.2. Tourisme :	4
4.3. Industrie :	4
5. RELIEFS ET GEOMORPHOLOGIE :	5
5.1- Géomorphologie :	5
5.1.1. Les Montagnes :	6
5.1.2. Cuvette (graben) :	6
5.1.3. La Végétation :	7
6. RESEAU HYDROGRAPHIQUE :	7
CHAPITRE II : HYDROCLIMATOLOGIE	9
1. INTRODUCTION :	9
2. PLUVIOMETRIE :	9
2.1. Carte des moyennes pluviales :	9
2.2. Variation interannuelle de la pluviométrie :	10
2.3. Variation des moyennes mensuelles des précipitations :	10
2.4. Précipitations saisonnières :	11
2.5. Le quotient pluviométrique :	11
3. LES TEMPERATURES :	12
4. LE VENT :	13
5. REGIME CLIMATIQUE :	13
5.1. Courbe Pluvio-thermique :	13
5.2. L'indice d'aridité mensuel de De Martonne :	14
6. L'EVAPOTRANSPIRATION :	15
6.1. L'évapotranspiration potentielle :	15
6.1.1. Définition :	15
6.1.2. Formule de Thornthwaite :	15

6.2. <i>Evapotranspiration Réelle (ETR)</i>	16
6.2.1. Formule de Turc :	16
6.2.2. Méthode de Thornthwaite :	16
6.3 <i>Estimation des réserves facilement utilisables</i> :	17
6.4. <i>Indice thermique mensuel</i>	17
6.5. <i>Indice thermique annuel</i>	17
6.6. <i>Estimation du ruissellement et de l'infiltration</i> :	17
6.6.1. Le ruissellement :	17
6.6.2. Calcul de l'infiltration	17
7. BILAN HYDROLOGIQUE :	18
8. CONCLUSION :	19
CHAPITRE III : CADRE GÉOLOGIQUE ET STRUCTURAL	20
1. STRATIGRAPHIE ET DESCRIPTION DES FACIES.....	20
1.1. <i>Le Trias</i>	20
1.2. <i>Le jurassique</i>	22
1.3. <i>Le barrémien</i>	22
1.4. <i>L'Aptien</i>	22
1.4.1. L'Aptien marneux	23
1.5. <i>Le Clansayésien</i>	23
1.6. <i>L'Albien</i>	23
1.7. <i>Le Vraconien</i>	23
1.8. <i>Le Cénomaniens</i>	23
1.9. <i>Le Turonien</i>	24
1.9.1. Le Campanien-Santonien	24
1.10. <i>Le Maestrichtien</i>	24
1.11. <i>Le Paléocène</i>	24
1.12. <i>L'Eocène</i>	24
1.13. <i>Le Miocène</i>	25
1.14. <i>Le Quaternaire</i>	25
1.14.1 Formations actuelles et récentes	26
1.14.2. Formations anciennes	26
2. TECTONIQUE DE LA REGION	27
2.1. <i>Les phases de l'orogénèse</i>	27
2.2. <i>La phase compressive fini -Lutétienne</i>	27
2.3. <i>La phase distensive du Miocène Inférieur</i>	27
2.4. <i>La phase compressive du Miocène supérieur</i>	28
2.5. <i>La phase compressive du Pliocène Inférieur</i>	28
2.6. <i>La phase compressive du pliocène Supérieur</i>	28
2.7. <i>La formation du fossé d'effondrement de Tébessa</i>	29
2.8. <i>Commentaire sur la tectonique</i>	30

3. CONCLUSION.....	30
CHAPITRE IV : SITES ET PROCÉDURE.....	32
1. INTRODUCTION.....	32
2. GEOMETRIE DE L'AQUIFERE.....	32
2.1. Essai de corrélation entre la géologie et la géophysique.....	33
2.1.1. Ain Chabro :.....	33
2.1.2. Tébessa :.....	34
2.1.3. Bekkaria :.....	35
2.2. Mise en parallèle des profils géophysiques et des coupes lithologiques.....	35
3. PIEZOMETRIE.....	36
3.1. Carte piézométrique de la période des hautes eaux (mars 2009).....	37
3.2. Carte piézométrique de la période des basses eaux (juillet 2009).....	37
4. CARTE DES CONDITIONS AUX LIMITES.....	38
4.1. Conditions aux limites et apports souterrains :.....	38
5. CONCLUSION :.....	40
CHAPITRE V : MATERIELS ET METHODES.....	41
1. LES LOGICIELS UTILISES :.....	41
1.1. Global Mapper :.....	41
1.2. ArcGis 10.3 :.....	41
1.3. ENVI 5.1 :.....	41
1.4. Google Earth Pro :.....	42
1.5. Diagrammes :.....	42
1.6. Preeql v 2.15 :.....	42
1.7. AqQA :.....	42
1.8. Origin :.....	42
2. METHODES :.....	42
2.1. La modélisation hydrologique :.....	42
2.1.1. Processus d'extraction du réseau hydrographique.....	43
2.1.2. Extraction de la carte des pentes.....	44
2.2. Modélisation de la vulnérabilité des eaux souterraines.....	44
2.2.1. Données Raster (grille) :.....	45
2.2.2. Données Vectorielles (Shape) :.....	48
2.2.3. Données Alphanumériques (Métadonnées) :.....	50
2.3. La rasterisation des données.....	52
2.4. Reclassification et ajout des cotes DRASTIC.....	52
2.5. Calcul de l'indice de vulnérabilité des eaux souterraines DRASTIC.....	54
2.6. Validité de la méthode DRASTIC :.....	55
2.7. Hydrochimie :.....	55
2.7.1. Mode d'échantillonnage :.....	56

2.7.2. Méthodes d'analyses des eaux :	56
2.7.3. Méthodes de traitement des résultats :	57
CHAPITRE VI : VULNERABILITE A LA POLLUTION ET PROTECTION DES RESSOURCES EN EAU	60
1. HYDROLOGIE :	60
1.1. Caractéristique de la forme du bassin versant :	60
1.2. Carte des pentes :	60
1.3. Réseau hydrographique :	61
2. OCCUPATION DU SOL :	62
2.1. Photo-interprétation des images satellitaires :	62
2.2. Classification supervisée des images :	62
2.3. Evolution temporelle des états de surface (Change détection)	62
2.3.1. Les matrices de changements :	62
2.3.2. Les changements saisonniers (Avril et Aout) :	62
2.3.3. Le résultat final des évolutions temporelles durant les 2 dates :	63
2.4. La cartographie des changements :	64
2.4.1. Evolution temporelle entre Avril et Aout :	64
2.4.2. La carte d'occupation du sol durant la période d'étude :	64
3. LES PARAMETRES DE VULNERABILITE DRASTIC DES EAUX SOUTERRAINES	65
3.1. Profondeur de la nappe (D)	65
3.2. Recharge efficace (R).....	66
3.3. Nature de la zone saturée (A).....	67
3.4. Sol (S).....	67
3.5. Topographie (T)	68
3.6. Impact de la zone vadose (I).....	68
3.7. Perméabilité (C).....	69
4. INDICE DE VULNERABILITE DRASTIC	69
5. VALIDATION DE LA CARTE DE VULNERABILITE	70
6. CONCLUSION :	71
CHAPITRE VII : ETUDE HYDROCHIMIQUE	73
1. DESCRIPTION DES RESULTATS D'ANALYSES CHIMIQUES DE L'EAU :	73
1.1. Paramètres physico-chimiques :	73
1.1.1. Potentiel d'hydrogène (pH) :	73
1.1.2. La conductivité électrique :	73
1.1.3. Les éléments majeurs :	74
2. FACIES CHIMIQUES DES EAUX :	75
3. GEOCHIMIE DES EAUX SOUTERRAINES.....	76
3.1. Indice de saturation.....	76
3.2. Indice d'échange de base (i.e.b) :	77

3.3. Diagramme de concentration :.....	78
4. LA QUALITE DES EAUX	79
4.1. La potabilité des eaux :.....	79
4.2. Aptitude des eaux à l'irrigation :	81
5. CONCLUSION :	82
CONCLUSION GENERALE	84
REPERES BIBLIOGRAPHIQUES	85

Liste des figures

FIGURE 1. SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA REGION D'ETUDE	3
FIGURE 2. CARTE ALTIMETRIQUE DU BASSIN VERSANT DE LA PLAINE DE TEBESSA	5
FIGURE 3. CROQUIS GEOMORPHOLOGIQUE DE LA REGION DE TEBESSA (IN DJABRI, 1987).....	6
FIGURE 4. RESEAU HYDROGRAPHIQUE DU BASSIN VERSANT DE LA PLAINE DE TEBESSA	7
FIGURE 5. PRECIPITATIONS MOYENNES ANNUELLES (1965-1995).....	9
FIGURE 6. EVOLUTION DES PRECIPITATIONS ANNUELLES DANS LA STATION DE TEBESSA (1972-2012)	10
FIGURE 7. DISTRIBUTION INTERANNUELLE DES PRECIPITATIONS DANS LA STATION DE TEBESSA (1972-2012).....	10
FIGURE 8. REPARTITION SAISONNIERE DES PRECIPITATIONS (1972/2012)	11
FIGURE 9. REPARTITION MENSUELLE DES TEMPERATURES (1972/2012)	13
FIGURE 10. DIAGRAMME PLUVIO-THERMIQUE DE LA STATION DE TEBESSA	14
FIGURE 11. REPRESENTATION GRAPHIQUE DU BILAN HYDRIQUE (THORNTHWAITE) STATION DE TEBESSA	18
FIGURE 12. COLONNE STRATIGRAPHIQUE SYNTHETIQUE DE LA REGION DE TEBESSA	21
FIGURE 13. CARTE DES AFFLEUREMENTS GEOLOGIQUES DE LA REGION D'ETUDE.....	25
FIGURE 14. ESQUISSE STRUCTURALE DU FOSSE D'EFFONDREMENT DE TEBESSA ET SES ABORDS (DUROZOY, 1956) MODIFIEE.....	30
FIGURE 15. CARTE D'IMPLANTATION DES SONDAGES ELECTRIQUES (DJABRI, 1987)	32
FIGURE 16. COUPES ELECTRIQUES A TRAVERS LA PLAINE DE TEBESSA SELON LES PROFILS (J, K, L ET M) (IN DJABRI, 1987)	33
FIGURE 17. COUPES ELECTRIQUES A TRAVERS LA PLAINE DE TEBESSA SELON LES PROFILS (R, S, T ET U) (IN DJABRI, 1987)	34
FIGURE 18. COUPES ELECTRIQUES A TRAVERS LA PLAINE DE TEBESSA SELON LES PROFILS (V, W, X ET XY) (IN DJABRI, 1987).....	35
FIGURE 19. MISE EN PARALLELE DES PROFILS GEOPHYSIQUES ET DES COUPES LITHOLOGIQUES (CAS DU PROFIL R) (IN DJABRI, 1987)	36
FIGURE 20. CARTE D'INVENTAIRE DES POINTS D'EAU (GHRIEB, 2011)	37
FIGURE 21. CARTE PIEZOMETRIQUE MARS 2009/ PLAINE DE TEBESSA (GHRIEB, 2011).....	37
FIGURE 22. CARTE PIEZOMETRIQUE JUILLET 2009/ PLAINE DE TEBESSA (GHRIEB, 2011)	38
FIGURE 23. CARTE DES CONDITIONS AUX LIMITES. (DJABRI, 1987)	39
FIGURE 27. ILLUSTRATION DE LA CHAINE DE GEOTRAITEMENTS POUR LA DELIMITATION DU BASSIN VERSANT.....	43
FIGURE 28. ORGANIGRAMME GENERAL DU PROCESSUS D'EXTRACTION DU RESEAU HYDROLOGIQUE.....	44
FIGURE 29. ORGANIGRAMME DE LA MODELISATION DE LA VULNERABILITE DES EAUX SOUTERRAINES.....	45
FIGURE 30. IMAGE MNT DU BASSIN VERSANT DE LA ZONE D'ETUDE	46
FIGURE 31. IMAGE SENTINEL-2 DU BASSIN VERSANT DE LA ZONE D'ETUDE	46
FIGURE 32. ORGANIGRAMME DU PROCESSUS GENERAL DE TRAITEMENTS DES IMAGES SENTINEL-2	47
FIGURE 33. CARTE D'AFFLEUREMENTS GEOLOGIQUES DU BASSIN VERSANT DE LA ZONE D'ETUDE	49
FIGURE 34. CARTE DES SOLS DU BASSIN VERSANT DE LA ZONE D'ETUDE	49
FIGURE 35. CARTE DES RESSOURCES EN EAU DU BASSIN VERSANT DE LA ZONE D'ETUDE	50
FIGURE 36. CARTE DES PROFONDEURS DES NIVEAUX STATIQUES DU BASSIN VERSANT DE LA ZONE D'ETUDE	51
FIGURE 37: CARTE DE LA REPARTITION DES ECHANTILLONS DANS LA ZONE D'ETUDE	56
FIGURE 38. CARTE DE PENTES DE LA ZONE D'ETUDE.....	61
FIGURE 39. CARTE DE RESEAU HYDROGRAPHIQUE	61
FIGURE 40. CARTE D'EVOLUTION TEMPORELLE ET D'OCCUPATION DU SOL (ENTRE 04/04/2018 ET 27/08/2018).....	64
FIGURE 41. CARTE DE LA PROFONDEUR DU NIVEAU STATIQUE (D) DANS LE BASSIN VERSANT DE TEBESSA	65

FIGURE 42. CARTE DE LA RECHARGE EFFICACE (EN CM/AN) DANS LE BASSIN VERSANT DE TEBESSA	66
FIGURE 43. CARTE DE LA RECHARGE EFFICACE (R) DANS LE BASSIN VERSANT DE TEBESSA	66
FIGURE 44. NATURE LITHOLOGIQUE DE LA ZONE SATUREE (A) DANS LE BASSIN VERSANT DE TEBESSA	67
FIGURE 45. CARTE DES SOLS (S) DANS LE BASSIN VERSANT DE TEBESSA	67
FIGURE 46. CARTE DES PENTES (T) DANS LE BASSIN VERSANT DE TEBESSA.....	68
FIGURE 47. NATURE LITHOLOGIQUE DE LA ZONE NON SATUREE (I) DANS LE BASSIN VERSANT DE TEBESSA	68
FIGURE 48. CARTE DE PERMEABILITE (C) DANS LE BASSIN VERSANT DE TEBESSA.....	69
FIGURE 49. CARTE DE L'INDICE DE VULNERABILITE (ID) DANS LE BASSIN VERSANT DE TEBESSA	70
FIGURE 50. CARTE DU DEGRE DE VULNERABILITE DANS LE BASSIN VERSANT DE TEBESSA.....	70
FIGURE 51. CARTE DE VALIDATION DE L'INDICE DRASTIC PAR LA DISTRIBUTION DES NITRATES DANS LE BASSIN VERSANT DE TEBESSA	71
FIGURE 52. FACIES CHIMIQUE DES EAUX PAR LE DIAGRAMME DE PIPER	75
FIGURE 53. VARIATION DE L'INDICE DE SATURATION	76
FIGURE 54. VARIATION DE L'INDICE D'ECHANGE DE BASE	77
FIGURE 55. DIAGRAMME DE CONCENTRATION	78
FIGURE 56. DIAGRAMME DES CATIONS SELON LES NORMES DE L'OMS	79
FIGURE 57. DIAGRAMME DES ANIONS SELON LES NORMES DE L'OMS	80
FIGURE 58. CLASSIFICATION DES EAUX A L'IRRIGATION EN FONCTION DU SAR	82

Liste des tableaux

TABLEAU 1 : LES COORDONNEES DES STATIONS DE MESURES [ANRH, TEBESSA].....	9
TABLEAU 2 : REPARTITION SAISONNIERE DES PRECIPITATIONS POUR LA PERIODE 1972/2012	11
TABLEAU 3 : COEFFICIENT PLUVIOMETRIQUE DE LA PLAINE DE TEBESSA (1972/2012)	12
TABLEAU 4 : MOYENNE MENSUELLE DES TEMPERATURES (1972/2012).....	13
TABLEAU 5 : INDICE D'ARIDITE MENSUEL.....	15
TABLEAU 6 : ETR SELON L. TURC ET C.V. THORNTHWAITE	16
TABLEAU 7 : RESULTAT DU RUISSELLEMENT POUR LA PERIODE 1972/2012.....	17
TABLEAU 8 : RESULTAT DE L'INFILTRATION POUR LA PERIODE 1972/2012	17
TABLEAU 9 : BILAN HYDRIQUE GLOBAL D'APRES LA METHODE DE THORNTHWAITE-STATION DE TEBESSA (1972-2012)	18
TABLEAU 10 : NOTATIONS ACCORDEES AUX PARAMETRES DE LA METHODE DRASTIC (D'APRES LALLEMAND- BARRES, 1994)	53
TABLEAU 11 : LES VALEURS DES INDICES CORRESPONDENT A CHAQUE DEGRE DE VULNERABILITE.....	55
TABLEAU 12 : NORME DE POTABILITE DE L'EAU	57
TABLEAU 13 : CLASSIFICATION DES EAUX PAR DEGRES D'APTITUDE A L'IRRIGATION PAR LA METHODE DU SAR (L'OUVRIER, 1976)....	58
TABLEAU 14 : LES LONGUEURS D'ORDRES DES COURS D'EAU DANS LA CUVETTE DE TEBESSA	61
TABLEAU 15 : SYNTHESE D'EVOLUTION DE SURFACES AU COURS DE LA PERIODE D'ETUDE	62
TABLEAU 16 : MATRICE DE CHANGEMENTS ENTRE AVRIL ET AOUT 2018.	63
TABLEAU 17 : SYNTHESE D'EVOLUTION DE SURFACES AU COURS DES 2 DATES.....	63
TABLEAU 18 : SURFACES OCCUPEES PAR LES DIFFERENTES CULTURES	65
TABLEAU 19 : RESULTATS DES ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES DE TEBESSA	73
TABLEAU 20 : VARIATION DES ELEMENTS MAJEURS DES EAUX DE TEBESSA (2015)	76

Introduction générale

Introduction générale

L'eau est vitale à la survie, à la santé et à la dignité humaine. Elle représente une ressource fondamentale au développement humain. Les ressources en eau douce du monde sont sous pression croissante déjà de nombreuses personnes manquent encore d'accès adéquat à l'approvisionnement en eau pour leurs besoins de base, la croissance de la population, une activité économique en plein essor et des niveaux de vie améliorés mènent à une concurrence accrue et à des conflits pour une ressource en eau douce limitée

La plaine de Tébessa qui s'étend en longueur dans la feuille de Tébessa notamment autour des villages : Tébessa, Bekkaria et Hammamet ; Elle forme une cuvette, allongée selon une direction Nord-Ouest – Sud-Est. Concernant notre région d'étude, la qualité de l'eau potable a provoqué un mécontentement général de la population ; pour cette raison elle n'a eu comme unique refuge que de s'alimenter des sources naturelles. En effet, l'essor démographique, industriel et surtout agricole de la dernière décennie a dégradé la qualité des eaux souterraines de l'aquifère de la plaine de Tébessa.

Cette étude a comme objectif principal la détermination des caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines de la nappe superficielle de la région de Tébessa en essayant de cerner les différents facteurs qui contribuent à ce chimisme.

Une étude de vulnérabilité de cette région a été réalisée par méthode DRASTIC afin d'avoir une idée sur sa situation vis-à-vis d'un éventuel plan de développement.

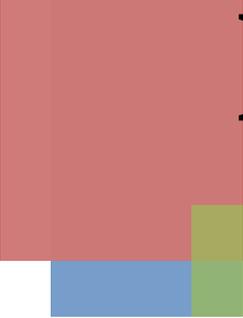
Pour arriver à cet objectif, notre travail est divisé en deux parties principales dont la première partie (Synthèse bibliographique) renferme quatre chapitres :

- ✓ **Le premier chapitre**, nous nous proposons de présenter les principales données que nous avons recueillies et qui concernent le cadre général de notre région d'étude (situation géographique, étude socio-économique, description des caractéristiques géomorphologiques).
- ✓ **Le deuxième chapitre** : définit les caractéristiques hydro-climatologiques et évalue les différents termes du bilan hydrique pour pouvoir donner une estimation de la réserve en eau de la nappe.
- ✓ **Le troisième chapitre** donne un aperçu géologique et structural de la région et leur relation avec les eaux souterraines.
- ✓ **Le quatrième chapitre**, consacré à une synthèse hydrogéologique ; la limitation des aquifères ainsi que la détermination des paramètres hydrodynamiques. On se sert des cartes piézométriques à différentes périodes pour déceler les fluctuations du niveau piézométrique, le sens d'écoulement, les zones d'alimentations et d'accumulation des eaux.

La deuxième partie (*Travail pratique*) est subdivisée en trois chapitres :

- ✓ **Le cinquième chapitre**, nous présentons les différents matériels utilisés et les méthodes de traitements des données satellitaires, et aussi nous présentons les conditions et les modalités d'échantillonnage, les techniques de mesure et d'analyse des échantillons ainsi que les outils informatiques utilisés pour le traitement des résultats.
- ✓ **Le sixième chapitre**, est consacré à l'interprétation et la discussion des résultats obtenus, pour la partie télédétection par l'interprétation des résultats obtenus à travers la création de la composition colorée et les autres traitements multi spectrale des images satellitaires. Ces traitements participent à la modélisation de la vulnérabilité de cette région par la méthode DRASTIC sous SIG.
- ✓ **Le septième chapitre**, par une interprétation des résultats des analyses physico-chimiques des eaux des zones d'études pour avoir la qualité et les faciès chimiques de ces eaux avec l'interprétation des résultats des déférentes analyses effectuer.

Et enfin une conclusion générale synthétise les résultats de cette étude.



Partie 1

Synthèse bibliographique

Chapitre 01 : Description générale de la zone d'étude.

Chapitre 02 : Hydroclimatologie.

Chapitre 03 : Cadre géologique et structural.

Chapitre 04 : Synthèse Hydrogéologique

Chapitre I :

*Description générale
de la zone d'étude*

Chapitre I : Description générale de la zone d'étude

1. Introduction

La géographie est la base de toute étude de terrain, surtout pour l'étude géologique, elle délimite le secteur étudié et détermine la distribution des facteurs physico-géographique caractérisant cet espace.

2. Situation géographique :

Tébessa, connue jadis sous le nom de THEVEST, est une cité très ancienne qui se distingue de nos jours par son histoire, ses très beaux tapis et muraille romaine. Ville frontalière avec la Tunisie, elle est située à l'extrême Est algérien, aux portes du désert à environ 230 km au Sud de Annaba et 586 km à l'est de la capitale Alger. Elle est entourée au Sud et à l'Est par les monts de Tebessa et à l'Ouest par Djebel Doukkane.

3. Situation administrative :

Le bassin versant de Tébéssa fait partie de la wilaya de Tébéssa. Ce bassin englobe le chef-lieu de la wilaya, la ville de Bekkaria et la ville de Hammamet (Fig. 1).

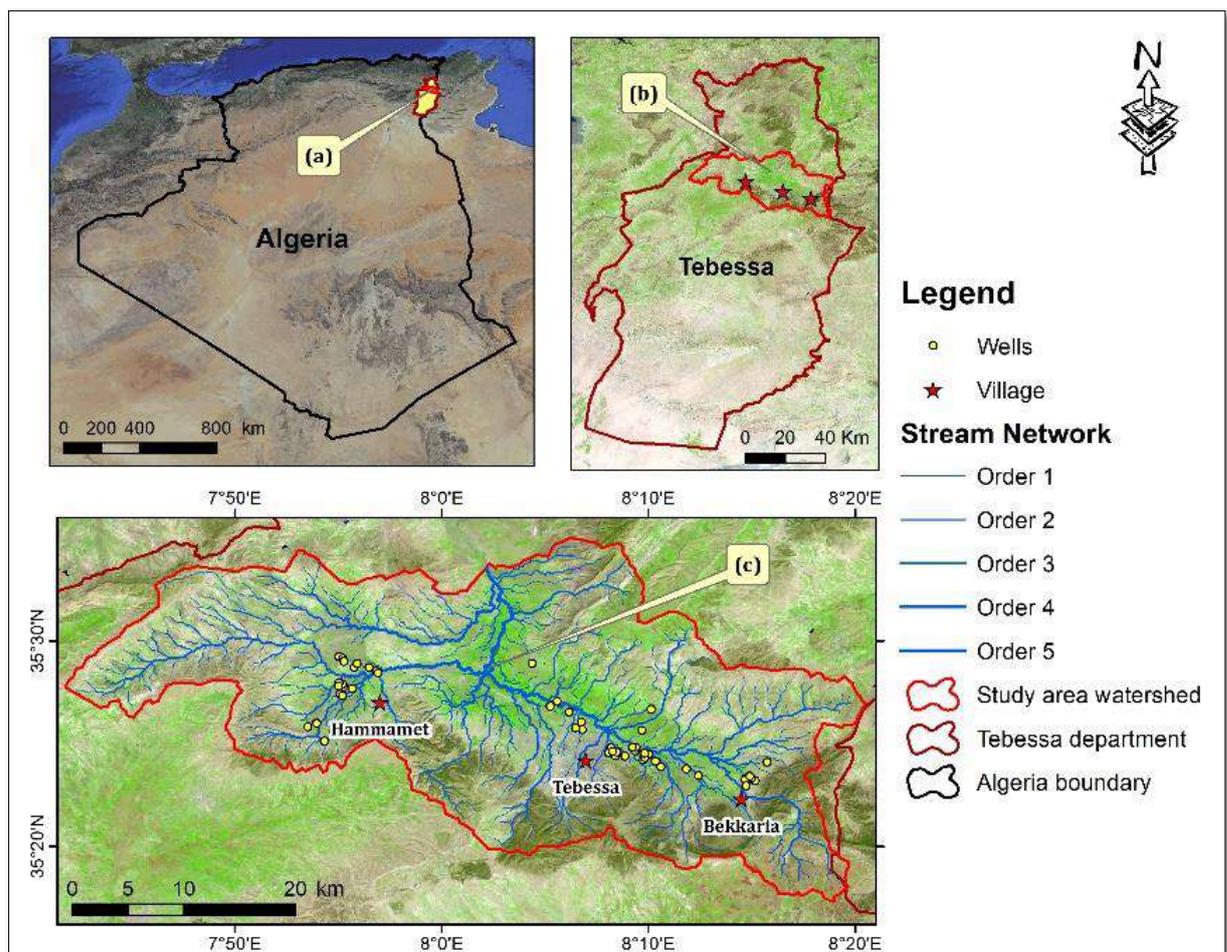


FIGURE 1. SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA REGION D'ETUDE

4. Aperçus socio-économique :

La population de la commune de Tébessa est estimée à 150.000 habitants. Le taux annuel de l'accroissement démographique est de 3% qui laisse présager un nombre élevé et alarmant de sa population dans les décennies avenir.

4.1. Agriculture :

La région d'étude 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. La sécheresse qui a sévit pendant la décennie précédente 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 soutien agricole basée sur la mobilisation des ressources en eau souterraine. La plaine de Tébessa est limitrophe au centre urbain de Tébessa qui représente le centre économique de toute la région.

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 ».

4.2. Tourisme :

Le patrimoine touristique est riche et diversifié. Des sites naturels attractifs, des lieux de cure thermale et un fort potentiel historique et patrimonial. La wilaya dispose de plus d'une centaine de sites archéologiques, dont une trentaine est classée patrimoine national, lui permettant d'occuper une place importante dans le circuit international du tourisme religieux et culturel. Ses sites les plus célèbres siègent au niveau du chef-lieu de wilaya et sont le temple de minerve, la muraille Byzantine, la basilique romaine, les portes de Caracalla de Constantine et l'huilerie de Brezguen a El Malabiod, par ailleurs, les deux villages millénaires de Negrine et de Youkous, le foret de Bekkaria, ainsi que la station thermale de El-Meridj ont été promus, en 2008, au rang de zones d'expansion touristique (ZET).

Le village millénaire de Youkous est connu par son histoire ancienne, ses sources d'eau minérales, son milieu naturel et ses maisons de pierres. Situé dans la commune d'El-Hammamet, il est construit sur les deux rives de l'oued Bou Akous.

4.3. Industrie :

L'industrie a connu une grande expansion, représentée par des ateliers de confection et des unités industrielles et artisanales, avec l'existence de gisements importants et substances utiles et la diversification de ses activités, grâce à l'extension du réseau de gaz et de l'hydraulique, la

wilaya de Tébessa est devenue un pôle industriel constituant en fait une bouffée d'oxygène pour une population en plein désarroi et en quête de travail.

5. Reliefs et géomorphologie :

La région d'étude, a une topographie plus ou moins plate, sous forme de cuvettes juxtaposées et entourées les unes aux autres par des massifs montagneux, l'altitude varie de 1712 m, qui est le sommet le plus haut de la région (Djebel Doukkane) à 900 m qui est l'altitude la plus basse, sur la plaine de Tébessa (Fig. 2).

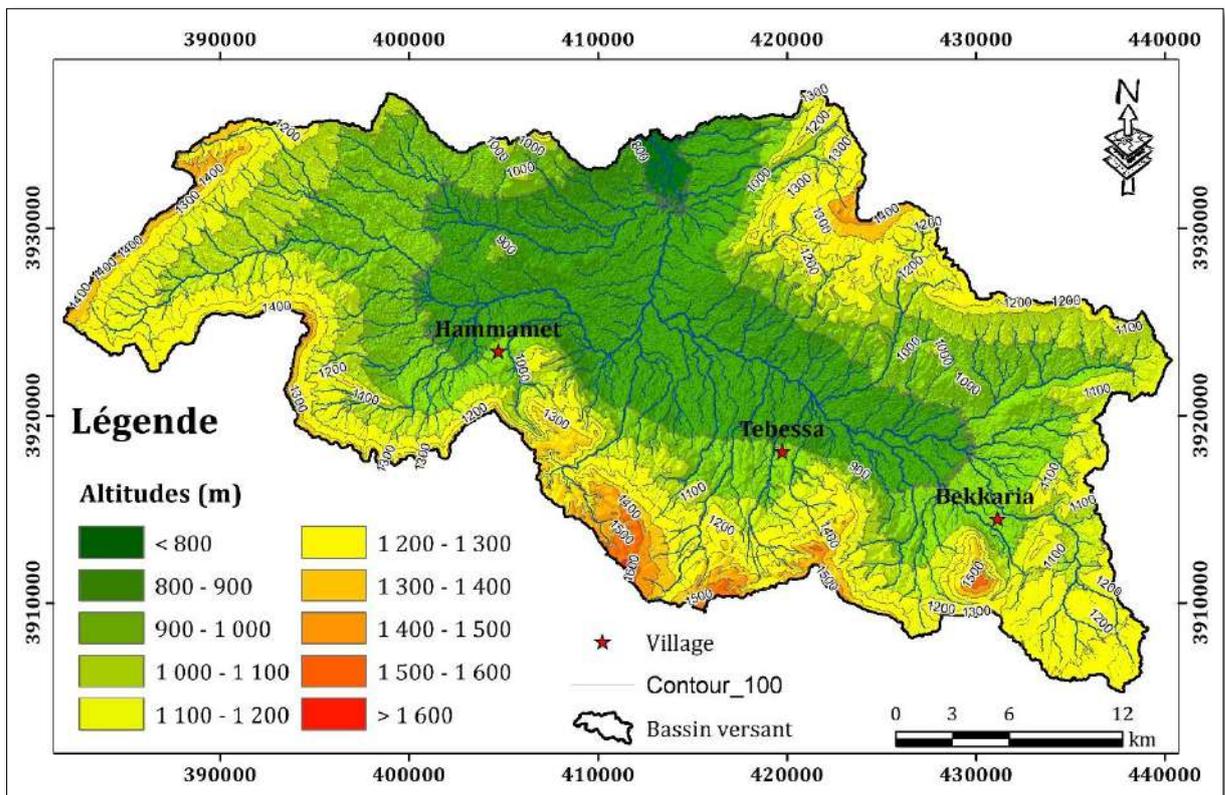


FIGURE 2. CARTE ALTIMETRIQUE DU BASSIN VERSANT DE LA PLAINE DE TEBESSA

5.1- Géomorphologie :

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 disloquants 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 (Fig. 3)

Les formes géomorphologiques existantes sont toutes liées à la tectonique qui a affecté la région. Les principales formes existantes dans la région sont :

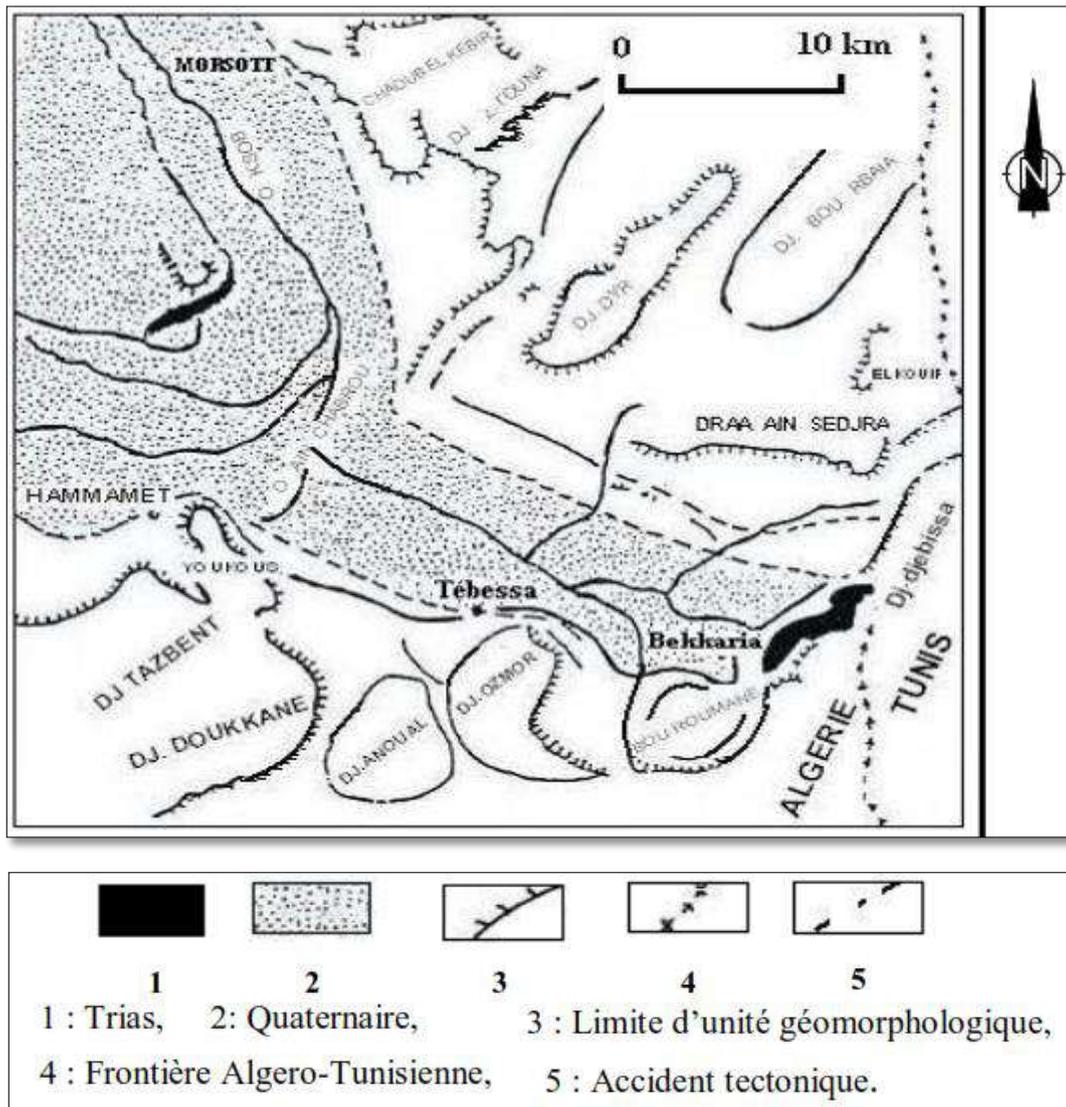


FIGURE 3. CROQUIS GEOMORPHOLOGIQUE DE LA REGION DE TEBESSA (IN DJABRI, 1987)

5.1.1. Les Montagnes :

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

Au sud, le fossé d'Aïn 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 où elle ferme la plaine de Tébessa. Cette barrière se présente en petits massifs tels que Djebel Anoual, Djebel Azmour et Djebel Bouroumane.

5.1.2. Cuvette (graben) :

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.

5.1.3. La Végétation :

Les conditions climatiques qui régissent la région de Tébessa favorisent une couverture végétale jugée limitée et peu couvrante. On rencontre le pin d'Alpe avec le genévrier phénicien couvrant le sol calcaire et localement le chêne Kermès constituant de très belles forêts qui sont malheureusement en destruction. Ainsi l'Alfa qui ne pousse que sur les marnes et les grès qui sont localement exploités. Les alluvions ne permettent que des récoltes irrégulières de céréales.

6. Réseau hydrographique :

La Wilaya de Tébessa, chevauche sur deux grands systèmes hydrographiques (Fig. 4) :

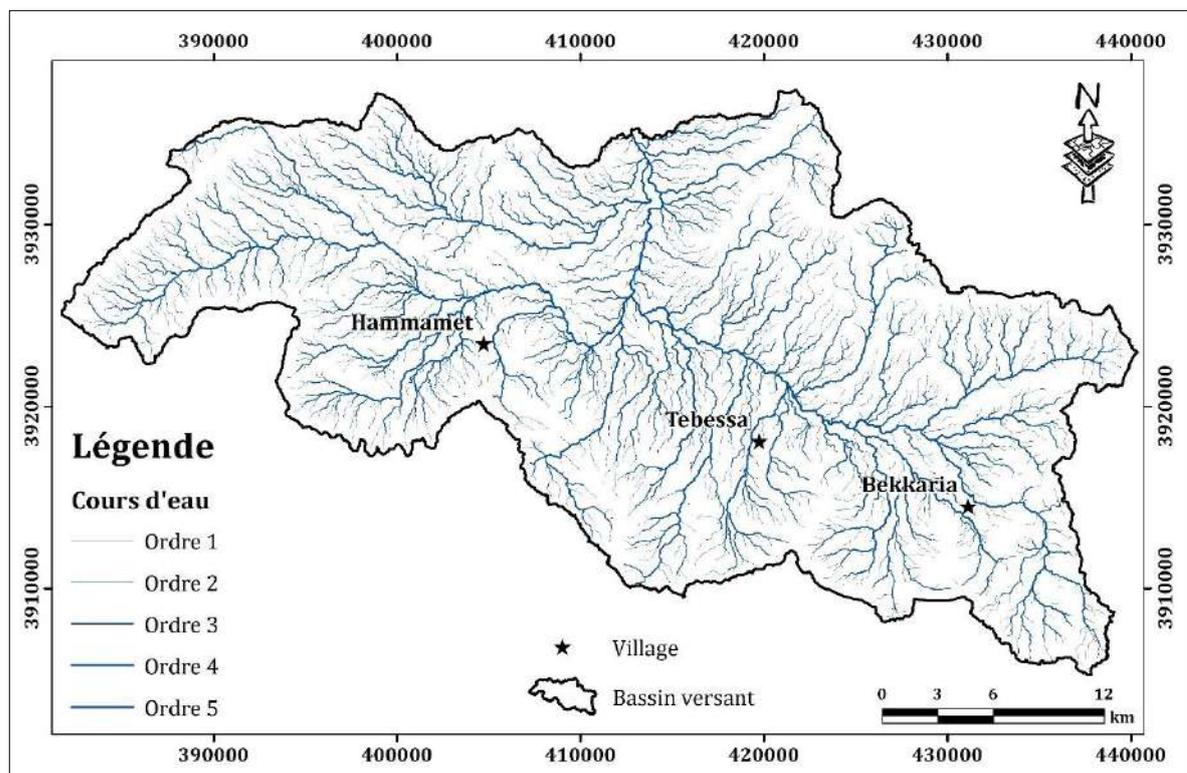


FIGURE 4. RESEAU HYDROGRAPHIQUE DU BASSIN VERSANT DE LA PLAINE DE TEBESSA

- Le Bassin versant de l'Oued Medjerda, lui-même subdivisé en 04 sous Bassins couvrant la partie Nord de la Wilaya l'écoulement y est exoréique assuré par une multitude de cours d'eau dont les plus importants sont : Oued Mellegue, Oued Chabro, Oued Serdies, Oued Kebir.
- Le Bassin versant d'oued Melghir, qui couvre la partie sud de la Wilaya. L'écoulement y est endoréique, il est drainé par oued Cheria, oued Helail, oued Mechra, oued Saf-Saf, oued Gheznet, oued Djarech, oued Sendess, qui aboutissent et alimentent les zones d'épandage

situées au sud. Aucun ouvrage de mobilisation des eaux superficielles n'existe à l'heure actuelle.

La plaine de Tébessa est drainé par l'Oued Chabro à écoulement vers le Nord, 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), au centre il traverse entre la commune de Boulhaf Eddir (rive Nord) et les communes de Tébessa, Hammamet et Bir D'hab (rive Sud), il parcourt un long trajet pour atteindre son exutoire à la commune de El-Aouinet.

Chapitre III :

Hydroclimatologie

Chapitre III : Hydroclimatologie

1. Introduction :

L'étude climatologique est très importante pour la connaissance des caractéristiques hydro-climatologiques, qui est indispensable pour évaluer l'alimentation des ressources hydriques et des réserves souterraines.

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 potentielle et réelle. Ces paramètres seront calculés avec différentes méthodes empiriques (ETR, ETP, R) et des mesures sur terrain (P, T°). Une attention particulière sera donnée au régime climatique selon les méthodes de De Martonne et d'Emberger pour placer la région étudiée dans son contexte climatique.

Notre étude est basée sur des données recueillies au niveau de la station de Tébessa (Tab. 1).

Cette dernière présente les coordonnées suivantes :

TABLEAU 1. LES COORDONNEES DES STATIONS DE MESURES [ANRH, TEBESSA]

Station	Lambert		UTM		Z (m)	Code
	X (km)	Y (km)	X (m)	Y (m)		
Tébessa	991.9	247.2	419886	3917750	890	12.03.01

2. Pluviométrie :

2.1. Carte des moyennes pluviales :

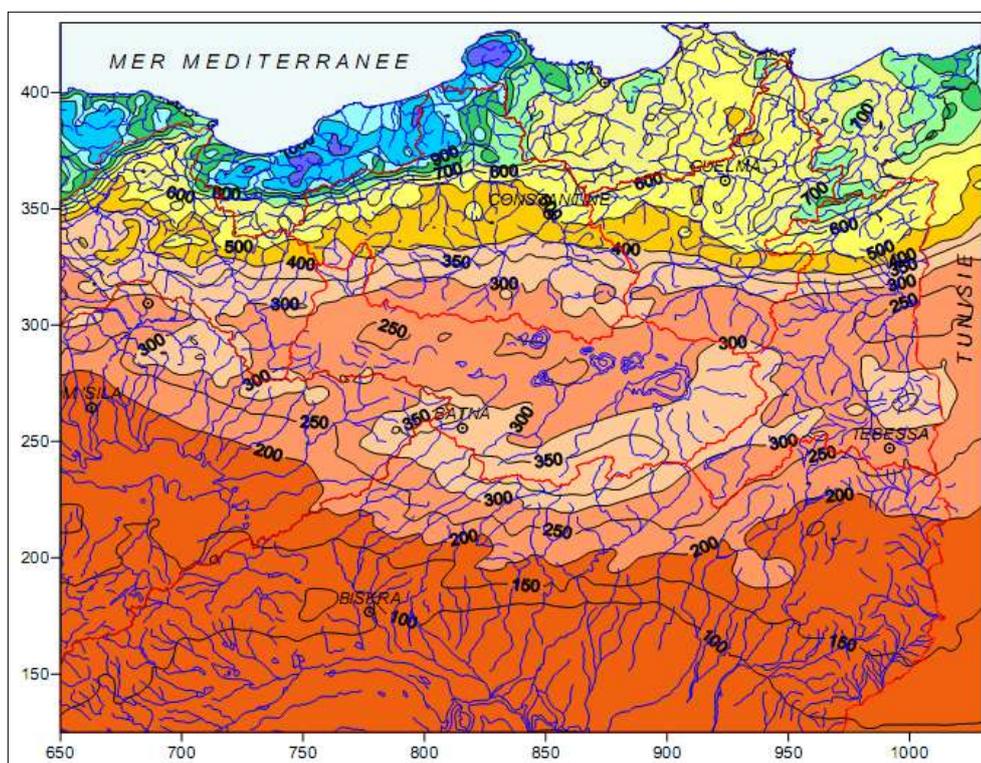


FIGURE 5. PRECIPITATIONS MOYENNES ANNUELLES (1965-1995)

L'extrait de la carte de répartition des précipitations (Fig. 5) établie par l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) pour la période 1965-95, montre que les précipitations sont de l'ordre de 300 mm/an, ce qui constitue un faible apport.

2.2. Variation interannuelle de la pluviométrie :

Selon les données relatives à la station de Tébessa pour une durée d'observation de 40 ans (1972/2012), nous avons pu établir le graphique des variations interannuelles (Fig. 6), sur lesquels nous avons constaté que l'année 1972 est l'année la plus arrosée avec 634.7 mm/an par contre l'année 1997 est la plus sèche avec 207.4 mm/an. Notons que les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre de 376.9 mm/an.

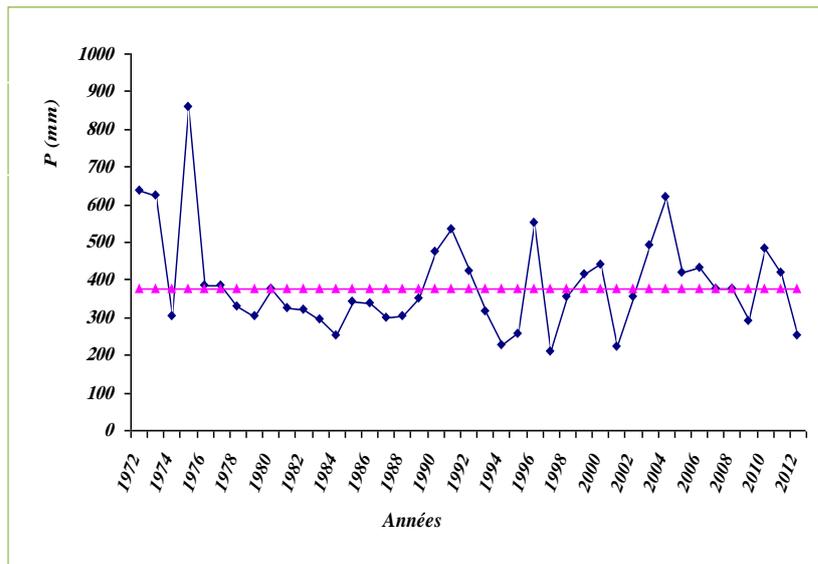


FIGURE 6. EVOLUTION DES PRECIPITATIONS ANNUELLES DANS LA STATION DE TEBESSA (1972-2012)

2.3. Variation des moyennes mensuelles des précipitations :

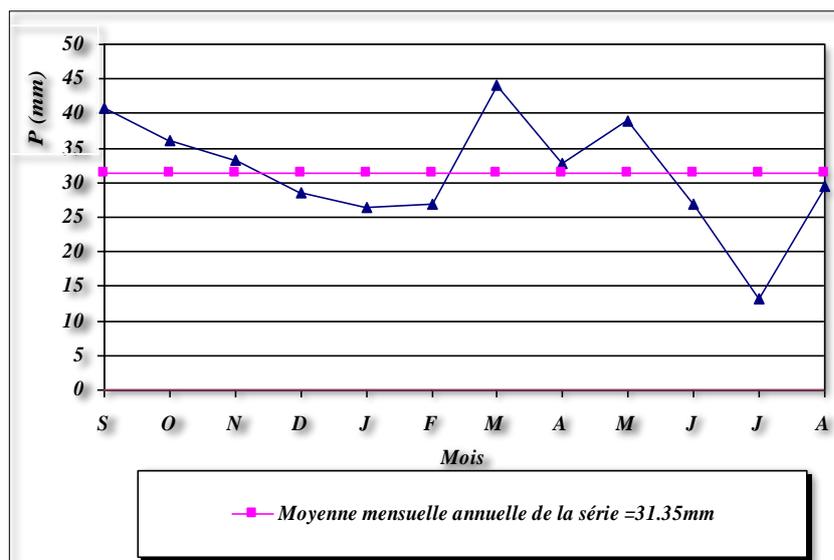


FIGURE 7. DISTRIBUTION INTERANNUELLE DES PRECIPITATIONS DANS LA STATION DE TEBESSA (1972-2012)

La courbe de variation des moyennes mensuelles des précipitations, sur une période de 41 ans (1972-2012) (Fig. 7), montre que le mois de mars (44.1 mm) est le plus pluvieux, par contre le mois de juillet avec 13.1mm, est le plus sec.

2.4. Précipitations saisonnières :

La subdivision des pluies de l'année pour chaque saison est faite suivant les saisons agricoles (Automne : (Sep, Oct, Nov), Hiver : (Déc, Jan Fév), Printemps : (Mar, Avr, Mai), Été : (Jui Juill, Aou).

Les résultats des précipitations saisonnières pour la station de Tébéssa sont reportés au tableau n°2.

TABLEAU 2 : REPARTITION SAISONNIERE DES PRECIPITATIONS POUR LA PERIODE 1972/2012

Saisons Années	Automne		Hiver		Printemps		Eté	
	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
1972/2012	110.10	29.21	81.78	21.7	115.65	30.68	69.33	18.39

En observant le tableau précédent et la figure suivante, nous remarquons pour la période considérée, que la saison printanière et la saison automnale sont les plus pluvieuses, au total, il tombe 225.75 mm soit 60 % des pluies annuelles. En hiver le total des précipitations est de l'ordre de 81.78 mm soit 22% du total annuel. La saison estivale est la plus sèche, la pluviométrie enregistrée est la plus faible de l'ordre de 69.33 mm soit 18 % de la totalité des pluies (Fig. 8).

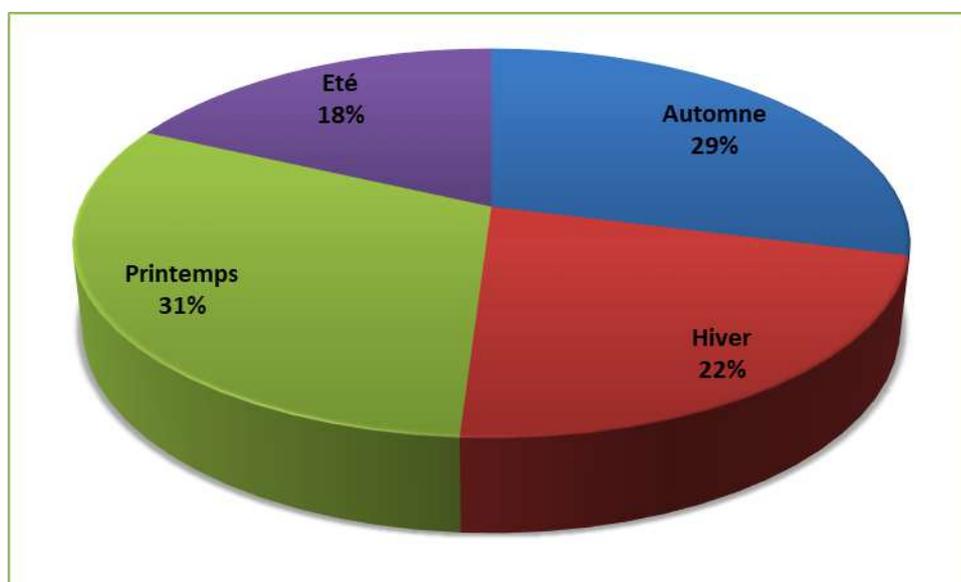


FIGURE 8. REPARTITION SAISONNIERE DES PRECIPITATIONS (1972/2012)

2.5. Le quotient pluviométrique :

Il représente le rapport entre les précipitations pendant les deux saisons les plus humides et celles pendant les plus sèches : Les résultats sont reportés au tableau 3.

$$Cp = 365 Pi / Pn$$

Avec :

P : Précipitation moyenne annuelle ;

P_i : Précipitation du mois de rang i ;

n : Nombre de jours dans le mois ;

C_p : exprime le caractère plus au moins pluvial du mois considéré par rapport à l'ensemble de l'année.

$$C_p = (365/n_i) * (P_i/P) = k.(P_i/P)$$

Où k est un coefficient dépendant du nombre de jours du mois considéré :

$$\text{Si } n_i = 31 \text{ jours } k = 365/31 = 11.77$$

$$\text{Si } n_i = 30 \text{ jours } k = 365/30 = 12.16$$

Sur quatre années consécutives, le mois de février comporte 28 jours pendant trois ans, et une fois 29 jours, d'où :

$$K = 365/(28 \times 3 + 29)^{1/4} = 12.92$$

- Pour la station de Tébessa on a P = 376.9mm
- Saison humide : C_p = (sh) = 6.14
- Saison sèche : C_p (ss) = 5.84

Pour la région de Tébessa : R = C_p sh / C_p ss = 6.14 / 5.84 = 1.05

Donc 1 < R < 1.75 (Climat semi-aride).

TABLEAU 3 : COEFFICIENT PLUVIOMETRIQUE DE LA PLAINE DE TEBESSA (1972/2012)

Mois	Saison humide								Saison sèche			
	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Fev.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Juill.	Aout	Sept.
K	11.77	12.16	11.77	11.77	12.92	11.77	12.16	11.77	12.16	11.77	11.77	12.16
P _i	36.1	33.3	28.5	26.4	26.9	44.1	32.7	38.8	26.8	13.1	29.4	40.7
C _p	1.13	1.07	0.89	0.82	0.92	1.38	1.06	1.21	0.86	0.41	0.92	1.31

Selon ces normes la région d'étude est soumise à un climat, semi-aride caractérisé par deux saisons ; l'une humide marquée par une moyenne de pluviosité allant du mois d'octobre jusqu'au mois de mai et par une faible température. L'autre sèche de forte température atteignant leur maximum au mois de juillet.

3. Les températures :

La température est un facteur très important, régissant le phénomène d'évapotranspiration et le déficit d'écoulement annuel et saisonnier. Les données sur la température dont on dispose sont des valeurs moyennes mensuelles et annuelles mesurées à la station Météorologique de Tébessa.

D'après le tableau 4 des températures et la figure 9, on a constaté que le mois de janvier est le mois le plus froid avec une valeur de 6.65°C tandis que le mois le plus chaud est Juillet avec une moyenne observée sur la période d'observation de l'ordre de 26.28°C.

TABLEAU 4 : MOYENNE MENSUELLE DES TEMPERATURES (1972/2012)

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Fev.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Jul	Aou.
Moy.	21.53	17.14	11.10	7.88	6.65	7.82	10.47	13.41	18.62	23.43	26.28	25.55

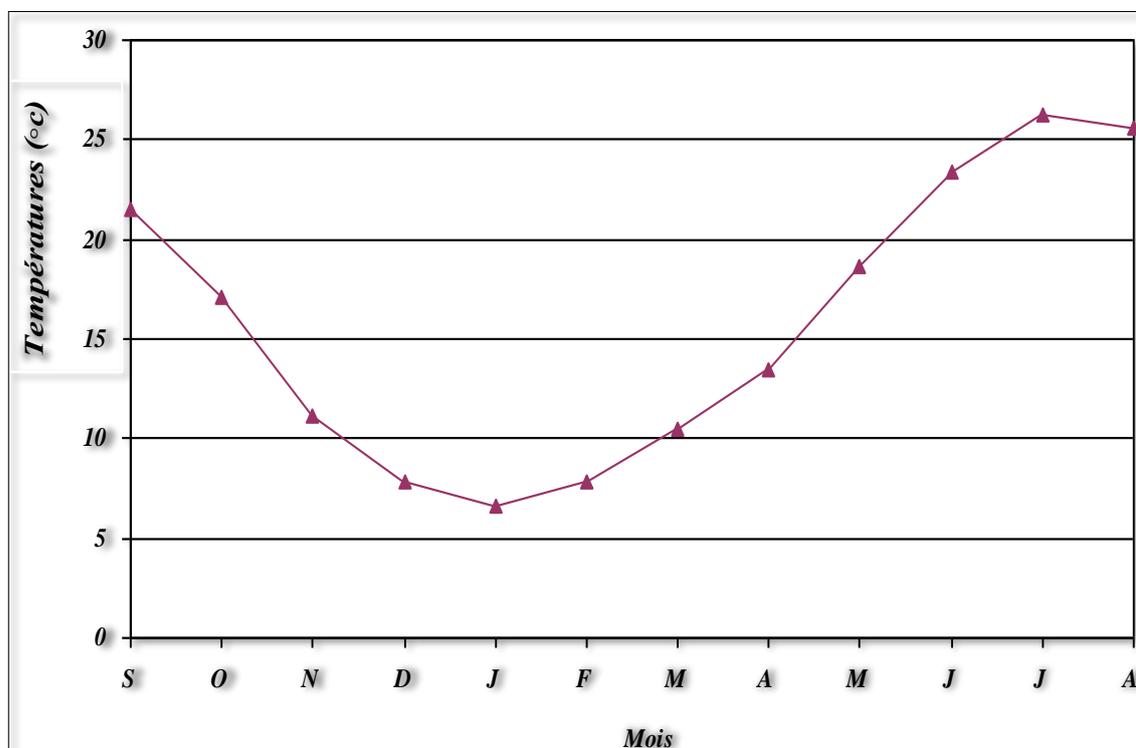


FIGURE 9. REPARTITION MENSUELLE DES TEMPERATURES (1972/2012)

4. Le vent :

Les vents sont caractérisés par leur vitesse et leur intensité. Les vents prédominants sont de direction Ouest-Nord-Ouest au mois de Novembre et la distribution du champ de direction du vent est saisonnière hiver-été. En hiver, les vents du NW sont souvent secs et froids ; en été les vents du sud sont fréquents et peuvent être chauds et secs, d'où l'augmentation de l'évaporation et une sécheresse fait augmenter le déficit d'écoulement.

5. Régime climatique :

Défini par la formule et la classification suivantes :

5.1. Courbe Pluvio-thermique :

C'est la confrontation des précipitations avec la température de même période d'observation. L'établissement de ce digramme de station de Tébéssa a permis de montrer que la période de sécheresse qui s'étend sur 5 mois de l'année, allant du mois de Mai jusqu'au mois de septembre, alors que le reste des mois (7 mois) représente la période humide allant du mois d'octobre jusqu'au mois d'avril (Fig. 10).

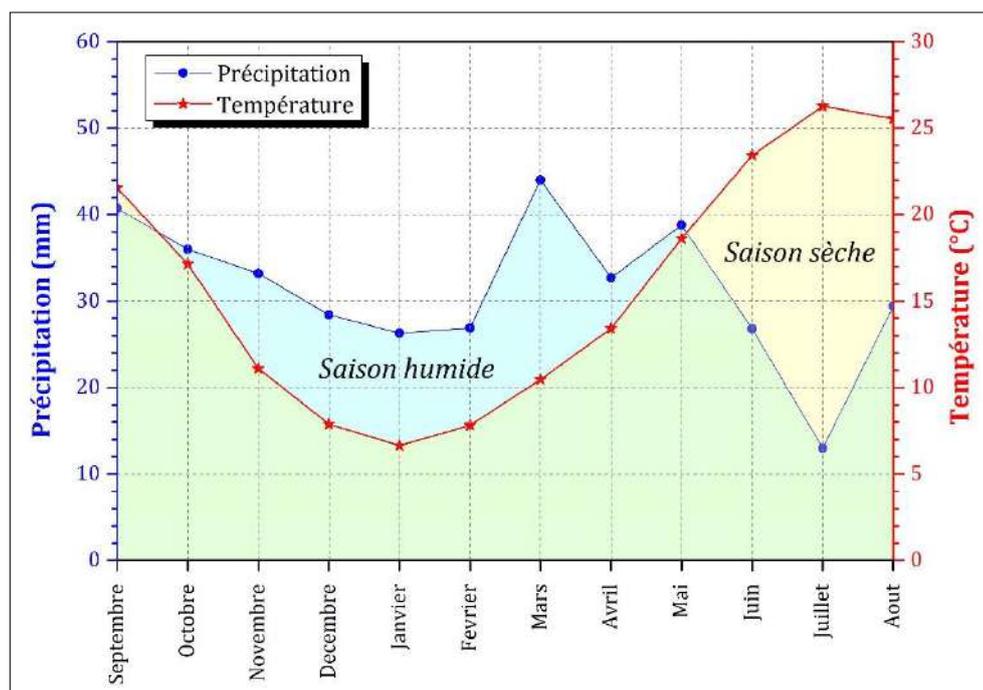


FIGURE 10. DIAGRAMME PLUVIO-THERMIQUE DE LA STATION DE TEBESSA

5.2. L'indice d'aridité mensuel de De Martonne :

L'aridité peut s'exprimer quantitativement par différents indices d'aridité conventionnels et empiriques, la plupart est un simple rapport hydro-thermique fondé principalement sur des grandeurs moyennes de précipitations et de température, qui sont utilisés pour définir les degrés d'aridité et les conditions de l'écoulement fluvial. Ils ont été proposés par des climatologues, des morphologues, des géographes, des botanistes. Les plus connus sont ceux de De Martonne (1926), Emberger (1932), Thornthwaite (1948), Dubief (1950), Capot-Rey (1951), Gausson, Bagnouls (1952) et Birot (1953). Suivant l'ampleur du déficit hydrique déterminant, plusieurs degrés d'aridité peuvent être différenciés, se définir par des classes d'indices d'aridité convenues et recevoir des qualifications particulières applicables à des zonalités climatiques. Il est devenu classique de distinguer trois degrés dans l'aridité.

- Hyper-aride
- Aride
- Semi-aride

Cet indice prend en considération les précipitations et les températures annuelles :

$$I = p/T+10$$

Avec :

I : Indice d'aridité ;

P : Précipitation moyenne annuelle (mm) ;

T : Température moyenne annuelle (°C)

Pour : $I < 5 =$ climat hyper aride

$5 < I < 7.5 =$ climat désertique

$7.5 < I < 10 =$ climat steppique

$10 < I < 20 =$ climat semi-aride

$20 < I < 30 =$ climat tempéré

Application numérique :

* pour la région de Tébessa : $P = 376.90$ mm, $T = 15.82$ °C ce qui donne : $I = 14.59$.

Cette région est donc soumise à un climat semi-aride.

Un indice d'aridité peut être calculé par mois :

Il est défini par : $a = 12p/(t+10)$ p : précipitations mensuelles moyennes (mm)

t : températures mensuelles moyennes (°C)

Les valeurs de l'indice d'aridité mensuel sont reportées au tableau suivant :

TABLEAU 5 : INDICE D'ARIDITE MENSUEL

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Fev.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Jul	Aou.
I	15.5	16.0	18.9	19.1	19.0	18.1	25.8	16.8	16.3	9.6	4.3	9.9

D'après les résultats présentés dans le tableau (5), le mois de juillet présente un climat hyperaride, les mois de juin et aout jouissent d'un climat steppique. Le mois de mars présente un climat tempéré alors que le climat semi-aride marque le reste des mois de l'année.

6. L'évapotranspiration :

6.1. L'évapotranspiration potentielle :

6.1.1. Définition :

L'évapotranspiration peut être considérée comme étant la somme des deux termes que sont la transpiration végétale et l'évaporation du sol. L'intensité de l'évapotranspiration est fonction de la radiation solaire, de la température, de l'humidité relative de l'air, de l'humidité du sol, du vent, de la couverture végétale, et enfin des travaux du sol. Elle est le terme le plus important après les précipitations (P). Elle est la somme des quantités d'eau évaporées à partir de la surface du sol et utilisées par les plantes. Elle est difficile à évaluer à cause de sa pluri dépendance aux facteurs tant biologiques que physiques. Elle correspond à l'évaporation d'une surface qui serait suffisamment approvisionnée en eau pour évaporer la quantité d'eau maximale permise par les conditions climatiques (cas des nappes phréatiques peu profondes).

6.1.2. Formule de Thornthwaite :

$$ETP = 16 (10 T/D)^a.k$$

ETP : évapotranspiration potentielle mensuelle corrigée (mm)

$$i = (T/5)^{1.514} \Leftrightarrow I = \sum i$$

T = température moyenne mensuelle en °C

$$a = [16 I/100] + 0.5$$

K : coefficient de correction dépendent de la latitude du bassin versant et donc de l'insolation.

a : indice liée à la température.

- I : indice thermique annuel obtenu à partir de la somme des valeurs mensuelles de température.

6.2. Evapotranspiration Réelle (ETR)

a/ Définition : c'est une fraction de l'ETP qui dépend beaucoup plus de l'état des réserves en eau du sol, et donne des informations sur la quantité d'eau évaporée réellement.

b/ Estimation de l'évapotranspiration Réelle (ETR) : l'évapotranspiration réelle annuelle moyenne est calculée par l'application des équations empiriques telles que celles de Turc et de Coutagne :

6.2.1. Formule de Turc :

$$ETR = P/[0.9 + P^2 / L^2]^{0.5} \quad (\text{en mm/an})$$

Avec : P : les précipitations annuelles moyennes en mm

$$L = 300 + 25 T + 0.05 T^3 \quad \text{où } T \text{ est la température annuelle moyenne en } ^\circ\text{C}$$

Les résultats des deux stations sont reportés au tableau 6.

6.2.2. Méthode de Thornthwaite :

Pour le calcul de l'ETR par la méthode du bilan hydrique de Thornthwaite, deux cas sont à considérer

1^{er} cas : $P > ETP = ETR$ on a alors un excédent

2^{ème} cas : $P < ETP \Rightarrow ETR = P + RFU$

Les résultats sont reportés au tableau 6.

TABLEAU 6 : ETR SELON L. TURC ET C.V. THORNTHWAITE

Méthode	ETR (mm)	ETR (%)
Thornthwaite	341.9	90.71
Turc	363.02	96.32

6.3 Estimation des réserves facilement utilisables :

Elle présente la quantité d'eau emmagasinée dans le sol, son degré de saturation dépend de plusieurs facteurs : La nature, la lithologie et l'épaisseur de la couche superficielle. La profondeur du niveau piézométrique de la nappe aquifère, le climat de la région et le type de la couverture végétale. Ricard. J (1979), dans son travail a calculé la RFU, en tenant compte du coefficient de rétention (CR). Cette dernière est égale à 26 mm.

6.4. Indice thermique mensuel

Cet indice est calculé à partir de la température moyenne mensuelle (t) du mois considéré.

$$i=(t/5)^{1.514}$$

6.5. Indice thermique annuel

C'est la somme des indices mensuel des 12 mois de l'année.

$$I= \sum i$$

6.6. Estimation du ruissellement et de l'infiltration :

6.6.1. Le ruissellement :

La lame d'eau ruisselée sera estimée par la formule de Tixeront-Berkaloff qui s'écrit comme suit :

$$R= P^3 / 3(ETP)^2$$

Avec : R : Ruissellement annuel (mm) ;

ETP : Evapotranspiration potentielle annuelle (mm) ;

P : Pluviométrie annuelle moyenne (mm)

TABLEAU 7 : RESULTAT DU RUISELLEMENT POUR LA PERIODE 1972/2012

Période	P (m)	ETP (m)	R (m)	R(%)
1972/2012	0.376	0.855	0.024	6.38

6.6.2. Calcul de l'infiltration

D'après le bilan hydrologique l'infiltration efficace peut être calculée comme suit :

$$P = ETR + R + I$$

Alors : $I = P - R - ETR$

TABLEAU 8 : RESULTAT DE L'INFILTRATION POUR LA PERIODE 1972/2012

Période	Infiltration (mm)	Infiltration (%)
1972/2012	11	2.92

7. Bilan hydrologique :

La formule donnant le bilan hydrologique est la suivante (Castany, 1982) :

$$P = R + I + ETR$$

P : Précipitation (mm) ;

R : Ruissellement (mm) ;

I : Infiltration (mm) ;

ETR : Evapotranspiration réelle (mm)

Sur cette base nous avons établi le bilan hydrique de la région d'étude, représenté ci-dessous.

TABLEAU 9 : BILAN HYDRIQUE GLOBAL D'APRES LA METHODE DE THORNTHWAITE-STATION DE TEBESSA (1972-2012)

Mois	T °C	i	K	ETP	P	BH	RFU	ETR	Def	Exc
Sep	21.5	9.1	1.03	99.7	40.7	-59.0	0.0	40.7	59.0	0.0
Oct	17.1	6.5	0.97	64.0	36.0	-27.9	0.0	36.1	27.9	0.0
Nov	11.0	3.3	0.86	27.3	33.2	6.0	6.0	27.3	0.0	0.0
Dec	7.8	2.0	0.81	14.5	28.4	14.0	19.9	14.5	0.0	0.0
Jan	6.6	1.5	0.87	11.7	26.3	14.7	26.0	11.7	0.0	8.6
Fev	7.8	2.0	0.85	15.0	26.9	11.9	26.0	15.0	0.0	11.9
Mar	10.4	3.1	1.03	29.7	44.0	14.4	26.0	29.7	0.0	14.4
Avr	13.4	4.5	1.10	48.0	32.7	-15.3	10.7	48.0	0.0	0.0
Mai	18.6	7.3	1.21	91.7	38.8	-52.9	0.0	49.6	42.2	0.0
Jui	23.4	10.4	1.22	136.0	26.8	-109.2	0.0	26.8	109.2	0.0
Juil	26.2	12.3	1.24	167.7	13.0	-154.6	0.0	13.1	154.6	0.0
Aou	25.5	11.8	1.16	149.7	29.4	-120.3	0.0	29.4	120.3	0.0
Total	15.8	73.8		855.1	376.9	-478.3		341.9	513.2	35.0

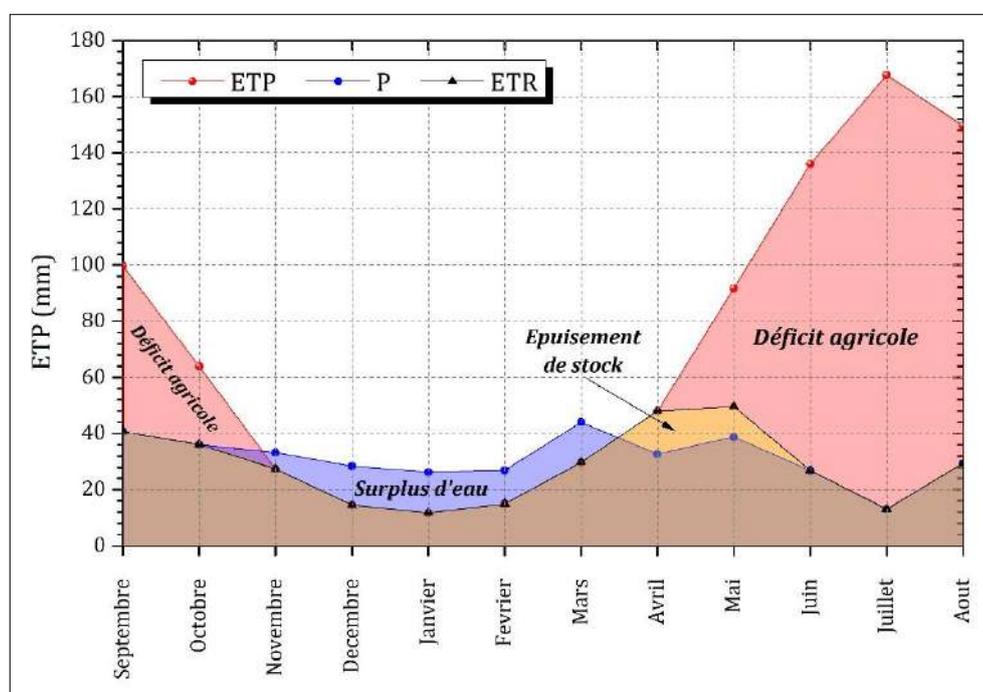


FIGURE 11. REPRESENTATION GRAPHIQUE DU BILAN HYDRIQUE (THORNTHWAITE) STATION DE TEBESSA

On constate que :

- Le déficit agricole se remarque à partir du mois de Mai et se poursuit jusqu'à Octobre, période pendant laquelle la RFU est épuisée (Tab. 9).

La figure ci-dessous (Fig. 11) illustre les résultats du tableau (9) sur 40 ans (72/2012), sur le bilan de Thornthwaite, qui nous permet une lecture simple des différents éléments du bilan.

- Les hauteurs de précipitation atteignent leur maximum au mois de Mars (44.0 mm) où l'ETP atteint en Janvier un minimum (11.7 mm) -L'ETP atteint son maximum au mois de Juillet (167.7 mm) où les précipitations atteignent (13.0 mm).

Pendant le mois de Novembre le stock se reconstitue ou la RFU atteint son maximum (26 mm) au mois de Janvier puis demeure jusqu'au mois d'Avril ensuite diminue jusqu'à l'épuisement total (Mai).

8. Conclusion :

La région d'étude est caractérisée par un climat semi-aride de type continental, avec un été très chaud et sec et un hiver très froid et humide. La moyenne interannuelle des précipitations tombées est de l'ordre de 376.9 mm. La température moyenne annuelle est de l'ordre de 15.8°C avec un maximum au mois de Juillet égal à 26.28°C et un minimum au mois de Janvier égal à 6.65°C. Le cycle pluviométrique le plus arrosé correspond à l'année 72/73 avec un apport de 634, mm ; alors que le cycle le plus sec correspond à l'année 96/97 avec un apport de 207.4 mm.

L'évapotranspiration réelle est estimée à 341.9 mm soit 90.71% des précipitations. Le ruissellement bénéficie que de 6.68 % des précipitations ce qui représente 24 mm.

L'infiltration ne laisse percoler que 11 mm, qui ne représente que 2.92% des précipitations, ceci nous laisse penser que l'alimentation de la nappe ne se base pas, uniquement sur l'infiltration efficace, mais aussi sur les calcaires fissurés qui bordent la nappe.

Chapitre III :

Cadre géologique et structural

Chapitre III : Cadre géologique et structural

1. Stratigraphie et description des facies

Une synthèse sur les travaux lithostratigraphiques dans la région de Tébessa a été donnée par Salmi-Laouar (2004). Je présente ici l'essentiel de cette description, (de bas en haut) avec présentation d'un log lithologique synthétique (Fig. 12).

1.1. Le Trias

Les terrains les plus anciens connus dans « la zone de diapirs » de la région de Tébessa appartiennent au Trias. Celui-ci a été daté par analogie à Dj. Chettaba (Bertrand, 1896). Les pointements triasiques qui affleurent dans cette région ont depuis toujours fait l'objet d'une attention particulière, en raison de leur importance pour l'exploration des champs miniers et pétroliers. En Algérie Nord orientale et en Tunisie, les nombreux diapirs sont à Trias évaporitique sans sel affleurant ; toutefois la présence du sel est souvent confirmée en profondeur (Bouzenoune, 1993 ; Perthuisot, 1994).

La succession lithologique complète du Trias dans « la zone de diapirs » n'est pas connue avec précision. Cependant, ce dernier garde une composition lithologique assez constante, du moins dans toute la région de Tébessa. Son épaisseur demeure également inconnue mais elle est évaluée à plus de 1000 mètres (Rouvier et al., 1985 ; Pohl et al., 1986). Au cours de la période triasique s'est déposée une puissante série de dépôts évaporitiques et argilo-gypsifère dans des bassins lagunaires et lacustres (Chevenine et al., 1989). Il s'agit de marnes bariolées à gypse, de dolomies, de calcaires dolomitiques et des grés.

Dans la région de Tébessa, le Trias affleure sous forme d'extrusion et occupe généralement le cœur des structures anticlinales (Perthuisot et Rouvier, 1992 ; Aoudjehane et al., 1992), avec des récifs à son apex à l'Aptien et à l'Albien (Masse et Chikhi-Aouimeur, 1982).

Ces corps triasiques présentent des dimensions variables sous forme de sections elliptiques parfois très étirées, sur une bande orientée NE-SW sur environ 80 Km. Les affleurements les plus importants sont ceux de Djebissa, Ouenza, Boukhadra, Mesloula, Boujaber, Hameimat Nord, Hameimat Sud et bien d'autres massifs.

Le déclenchement des phénomènes halocinétiques est lié à la distension (en blocs basculés) qui a caractérisé l'Atlas saharien oriental durant le Crétacé, après fracturation du substratum anti-salifère (Vila, 1980). La mobilisation du matériau salifère est favorisée par son fluage et l'existence de zones fragiles dans la couverture post-salifères. Elle provoque ainsi son ascension et sa migration vers le haut et une intense subsidence pour les formations post-Aptiennes d'une puissance d'environ 5000 m dans les bassins inter-diapiriques. La plasticité est intense et la disparition de son aspect stratigraphique originel compliqué ultérieurement par ensemble

chaotique non structuré. Ces critères ne sont que des effets de la mobilisation se traduit aussi par l'évolution d'une structure à plusieurs zonations minéralogiques accompagnée dans la plupart des cas par des concentrations métallifère Pb-Zn Ba-Sr (Rouvier et al., 1985 ; Sheppard et al., 1996).

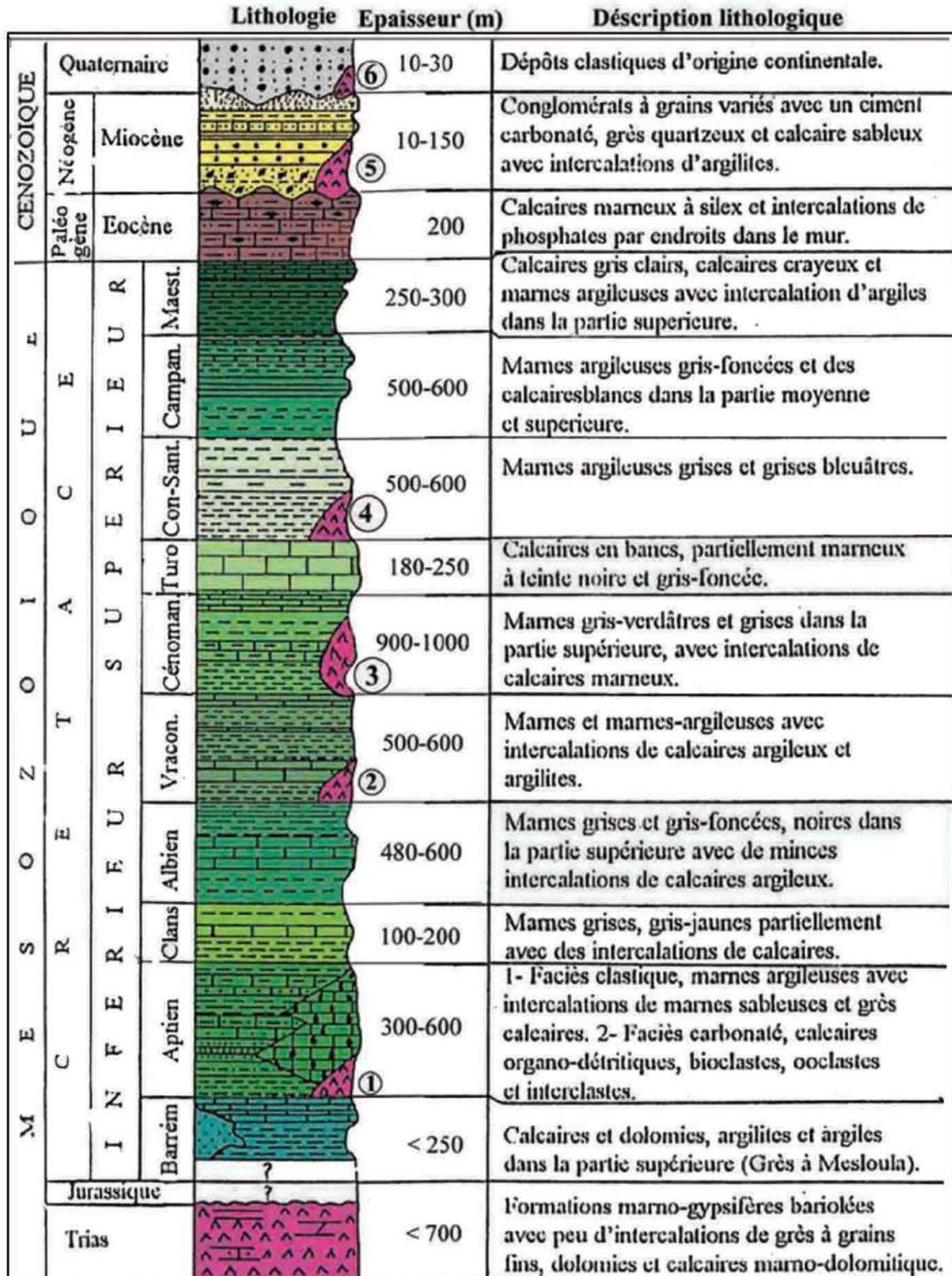


FIGURE 12. COLONNE STRATIGRAPHIQUE SYNTHETIQUE DE LA REGION DE TEBESSA (SALMI-LAOUAR, 2004)

Les arguments et les conséquences du diapirisme sur la couverture post-triasique retenus par les diapirites se traduisent par des remaniements de faciès, des constructions récifales, des variations lithologiques et des épaisseurs de sédiment Albo-Aptiens et des contacts verticaux avec les séries de la couverture et leur renversement. Ces effets sont visibles dans de nombreux massifs.

1.2. Le jurassique

Les dépôts jurassiques sont absents dans la région (Dubourdiou, 1956 ; Chevenine et al., 1989), mais ils ont été recoupés par des sondages pétroliers en dehors des zones diapiriques (Beghoul, 1974).

1.3. Le barrémien

Les formations Barrémiennes sont représentées essentiellement par des marnes grises ou jaunes assez argileuses, à ammonites pyriteuses. Vers le sommet, ces marnes sont intercalées par des minces passées de calcaires noduleux gris clair à patine ocre (Dubourdiou, 1956). Ces formations ne dépassent pas les 250 mètres d'épaisseur. Elles se sont déposées sur un haut fond assez proche de la surface (Dubourdiou, 1956), et témoignent des conditions de sédimentation en mer peu profonde. Ces conditions de sédimentation se sont poursuivies jusqu'au début de l'Aptien.

1.4. L'Aptien

Sur de vastes surfaces, l'Aptien prend dans « la zone des diapirs » de la région de Tébessa une grande importance par la nature de ses dépôts et leur développement substantiel (300 à 600 m d'épaisseur). Il est formé de roches carbonatées néritiques qui se sont déposées dans des eaux chaudes peu profondes. Ces conditions ont favorisé l'essor des processus organogènes de la sédimentation qui a mené à la formation de différentes constructions. A l'Aptien, la mer était plus étendue qu'au Barrémien. Le fait le plus marquant de cette période est la formation des récifs sur des rides allongées (Dubourdiou, 1956). Durant l'Aptien supérieur, la région de Tébessa a connu le développement de nombreuses plates-formes isolées dont l'architecture est contrôlée par des remontées diapiriques (Dubourdiou, 1956). Ce complexe fait partie de domaine des hauts-fonds qui sépare, durant l'Aptien un faciès aptiens annonce une régression fini-Aptienne.

La formation aptienne débute par un Aptien essentiellement marneux composé par une alternance de marne, d'argile des grés et de calcaires à gastéropode, Mollusques et Echinoides. Cet Aptien marneux est surmonté par un Aptien calcaire, formé de puissants blocs calcaires à ciment dolomitique, bioclastique à orbitolines, rudistes et qualifiés de récifaux (Dubourdiou, 1956). Le clansayésien apparaît au cœur des anticlinaux de la région.

1.4.1. L'Aptien marneux

Il est présenté par de gros bancs massifs et épais de calcaires bréchiques à ciment dolomitique, de calcaire graveleux et bioclastique à orbitolines et de mollusques. Parfois, on rencontre des intercalations de quelques niveaux de marnes feuilletées de couleur rouge violacée ou verte. On note la présence de quelques Lamillibranches, de moules internes de Gastéropodes au niveau de djebel Bouroumane. Cette formation peut atteindre 450 m d'épaisseur.

1.5. Le Clansayésien

Il affleure dans divers anticlinaux de la région étudiée, il s'agit des marnes grises, jaunes à Ammonites avec des calcaires gréseux (Dubourdiou, 1956).

La formation aptienne présente une épaisseur totale de l'ordre de 700 m en moyenne.

1.6. L'Albien

Généralement, la formation albienne débute par un faciès carbonaté qualifié de « récifal » dans sa partie inférieure et marneux et marno-calcaire dans sa partie moyenne à supérieure. Dans la région de Tébessa, il est marqué par une faune benthique dans des zones peu profondes. A l'Albien supérieur, la couverture albo-aptienne est percée par le Trias, entraînant le redressement des couches et la complexité des structures (plis évasés) généralement scellées par le Vraconien (Bouzenoune, 1993 ; Othmanine, 1987 ; Nedjari-Bélhacène et Ndjari, 1984). Une série monotone de marnes à argiles d'un gris foncé avec passage de calcaires à marnes noires. Sa puissance varie de 20 à 150 mètres.

1.7. Le Vraconien

Il est composé généralement par des marnes à intercalation de calcaires argileux et argilites de 500 à 600 mètres d'épaisseur (Dubourdiou, 1956). Il est généralement transgressif dans quelques régions sur le Trias (Thibiéroz et madre, 1976) et sur l'Aptien (Othmanine, 1987). Avec sa sédimentation marno-argileuse, le Vraconien forme un écran immédiat et contrôle principal à la minéralisation polymétallique.

1.8. Le Cénomanién

Dans la région de Tébessa, une série monotone de marnes argileuses verdâtres s'installe au Cénomanién inférieur. Au Cénomanién moyen, ces marnes admettent diverses intercalations calcaires peu développées avec une faune plus moins abondante et de veinules de calcite fibreuse. Au Cénomanién supérieur, la sédimentation devient carbonatée. L'épaisseur totale de la formation cénomaniénienne est estimée entre 750 et 1100 mètres.

La sédimentation cénomaniénienne s'est déposée dans des conditions abyssales (profondes). Cette époque est caractérisée par des décrochements traduisant un raccourcissement NE-SW (Othmanine, 1987).

1.9. Le Turonien

Il se fait remarquer par son changement rapide de sédimentation vers des calcaires compacts donnant lieu à des reliefs accusés. Le Turonien constitue les flancs des grands anticlinaux et synclinaux et ses formations affleurent également en dehors des zones diapiriques.

L'analyse lithologique faite par Salmi-Laouar (2004) montre que la partie inférieure du Turonien dans le massif d'Essouabaa, épaisse de 200 mètres environ, est formée d'une série d'alternance stratocroissante de marnes, de calcaire marneux et de calcaires. Les marnes sont parfois argileuses de couleur grisâtre, d'ordre métrique à pluviométrique. L'épaisseur des bancs de calcaires marneux et des calcaires fins micritiques sont aussi d'ordre métrique à plurimétrique. L'étude de la microfaune a livré des sections de genre *Weithnella* et du genre *Hedbergella*.

A partir du Turonien inférieur, les conditions abyssales qui régnaient, commencent à changer vers des conditions de mer chaude moins profonde. Au Turonien supérieur, une mer relativement profonde s'installe avec une accumulation d'une assise marneuse. Ce régime continue jusqu'au Campanien.

1.9.1. Le Campanien-Santonien

Ils ne sont pas subdivisés à cause du manque d'éléments de datation. Ils sont représentés par des marnes argileuses gris verdâtre et jaune gris à plaquettes de calcite fibreuse et intercalation de marnes à lumachelles. Leur puissance varie de 200 à 600 mètres.

1.10. Le Maestrichtien

Il est marqué par des calcaires blancs bien lités, d'environ 60 mètres d'épaisseur, recouvert par une très forte accumulation de marnes argileuses grises à noires (150 m). Ces dernières admettent à leur base quelques intercalations de calcaires (Dubourdiou, 1956).

Le régime sédimentaire au Campanien supérieur et au Mæstrichtien, indique toujours la continuité des mêmes conditions de dépôts dans un milieu peu profond et de mer chaude (Chevenine et al, 1989) avec une prédominance de calcaires crayeux rarement récifaux.

1.11. Le Paléocène

Sa base présente des marnes analogues à celle du Maestrichtien supérieur qui s'intercale à des couches phosphatées vers les niveaux supérieurs.

1.12. L'Eocène

Des calcaires à silex et d'autres à nummulites caractérisent l'Eocène inférieur et moyen, près des périmètres de la région de Tébessa. Leur puissance est de 200 mètres.

1.13. Le Miocène

Les dépôts du miocène inférieur et moyen reposent transgressivement sur les formations anciennes (Albien-Sénonien et même sur le Trias). Il s'agit une puissante accumulation de marnes et de grés dont l'épaisseur peut atteindre dans le bassin de Oulad Soukiés (NW de l'Ouenza) 1000 m (Dubourdiou, 1956 ; Kowalski et Hamimed, 2002).

A leur base, les formations miocènes comportent des conglomérats contenant des éléments de calcaires variés, de silex gris, des galets ferrugineux et des éléments empruntés au Trias, témoignant d'une activité diapirique (Bouzenoune, 1993). Le remaniement de silex, réputé d'âge Yéprisien à la base du Miocène témoigne de l'existence d'une mer Eocène où se dépose une sédimentation marine durant l'Eocène et le Miocène inférieur à moyen. La sédimentation à la fin du Miocène indique le début d'une phase de régression.

La puissance moyenne du Miocène dans la région d'étude est de 150 m (Dubourdiou, 1956).

1.14. Le Quaternaire

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 (Fig. 13) :

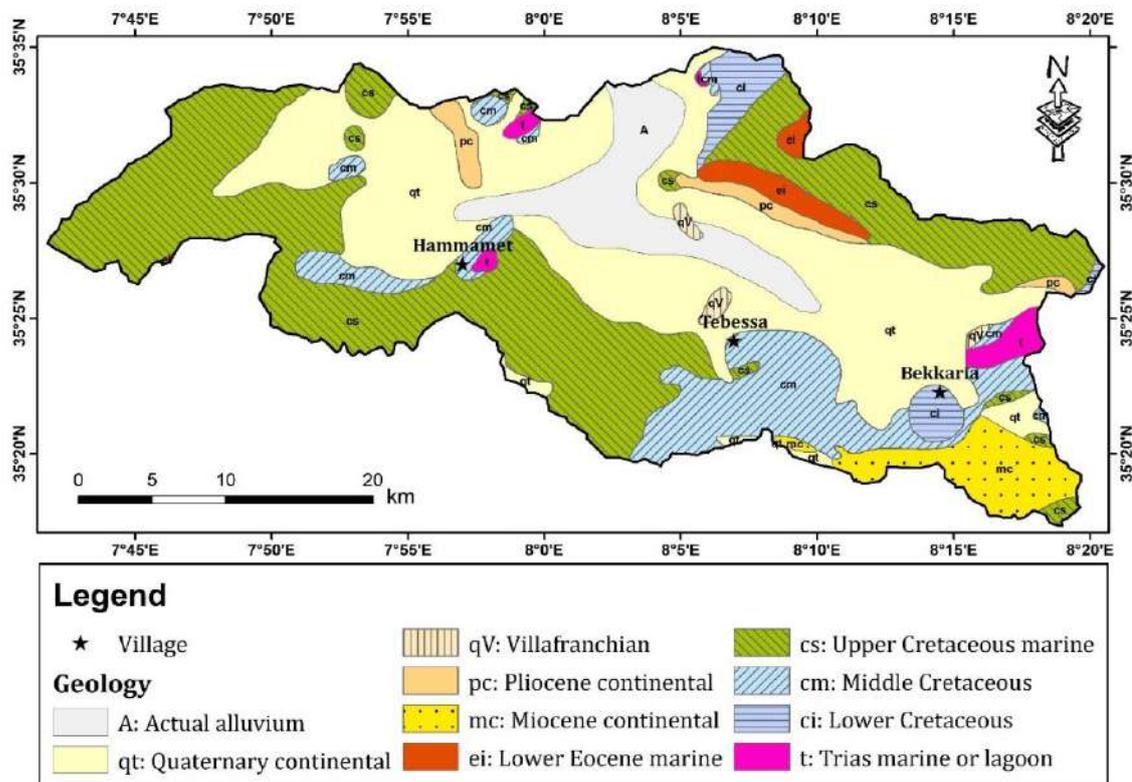


FIGURE 13. CARTE DES AFFLEUREMENTS GEOLOGIQUES DE LA REGION D'ETUDE

1.14.1 Formations actuelles et récentes

- *Éboulis actuels* : Ils existent au pied de tous les grands reliefs calcaires, mais ils se confondent, la plus part du temps, avec les éboulis anciens.
- *Travertins* : Ils se déposent par les sources de Tébessa et de Tenoukla.
- *Alluvions actuelles* : Elles n'existent que rarement car, en règle très générale, les oueds recourent les formations sur lesquelles ils coulent. Sur les bordures de la plaine, elles affectent l'allure de dépôts torrentiels.
- *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* : Ce sont des dépôts superficiels dû à l'évaporation d'eau chargée de calcaire développé surtout sur les alluvions caillouteuses anciennes.

1.14.2. Formations anciennes

- *Alluvions anciennes* : Elles constituent les basses terrasses des oueds et se raccordent généralement à des formations anciennes occupant latéralement de plus grandes surfaces ainsi que de niveaux localement discernables (cours amont de l'oued Ogla el Rbaib).
- *Alluvions anciennes de piedmont* : ce sont des formations de bordures de la plaine de Tébessa, argileuses ou caillouteuses. Dans le premier cas, elles sont constituées à partir des marnes sénoniennes à l'ouest de Tébessa, Dano-Montiennes au NW, Cénomaniennes au SE et dans le second cas, à partir des calcaires Maestrichtiens à du Dj. Djebissa. Ce sont, la plupart du temps, des cônes de déjection.
- *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 et Hallouf), sur les marnes Crétacées.
- *Matériel d'épandage ancien* : éboulis et cônes de déjection.
 - a. éboulis et cônes de déjection anciens, ravinés par les oueds actuels ;
 - b. grand éboulis, amas de blocs, souvent énormes, de calcaires Maestrichtiens paraissant soliflués, disloqués et en cours de destruction par l'érosion ;
 - c. localement : anciens cônes de déjection rougeâtres, d'esquilles calcaires bien cimentées, empruntées exclusivement aux reliefs Maestrichtiens au pied desquels ils se trouvent (Dj. Mistiri, Chabet el Hamara, Ksar Tebinet). Un pendage vers l'amont est parfois visible. Il peut s'agir, soit du rejeu récent d'accidents de la bordure du fossé d'effondrement, soit de mouvements de solifluxion sur les marnes. Une période très humide a dû présider à leur formation.

- *Cailloutis ancien du Dj. Djebissa* : Ils sont souvent perchés sur les argiles à gypse du Trias ou sur les marnes cénomaniennes dans la région du Dj. Djebissa.
- *Plio-quaternaire (Villafranchien)*

Il est composé de :

- a. Argile rouge (O. Oglat Rbaib ; O. kébir ; kodiet el Kramassa ; O. Serdiess) ;
- b. Conglomérat (contreforts E du Dj. Djebissa). Au kodiet et dans l'O. Naguess, près de Tébessa), l'argile et les conglomérats, alternant, n'ont pas été distingués. Quelquefois horizontaux, ces sédiments présentent, la plupart du temps, un pendage qui, s'il tient parfois à leur origine (dépôts de pente anciens à l'E du Dj. Djebissa), peut être aussi d'origine tectonique (O. Naguess, près de Tébessa).

A cette série se rapporte la plus grande partie des terrains de comblement du fossé d'effondrement. Un sondage exécuté pour la recherche d'eau dans la basse plaine de Tébessa les a traversés sur 171 m. Ils renferment, en général, une faune d'Hélicidés. L'origine des sédiments détritiques est toujours immédiatement proche.

2. Tectonique de la région

2.1. Les phases de l'orogénèse

Les différentes études sur la tectonique de la région ont permis de mettre en évidence la chronologie de la sédimentation, du plissement, du diapirisme et de la fracturation ainsi que, localement, les stades successifs d'effondrement du fossé de Morsott-Tébessa (Fig. 14). Cette région a subi les cinq phases et l'orogénèse alpine (Kowalski et al., 2002).

2.2. La phase compressive fini -Lutétienne

Elle est caractérisée par une contrainte maximale d'orientation N 320-330E. Elle se manifeste par des plis d'orientation atlasique N 50°-60° E bien visibles sur les cartes géologiques d'El-Aouinet (Dozet et al. 1985) et de Morsott (Blés, Fleury, 1970), mais moins nette sur la carte géologique de Tébessa (Durozoy, 1956) à cause de la superposition des phases ultérieures. Elle se manifeste clairement au SW de Tébessa (Carte géologique d'Ain Télijdjène, Vila., 1996).

2.3. La phase distensive du Miocène Inférieur

Elle est responsable de la formation et développement du bassin d'El Ma Labiod au cours du langhien-Serravallien et Tortonien, ainsi que celui des Oulad Skoukies et du graben de Foussana et Kasserine en Tunisie. La distension miocène a facilité la diapirisme dans le fossé de Oulad Soukies, à djebel Ouenza, à djebel Boukhadra et dans la zone entre djebel Belkfif et Hamiemat.

2.4. La phase compressive du Miocène supérieur

Elle ne se manifeste que dans la zone de Sebkhha Selloua et plus au Nord. Dans la zone d'étude, ces manifestations sont amorties, en accord avec (Vila., 1980). Les dernières manifestations de la compression miocène vers le sud, ont été observées dans les monts de Haute Merdja.

2.5. La phase compressive du Pliocène Inférieur

Elle a une contrainte maximale $N0^{\circ}-20^{\circ} E$ responsable de la formation des plis orientés $N90^{\circ}-110^{\circ}S$ (l'anticlinal de Bled Tabaga, le synclinal de Draa Es Snouber, L'anticlinal de Bir Salem et le remplissements de l'anticlinal Fini-Lutien de Bouroumane. Avec la formation de l'anticlinal de Bouramane-Tella-Djebel Anoual) sur la carte de Tébessa. On observe aussi la formation de synclinal de Draa Snouber sur la carte de Meskiana. L'effondrement du fossé de Morsott provoqué par la composante senestre de la contrainte $N0^{\circ}-20^{\circ}E$ au cours de stade distensif, était accompagné par le percement du diapir de Belkfif-Hamiema (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 sou-marin à l'Aptien-Albien, provoquant la réduction drastique du profil Aptien-albien de ce Djebel (Vila, 1996).

2.6. La phase compressive du pliocène Supérieur

Elle est responsable de la formation des structures plissées plus jeunes que le fossé de Morsott qui lui sont parallèles. A cette phase appartient l'anticlinal de djebel Belkfif, le synclinal Faid AL Obbiz (Morel, 1957) et l'anticlinal d'oued Annaba- djebel-Stah. Ces plis, orienté $N160-170^{\circ}E$ sont formés par la contrainte maximale $N80^{\circ}E$ et détecté par Blés (1969) à El Kouif. La composante dextre de cette contrainte est responsable de l'effondrement du fossé de Tébessa lié avec l'effondrement et basculement d'une partie des structures plicatives du Pliocène inférieur (comme une partie de l'anticlinal du Bled Tebaga, et du synclinal Draa Snouber). La composante senestre de cette contrainte a réactivé la montée du diapir de djebel Belkfif avec sa couverture turonienne et de la zone de Sidi Bouhalala. Ce soulèvement diapirique a déformé le fossé du Morsott et parallèlement se produisait la réactivation du diapir du djebel Djebissa. Qui monte jusqu'à maintenant. La zone de jonction des fossés de Morsott (orienté $NNW-SSE$) et de Tébessa (orienté $WNW-ESE$) constitue une sorte de décrochement. La prolongation septentrionale du fossé de Tébessa déborde cette zone de jonction en modifiant partiellement le synclinal de Draa Snouber (Pliocène inférieur) à l'Ouest du Djebel Belkfif. Par contre les plis de Villafranchien inférieur, parallèles au fossé du Morsott sont conservés. La composante senestre de la contrainte maximale du Plio-Villafranchien est responsable de la

formation du fossé de Hammamet (Fig. 14). Le substratum de ce fossé basculé, est constitué d'un système de horsts et grabens orientés SW-NE.

2.7. La formation du fossé d'effondrement de Tébessa

L'effondrement dans la région étudiée n'est observable qu'après la phase atlasique finilitétienne qui se manifeste dans l'atlas Saharien par des plis dirigés SW-NW.

Le fossé de Morsott dirigé NNW-SSE s'est formé après le stade compressif de la phase pliocène inférieur. La jonction entre le fossé de Morsott et le fossé de Foussana a été établie au cours du Villafranchien inférieur par la formation du fossé de Tébessa.

Les sédiments du Pliocène supérieur (Villafranchien inférieur) appartenant au premier stade d'effondrement du fossé de Tébessa ont été en grande partie érodés en liaison avec le deuxième stade d'effondrement affectant presque toute la surface du fossé au villafranchien supérieur (Pléistocène inférieur). Dans le fossé de Foussana les sédiments du Miocène sont couverts par la formation de Segui (Villafranchien inférieur) qui est contemporaine des sédiments du premier stade d'effondrement du fossé de Tébessa.

Les puissantes séries de cailloutis témoignent dans le fossé de Tébessa de l'importance de deuxième stade d'effondrement du Pléistocène inférieur.

Une subsidence beaucoup plus modérée après le deuxième stade d'effondrement a favorisé, au Pléistocène moyen, la sédimentation d'argiles au cours du troisième stade d'effondrement.

Au Pléistocène supérieur a eu lieu un quatrième stade d'effondrement très important dans la zone axial du fossé de Tébessa. Selon Zerdazi (1990), cet effondrement a provoqué la formation d'un graben d'une largeur d'environ 2 km. L'ampleur de l'effondrement a provoqué l'érosion partielle des sédiments de Q2 et le dépôt des galets de la série Q3 dans les zones érodées.

La subsidence était ralentie rapidement au cours de l'Holocène, mais elle se poursuit encore actuellement. Trois séismes d'intensité 4-5 sur l'échelle de Richter ont eu lieu au cours de l'année 1995, semblant bien être en relation avec le stade de distension de la phase plio-quadernaire. La zone axiale du graben de Tébessa, qui est actuellement le siège des dépôts alluvionnaires, poursuit son affaissement parallèlement aux soulèvements des marges du fossé lui-même.

Ce mouvement tectonique a provoqué l'érosion partielle des sédiments du Pléistocène moyen et le dépôt, dans des zones érodées, des galets du Pléistocènes supérieur. La subsidence s'est ralentie rapidement au cours du Quatrième stade, mais elle se poursuit jusqu'à nos jours car trois séismes ont eu lieu lors de l'année 1995 ; ce qui semble être en relation avec la phase responsable de la mise en place du fossé.

Le centre du fossé constitue, actuellement, le siège de dépôts alluvionnaires sur les sédiments du quatrième stade.

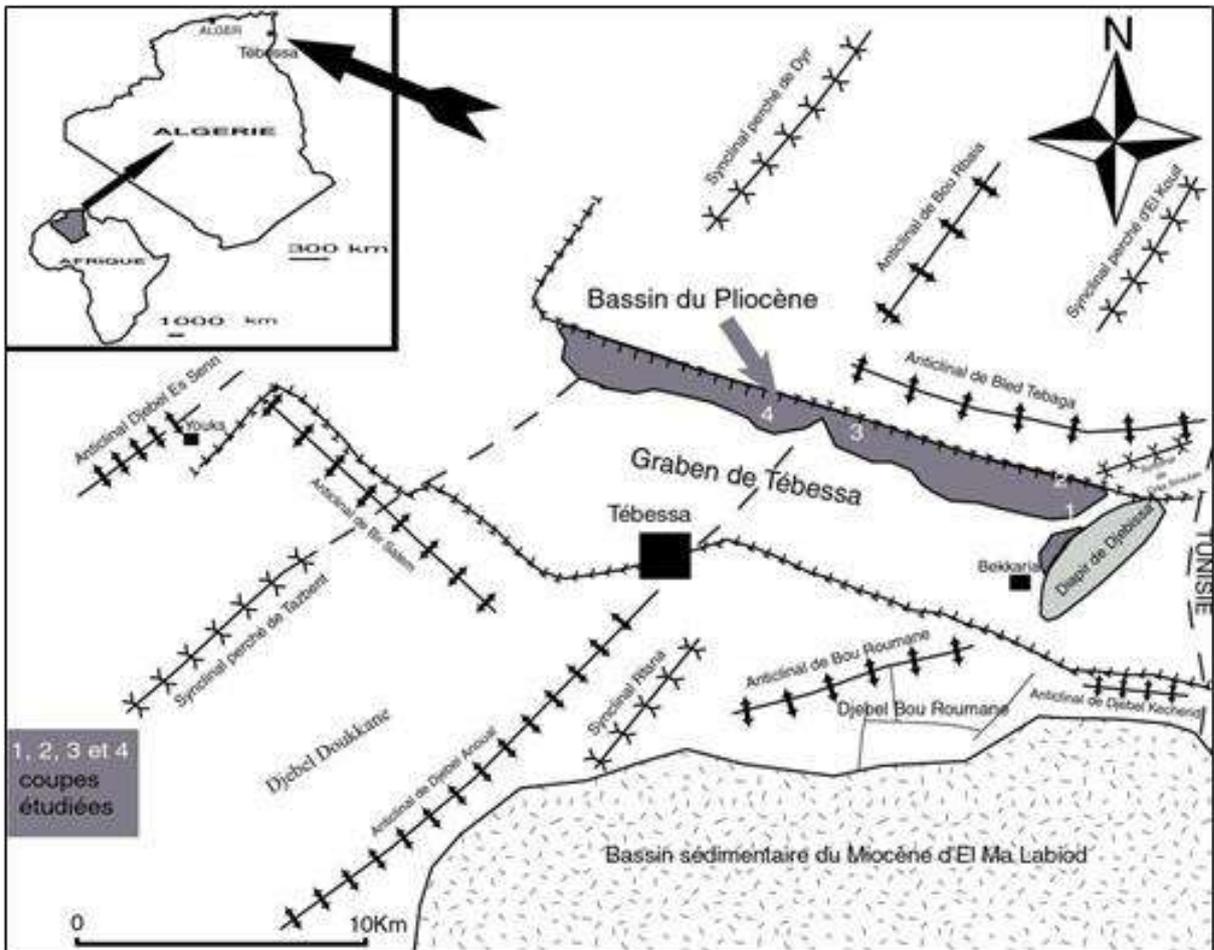


FIGURE 14. ESQUISSE STRUCTURALE DU FOSSE D'EFFONDREMENT DE TEBESSA ET SES ABORDS (DUROZOY, 1956) MODIFIEE

2.8. Commentaire sur la tectonique

La complexité tectonique de la zone étudiée nous a poussé à dégager les différentes structures résultantes de ces mouvements car ces structures pourraient constituer, probablement, des conditions aux limites des aquifères. Les cycles d'érosion et de sédimentation influent sur l'extension des systèmes aquifères.

3. Conclusion

En faisant le point sur toutes les formations géologiques, nous pouvons retenir quelques niveaux qui sont d'une perméabilité en grand, ce sont les calcaires maestrichtiens, turoniens, et ceux de l'Eocène. La présence de failles au niveau de ces formations leur confère l'aptitude de jouer le rôle d'important magasin d'eau. En effet ces fractures peuvent constituer au sein de ces assises des réseaux prêts à emmagasiner ou faire circuler d'importantes quantités d'eau. Nous rappelons que ces formations bordent la plaine de Tébessa aussi bien au Nord qu'au Sud.

A l'intérieur de la plaine on a des formations alluvionnaires qui sont d'une perméabilité en petit qui se constituent à partir des sédiments de la série plio-quadernaire. Ces formations bénéficient d'un granoclassement de la bordure vers l'axe de la plaine. En bordure on rencontre des gros cailloutis, voire des galets calcaires et au centre des limons récents qui sont peu perméables.

Chapitre IV :

Synthèse Hydrogéologique

Chapitre IV : Synthèse Hydrogéologique

1. Introduction

L'hydrogéologie constitue un outil de base pour connaître les différentes caractéristiques d'une nappe. Pour aborder cette étude nous avons effectué des mesures, nous permettant de dresser la cartographie piézométrique.

La détermination des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère (transmissivité et perméabilité) nous renseigne sur les caractéristiques de l'écoulement et le comportement de la nappe.

2. Géométrie de l'aquifère

Le bassin d'effondrement de Tébessa-Morsott a été couvert par une prospection électrique assez importante, à l'aide de 242 sondages électriques avec une ligne AB = 2000 m et 105 sondages avec une ligne AB = 6000m, réalisés par la compagnie générale de géophysique (Fig. 15).

A la suite de cette étude, des forages ont été entrepris. Ces derniers s'adressent uniquement aux formations du remplissage quaternaire plus ou moins perméables, ils ont été implantés dans les zones de plus fortes résistivités de ce remplissage.

Parmi les sondages électriques mentionnés ci-dessous, cent soixante-six ont été implantés sur la plaine, objet de notre étude. A la suite de cette opération, des forages ont été exécutés dans les formations de remplissage quaternaire plus au moins perméables, surtout dans les zones de plus forte résistivité.

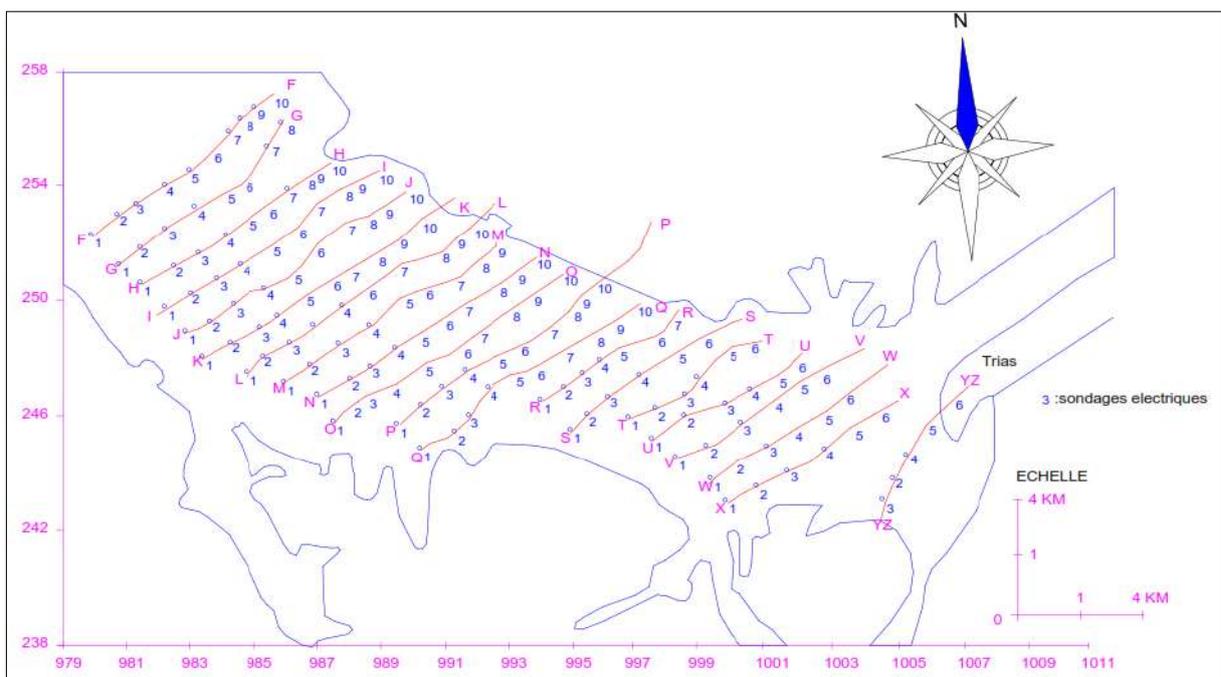


FIGURE 15. CARTE D'IMPLANTATION DES SONDAGES ELECTRIQUES (DJABRI, 1987)

Dans le but de mettre en évidence les variations du remplissage, la profondeur et la forme du substratum et de dégager la géométrie de l'aquifère, dans diverses zones, une réinterprétation des sondages électriques a été faite par Djabri (1987).

2.1. Essai de corrélation entre la géologie et la géophysique

Dans l'objectif de créer une corrélation entre la géologie et la géophysique, on dispose de vingt (20) profils, établis en se basant sur les résultats de la prospection électrique.

L'alternance des couches résistantes avec d'autres non résistantes et la répartition spatiale des résistivités fait sortir trois (03) horizons P1, P2, et P3 qui se suivent et se superposent d'une manière irrégulière.

Chacun de ces horizons est caractérisé par ses résistivités et sa position relative sur la coupe et aux prolongements qui se répartissent comme suit :

2.1.1. Ain Chabro :

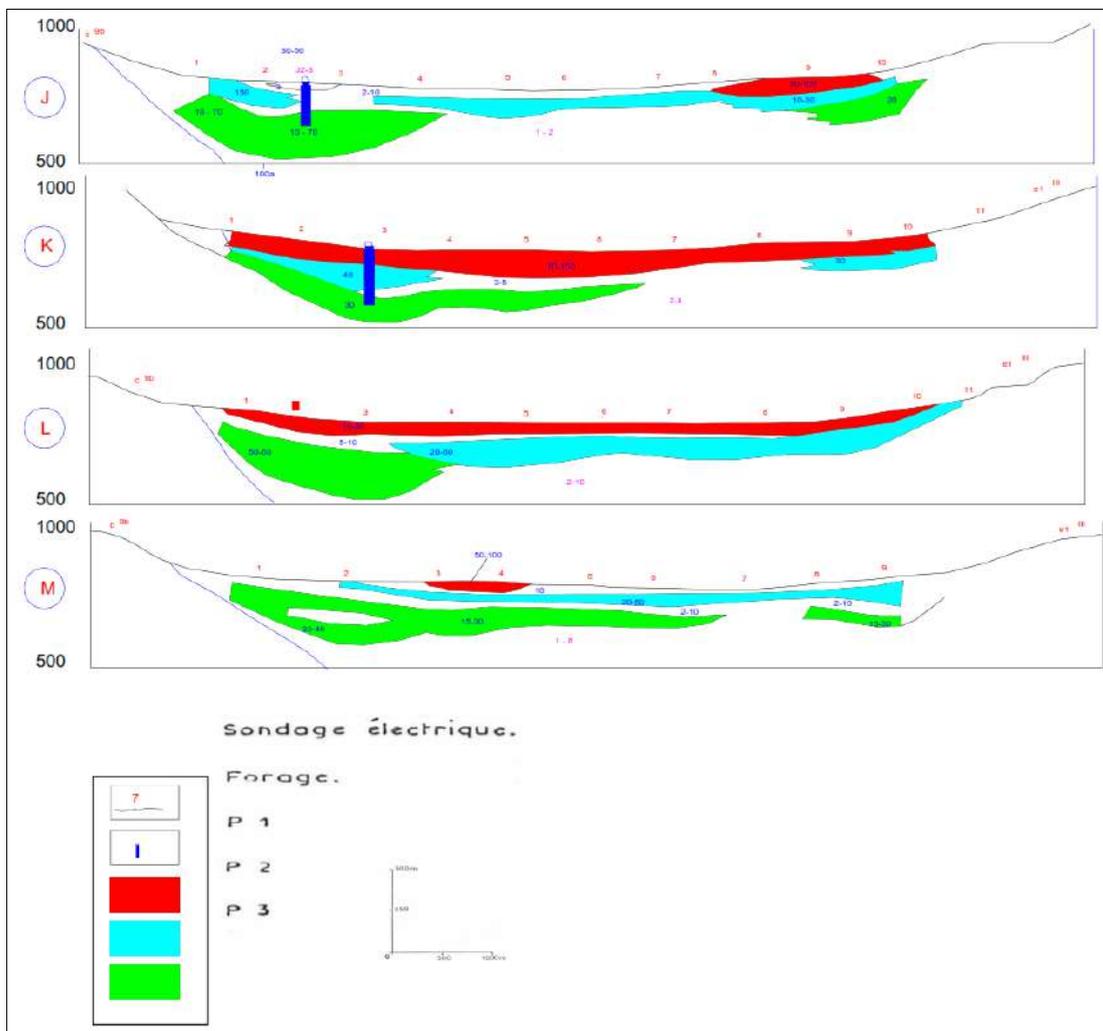


FIGURE 16. COUPES ELECTRIQUES A TRAVERS LA PLAINE DE TEBESSA SELON LES PROFILS (J, K, L ET M) (IN DJABRI, 1987)

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.

2.1.2. Tébessa :

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.

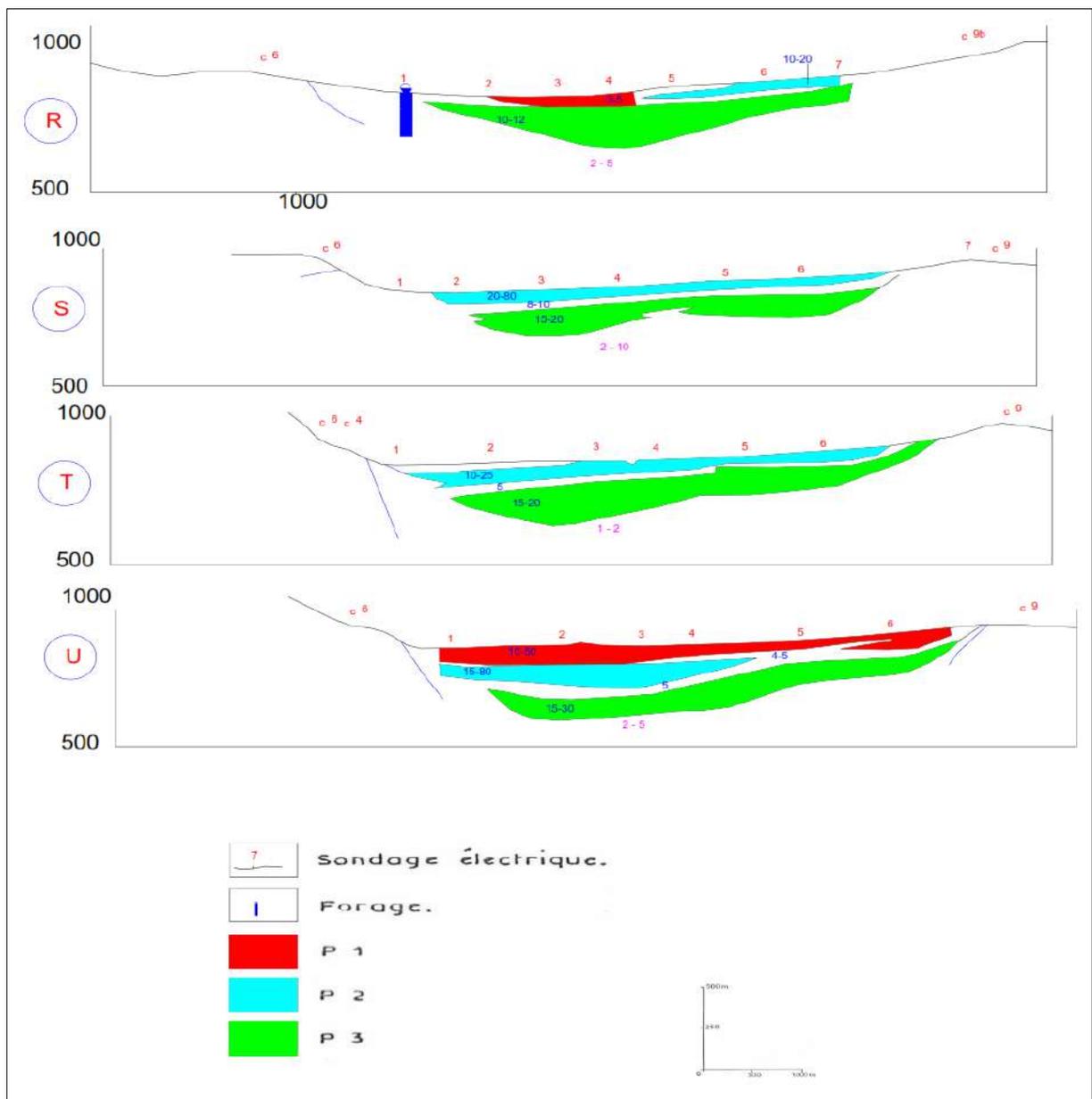


FIGURE 17. COUPES ELECTRIQUES A TRAVERS LA PLAINE DE TEBESSA SELON LES PROFILS (R, S, T ET U) (IN DJABRI, 1987)

2.1.3. Bekkaria :

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.

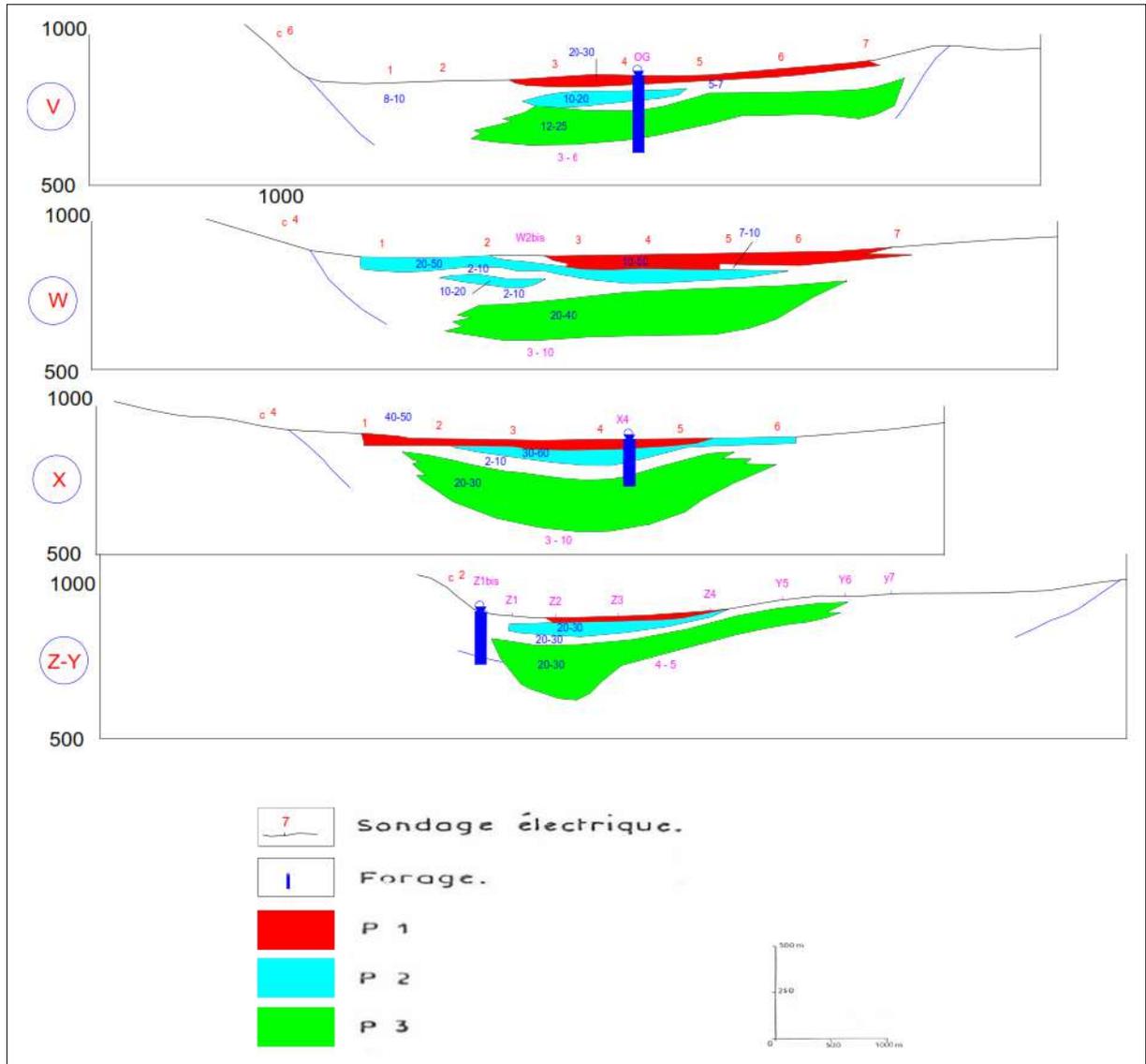


FIGURE 18. COUPES ELECTRIQUES A TRAVERS LA PLAINE DE TEBESSA SELON LES PROFILS (V, W, X ET XY) (IN DJABRI, 1987)

2.2. Mise en parallèle des profils géophysiques et des coupes lithologiques.

Avant de procéder à la mise en parallèle des profils géophysiques et des coupes lithologiques, il nous a paru utile de donner quelques indications concernant les relations entre les couches géologiques et les résistivités électriques pour la plaine d'étude :

- De 01 à 05Ωm : formations très conductrices : argiles ou marnes ou présence d'eau minéralisée.
- De 05 à 10Ωm : argiles ou marnes non salées conductrices
- De 10 à 20 Ωm : argiles avec cailloutis

- De 20Ωm et plus : formations relativement résistantes (Ces formations caractérisent l'horizon P).

La mise en parallèle se fait en essayant de corrélérer entre les profils géophysiques, reconstitués d'après la prospection électrique et la diagraphie d'une part et la succession lithologique résultante des couches traversées par les forages d'autre part, et ce en attribuant des valeurs de la résistivité à ces couches (Fig. 19).

L'implantation des puits sur les coupes géoélectriques nous permis de déterminer la résistivité électrique du premier horizon aquifère. En se basant sur les valeurs de la résistivité et les couches traversées par les forages, on peut déterminer la lithologie probable correspondante à la nappe phréatique.

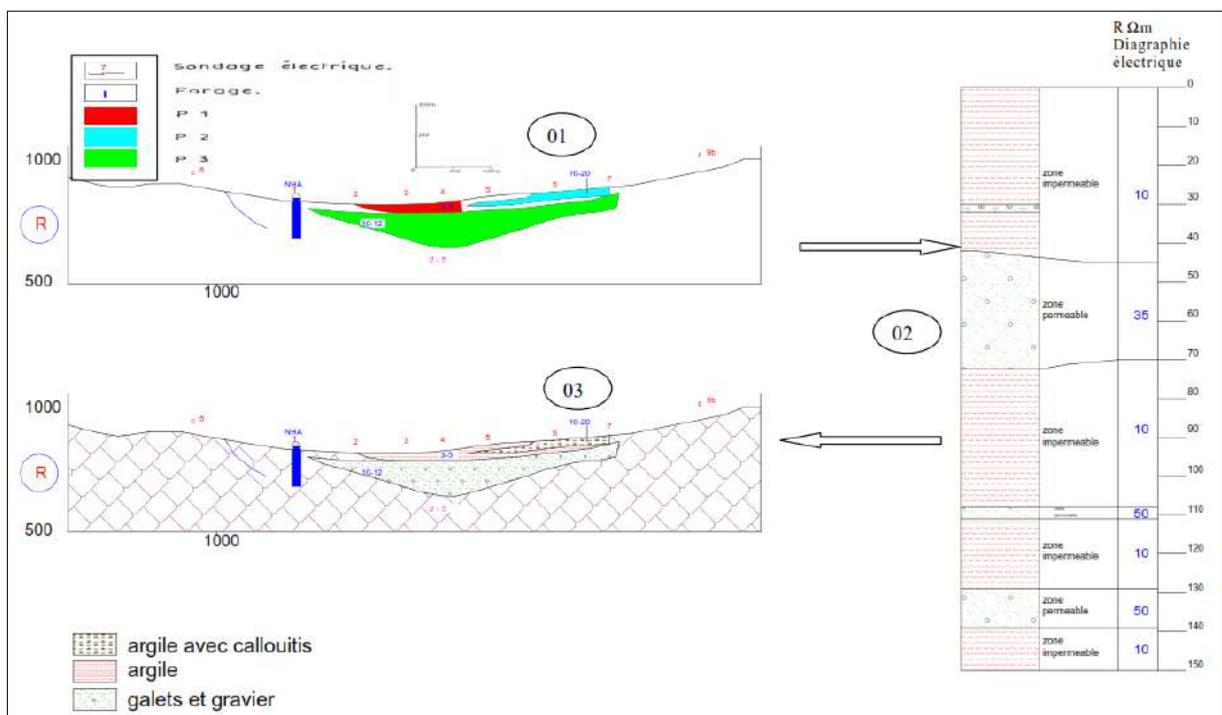


FIGURE 19. MISE EN PARALLELE DES PROFILS GEOPHYSIQUES ET DES COUPES LITHOLOGIQUES (CAS DU PROFIL R) (IN DJABRI, 1987)

3. Piézométrie

Deux campagnes piézométriques ont été réalisées (Ghrieb, 2011) : une première se rapportant au mois de mars 2009 comme période des hautes eaux et touche 73 puits et une deuxième campagne effectuée au mois de juillet 2009 comme période des basses eaux et touche les même puits.

Les puits mesurés sont reportés sur la carte (Fig. 20).

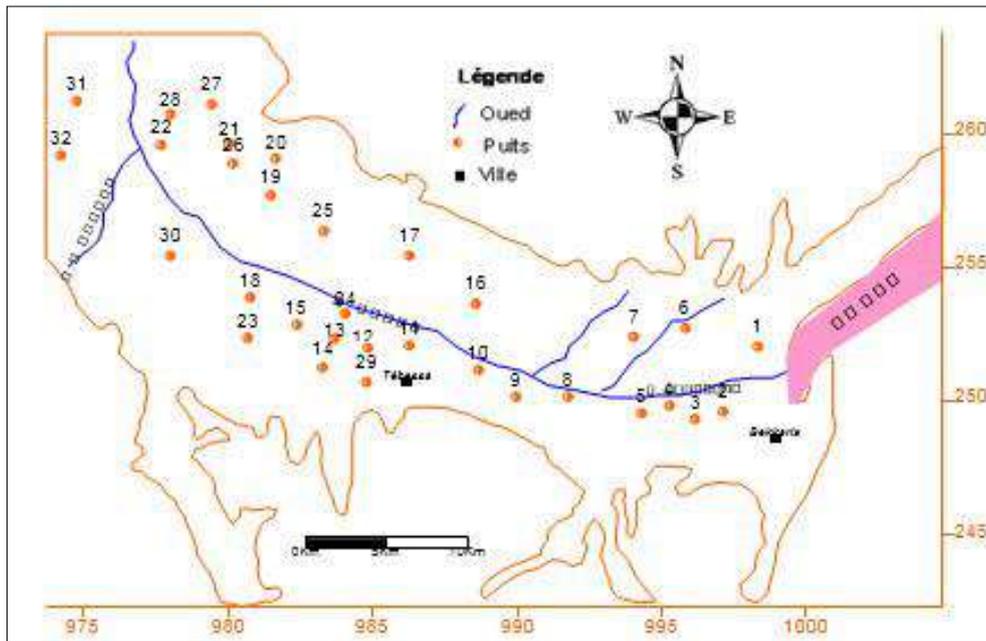


FIGURE 20. CARTE D'INVENTAIRE DES POINTS D'EAU (GHRIEB, 2011)

3.1. Carte piézométrique de la période des hautes eaux (mars 2009)

L'analyse de cette carte montre des fluctuations plus importantes au centre de la plaine (région de Tébessa), matérialisée par une baisse du niveau piézométrique surtout pour les puits 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17. Á Ain Chabro, on remarque une dépression localisée au niveau des puits 22 et 28. (Fig. 21). Ces changements sont probablement dus aux effets de pompage.

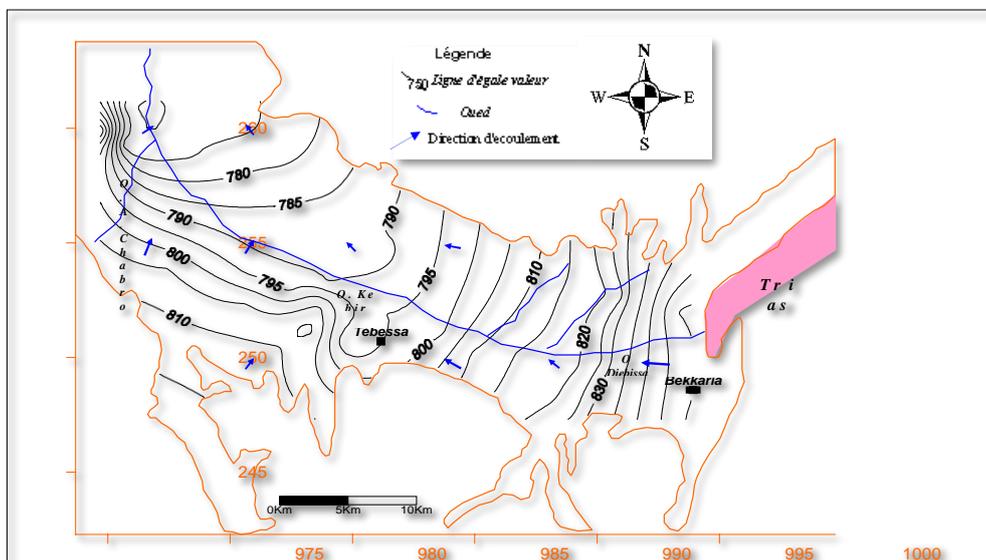


FIGURE 21. CARTE PIEZOMETRIQUE MARS 2009/ PLAINE DE TEBESSA (GHRIEB, 2011)

3.2. Carte piézométrique de la période des basses eaux (juillet 2009)

La présente carte relative à la période des basses eaux (juillet 2009) (Fig. 22), comparée à la précédente ne montre aucun changement.

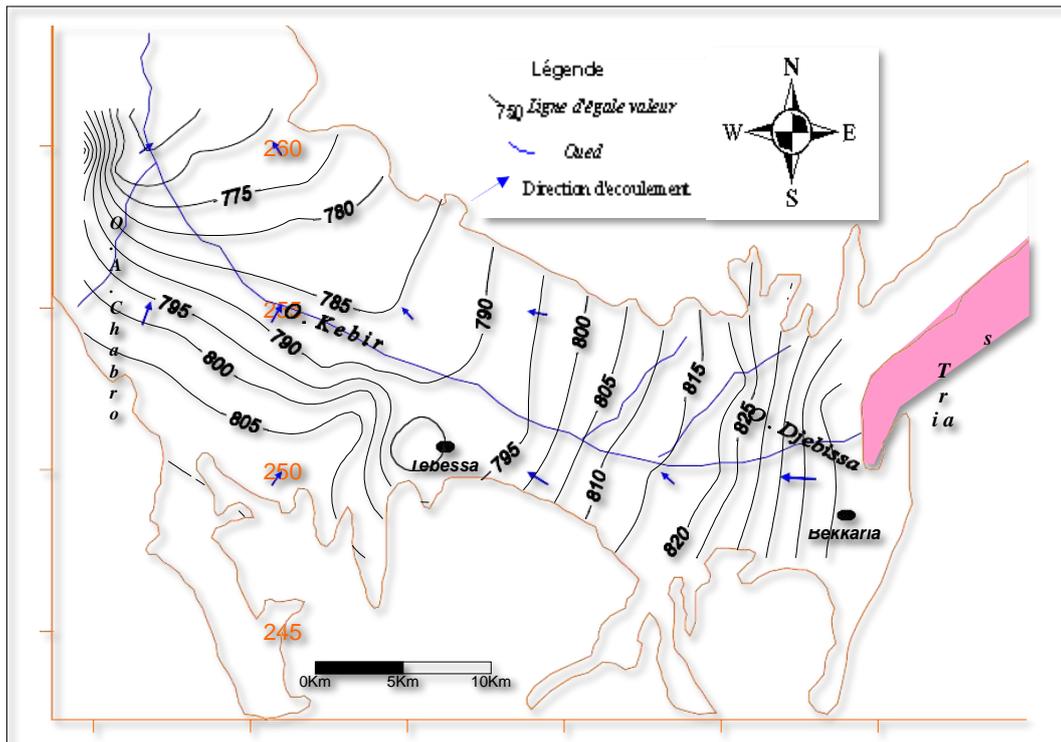


FIGURE 22. CARTE PIEZOMETRIQUE JUILLET 2009/ PLAINE DE TEBESSA (GHRIEB, 2011)

Les cartes piézométriques réalisées montrent un écoulement dirigé de l’Est vers l’Ouest conformément à la topographie, en effet Bekkaria est située à 900 m d’altitude par rapport contre Tébéssa est 800 et Ain Chabro se situe à moins de 800 m d’altitude.

Le drainage de la nappe s’effectue principalement par oued Kebir et ses affluents, il est compensé par une alimentation provenant des bordures calcaires situées dans la partie sud et nord de la région. À cette alimentation s’ajoute la recharge qui se fait à partir des précipitations.

4. Carte des conditions aux limites

4.1. Conditions aux limites et apports souterrains :

La cartographie piézométrique a montré un écoulement général de direction Est-Ouest, une partie de ces eaux converge vers l’oued Kebir, qui joue le rôle d’axe de drainage de la nappe superficielle. Les formations calcaires situées sur les bordures sont fissurées assurant ainsi une recharge de la nappe.

L’étude géophysique combinée à l’interprétation piézométrique et à la géologie locale, nous permet de dire :

- Que l’alimentation de la nappe se fait par les bordures nord et sud.
- À l’Est la nappe est légèrement alimentée (trias), tandis qu’à l’ouest une alimentation partielle existe par l’intermédiaire des calcaires turoniens.

En partant du contexte hydrogéologique régional (Fig. 23), on note les faits suivants :

- La bordure Est (septentrionale) est constituée par les formations argileuses rouges du trias. Djebel Djebissa qui forme un relief très boisé est une limite imperméable.

- la bordure Sud (méridionale) de Bekkaria à Ain Chabro présente une série stratigraphique complète de l’Aptien inférieur au Maestrichtien moyen (carte géologique) ainsi les calcaires perméables constituent une ligne d’alimentation.
- A Bekkaria, trois sources de débit variable (8, 1, 0.5 l/s) sortent des grés et se déversent dans la plaine. La plus importante est la source de Bekkaria (81 l/s) qui irrigue les jardins de Bekkaria par une seguia (canal). A noter que les eaux de ruissellement arrivent dans la plaine par l’oued djebissa. A noter que les eaux de ruissellement arrivent dans la plaine par l’Oued Djebissa.
- La bordure Est : est constituée par les formations argileuses rouges du Trias (Djebel-Djebissa) qui forment un relief très boisé et une limite imperméable.
- la bordure Nord : le contact entre le remplissage et les formations crétacées-éocènes de bordure se fait par faille. La limite hydrogéologique est constituée par la base faillée des calcaires de maestrichtien inférieurs qui donnent plusieurs sources de débordement. (Kissa–Couchada) se déversant vers le remplissage quaternaire. En deçà de cette limite, les calcaires de bordure peu étendus en surface ont un pendage vers la plaine et constituent une ligne d’alimentation.

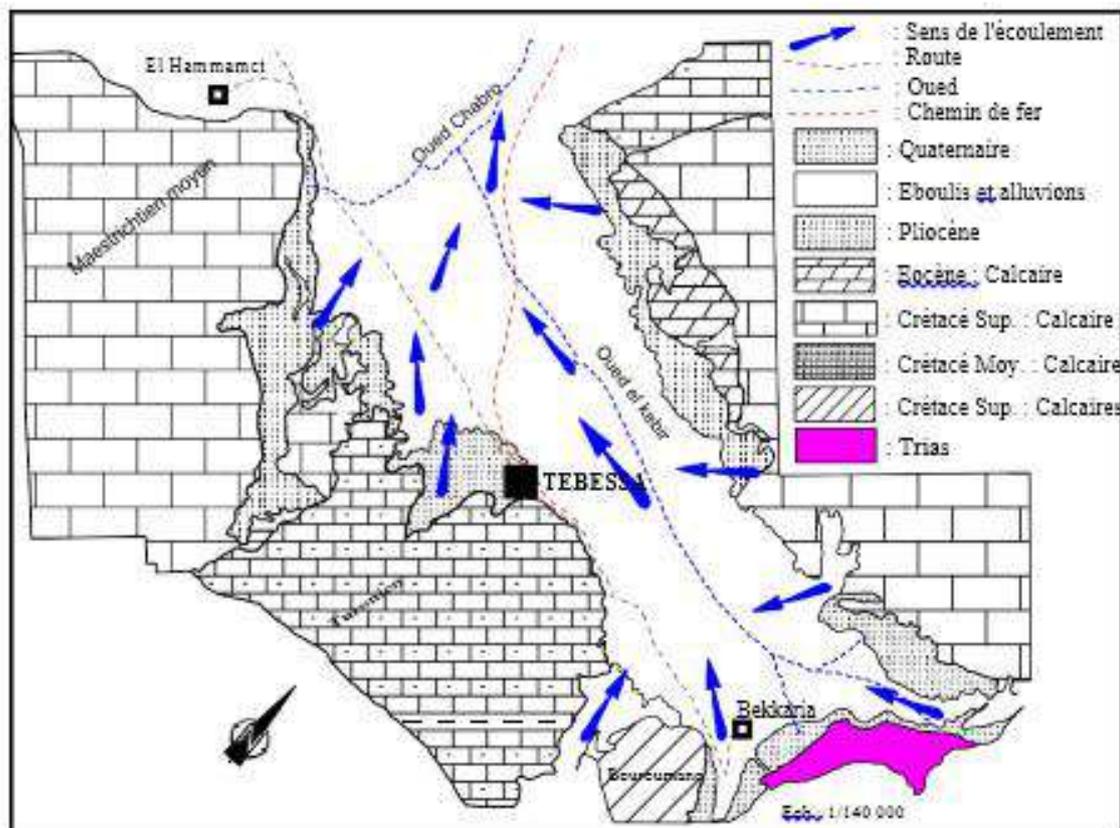


FIGURE 23. CARTE DES CONDITIONS AUX LIMITES. (DJABRI, 1987)

- La bordure Ouest : on a une limite étanche à l’exception du contact avec les calcaires du Turonien du Djebel Belkif dont le pendage est dirigé vers le remplissage quaternaire (A.N.R.H).

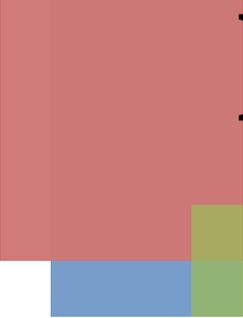
- L'alimentation de la nappe se fait par la bordure Nord et la bordure Sud.
- A l'Est la nappe est très peu alimentée (trias), tandis qu'à l'Ouest une alimentation partielle existe par l'intermédiaire des calcaires turoniens.

5. Conclusion :

L'étude piézométrique montre un écoulement général dirigé de l'Est vers l'Ouest, elle a également montré que les apports se font par les bordures latérales. Des échanges hydrauliques entre la nappe et Oued Kebir sont à noter, particulièrement au niveau du secteur de Tébessa, montrant l'existence d'une relation mixte entre les deux.

Par ailleurs l'interprétation des caractéristiques Hydrodynamiques a révélé que le secteur d'El Hammamet présente les meilleurs transmissivités, il est le plus favorable pour l'implantation d'éventuels forages.

Au cours de la période de hautes eaux, on note un affleurement de la nappe. Ce dernier est dû à la topographie et à la géologie (argiles).



Partie 2

Travail pratique

Chapitre 05 : Matériels et méthodes.

Chapitre 06 : Vulnérabilité à la pollution et protection des ressources en eau.

Chapitre 07 : Etude hydrochimique.

Chapitre V :

Matériels et méthodes

Chapitre V : Matériels et méthodes

Nous allons présenter les différentes méthodes de traitements des images satellitaires, les conditions et les modalités d'échantillonnage, les techniques de mesure et d'analyse des échantillons ainsi que le traitement des résultats par utilisation de l'outil informatique.

1. Les logiciels utilisés :

1.1. Global Mapper :

Est un logiciel de visualisation capable d'afficher les images raster, les données d'altitude et les données vectorielles les plus répandues. Il convertit, édite, imprime, acquière des données GPS, et vous permet d'utiliser des fonctionnalités SIG sur vos jeux de données de manière peu onéreuse et simple.

Un modèle numérique de terrain (MNT) peut être chargé avec une carte topographique pour créer une vue 3D de la carte. Une photographie aérienne numérique peut être drapée en même temps que des données vectorielles pour créer une carte riche en informations.

Il possède des fonctionnalités internes pour le calcul de distances et de superficies, l'ajustement de la luminosité et du contraste des images raster, des requêtes sur les altitudes, la création de contours, l'analyse de bassin versant à partir de MNT.

1.2. ArcGis 10.3 :

ArcGis Desktop comprend une suite d'applications intégrées : *ArcMap*, *ArcCatalog* et *ArcToolbox*. A l'aide de ces trois applications, on peut effectuer toutes les tâches SIG, de la plus simple à la plus avancée, y compris la cartographie, la gestion des données, l'analyse géographique, la mise à jour des données et le géotraitement.

ArcMap représente l'application centrale dans ArcGIS Desktop. Il s'agit de l'application SIG utilisée pour toutes les tâches associées aux cartes, y compris la cartographie, l'analyse des cartes et la mise à jour. Dans cette application, on travaille avec des cartes. Ces dernières ont une mise en page contenant une fenêtre géographique avec un ensemble de couches, légendes, barres d'échelle, Flèche d'orientation « Nord » et autres éléments.

1.3. ENVI 5.1 :

Le logiciel ENVI est un logiciel complet de traitement d'images de télédétection optiques et radar. Toutes les méthodes de traitement d'images de corrections géométriques, radiométriques, de classification et de mise en page cartographique sont présentes. Ce logiciel est fort dans son approche de traitement d'image qui combine les techniques du (file-based) et (band-based) avec des fonctions interactives. Lorsqu'un fichier d'image est ouvert chaque bande est stockée dans une liste puis elle peut être manipulée par toutes les fonctions du système. Si plusieurs fichiers sont ouverts en même temps, on peut sélectionner les bandes qui vont être traitées.

En général, le logiciel dispose essentiellement de tous les outils nécessaires au traitement d'images dans différentes disciplines, et permet pour chacun d'implémenter sa propre stratégie d'analyse.

1.4. Google Earth Pro :

Est un logiciel, propriété de la société Google, permettant une visualisation de la Terre avec un assemblage de photographies satellitaires. Ce logiciel permet à tout utilisateur de survoler la Terre et de zoomer sur un lieu de son choix. Selon les régions géographiques, les informations disponibles sont plus ou moins précises. Ainsi un chercheur d'une université peut localiser son site de recherche, obtenir une vue en 3D des reliefs, alors que la résolution des photos d'une bonne partie de la Terre est très faible. La couverture, d'après Google, devrait s'améliorer rapidement.

1.5. Diagrammes :

C'est un logiciel d'hydrogéochimie qui aide à vérifier la fiabilité des analyses chimiques par le calcul de la balance ionique, à calculer des paramètres géochimiques (rapports caractéristiques et les indices de saturation) et de réaliser des diagrammes hydrochimiques (Piper, Schoeller, Riverside, ... etc.).

1.6. PreeqI v 2.15 :

C'est un logiciel de modélisation thermodynamique qui fait la simulation à l'évaporation naturelle de l'eau (température de l'échantillon). Il fait des calculs des indices de saturation ($IS = \log(Q) / \log(Kps)$) des minéraux dissous dans l'eau (en utilisant la loi de Debye-Huckel). (Parkhurst et Appelo, 1999).

1.7. AqQA :

C'est un logiciel d'hydrogéochimie qui aide à vérifier la fiabilité des analyses chimiques par le calcul de la balance ionique, la spéciation des unités carbonatées ainsi que la conversion des unités.

1.8. Origin :

Origin est un logiciel de traitement et d'analyse de données scientifiques, Il permet notamment de tracer des graphes 2D et 3D et possède des fonctions d'analyse de pics. Il est aussi capable d'exporter les graphes en format JPEG, GIF, TIFF ... etc.

2. Méthodes :

2.1. La modélisation hydrologique :

Le bassin versant topographique est le collecteur des eaux de précipitations qui ruissellent jusqu'au plan d'eau qui en est le réceptacle. On considère ainsi que tout le contour du plan d'eau

représente un exutoire potentiel. C'est pourquoi le contour du plan d'eau est transformé en points espacés, distance qui correspond à la résolution du MNT. A chaque point sera associé un « sous bassin versant », l'ensemble des sous-bassins formant le bassin versant total du plan d'eau. La délimitation du bassin versant topographique n'a théoriquement besoin que d'un exutoire, à partir duquel les géotraitements permettent de remonter les lignes de plus grande pente et de dessiner les lignes de crêtes.

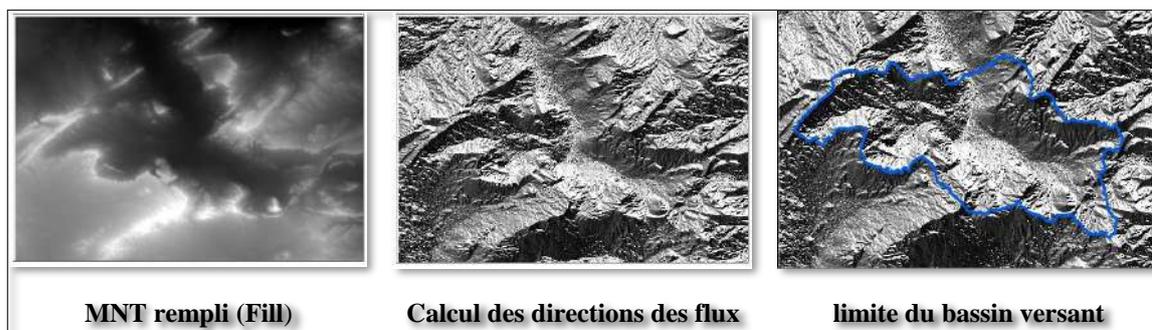


FIGURE 24. ILLUSTRATION DE LA CHAÎNE DE GEOTRAITEMENTS POUR LA DELIMITATION DU BASSIN VERSANT

Sous ArcGis le MNT a subi le traitement de remplissage pour donner un modèle hydrologique correct (outil « Fill »), puis les directions de flux ont été calculées (Flow direction) et (Flow accumulation). Le sous bassin versant est ensuite calculé pour chaque point de contour en utilisant l'outil Watershed de « ToolBox ArcGis / Spatial Analyst / Hydrology ». Ces sous bassins versants sont transformés en polygones (couche vectorielle) puis les réunis avec la surface du plan d'eau pour former un bassin versant global (Fig. 20).

2.1.1. Processus d'extraction du réseau hydrographique

Les techniques d'extraction de réseau à partir d'un MNT raster se décomposent, essentiellement en deux approches : celles qui reposent sur une analyse géomorphologique par caractérisation locale des variations altimétriques et celles à inspiration hydrologique en se basant sur le suivi du ruissellement de l'eau.

Dans cette approche, les méthodes d'extraction retiennent le principe d'un cheminement naturel des eaux entraînées par la gravité et guidées par la topographie. Elles s'appuient sur la détermination des directions d'écoulement de l'eau en chaque cellule de résolution ou pixel à partir des valeurs altimétriques du MNT, sachant que l'eau emprunte le chemin défini par la ligne de plus grande pente. Ainsi les cellules se déversent les unes dans les autres en fonction de la pente locale et de ceci un ensemble cohérent de talwegs principaux pourra être déduit.

Pour cette raison nous avons utilisé un processus d'extraction du réseau hydrologique basé sur une analyse hydrologique qui utilise le MNT. Les étapes de traitement que nous proposons sont schématisées par l'organigramme fonctionnel donné par la Figure 28.

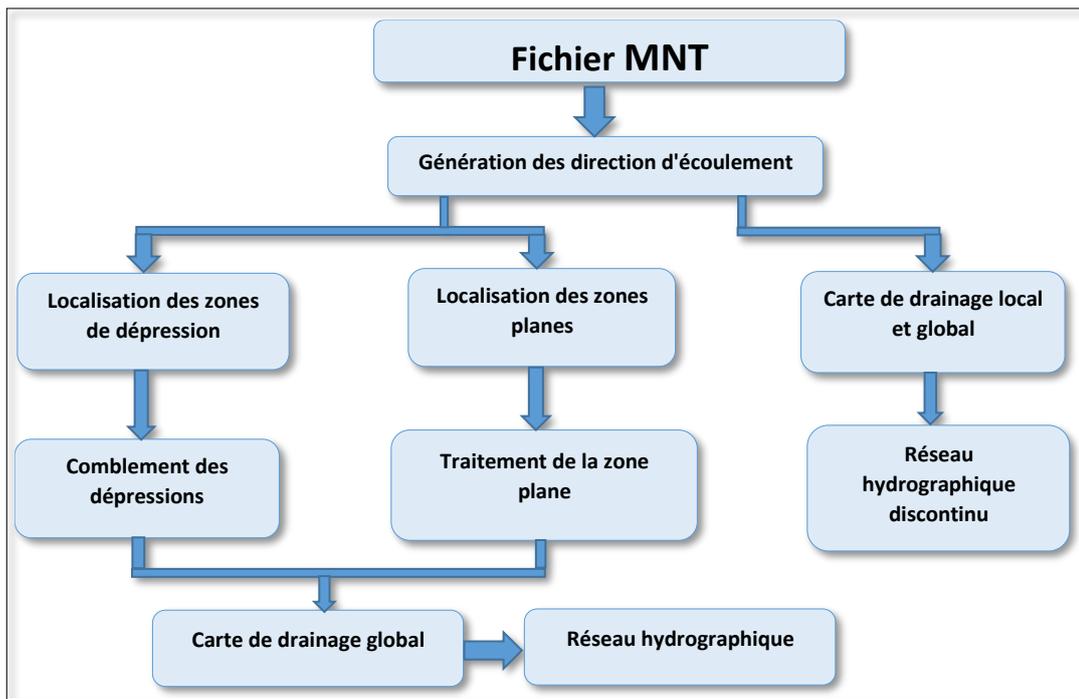


FIGURE 25. ORGANIGRAMME GENERAL DU PROCESSUS D'EXTRACTION DU RESEAU HYDROLOGIQUE

2.1.2. Extraction de la carte des pentes

La pente est un paramètre primordial qui intervient dans la détermination de beaucoup d'indices hydrologiques. Une carte des pentes de qualité est d'une grande importance pour pouvoir analyser correctement un bassin versant (Gunie, 2002).

La Carte des pentes quant à elle est dérivée du MNT sous ArcGIS à partir de *Modules* → *Spatial Analyst tools* → *surface* → *Slope* : Nous obtenons donc une carte des pentes en degré ou en pourcentage.

2.2. Modélisation de la vulnérabilité des eaux souterraines

Dans le contexte actuel de la politique de la gestion durable des ressources en eau, la prédiction du risque de pollution et la protection de ces ressources sont d'une importance capitale. Pour cela, la protection, à moyen et à long terme, de la qualité de ces ressources s'impose. Cette protection peut se faire, d'abord par la délimitation des zones susceptibles d'être atteintes par la pollution que l'on qualifiera de *vulnérables* ou à *risques*. Toutefois, la quantification du risque de pollution reste encore un problème difficile à appréhender.

Les jeux de données initiaux ont tous la même référence spatiale (WGS 1984 UTM zone 32N). Le traitement de ces données (Raster, Vectorielles et Alphanumériques) mène aux calculs et à la cartographie des indices DRASTIC (Fig. 29).

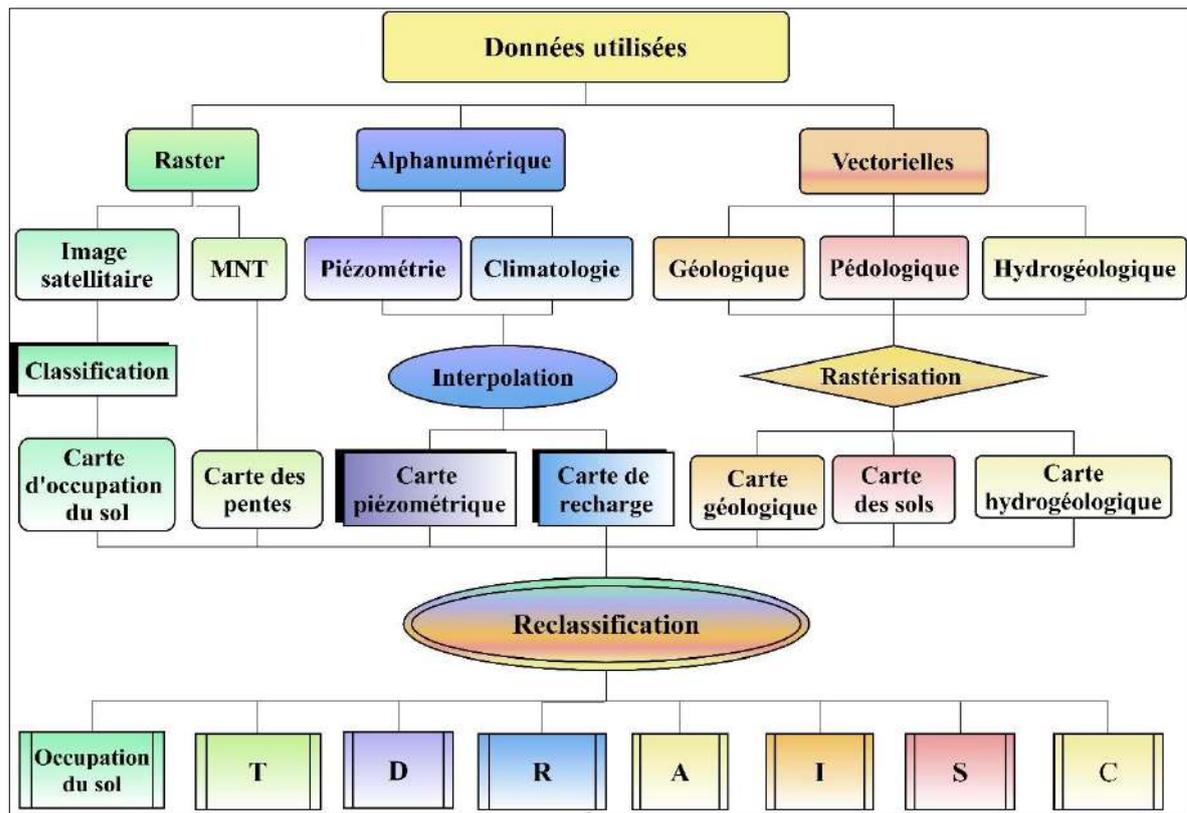


FIGURE 26. ORGANIGRAMME DE LA MODELISATION DE LA VULNERABILITE DES EAUX SOUTERRAINES

2.2.1. Données Raster (grille) :

Dans sa forme la plus simple, un raster se compose d'une matrice de cellules (ou pixels) organisées en lignes et en colonnes (grille) dans laquelle chaque cellule contient une valeur représentant des informations (la température, l'altitude, la couleur, ...). Les rasters sont des photographies aériennes numériques, des images satellitaires, des images numériques, voire des cartes numérisées (scannées).

a. Image MNT :

La prise en compte de la topographie par le MNT (Modèle Numérique de Terrain), pour notre travail avec une résolution de 12,5 m × 12,5 m a été obtenue de l'Alaska Satellite Facility (Fig. 30). Après le traitement de ces images MNT, elles nous ont permis de :

- Définir le réseau hydrographique.
- Choisir l'exutoire pour délimiter le sous-bassin versant.
- Réaliser la carte altimétrique (topographique).
- Réaliser la carte des pentes.

Le paramètre topographie est représenté par les valeurs de la pente en pourcent (%). Il traduit la capacité des eaux superficielles à introduire des agents polluants vers la nappe en influençant les taux d'infiltration et de ruissellement. Le modèle numérique de terrain a été utilisé pour calculer la pente en tous points de la zone d'étude.

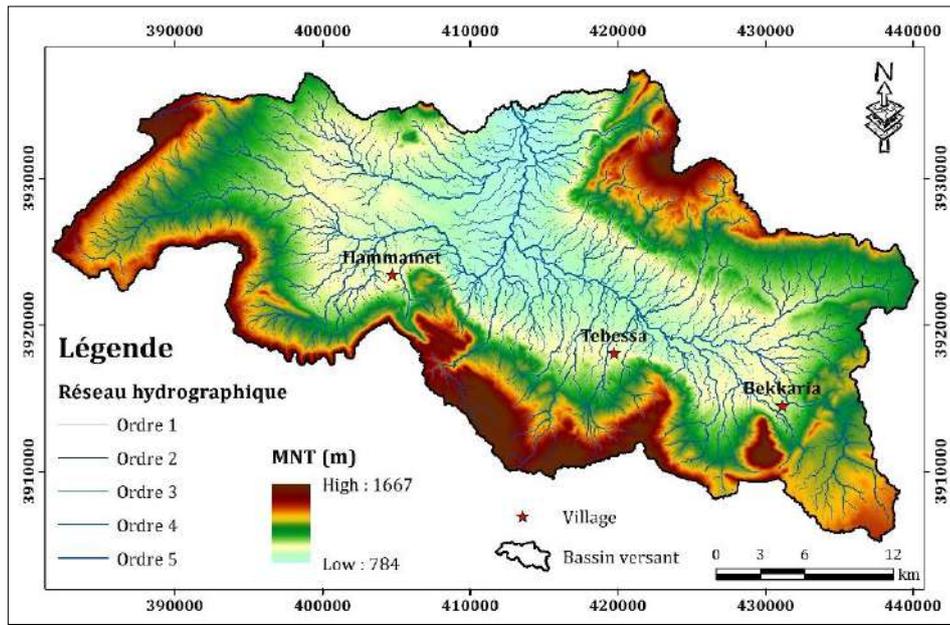


FIGURE 27. IMAGE MNT DU BASSIN VERSANT DE LA ZONE D'ETUDE

b. Image Sentinel-2 :

L'image satellitaire Sentinel-2, avec une résolution de 10 m × 10 m, a été obtenue du serveur d'images Earth Explorer de l'USGS à l'adresse <http://earthexplorer.usgs.gov/> (Fig. 31). Elle permet la détermination de l'occupation du sol par l'utilisation de la méthode de classification supervisée par l'algorithme « Maximum de vraisemblances » (MLC) pour discriminer les classes suivantes :

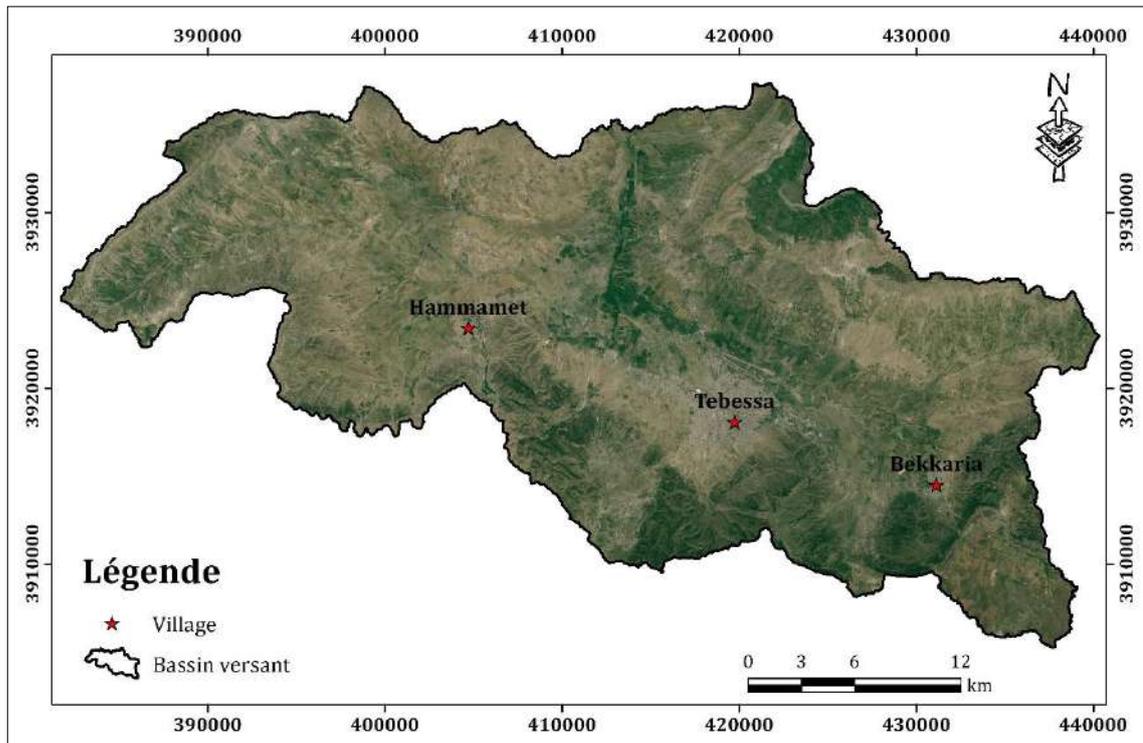


FIGURE 28. IMAGE SENTINEL-2 DU BASSIN VERSANT DE LA ZONE D'ETUDE

- ✓ Surfaces urbaines.
- ✓ Surfaces agricoles.
- ✓ Forêt.
- ✓ Sol nu.
- ✓ Surfaces d'eau.

Les données acquises par télédétection nécessitent donc une série de traitements afin qu'elles soient les plus représentatives possible de la réalité. Pour atteindre notre objectif, notre démarche a été réalisée comme suit (Fig. 32) :

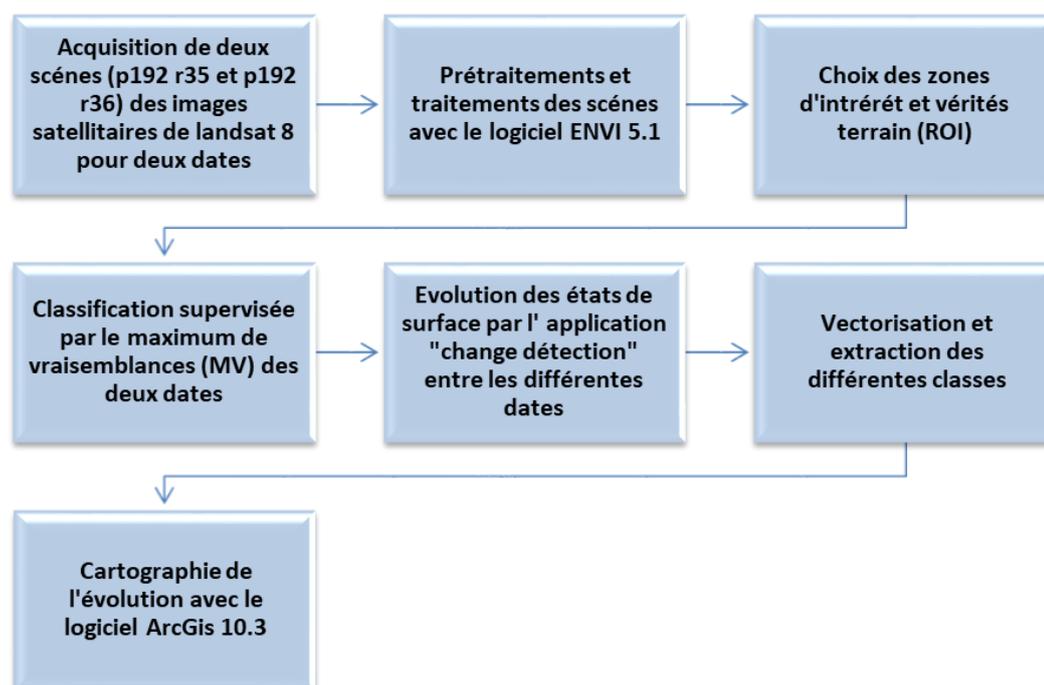


FIGURE 29. ORGANIGRAMME DU PROCESSUS GENERAL DE TRAITEMENTS DES IMAGES SENTINEL-2

- Le prétraitement d'image commence par un empilement spectral des bandes de chaque scène à partir de la commande <layer stacking> dans le logiciel de traitement d'images satellitaires (Envi 5.1), cette étape est utilisée pour simplifier le découpage des scènes des 2 dates étudiées. (Gunie, 2002).
- Pour l'extraction du secteur d'intérêt et la correction géométrique de l'image Sentinel-2 dans le système de référence UTM/WGS 84, fuseau 32N. Nous avons effectué un redimensionnement par traitement « Resize Data » dans le menu principal d'ENVI.
- Dans l'exploitation des images Sentinel-2, nous pouvons choisir de faire une analyse combinée en faisant appel aux différentes compositions colorées ou choisir une analyse individuelle, canal par canal. Les images individuelles apparaissent comme des images à niveaux de gris. Cependant, ils peuvent être combinés pour former des images composites, en affectant à chaque bande spectrale une couleur primaire. Nous considérons que les trois bandes spectrales sélectionnées présentent le maximum

d'information. D'après ce dernier la combinaison des bandes « MIR », « PIR » et « Rouge » représente le maximum d'information pour notre thématique dans la région d'étude. L'analyse des signatures spectrales montre une décorrélation entre les différentes bandes spectrales. Modifier l'aspect visuel d'une image en vue de faciliter son interprétation. L'aspect visuel d'une image dépend fortement de sa dynamique (contraste).

- La classification par maximum de vraisemblance utilise également des zones-échantillons pour déterminer les caractéristiques des classes d'objets, qui deviennent également des centres dans l'espace multi-spectral. par contre, au lieu d'affecter un vecteur spectral à la classe dont le centre de gravité est le plus proche, elle se base sur une analyse statistique de la distribution des vecteurs spectraux de l'échantillon pour définir des zones de probabilité équivalente autour de ces centres.
- La probabilité d'appartenance à chacune des classes est calculée pour chaque vecteur spectral et le vecteur est affecté à la classe pour laquelle la probabilité est la plus élevée. Un avantage considérable de cette méthode est qu'elle fournit pour chaque pixel, en plus de la classe à laquelle il a été affecté, un indice de certitude lié à ce choix. Il est ainsi possible de traiter différemment des pixels de la classe "eau" avec plus de 90% de certitude, et des pixels classe "eau" avec une faible probabilité. On hésitera par exemple moins à reclasser ces derniers pixels dans une autre classe lors de traitements ultérieurs.

2.2.2. Données Vectorielles (Shape) :

Les fichiers de formes (shapefiles) sont le résultat d'une digitalisation des entités géographiques d'une image raster (images satellitaires et photos aériennes, ou cartes topographique, géologique, pédologique ... scannées et géoréférencées). Les entités géographiques d'un fichier de formes peuvent être représentées par des points, des lignes et des polygones (ou surfaces).

a. Carte Géologique :

C'est la digitalisation d'une image de la carte géologique de l'Algérie (2^{ème} édition, 1952, Constantine-Nord, échelle : 1/500000) numérisées et géoréférencée (image raster).

La zone non saturée (vadose) et la zone saturée (nappe) correspondent respectivement aux couches de terrain entre la surface topographique et la côte piézométrique maximale de la nappe et aux couches de terrain entre la côte piézométrique maximale de la nappe et le substratum. L'intérêt de ces deux zones réside essentiellement dans leurs perméabilités et leurs capacités d'atténuation. Les cartes « I » et « A » sont obtenue par l'interprétation de la carte géologique (Fig. 33). Les différentes classes ainsi obtenues sont pondérées de 3 à 10 selon le modèle DRASTIC.

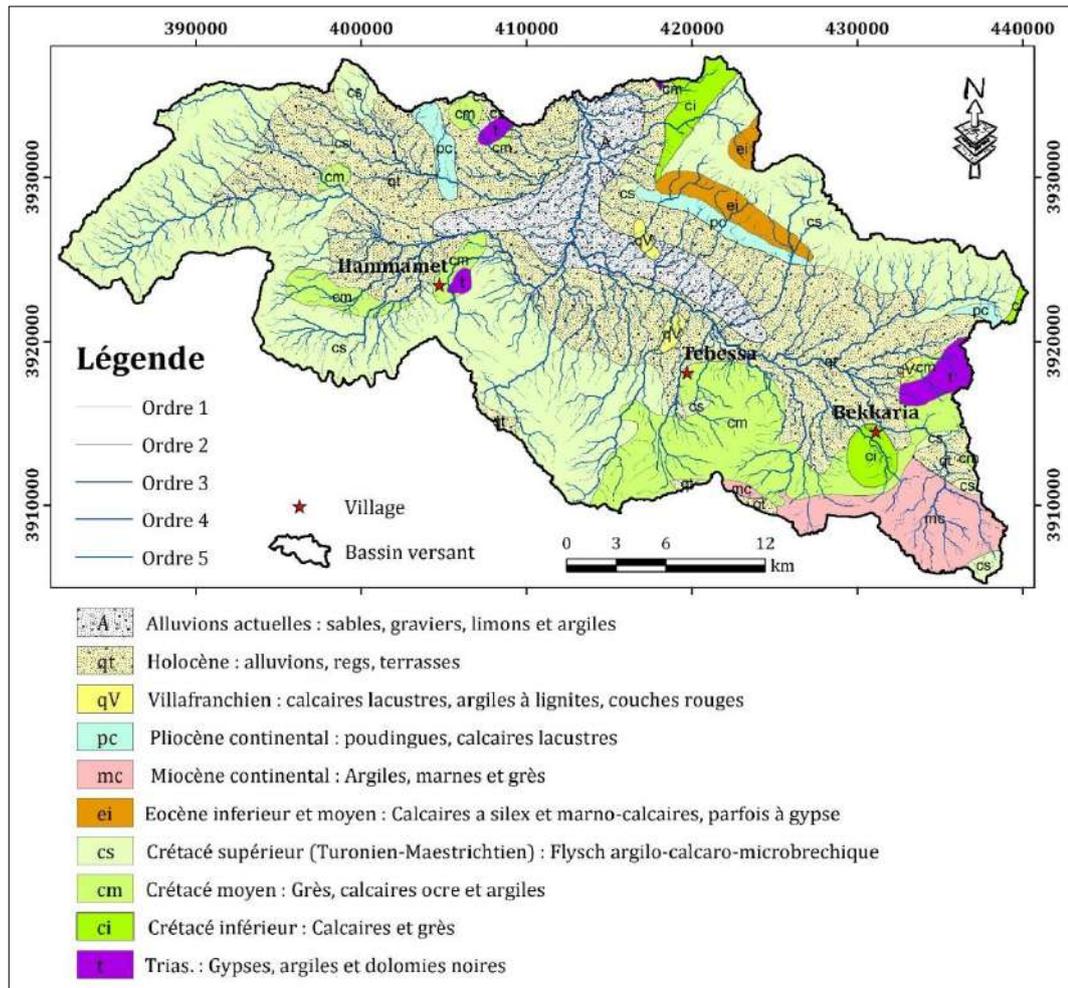


FIGURE 30. CARTE D’AFFLEUREMENTS GEOLOGIQUES DU BASSIN VERSANT DE LA ZONE D’ETUDE

b. Carte des Sols :

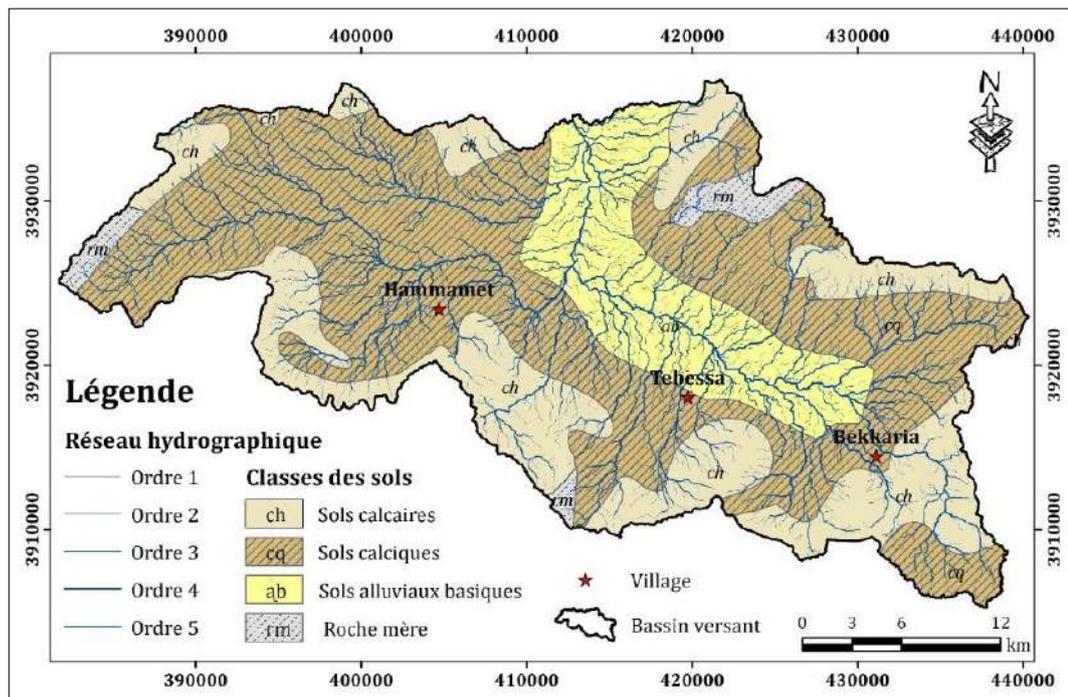


FIGURE 31. CARTE DES SOLS DU BASSIN VERSANT DE LA ZONE D’ETUDE

C'est une image de la carte des sols d'Algérie (Feuille N.I.32-NO, Tébessa, échelle : 1/500000) numérisée et géoréférencée (image raster). La carte pédologique (Fig. 34) présente quatre différentes classes de sols : calciques, calcaires, alluvions basiques, roche mère.

c. Carte Hydrogéologique :

C'est une image de la carte hydrogéologique interprétative d'Algérie (Feuille N.I.32-XX, Oum El Bouaghi et Feuille N.I.32-XXI, Tébessa, échelle : 1/200000) numérisée et géoréférencée (image raster). (Fig. 35)

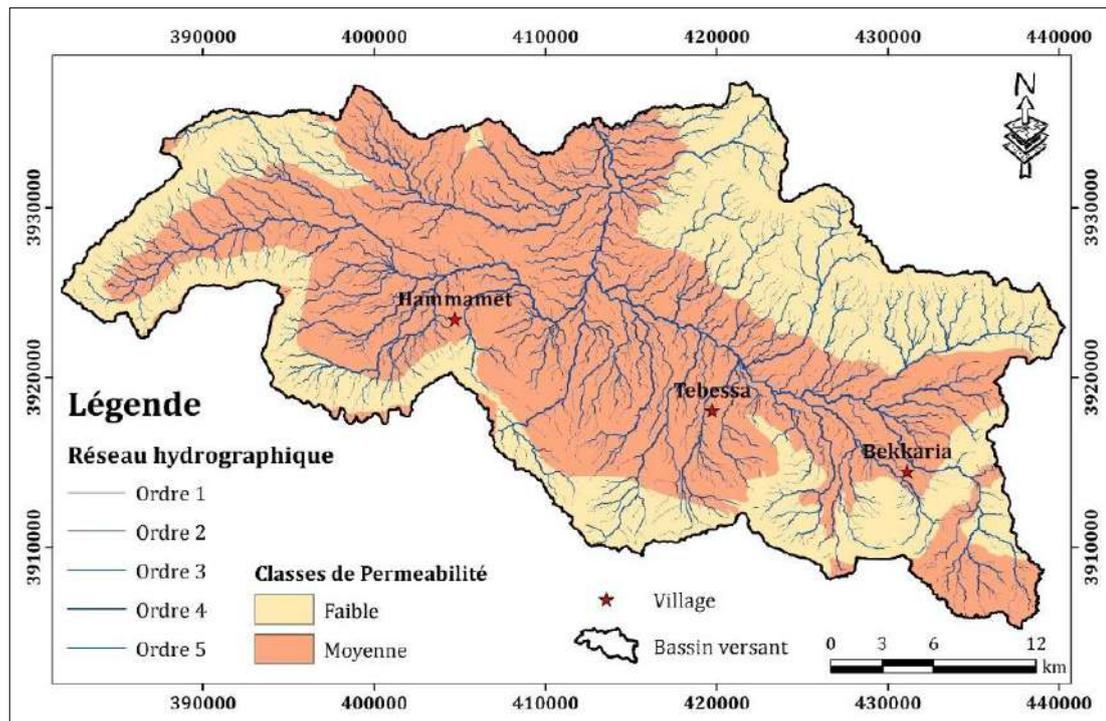


FIGURE 32. CARTE DES RESSOURCES EN EAU DU BASSIN VERSANT DE LA ZONE D'ETUDE

2.2.3. Données Alphanumériques (Métadonnées) :

Les données alphanumériques sont des données représentées à l'aide de lettres et de chiffres, et éventuellement de caractères spéciaux et du caractère espace. Elles sont de type attributaire stockées dans des tables et organisées en bases de données structurées.

a. Données piézométriques :

Sont des données mesurées sur terrain de la profondeur (en mètre) du niveau statique des eaux souterraines (D). Elles sont stockées et organisées dans des tables Excel comme bases de données.

On a utilisé les niveaux piézométriques les plus faibles (pessimistes), ce qui permet de représenter la situation la plus défavorable, car plus la nappe est proche de la surface plus elle est vulnérable à toute contamination de surface. La carte piézométrique (Fig. 36) est établie à partir des données les plus pessimistes. Après interpolation des données, une

classification de chaque pixel est faite en fonction des côtes de la méthode DRASTIC. Les coefficients de ce paramètre D varient de 1 à 10.

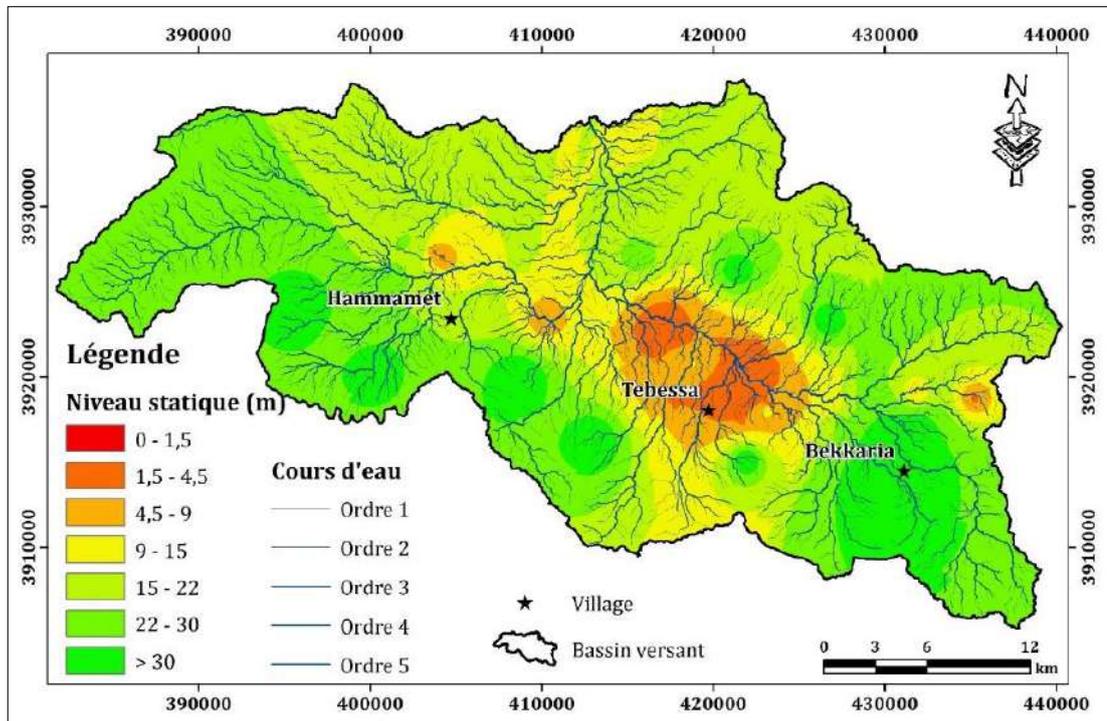


FIGURE 33. CARTE DES PROFONDEURS DES NIVEAUX STATIQUES DU BASSIN VERSANT DE LA ZONE D'ETUDE

b. Données climatiques :

La recharge de l'aquifère est le principal vecteur des contaminants vers les eaux souterraines. Le contaminant peut mieux se solubiliser et atteindre la nappe en plus grande quantité lorsque la recharge est grande.

L'estimation de la recharge d'un aquifère est un paramètre qui est difficile à déterminer à cause de la multiplicité des facteurs qui l'affectent. La recharge nette est la quantité totale d'eau infiltrée de la surface du sol vers l'aquifère annuellement Williams et Kissel (1991) ont proposé quatre équations empiriques pour le calcul de la recharge efficace R, en cm/an en fonction des précipitations annuelles P et du type de sol :

- ✓ $R = (P - 10,28)^2 / (P + 15,83)$ → Pour les sols sableux et graveleux
- ✓ $R = (P - 15,05)^2 / (P + 22,57)$ → Pour les sols sableux, sols forestiers gréseux et sols sablo-limoneux
- ✓ $R = (P - 19,53)^2 / (P + 29,29)$ → Pour les sols limono-sableux

Elles sont stockées et organisées dans des tables Excel comme bases de données.

2.3. La rastérisation des données

La rastérisation, ou matricialisation, est un procédé qui consiste à convertir une image vectorielle en une image matricielle destinée à être affichée sur un écran.

Pour une bonne gestion du jeu de données utilisées, il faut définir au niveau de l'application Géotraitement → Environnements :

- Les coordonnées de sortie, le masque et l'étendue sur « BV Tébessa ».
- La taille de la cellule à 12.5 mètres (identique à celle du MNT).

Il nécessite de travailler seulement avec les données raster. Donc il faut convertir les données vectorielles et interpoler les données alphanumériques.

On a créé une série de grilles représentant les cotes DRASTIC pour chaque paramètre :

- **D** : Profondeur à la nappe phréatique,
- **R** : Recharge Nette,
- **A** : Milieu aquifère,
- **S** : Substrat pédologique,
- **T** : Topographie,
- **I** : Impact de Vadose Zone,
- **C** : Conductivité hydraulique.

Le jeu de données que nous utiliserons pour créer chaque grille est présenté dans le graphique ci-dessous. Dans cette section, nous présenterons deux nouveaux concepts d'analyste spatial : créer des grilles de pente à partir de l'élévation et reclasser des plages de valeurs par opposition aux valeurs uniques.

Lettres acronymes	D	R	A	S	T	I	C
Données initiales	piézométrie	Recharge efficace	Géologie	Sol	MNT	Géologie	Hydrogéologie

2.4. Reclassification et ajout des cotes DRASTIC

Maintenant que les données sont tous en format grille (raster), nous pouvons reclasser ces grilles pour attribuer des notes DRASTIC (Tableau 10).

TABLEAU 10 : NOTATIONS ACCORDEES AUX PARAMETRES DE LA METHODE DRASTIC (D'APRES LALLEMAND- BARRES, 1994)

		Classe	Note	Poids
<i>D (m)</i>	<i>Distance à la nappe</i>	0 -1.5	10	5
		1.5 – 4.5	9	
		4.5 – 9	7	
		9 – 15	5	
		15 – 23	3	
		23 – 30	2	
		> 30	1	
<i>R (mm)</i>	<i>Recharge (efficace)</i>	0 – 50	1	4
		50 – 100	3	
		100 – 175	6	
		175 – 225	8	
		> 225	9	
<i>A</i>	<i>Nature de la zone saturée</i>	Calcaire karstique	10	3
		Basalte	9	
		Sable et gravier	8	
		Calcaire massif	6	
		Grès massifs	6	
		Métamorphique altéré	4	
		Métamorphique	3	
Shale massif	2			
<i>S</i>	<i>Nature du sol</i>	Peu épais ou absent	10	2
		Gravier	10	
		Sables	9	
		Argile, agrégats	7	
		Limon sableux	6	
		Limon	5	
		Limon silteux	4	
		Limon argileux	3	
Argiles non agrégée	1			
<i>T (%)</i>	<i>Topographie, pente</i>	0 – 2	10	1
		2 – 6	9	
		6 – 12	5	
		12 – 18	3	
		> 18	1	
<i>I</i>	<i>Nature de la zone vadose</i>	Calcaire karstique	10	3
		Sable et gravier	9	
		Sable et gravier avec silt et argile	8	
		Grès	6	
		Calcaire	6	
		Silt/Argile	1	
<i>C (m/s)</i>	<i>Perméabilité</i>	$> 9,4.10^{-4}$	10	5
		$4,7.10^{-4} – 9,4.10^{-4}$	8	
		$32,9.10^{-5} – 4,7.10^{-4}$	6	
		$14,7.10^{-5} – 32,9.10^{-5}$	4	
		$4,7.10^{-5} – 14,7.10^{-5}$	2	
		$4,7. 10^{-7} – 4,7.10^{-5}$	1	

- Attribution des notes DRASTIC à chaque type de sol pour l'obtention de la carte du paramètre « *S* ».
- Deux des sept facteurs DRASTIC (« *A* » - Milieux aquifères et « *I* » - Impact de la zone vadose) peuvent être définis sur la base de la géologie. Nous utiliserons à nouveau l'outil Reclassification pour attribuer des évaluations DRASTIC correspondant à ces deux facteurs pour les unités de géologie de surface appropriées contenues dans la couche géologique.
- Attribution des notes DRASTIC à chaque type hydrogéologique (classe de perméabilité) pour l'obtention de la carte du paramètre « *C* ».
- Création d'une carte de pente à partir du modèle numérique de terrain (MNT) selon les classes indiquées en Tableau 10 ci-dessus. On procède à une reclassification pour attribuer des évaluations DRASTIC correspondant au facteur de la topographie « *T* ».
- Enfin et après interpolation des données piézométriques et climatiques on a obtenu des cartes des iso-profondeurs du niveau statique et iso-recharge efficace. A l'aide d'une reclassification par attribution des évaluations DRASTIC correspondant respectivement aux facteurs « *D* » et « *R* ».

Une modification de la symbologie des grilles D, R, A, S, T, I et C afin que les niveaux de vulnérabilité faibles (1-3) soient verts, les évaluations moyennes (4-7) jaunes et les évaluations élevées (8-10) en rouges. Les valeurs similaires seront regroupées à l'aide de "Valeurs uniques".

2.5. Calcul de l'indice de vulnérabilité des eaux souterraines DRASTIC

Maintenant on dispose des couches de données requises, on va créer une grille de vulnérabilité des eaux souterraines DRASTIC basée sur l'équation d'index DRASTIC. Cela impliquera l'utilisation du calculateur de raster pour combiner plusieurs grilles dans une superposition pondérée.

La combinaison de couches raster est un processus simple mais très important avec Spatial Analyst. Vous trouverez souvent qu'il est nécessaire de créer un seul calque composé de plusieurs ensembles de données. L'idée est similaire à celle consistant à effectuer une superposition avec des calques vectoriels, dans la mesure où vous en créez un parmi beaucoup d'autres, à l'exception majeure que les valeurs de cellule changent en fonction de l'expression utilisée.

La syntaxe du calculateur de raster doit être absolument correcte ou vous obtiendrez une "erreur de syntaxe".

$$"D" * 5 + "R" * 4 + "A" * 3 + "S" * 2 + "T" * 1 + "I" * 5 + "C" * 3$$

Les valeurs des indices obtenues sont regroupées (tableau 11), selon Aller et al., (1987) en cinq classes dont chacune correspond à un degré de vulnérabilité.

TABLEAU 11 : LES VALEURS DES INDICES CORRESPONDENT A CHAQUE DEGRE DE VULNERABILITE

Degré de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
Très faible	< 80
Faible	80 – 120
Moyen	120 – 160
Elevé	160 – 200
Très élevé	> 200

L'approche cartographique a été réalisée à l'aide du logiciel ArcGIS et permet de compiler les données spatiales, calculer les indices à partir de la répartition géographique des scores pondérés attribués aux sept paramètres, et de réaliser la carte de vulnérabilité qui représente la variation des indices de vulnérabilité. La classification de ces indices en fonction des classes DRASTIC permet de spatialiser la vulnérabilité relative de chaque secteur étudié.

2.6. Validité de la méthode DRASTIC :

Toute carte de vulnérabilité élaborée doit être testée et validée par des mesures et l'analyse de données chimiques des eaux souterraines. En effet, plusieurs auteurs Isabel et al. (1990) ; Champagne et Chapuis (1993) ; Mohamed (2001) ; Jourda et al. (2007) ; Hamza et al. (2007 et 2008) ont vérifié la validité des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité à la pollution en se basant sur des données chimiques des eaux souterraines.

Dans le cas de notre étude, la validité de l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution par les méthodes DRASTIC, a été testée par le taux des nitrates dans les eaux souterraines en établissant une comparaison entre la répartition spatiale des nitrates dans les eaux souterraines et la distribution des classes de vulnérabilité. Pour cela un suivi de la qualité des eaux souterraines a été effectué sur des puits agricoles plus de 40 échantillons d'eaux ont été collectés à partir des puits analysés. Les paramètres analysés sont les nitrates et la minéralisation.

2.7. Hydrochimie :

La composition chimique d'une eau est indispensable pour la détermination de sa qualité et du domaine de son utilisation. Dans cette partie on se basant particulièrement sur les variations physico-chimiques des eaux souterraines (des eaux de l'aquifère superficiel) de Tébesa afin de mettre en évidence l'influence de la nature lithologique sur leur composition chimique. Les puits de cet aquifère sont tous situés sur les principaux axes routiers et près des agglomérations. Leurs eaux sont donc à un usage quotidien surtout l'activité agricole, d'où la nécessité d'un suivi rigoureux de leur composition chimique et leur degré de potabilité ou de pollution.

Avant de traiter et discuter les différents résultats d'analyses des données obtenues dans les eaux souterraines de Tébessa on a besoin de définir les principales méthodes à suivre avec bien sur les différents matériels en se basant spécialement sur les conditions et le mode d'échantillonnage, ainsi que les techniques de mesure et d'analyse des échantillons sans oublier l'outil informatique (PhreeqC et Diagrammes).

2.7.1. Mode d'échantillonnage :

Une campagne (2015) de prélèvement de 50 échantillons, conditionnée par une bonne répartition spatiale de ses différents points d'eau. Les stations d'échantillonnage ont été divisées en 3 groupes : puits domestiques réparties en 3 sous zones : la ville de « Tébessa », la ville de « Bekkaria » et la ville de « Hammamet » (Fig. 37).

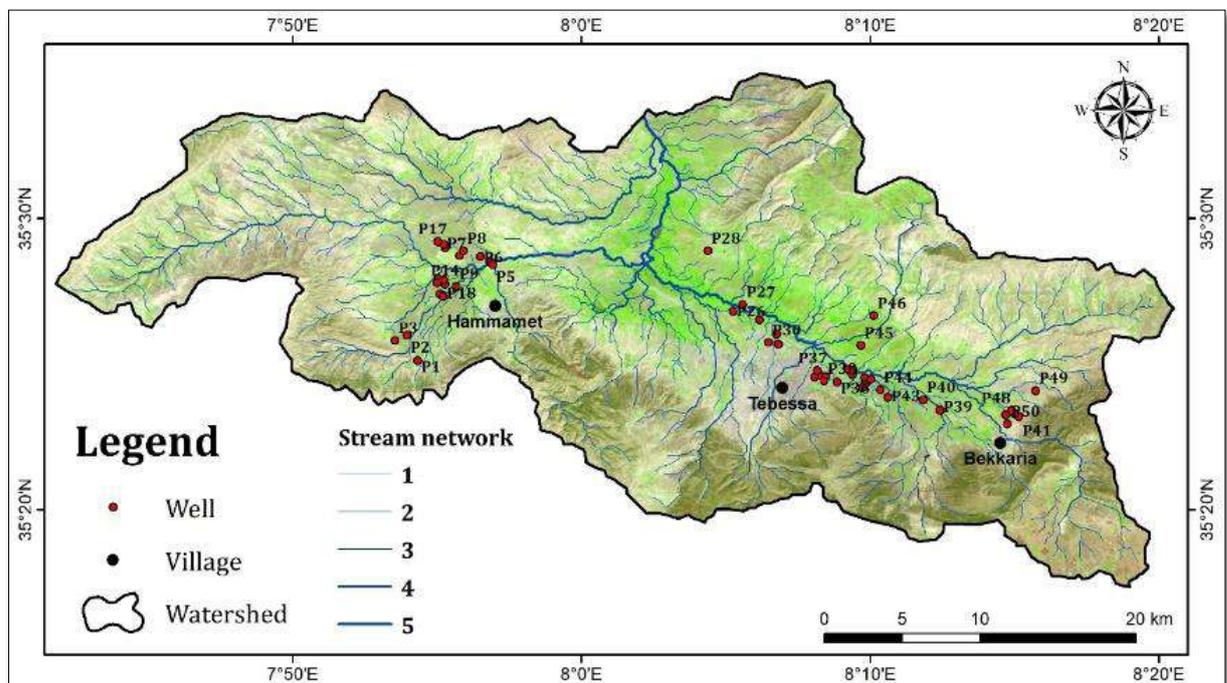


FIGURE 34: CARTE DE LA REPARTITION DES ECHANTILLONS DANS LA ZONE D'ETUDE

2.7.2. Méthodes d'analyses des eaux :

Nous avons choisi des paramètres physico-chimiques tels que la conductivité électrique, le pH et des paramètres chimiques tels que les éléments majeurs :

Les anions solubles (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-) et les cations solubles (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+}) ainsi que les nutriments (NO_3).

a. Les analyses sur terrain (Mesures in situ) :

Deux paramètres physiques (pH et conductivité ($\mu\text{s}/\text{cm}$)) sont mesurés sur site directement après le prélèvement des échantillons à l'aide d'un multiparamètre WTW (Multiline P3 PH/LF SET)

b. Analyses au laboratoire :

- Par titrimétrie : Les Chlorures, les Bicarbonates, ainsi que le Calcium ont été dosés par titrimétrie (Rodier, 2005).
- Par complexométrie : La dureté totale ou titre hydrotimétrique (TH)
- Par spectrophotométrie : Les teneurs des Sulfates.
- Par photométrie de flamme : Sodium et Potassium
- Par colorimétrie : Les Nitrates
- La concentration magnésienne de l'eau analysée est donné par la différence entre la dureté totale et la dureté calcique $Mg^{+2} = TH - Ca^{2+}$ (Rodier, 2009)

2.7.3. Méthodes de traitement des résultats :

- ✓ La réalisation des diagrammes hydrochimiques : pour la détermination des faciès chimique de l'eau on a utilisé le logiciel « Diagrammes » par la représentation des éléments chimiques dans le diagramme de Piper, puis une représentation des éléments chimiques dans le diagramme de « Riverside » pour déterminer l'aptitude des eaux à l'irrigation.
- ✓ Le calcul de l'indice de saturation : on a utilisé le logiciel thermodynamique chimique, Phreeqci.v.2.15 pour le calcul de l'indice de saturation ($IS = \log(Q) / \log(Kps)$) des minéraux dissous dans l'eau.
- ✓ La détermination de la potabilité des eaux : Les analyses physico-chimiques des eaux souterraines de Tébessa obtenu sont comparées avec des normes de potabilité de l'eau qui sont représentées dans le Tableau 12 :

TABLEAU 12 : NORME DE POTABILITE DE L'EAU

Paramètres	Unités	Valeurs maximales admissibles	
		Algérie ⁽¹⁾	OMS ⁽²⁾
Couleur	mg/l de platine Pt/Co	15	15
Turbidité	NTU	5	1
Saveur	Taux de dilution à 25 °C	4	/
Odeur	Taux de dilution à 25 °C	4	/
Résidu sec	mg/l	1500	/
Température	°C	25	/
Concentration en ions hydrogène	Unité pH	≥ 6,5 et ≤ 9	≥ 6,5 et ≤ 8,5
Conductivité	μS/cm à 20 °C	2800	400
TDS	mg/l	/	< 600
Dureté totale (TH)	Degré français °F	200 (mg/l en CaCO ₃)	10
Calcium	mg/l en CaCO ₃	200	/
Magnésium	mg/l de Mg ²⁺	150	/
Sodium	mg/l	200	200
Potassium	mg/l	12	12
Alcalinité	mg/l en CaCO ₃	500	/
Chlorures	mg/l	500	250
Sulfates	mg/l	400	250

Nitrates	mg/l de NO ₃ ⁻	50	50
Nitrites	mg/l NO ₂ ⁻	0,2	3
Ammonium	mg/l	0,5	0,5
Phosphate	mg/l	0,5	/
Fluorures	mg/l	1,5	1,5
Silices	mg/l	/	≤ 10

(1) : Selon le décret du 22 mars 2011 (J.O.R.A.), Algérie.

(2) : Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (O.M.S.), 2011.

- ✓ Aptitude des eaux à l'irrigation : Les eaux chargées en sels minéraux posent des problèmes pédologiques et agronomiques entraînant une influence sur la croissance des plantes. Parmi ces sels, on peut citer le cas des sulfates et du sodium, qui avec de fortes teneurs influent sur la structure physique du sol et sur le développement de la plante (Gouaidia. 2000).

Ce risque est déterminé à l'aide de la valeur du sodium absorbable (Sodium Absorption Ratio, ou « SAR »). Pour une même conductivité, le risque est d'autant plus grand que le coefficient est plus élevé. Le SAR est défini par la relation suivante :

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}}$$

Cinq classes d'eau ont été définies : excellente, bonne, admissible, médiocre, mauvaise (Tab.13).

TABLEAU 13: CLASSIFICATION DES EAUX PAR DEGRES D'APTITUDE A L'IRRIGATION PAR LA METHODE DU SAR (L'OUVRIER, 1976).

Degrés	Qualité	Classe	Etat d'utilisation
1	Excellente	C1-S1	Utilisation sans danger pour l'irrigation de la plupart des cultures sur la plupart des sols.
		C1-S2	
2	Bonne	C2-S1	Convenable aux plantes qui ont une tolérance aux sels, cependant son utilisation peut générer des problèmes pour les argiles
		C2-S2	
3	Admissible	C3-S1, C2-S3	La salinité doit être contrôlée, irrigation des cultures tolérables aux sels sur des sols bien drainés.
		C3-S2	
4	Médiocre	C4-S1, C4-S2,	Eau fortement minéralisée, utilisée uniquement pour des plantes très résistantes aux sels dont le sol présente une bonne perméabilité.
		C3-S3	
5	Mauvaise	C3-S4, C4-S3	Inutilisable
		C4-S4	

- ✓ Diagramme de concentration :

Le facteur de concentration (FC) peut être comme le rapport entre le volume initial et le volume final. Ce type de diagramme permet de suivre l'évolution de la concentration des éléments dissous par rapport à un élément de référence choisis comme traceur. Il vise à mettre

en évidence les mécanismes chimiques (précipitation dissolution ; échanges ioniques...) susceptibles de contrôler l'évolution de la concentration des divers éléments.

Le facteur de concentration (FC) des eaux de cette nappe est estimé à partir du chlorure (Cl) utilisé ici comme traceur. Cet élément a été préféré aux autres éléments pour deux raisons :

- Dans la gamme de concentration étudiée le chlore peut être considéré comme inerte par rapport à la matrice poreuse et donc il n'entre pas dans des processus chimiques qui peuvent affecter sa concentration. Il peut donc constituer un critère d'estimation de facteur de concentration.
- De plus cet élément présente la plus forte pente dans le diagramme de concentration ; ce qui montre que c'est le paramètre le moins affecté par des processus biogéochimiques.

✓ Indice d'échange de base (i.e.b) :

L'indice d'échange de base (i.e.b) défini par Schoeller (1934) ; traduit le rapport entre les ions échangés et les ions primitivement existants de même nature dans l'eau. Il permet de mettre en évidence l'évolution du processus chimique de l'eau au cours de son parcours souterrain.

L'indice est calculé par la formule suivante :

$$i.e.b = \frac{rCl^- - r(Na^+ + K^+)}{rCl^-}$$

Selon les valeurs de cet indice on a :

- Echange des ions Ca^{++} et Mg^{++} de l'eau par les ions Na^+ et K^+ des formations encaissantes ; si l'i.e.b est de signe négatif.
- Remplacement des ions Na^+ et K^+ de l'eau par des ions Mg^{++} et Ca^{++} des formations encaissantes ; si l'indice i.e.b est de signe positif.
- Un équilibre entre les composants chimiques de l'eau et ceux du terrain encaissant pour un indice i.e.b nul.

Chapitre VIII :

*Vulnérabilité à la pollution et
protection des ressources en eau*

Chapitre VI : Vulnérabilité à la pollution et protection des ressources en eau

Dans cette partie, nous allons examiner les différents résultats obtenus dans ce travail ainsi que le travail de cartographie par l'outil télédétection avec l'interprétation des résultats de différents traitements multispectrales des images satellitaires.

1. Hydrologie :

Le traitement de l'image satellitaire MNT par ArcGis a permis de délimiter le bassin versant de Tébessa ainsi que la détermination du réseau hydrographique et la réalisation de la carte des pentes.

1.1. Caractéristique de la forme du bassin versant :

Les caractéristiques morphométriques du bassin versant de Tébessa ont été déterminés à partir du logiciel ArcGis le bassin versant a une superficie de 998 km² pour un périmètre de 195.4 km la forme du bassin versant conditionne le temps de réponse aux précipitations.

Indice de compacité ou coefficient de Gravelius : Ce coefficient « Kc » caractérise la compacité et compare la forme du bassin versant.

$$Kc = \frac{0.28P}{\sqrt{A}} = 1.73$$

Où :

P : Périmètre (km)

A : Surface du bassin versant (Km²)

Si :

$Kc \leq 1$: Bassin versant de forme circulaire

$Kc = 1.12$: Bassin versant de forme carrée

$Kc \geq 1.12$: Bassin versant allongé

Dans notre cas $Kc = 1.73$ donc le bassin versant de Tébessa à une forme allongée.

1.2. Carte des pentes :

La distribution des altitudes du bassin versant de Tébessa montre que la majeure partie de ce bassin (60%) est située entre les cotes (210 m à 1000 m).

D'après la figure 20, on a révélé que notre zone d'étude est caractérisée par cinq classes des pentes en fonction d'altitude qui sont :

- ❖ Classe 1 : de 0 à 2% située entre l'altitude 210 m et 780 m
- ❖ Classe 2 : de 2 à 6 % située entre l'altitude 780 m et 1000 m
- ❖ Classe 3 : de 6 à 12% située entre l'altitude 1000 m et 1100 m
- ❖ Classe 4 : de 12 à 18 % située entre l'altitude 1100 m et 1280 m
- ❖ Classe 5 : > 18 % située entre l'altitude 1280 m et 1380 m

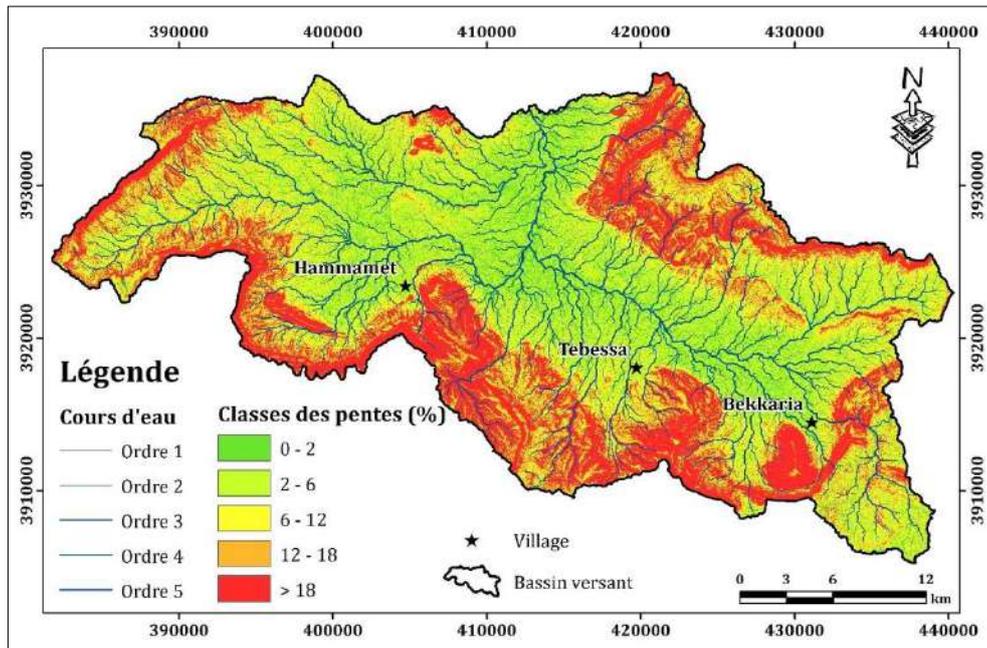


FIGURE 35. CARTE DE PENTES DE LA ZONE D'ETUDE

1.3. Réseau hydrographique :

Le réseau hydrographique fait référence aux caractéristiques géographiques et physiques de la plaine et des cours d'eau d'une région donnée. Le réseau hydrographique dans le bassin de Tébéssa est très développé, près de 470 km de cours d'eau drainent ce bassin versant

TABLEAU 14 : LES LONGUEURS D'ORDRES DES COURS D'EAU DANS LA CUVETTE DE TEBESSA

N° d'ordre	Ordre 1	Ordre 2	Ordre 3	Ordre 4
Longueur (km)	252.2	143.5	64	10
Pourcentage (%)	53.7	30.5	13.7	2.1

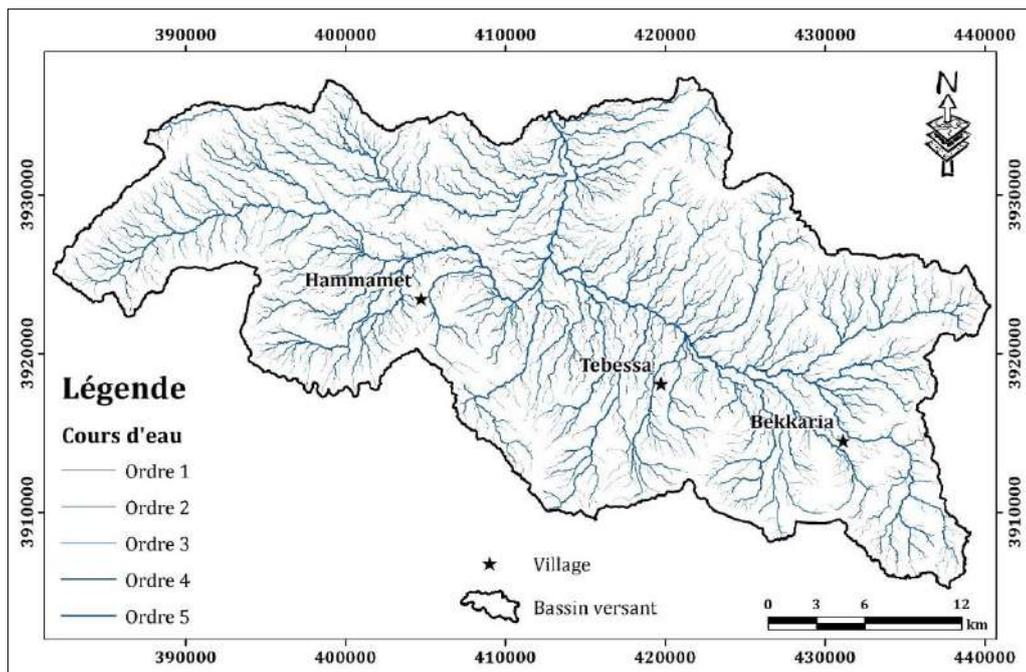


FIGURE 36. CARTE DE RESEAU HYDROGRAPHIQUE

2. Occupation du sol :

Le traitement de l'image satellitaire Sentinel-2 du 04/04/2018 et 27/08/2018 par ENVI 5.1 a permis d'identifier les différentes classifications de notre région d'étude (Nord-Est algérien). Il nous a permis d'obtenir la meilleure méthode de classification et la plus proche de la réalité.

2.1. Photo-interprétation des images satellitaires :

La présentation des deux cartes fait ressortir visuellement une nette évolution des états de surface dans la région de Tébessa qui nous intéresse dans notre travail. On remarque notamment un changement du couvert végétal dans le temps : Avril et Aout, mais cela reste visuelle et sans aucune quantification, ni dans le temps ni dans l'espace. C'est pourquoi on fait appel à d'autres techniques pour estimer les surfaces du tissu urbain et du couvert végétal et calculer leurs évolutions.

2.2. Classification supervisée des images :

La thématique de notre travail se base sur la détermination des deux classes (Couvert végétal et Sol nu). À l'aide de la reconnaissance des échantillons sur terrain, cela nous a aidé à effectuer la phase d'apprentissage par échantillonnage (ROI) des classes (*Villages, Végétation et Sol nu*).

On peut noter la différence des deux images concernant le couvert végétal :

En mois d'avril, il couvre de grandes surfaces au centre du bassin, mais dans le mois d'aout les surfaces végétales auront une importante diminution avec apparition d'autres surfaces au sud.

Pour les surfaces urbaines (*Villages*), on remarque une surface importante au centre du bassin c'est la ville de Tébessa et deux petites surfaces à l'est le village de Bekkaria et à l'ouest le village de Hammamet.

2.3. Evolution temporelle des états de surface (Change détection)

Afin d'étudier l'évolution entre les deux dates, on a utilisé un intervalle « *Avril – Aout* ».

2.3.1. Les matrices de changements :

Cette étude statistique a donné une estimation des changements de surfaces durant la période d'étude (Tab.15). Cette étape indique une diminution du couvert végétal et par conséquent une augmentation du sol nu dans le temps

TABLEAU 15 : SYNTHÈSE D'ÉVOLUTION DE SURFACES AU COURS DE LA PÉRIODE D'ÉTUDE

Surface (Km ²)	Végétation	Sol nu
Avril -Aout	-222	222

2.3.2. Les changements saisonniers (Avril et Aout) :

Le tableau 16 fait ressortir une nette évolution saisonnière des surfaces de végétation entre *Avril* et *Aout*, avec notamment une diminution du couvert végétal.

La surface du couvert végétal (Tab. 16) montre une diminution de 70 % de la surface initiale (de 322 km² en mois d'Avril à 100 km² en mois d'Aout). Cette diminution spécifie les parcelles agricoles par la moisson des céréales et le labour des sols au cours du mois d'Aout. Mais dans certaines régions surtout au sud la couleur verte est apparue pour les forêts à cause de leurs couleurs plus sombres que les terres agricoles.

TABLEAU 16 : MATRICE DE CHANGEMENTS ENTRE AVRIL ET AOUT 2018.

		Avril				
		Classes	Village	Végétation	Sol nu	Class Total
Aout	Village	24	0	0	24	
	Végétation	0	22	78	100	
	Sol nu	0	300	574	874	
	Class Total	24	322	652		
	Class Changes	0	300	78		
	Image Difference	0	-222	222		

2.3.3. Le résultat final des évolutions temporelles durant les 2 dates :

L'évolution temporelle de végétation durant la période d'étude dans la région de Tébéssa (Tab. 17) montre une stabilité d'une surface de 22 Km² ce qui indique une pérennité de cette surface durant cette période, ces surfaces pérennes sont identifiées par les forêts et les arbres fruitiers (vergers).

TABLEAU 17 : SYNTHÈSE D'ÉVOLUTION DE SURFACES AU COURS DES 2 DATES

Surface (Km ²)	Avril-Aout
Végétation inchangée	22
Gain de végétation	78
Perte de végétation	222

Le changement affectant ces surfaces végétales depuis Avril jusqu'à Aout a montré :

- Une perte de 222 Km² de sa surface sous l'influence des activités agricoles dominantes dans cette région qui se présente essentiellement par les grandes cultures.
- Un gain de 78 Km², cette surface montre une grande partie des forêts qui ne sont pas discriminées au mois d'avril sous l'effet de la couleur sombre dans un espace vert ce qui a changé leurs signatures spectrales.

2.4. La cartographie des changements :

2.4.1. Evolution temporelle entre Avril et Aout :

Les surfaces de végétation inchangées

Les surfaces de végétation inchangées représentent une partie des Forêts en pourtour du bassin. En plus un certain nombre de pixels verts sont répartis sur le niveau central du bassin, sont des zones agricoles (vergers).

La perte de végétation (Agriculture) :

L'agriculture occupe la majeure partie du bassin, au niveau des plaines au voisinage des oueds, avec une surface de 300 km². Elle apparaisse au printemps en couleur verte, tandis que dans l'automne elle disparaisse par la récolte et le labour des sols au cours de cette saison.

Le gain de végétation (Forêts) :

Les forets caractérisés essentiellement par le "Pin d'Alep" au niveau des reliefs élevés entourant le bassin. Cette surface de 78 Km² a montré une confusion avec le sol nu au mois d'avril mais elle apparait claire en mois d'Aout.

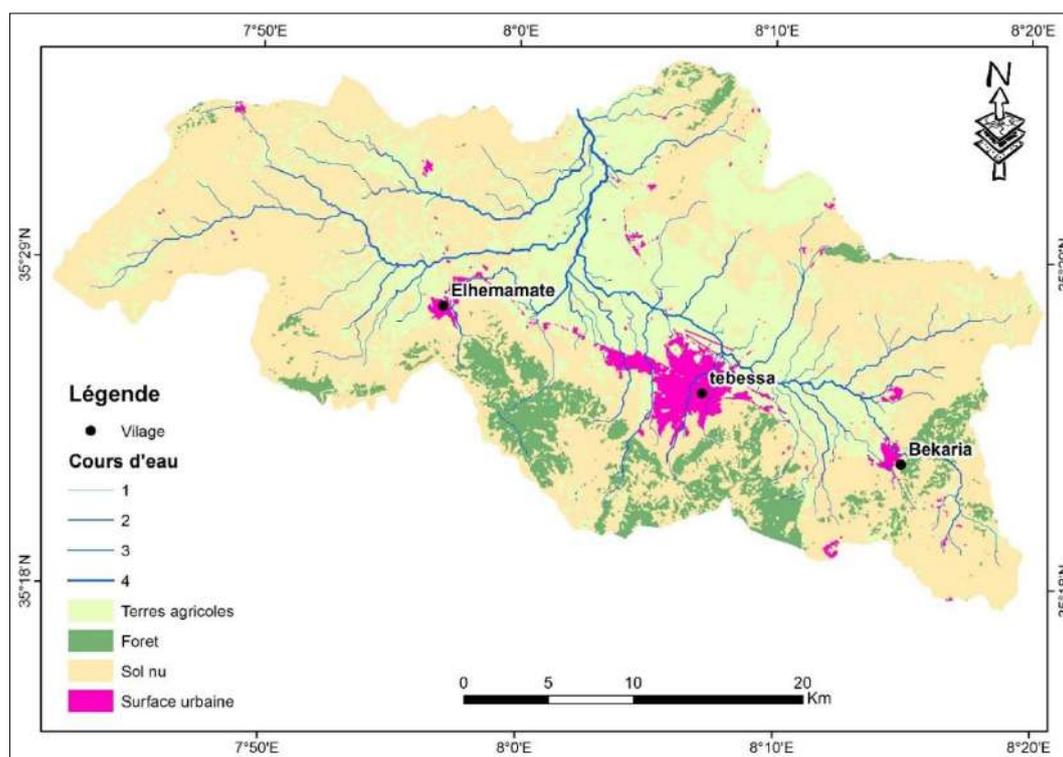


FIGURE 37. CARTE D'EVOLUTION TEMPORELLE ET D'OCCUPATION DU SOL (ENTRE 04/04/2018 ET 27/08/2018)

2.4.2. La carte d'occupation du sol durant la période d'étude :

Le couvert végétal montre aussi une très forte extension dans toute la zone d'étude. La somme de toutes les informations issues de différentes classifications utilisées nous a permis d'améliorer l'exactitude de l'occupation du sol et d'obtenir une meilleure caractérisation pour chaque pixel de

l'occupation du sol (Fig. 40). Cette dernière est subdivisée en 3 classes principales qui sont : « Terres agricoles », « Forêts » et « Sol nu »

TABLEAU 18 : SURFACES OCCUPEES PAR LES DIFFERENTES CULTURES

Classe	Surface (Km ²)	Pourcentage (%)
Terres agricoles	304.5	30.5
Forêt	86.1	8.6
Sol nu	577.4	57.8

D'après la carte d'occupation du sol établie (Fig. 40) on a pu calculer les surfaces des classes (Tab. 18). On a trouvé que les *Terres agricoles* occupent une grande superficie de bassin avec 304.5 km².

Ces parcelles agricoles, d'une surface supérieure à 30.5 % de la cuvette, dépendent essentiellement des eaux de pluies pour leurs arrosages (grandes cultures).

3. Les paramètres de vulnérabilité DRASTIC des eaux souterraines

3.1. Profondeur de la nappe (D)

Après interpolation des données, une classification de chaque pixel est faite en fonction des côtes de la méthode DRASTIC. Les coefficients de ce paramètre D varient de 1 à 10. La carte de la profondeur de la nappe regroupée en trois classes (Fig. 41) montre que les profondeurs des niveaux statiques sont faibles dans le centre du bassin versant (au nord de la ville de Tebessa). C'est la zone la plus susceptible d'être polluée.

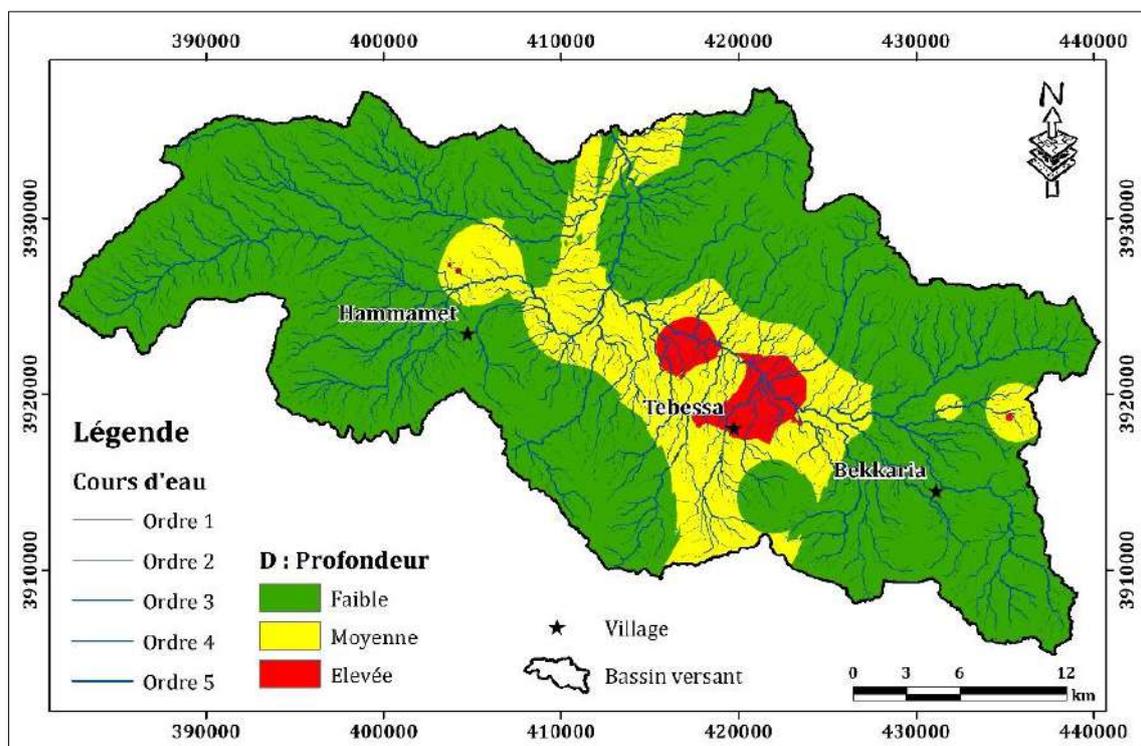


FIGURE 38. CARTE DE LA PROFONDEUR DU NIVEAU STATIQUE (D) DANS LE BASSIN VERSANT DE TEBESSA

3.2. Recharge efficace (R)

La carte (Fig. 42) élaborée à partir de la classification des valeurs du paramètre R calculé à partir de la formule : $R = (P - 15,05)^2 / (P + 22,57)$ → Pour les sols sableux, sols forestiers gréseux et sols sablo-limoneux. Elle montre après regroupement en trois classes (Fig. 43) que la recharge est moyenne dans tous le bassin versant.

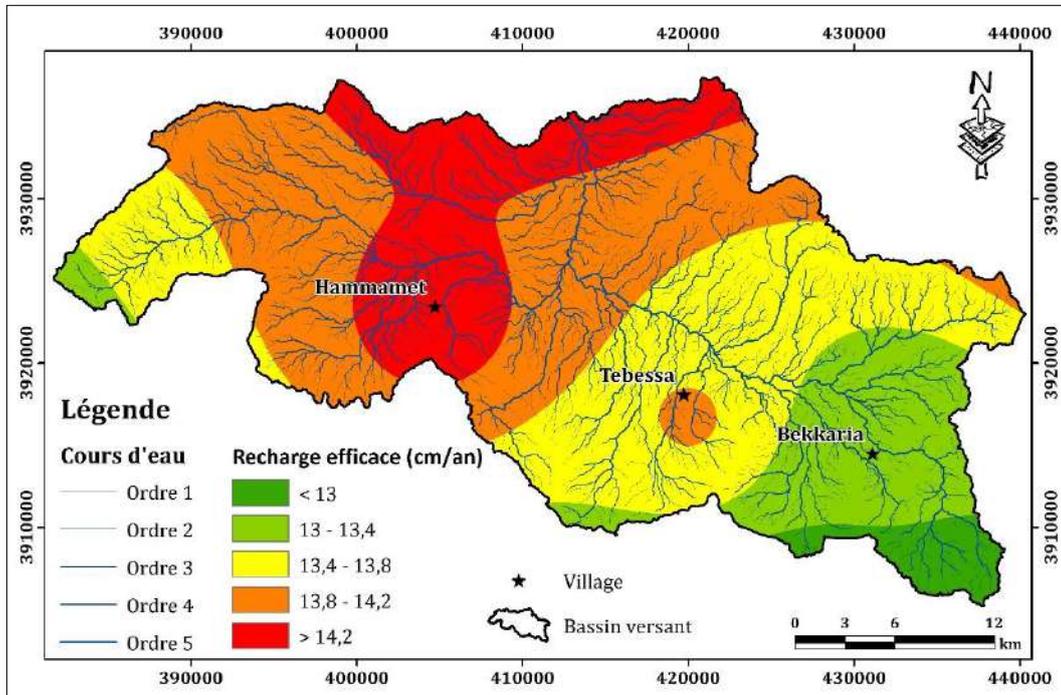


FIGURE 39. CARTE DE LA RECHARGE EFFICACE (EN CM/AN) DANS LE BASSIN VERSANT DE TEBESSA

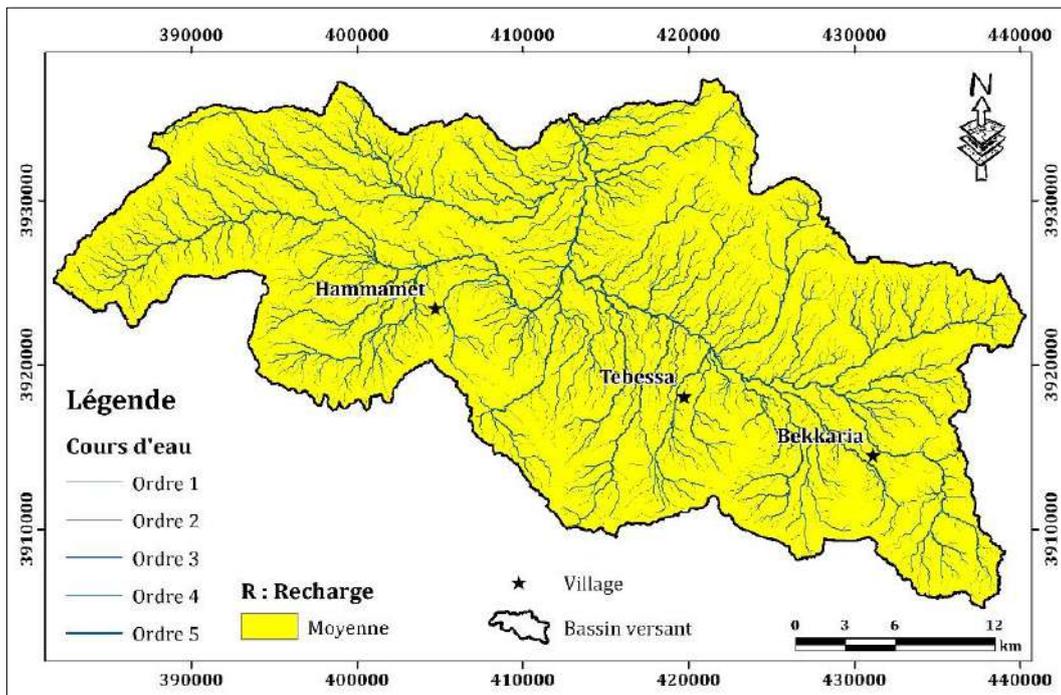


FIGURE 40. CARTE DE LA RECHARGE EFFICACE (R) DANS LE BASSIN VERSANT DE TEBESSA

3.3. Nature de la zone saturée (A)

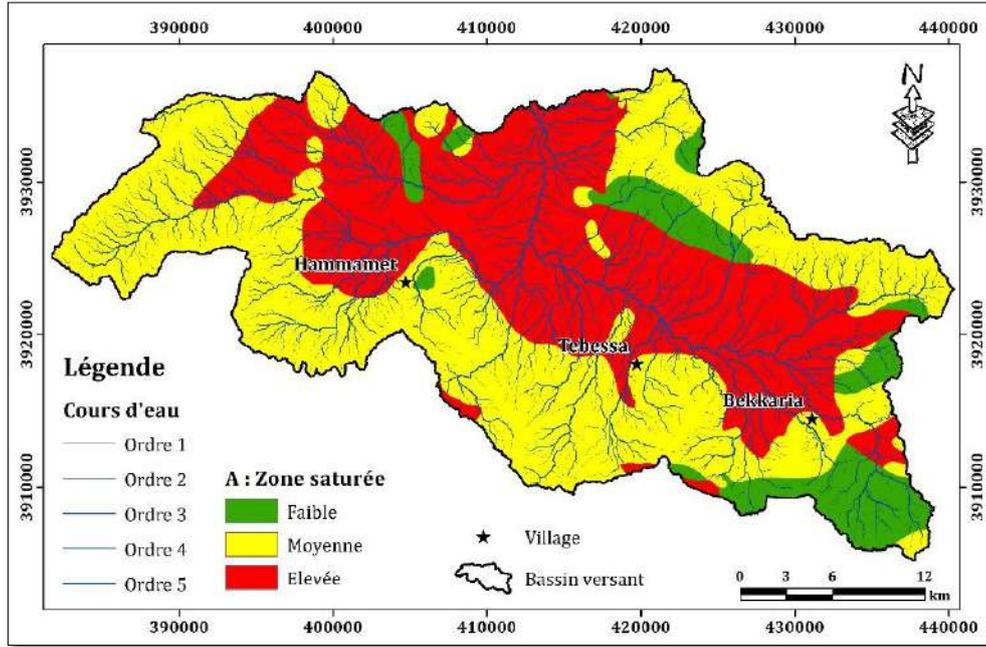


FIGURE 41. NATURE LITHOLOGIQUE DE LA ZONE SATUREE (A) DANS LE BASSIN VERSANT DE TEBESSA

La carte (Fig. 44) élaborée à partir de la classification des valeurs du paramètre A, montre que la lithologie de la zone saturée (nappe d'eau) au centre du bassin dans les formations alluvionnaires représente des notes DRASTIC importantes. Ce qui veut dire que cette zone saturée en eau (nappe alluviale) est constituée de matériaux perméables, par conséquent, le risque de propagation horizontale des polluants est élevé.

3.4. Sol (S)

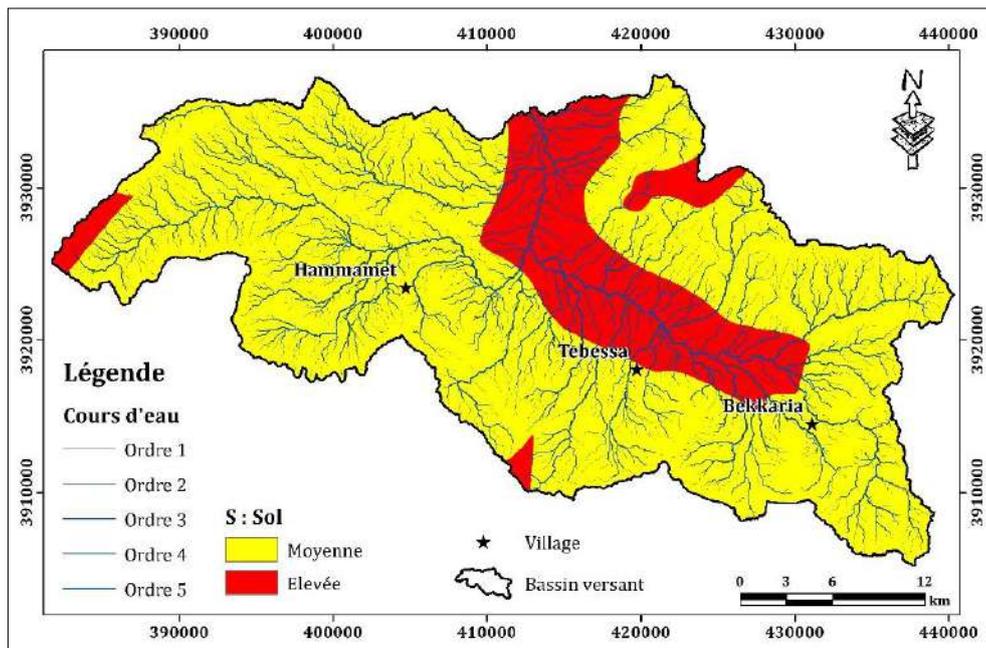


FIGURE 42. CARTE DES SOLS (S) DANS LE BASSIN VERSANT DE TEBESSA

La carte (Fig. 45) générée après classification montre que la zone d'étude présente deux classes de textures : Les sols à texture limoneuse occupent la majorité du terrain étudié du fait des pratiques agricoles et des phénomènes d'érosion qui transforment la texture limoneuse en limons fins.

3.5. Topographie (T)

La carte (Fig. 46) élaborée après classification de chaque pixel, en fonction des systèmes de cotation, montre que la zone centrale entourant les deux grands axes des oueds est une plaine alluviale caractérisée par une pente très faible, inférieure à 5%.

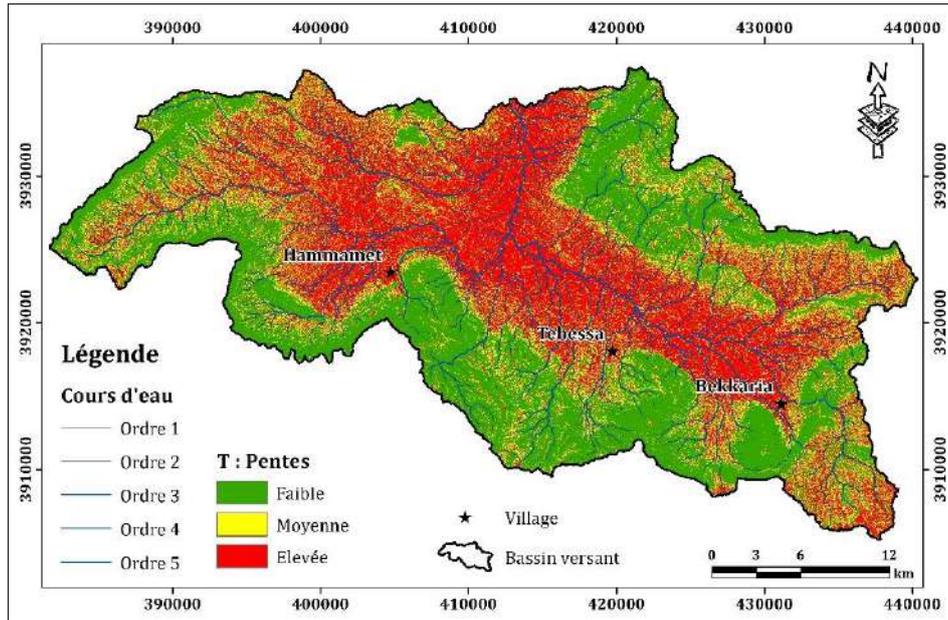


FIGURE 43. CARTE DES PENTES (T) DANS LE BASSIN VERSANT DE TEBESSA

3.6. Impact de la zone vadose (I)

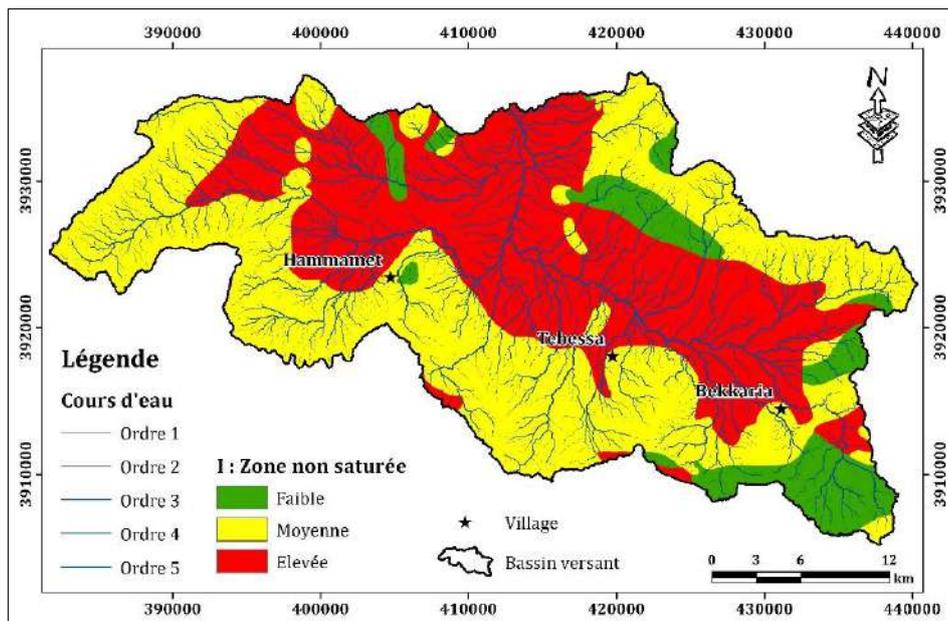


FIGURE 44. NATURE LITHOLOGIQUE DE LA ZONE NON SATURÉE (I) DANS LE BASSIN VERSANT DE TEBESSA

La carte matricielle (Fig. 47) montre que la lithologie de la zone vadose au centre du bassin dans les formations alluvionnaires représente des notes DRASTIC importantes. Ce qui veut dire que cette zone non saturée en eau est constituée de matériaux perméables, par conséquent, le risque de pollution est élevé par une propagation verticale des polluants.

3.7. Perméabilité (C)

La carte matricielle (Fig. 48) montre que la lithologie de la zone vadose, au centre de la zone dans la plaine alluviale, représente des notes DRASTIC importantes. Ce qui veut dire que cette zone non saturée en eau est constituée de matériaux perméables, par conséquent, le risque de pollution est élevé.

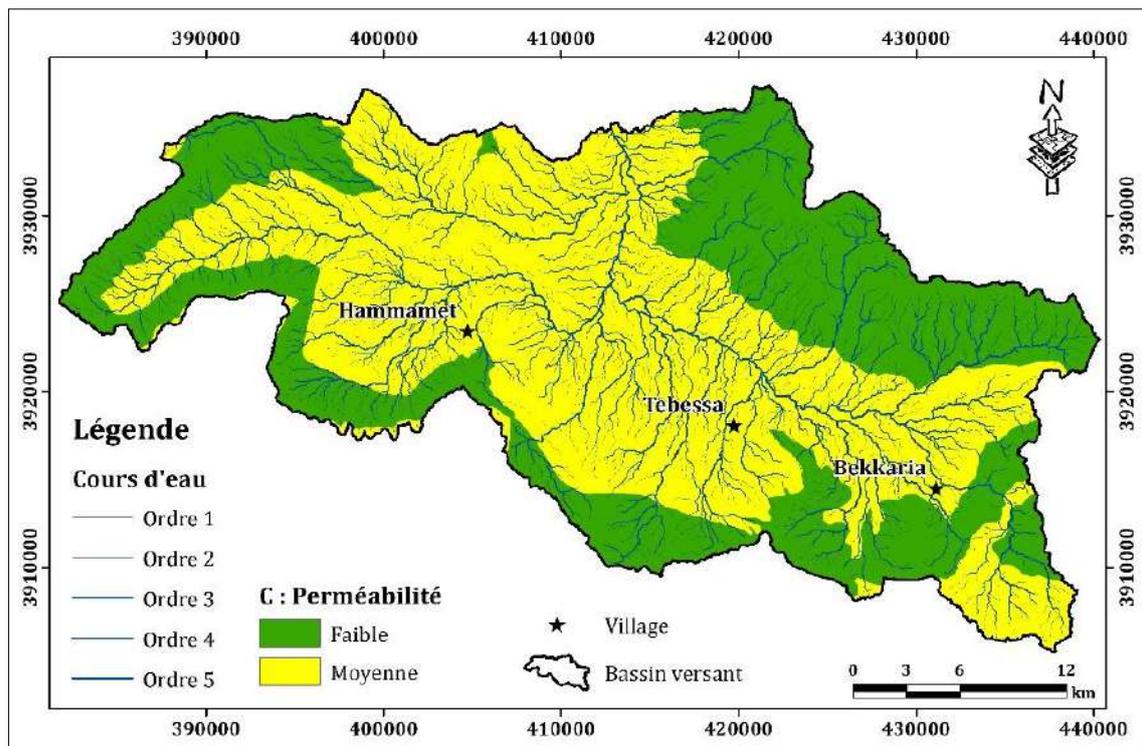


FIGURE 45. CARTE DE PERMEABILITE (C) DANS LE BASSIN VERSANT DE TEBESSA

4. Indice de vulnérabilité DRASTIC

La carte de l'indice DRASTIC (Fig. 49) présente cinq intervalles d'indice variant de 57 à 181. Chaque indice ainsi calculé représente une évaluation du niveau de risque de contamination de la nappe, ce risque augmente avec la valeur de l'indice (Aller et al., 1987).

Après regroupement des valeurs obtenues des indices en fonction des classes de la méthode DRASTIC (tableau 11), on obtient la carte suivante qui permet de visualiser le degré relatif de vulnérabilité de chaque secteur de la zone étudiée.

L'observation de la carte de vulnérabilité (Fig. 50) montre que la répartition spatiale des degrés de vulnérabilité de la nappe de la plaine de Tébesa est généralement de très faible à élevée.

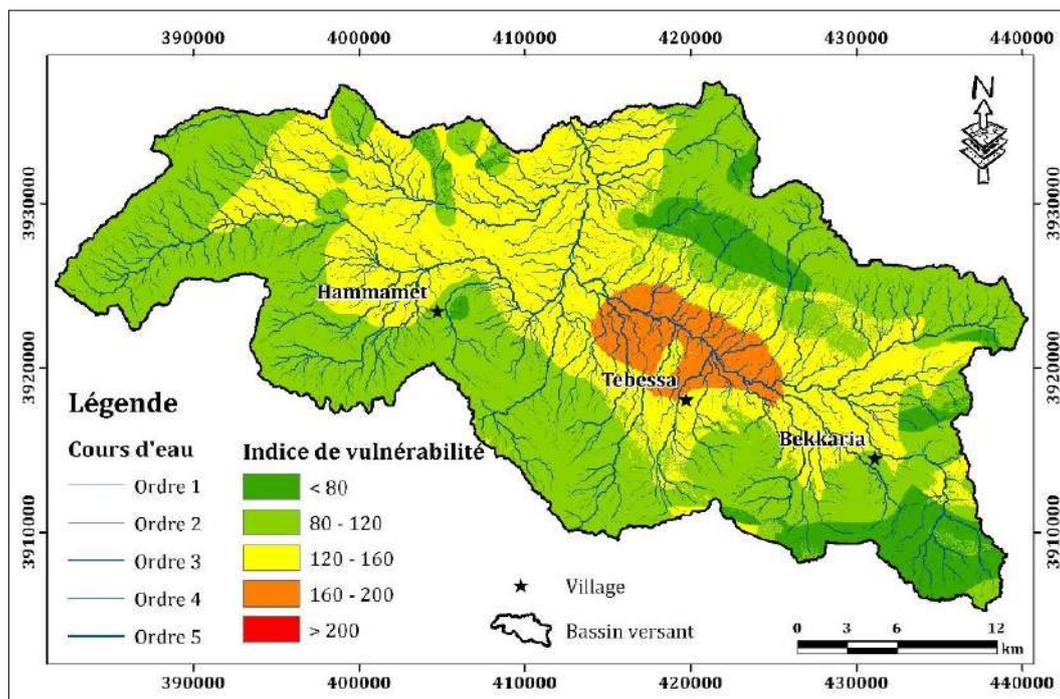


FIGURE 46. CARTE DE L'INDICE DE VULNERABILITE (ID) DANS LE BASSIN VERSANT DE TEBESSA

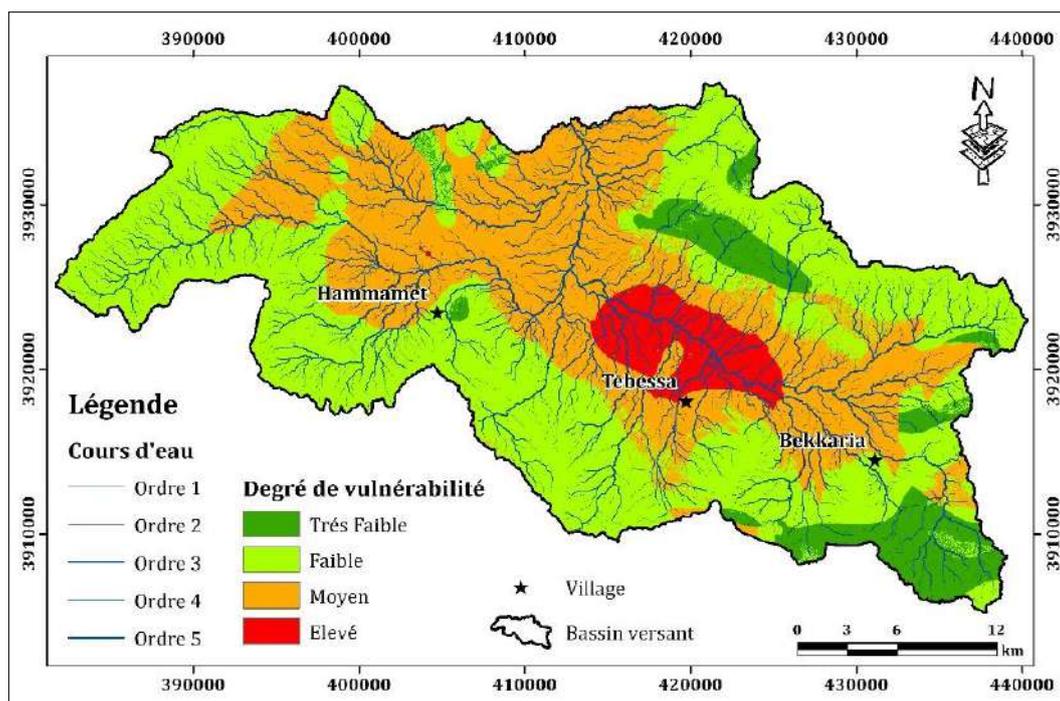


FIGURE 47. CARTE DU DEGRE DE VULNERABILITE DANS LE BASSIN VERSANT DE TEBESSA

5. Validation de la carte de vulnérabilité

La variation du taux de nitrate moyen au cours des campagnes de mesures montre que les teneurs en nitrates sont plus élevées en période de basses eaux.

Les concentrations de nitrates contenus dans les eaux souterraines de notre région varient entre 20.1 et 99.22 mg/l. Ces concentrations sont dans leur majorité inférieure à 50 mg/l (norme OMS). Ces concentrations sont élevées au centre (au nord de la ville de Tébessa) et à l'est du bassin.

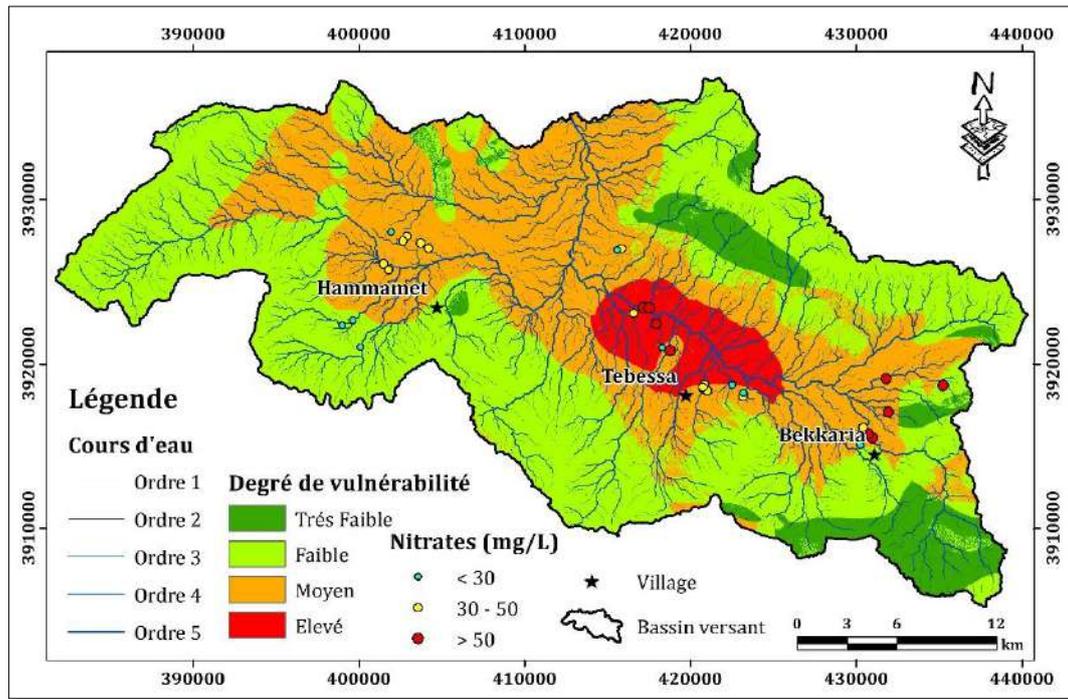


FIGURE 48. CARTE DE VALIDATION DE L'INDICE DRASTIC PAR LA DISTRIBUTION DES NITRATES DANS LE BASSIN VERSANT DE TEBESSA

Ces analyses indiquent que le niveau des nitrates des 35,3% des points d'eau dépasse largement la limite admissible de l'OMS (50 mg/l). En comparant la carte des degrés de vulnérabilité DRASTIC avec les concentrations des nitrates (Fig. 51) on constate que la zone à risque de vulnérabilité élevé est en corrélation avec celle de concentration en nitrates. Par contre on distingue aussi l'existence d'autres zones à fortes concentrations en nitrates comme à l'est de la zone d'étude au niveau des villes de Bekkaria et qui apparaissent sur la zone de vulnérabilité faible à moyenne. Cela peut être expliqué par des difficultés qui apparaissent dans l'élaboration de la méthode DRASTIC à savoir:

- L'attribution des notes des sept paramètres composant le modèle DRASTIC ;
- Le manque de données nécessite d'établir quelques hypothèses, pour l'estimation de la recharge et de la conductivité hydraulique.
- Le nombre important de paramètres que la méthode DRASTIC prend en compte. Il est possible qu'un paramètre important soit masqué par les autres paramètres.
- La fiabilité des résultats d'analyses des nitrates est en question.

6. Conclusion :

La pratique agricole et l'élevage influencent fortement la qualité des eaux par l'emploi des engrais afin d'améliorer le rendement des cultures. De même, l'élevage intense (bovin, aviculture, ...) contribue à la pollution organique par les composés azotés et phosphatés par l'usage des déchets animaux comme fertilisants. Les rejets domestiques et industriels au niveau des oueds, sans aucune épuration ni traitement, représentent une autre source de contamination de la nappe.

Cette situation nous a incité à l'étude de la vulnérabilité de la nappe alluviale à la pollution afin de la protéger contre ce risque. Ce travail a permis de tirer les résultats suivants :

- La zone où la nappe est à très faible profondeur de 0 à 1,5m donc facilement accessible par un polluant, situé au centre de la plaine vers le Nord de la ville de Tebessa.
- La recharge de la nappe se fait essentiellement par les eaux de précipitation ainsi que les eaux d'irrigation dans un tel climat semi-aride.
- L'étude de la lithologie et des sols de la région a permis d'en déterminer les textures. Il s'agit d'une texture limono-sableuse qui occupe la grande partie de la zone d'étude. La texture sableuse et sablo-limoneuse occupe le centre et la plaine alluviale du bassin versant.
- En ce qui concerne la topographie, la région d'étude est caractérisée par des faibles pentes représentant la plaine alluviale du bassin versant. Ce qui diminue la vitesse d'écoulement et augmente l'infiltration, qui a son tour augmente le risque de propagation des polluants vers la nappe.

La carte de vulnérabilité est le résultat de la superposition des cartes des facteurs régissant la vulnérabilité de la nappe au risque de contamination. Ainsi, établie elle a permis de distinguer quatre zones à différents degrés de vulnérabilité :

- ✓ Les zones à très faible vulnérabilité occupent une faible aire à l'extrême Sud et au Nord-Est.
- ✓ Les zones à faible vulnérabilité réparties sur les versants entourant la plaine alluviale de la zone d'étude.
- ✓ La zone à moyenne vulnérabilité représente la plaine alluviale de la zone d'étude.
- ✓ La zone à forte vulnérabilité occupe le centre de la plaine au Nord de la ville de Tébéssa. Dans cette zone, les activités doivent être contrôlées notamment l'emploi des fertilisants qui doit être rationnel et les rejets domestiques et industriels doivent être épurés.

Dans tous les cas, malgré les difficultés soulevées dans l'élaboration des cartes de vulnérabilité à la pollution par la méthode DRASTIC, n'alerte en rien sa fiabilité, elle permet toujours de se faire une idée assez précise sur les zones sensibles d'une région donnée en vue de prendre des dispositions de protection nécessaires.

Chapitre VIII :

Etude hydrochimique

Chapitre VII : Etude hydrochimique

L'étude hydrochimique permet de mettre en évidence :

- ✓ La potabilité des eaux de la nappe superficielle.
- ✓ L'aptitude de ces eaux à l'irrigation.

En raison des données disponibles, nous tenterons d'examiner dans cette partie la nature des eaux de la nappe de Tébessa.

1. Description des résultats d'analyses chimiques de l'eau :

La statistique des analyses physico-chimiques des eaux souterraines de Tébessa présente les valeurs maximales, moyennes, minimales et les écarts types dans le Tableau 19 suivant :

1.1. Paramètres physico-chimiques :

TABLEAU 19 : RESULTATS DES ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES DE TEBESSA

Paramètres		Paramètres statistiques			
		Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
pH		7	8.66	7.93	0,27
CE	($\mu\text{s/cm}$)	900	6800	2444.54	1310.1
TDS	(mg/l)	558	4216	1518.2	819.85
Ca ²⁺	(mg/l)	43	520	126.25	101.11
Mg ²⁺	(mg/l)	29	305	117.25	57.96
Na ⁺	(m/l)	62	840	195.29	173.02
K ⁺	(mg/l)	1	40	5.82	6.63
HCO ₃	(mg/l)	171	580	310	82.18
Cl ⁻	(mg/l)	60.35	1199.9	275	258.82
SO ₄ ²⁻	(mg/l)	140	2800	546.18	454.89
NO ₃ ⁻	(mg/l)	6	160	56.78	44.87

1.1.1. Potentiel d'hydrogène (pH) :

Les résultats montrent un pH varie entre 7.00 et 8.66 ce dernier est dans les normes de potabilité. Il est neutre et tend vers l'alcalinité.

1.1.2. La conductivité électrique :

Les valeurs mesurées ont été corrigées par rapport à une température standard de 25°C. Les résultats obtenus montrent une moyenne de 2444.54 $\mu\text{s/cm}$ indiquant la forte minéralisation des eaux souterraines de Tébessa. L'écart-type est de l'ordre de 1310.10 $\mu\text{s/cm}$ reflète la variation des valeurs de la conductivité électriques, entre 900 $\mu\text{s/cm}$ à 6800 $\mu\text{s/cm}$ comme valeur maximale. Tous les échantillons dépassent les normes de l'OMS.

Ce qui montre que la conductivité ionique dépasse les normes algériennes dans le nord et nord-est de la ville de Tébessa et le nord de Bekkaria.

1.1.3. Les éléments majeurs :

a. Le calcium (Ca^{+2}) :

Le tableau 19 montre que la moyenne des concentrations dépasse les normes de l'OMS de potabilité de l'eau. Par contre la plupart des échantillons d'eau présentent des concentrations inférieures à la norme de potabilité algérienne.

b. Le magnésium (Mg^{+2}) :

Les résultats montrent des teneurs en Mg^{+2} moyenne de l'ordre de 117.25 mg/l. La pluparts des valeurs sont dans les limites des normes de potabilité algériennes

On remarque que les concentrations de Mg dépassent les normes algériennes dans le nord-est de la ville de Tébessa et le nord-ouest de Bekkaria.

c. Le Sodium (Na^+) :

Les teneurs du sodium présentent pour la plupart des points, des concentrations variables supérieures aux normes de potabilité avec une moyenne de l'ordre de 195,29 mg/l pour le sodium. Ces valeurs élevées sont traduites par les échanges de bases entre l'eau et les formations argileuses existantes au niveau des aquifères ainsi que les passages évaporitiques.

Les concentrations du sodium (Na) dépassent les normes dans presque toute la zone d'étude. Mais la zone de Hammamet reste dans les normes.

d. Le Potassium (K^+) :

Les valeurs observées montrent que la plupart des échantillons ont des concentrations inférieures à la limite de potabilité.

e. Les Bicarbonates (HCO_3^-) :

Les concentrations en bicarbonates sont très variables, elles varient de 171.4 à 580 mg/l

f. Les Chlorures (Cl^-) :

Les teneurs en chlorures présentent pour la plupart des échantillons, des concentrations variables supérieures aux normes de l'OMS de potabilité avec une moyenne de l'ordre de 275 mg/l pour les chlorures. Ces valeurs élevées proviennent de la dissolution des sels par lessivage de terrains, vu leurs forte solubilité.

g. Les Sulfates (SO_4^{-2}) :

Les teneurs moyennes 546,18 mg/l de cet élément dans les eaux de Tébessa dépassent les normes de potabilité. Cependant des variations (l'écart type est de l'ordre 454,89 mg/l) sont enregistrées autour des valeurs moyennes, allant d'un minimum de 140 mg/l à un maximum de 2800 mg/l. Ces

fortes concentrations dans la majorité des échantillons peuvent être liées aux apports anthropiques par les engrais chimiques sulfatés d'autre part.

La concentration des sulfates (SO_4) dépasse les normes algériennes presque dans toute la zone d'étude.

h. Les nitrates (NO_3^-):

Parmi les 50 échantillons analysés, on note que 36 % présentent des concentrations élevées dépassant les normes de potabilité avec une valeur maximale de l'ordre de 160 mg/l. Ce qui indique une pollution de cette eau qui est liée à plusieurs facteurs dont le plus important est l'activité agricole où l'utilisation excessive des engrais contribue à l'augmentation des teneurs des nitrates. D'autres facteurs peuvent influencer d'une manière à une autre tel que l'activité pastorale, la mauvaise protection des puits et l'absence de réseaux d'assainissement.

Toutes les eaux de la nappe superficielle des zones entourant la ville de Tébessa et Bekkaria sont polluées par les nitrates.

2. Faciès chimiques des eaux :

La relation ionique entre les paramètres hydrochimiques a été étudiée en traçant les principaux cations et anions dans le diagramme tri-linéaire de Piper (Fig. 52).

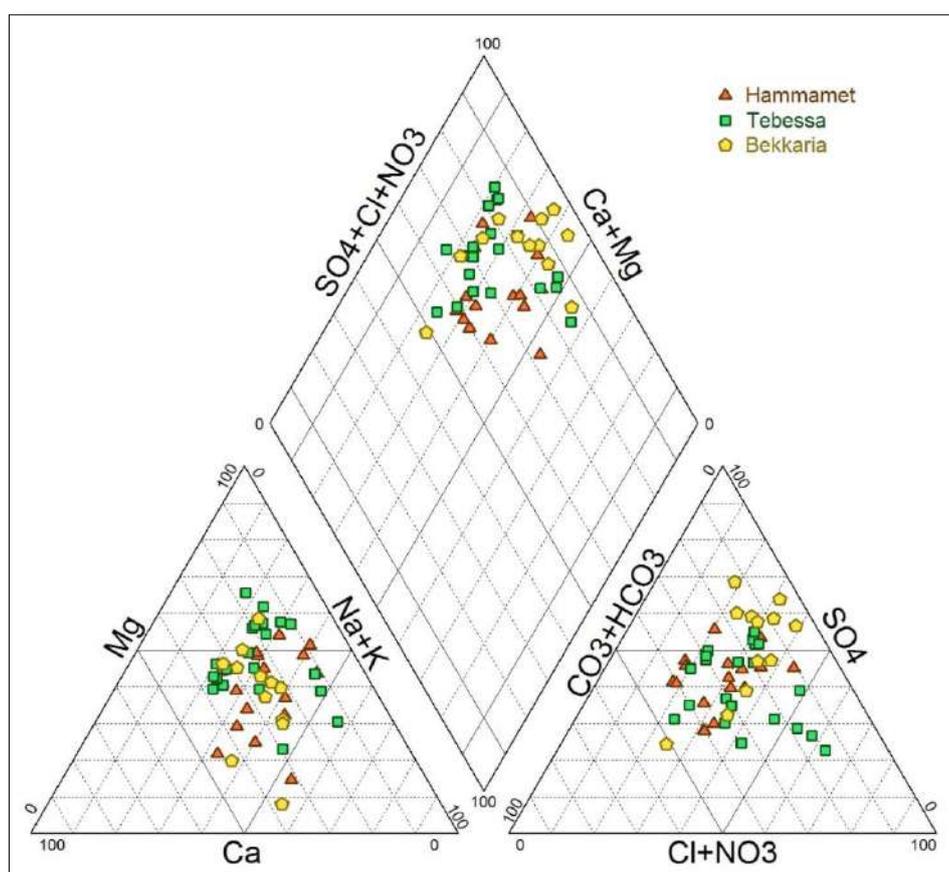


FIGURE 49. FACIÈS CHIMIQUE DES EAUX PAR LE DIAGRAMME DE PIPER

Les résultats montrent une variabilité du faciès chimique des eaux. Les échantillons prélevés dans les villes de Tebessa et Bekkaria sont caractérisés par la prédominance du sulfate, du chlorure, du magnésium et du sodium. Par conséquent, le faciès sulfaté magnésien est le plus dominant dans les deux endroits. On trouve aussi en deuxième position le faciès sulfaté sodique dans la ville de Bekkaria, et chloruré sodique dans la ville de Tebessa. Dans la ville de Hammamet, l'eau est dominée par les mêmes ions mais à des concentrations relativement plus élevées de bicarbonate. La comparaison des moyennes et des écart-types des éléments chimiques majeurs, pour les 50 échantillons des eaux prélevées (Tab. 20), montre que le magnésium et les sulfates ont des valeurs moyennes plus importantes, comparativement aux autres éléments majeurs, ce qui confirme la prédominance du faciès sulfaté et Magnésien.

TABLEAU 20 : VARIATION DES ELEMENTS MAJEURS DES EAUX DE TEBESSA (2015)

Paramètres	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃
Min.	46	29.00	62.00	1	171.00	60.35	140.00	6.00
Max.	520.00	305.00	840.00	40.00	580.00	1199.90	2800.00	160.00
Moy.	126.25	117.25	195.29	5.82	310.49	274.58	546.18	56.78
Ecart-type	101.11	57.96	173.03	6.64	82.19	258.82	454.90	44.88

3. Géochimie des eaux souterraines

3.1. Indice de saturation

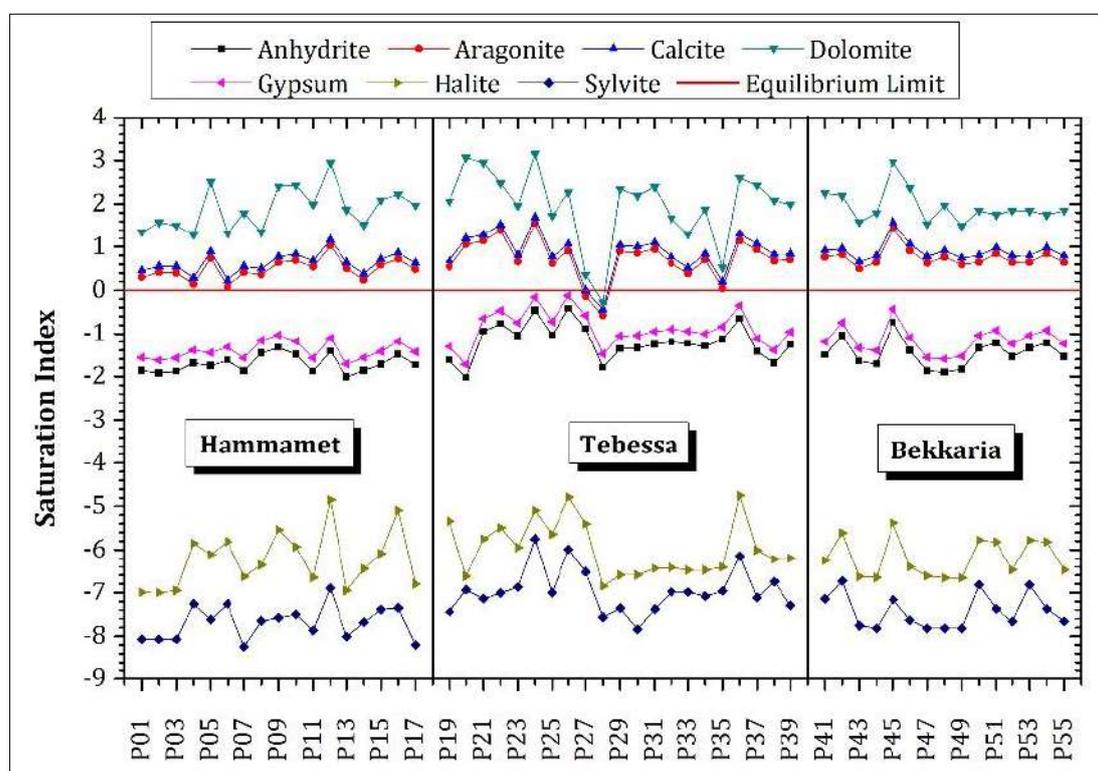


FIGURE 50. VARIATION DE L'INDICE DE SATURATION

Les résultats de calcul de l'indice de saturation ont montré que la plupart des échantillons d'eau souterraine étaient dans un état de sous-saturation ($SI < 0$) en termes de halite, gypse et anhydrite, mais dans un état de sursaturation ($SI > 0$) pour la calcite, aragonite et dolomite (Fig. 53), cela indique que le chimisme des eaux souterraines est beaucoup plus contrôlé par la dissolution de l'halite, du gypse et l'anhydrite, et pas de calcite, aragonite et dolomite.

Les minéraux évaporitiques, cas de l'halite et de la sylvite sont loin de la saturation et sont toujours aptes à la dissolution. L'anhydrite et le gypse sont proches de l'équilibre et tendent vers la saturation. Par contre les minéraux carbonatés tendent à précipiter sous la forme de dolomite, calcite et aragonite.

3.2. Indice d'échange de base (i.e.b) :

Les valeurs de l'indice d'échange de base montrent que la plupart des échantillons d'eau de la ville de Hammamet ont une valeur négative, ce qui signifie que l'eau reçoit Na^+ et K^+ libérés par les dépôts alluviaux qui contribuent directement à la chimie des eaux souterraines. A cet effet le facies sulfaté sodique se présente comme le deuxième facies dominant dans l'eau de cette ville. Le même résultat a été obtenu dans les villes de Tebessa et de Bekkaria, mais avec un nombre plus élevé d'échantillons d'eau qui ont l'état inverse (valeur positive). Pour cette raison, l'eau souterraine contient un mélange d'ions Na^+ , K^+ , Mg^{2+} et Ca^{2+} qui lui donne de différents faciès chimiques.

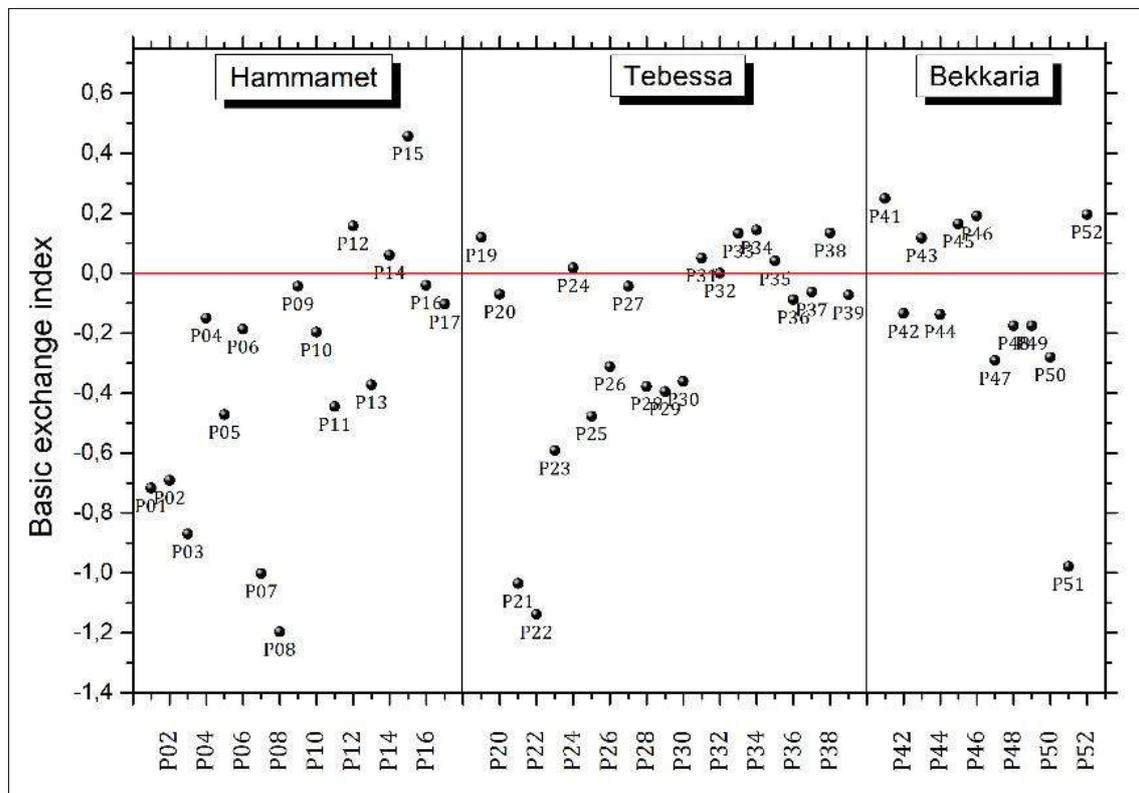


FIGURE 51. VARIATION DE L'INDICE D'ÉCHANGE DE BASE

3.3. Diagramme de concentration :

L'analyse de ce diagramme permet de dégager les conclusions suivantes (Fig. 55) :

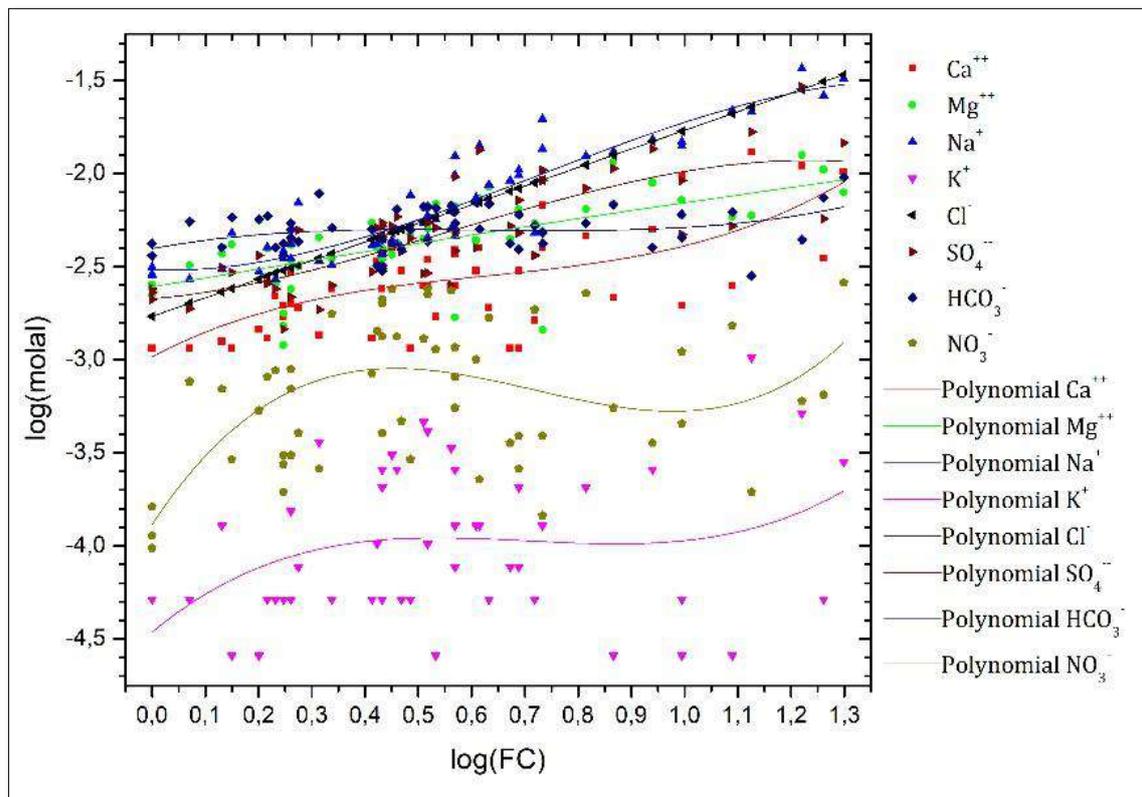


FIGURE 52. DIAGRAMME DE CONCENTRATION

- La concentration en Sodium n'augmente pas au même rythme que le chlorure. Ceci met en évidence le phénomène d'échange ionique qui a affecté légèrement la concentration de cet élément. En effet, la fixation du Sodium par les argiles est à l'origine de la diminution du rapport Na/Cl.
- La molalité en Calcium augmente moins fortement que le sulfate car une partie de Ca⁺² est impliquée dans la précipitation de la calcite. Le Calcium devient donc le facteur limitant de la précipitation conjointe de la calcite et du gypse (Droubi, 1976 ; Valles et al., 1989) ;
- L'alcalinité et la teneur en Calcium ne croient pas simultanément, ceci est dû en fait à la précipitation de la calcite (Valles et al., 1989). En effet, l'analyse de l'indice de saturation par rapport à la calcite montre que la majorité des eaux prélevées sont saturées voir même sursaturées par rapport au minéral, à l'exception de quelques échantillons qui sont légèrement sous-saturés.
- Le Magnésium varie généralement dans le même sens que le Calcium mais avec des teneurs généralement plus faibles. Ceci est dû au fait que la dolomie est moins soluble par les acides carboniques de la pluie ou les acides organiques des sols que le calcaire.
- Le Potassium et les Nitrates montrent pratiquement le même comportement des molalités par rapport à la concentration totale.

4. La qualité des eaux

4.1. La potabilité des eaux :

On a essayé de comparer les teneurs des éléments chimiques entre eux et par rapport aux normes précises selon l’OMS (Organisation Mondiale de la Santé). Par ailleurs ; voir leurs évolutions dans l’espace ; l’ensemble des résultats montre surtout des valeurs élevées de la conductivité indiquant la forte minéralisation des eaux souterraines de Tébessa avec un maximum qui atteint 6800 $\mu\text{s}/\text{cm}$. L’examen de la variation des concentrations des cations (Fig. 56) montre que :

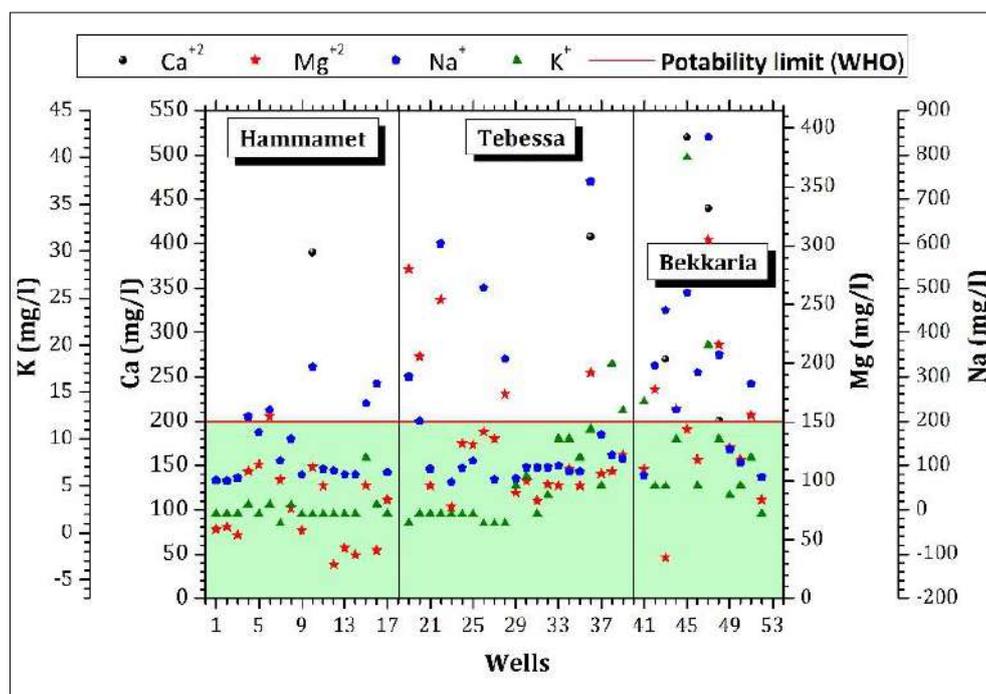


FIGURE 53. DIAGRAMME DES CATIONS SELON LES NORMES DE L’OMS

La moyenne des concentrations de calcium dépasse la norme de potabilité OMS, Par contre la plupart des échantillons d’eau présentent des concentrations inférieures à la norme.

Ainsi seuls quelques puits indiquent de fortes concentrations dépassant la norme, c’est le cas de P10 à Hammamet ; au niveau de la plaine de la Merdja le P36 et Bekkaria les puits P34, P45 et P47. L’origine de ces teneurs est liée aux apports qui se font par les produits latéraux et à la dissolution du gypse de djebel Djebissa.

La teneur moyenne en Mg est de l’ordre de 117.25 mg/l ; la plupart des valeurs sont conformes aux normes de potabilité (OMS), excepté les puits (19, 20, 28, 36) dans le Nord-Est de la ville de Tébessa et les puits (42, 47, 48, 51) dans le Nord-Ouest de Bekkaria. Les fortes concentrations en Magnésium sont dues à la dilution des calcaires dolomitiques des bordures.

En ce qui concerne le sodium, les plus fortes teneurs sont localisées dans la zone Est (région de Bekkaria) et du centre de la plaine de Tébessa, ce qui s’explique par le phénomène d’échange de base, en effet les eaux arrivants de Bekkaria riches en sodium au contact du sol libèrent le Na^+ et récupèrent le calcium contenu dans le sol.

Au niveau de Bekkaria, affleurent les évaporites riches en calcium ce qui facilite l'échange de base.

A Hammamet les concentrations connaissent une baisse ce qui traduit le fait que les échanges décrits précédemment n'ont plus lieu. Cette situation est due aux écoulements des eaux souterraines d'amont en aval auxquels s'ajoute l'effet des eaux douces provenant des bordures qui sont pauvres en sodium.

La plupart des échantillons montrent clairement que la teneur en K est faible ne dépassant pas la norme de potabilité excepté les puits (38 et 39) à Tébessa et les puits (41, 45, 47) à Bekkaria.

Le schéma de la variation des concentrations des anions (Fig. 57) nous a permis de constater que :

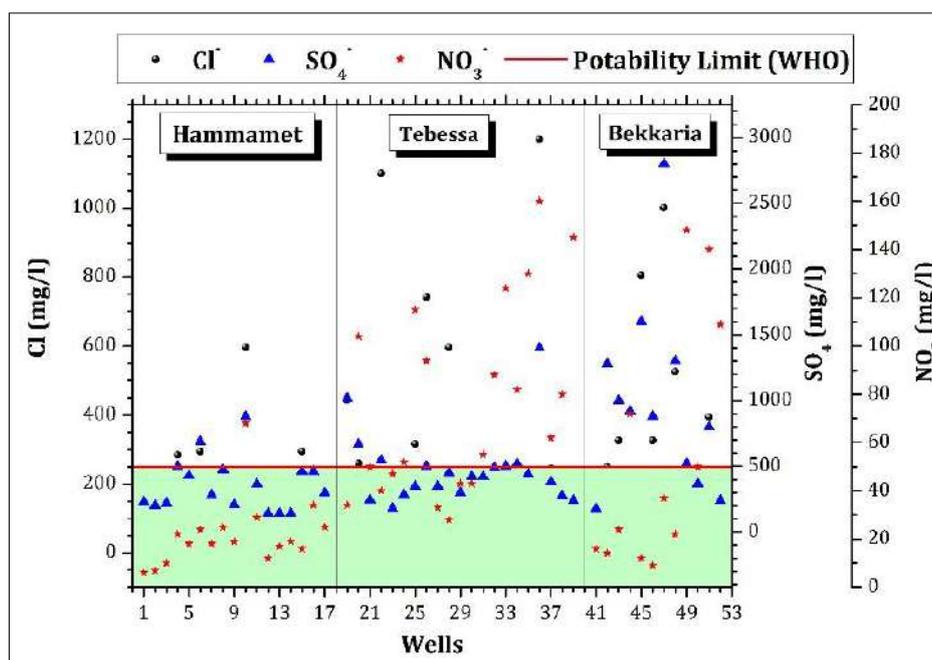


FIGURE 54. DIAGRAMME DES ANIONS SELON LES NORMES DE L'OMS

Les teneurs en chlorure sont variables, avec quelques concentrations élevées (dépassant la norme préconisée qui est 250 mg/l). Ces fortes teneurs sont localisées au centre de la plaine (P19, P22, P25, P26, P36) ; les puits (43, 45, 46, 47, 488, 51) à Bekkaria.

Ces fortes valeurs sont dues au lessivage des sédiments des marnes et des calcaires dolomitiques de la bordure d'une part et au lessivage des sédiments de quaternaire couvrant le secteur d'autre part.

La présence des alluvions et de sédiments d'origine évaporitique à la surface du sol facilite le lessivage.

Dans la zone de Hammamet excepté les puits (4, 6, 15), les autres puits présentent des concentrations conformes à la norme.

Les argiles du quaternaire sont à l'origine de ces teneurs ; la disposition de ces formations à la surface du sol favorise leur lessivage.

A Tébessa, les eaux contenues dans les formations alluvionnaires qui sont riches en sels solubles sont à l'origine de cette augmentation, on peut aussi expliquer ces augmentations en chlorures par la pollution d'origine domestique et agricole.

Dans la zone de Bekkaria et Tébessa on enregistre de fortes teneurs en sulfates dépassant la norme préconisée au niveau de quelques puits, le lessivage des formations gypsifères provenant de djebel Djebissa est à l'origine de ces concentrations d'une part et les apports anthropiques par les engrais chimiques sulfatés d'autre part.

Ces concentrations diminuent en allant vers Hammamet et peuvent dépasser la norme au niveau des puits (6 et 10), les argiles du quaternaire sont à l'origine de ces teneurs, la disposition de ces dernières à la surface du sol a favorisé leur lessivage.

Ces fortes valeurs sont dues au lessivage des marnes et des calcaires dolomitiques de la bordure d'une part et d'autre part au lessivage des sédiments du quaternaire couvrant ce secteur. La présence d'alluvions et des sédiments d'origine évaporitique à la surface du sol facilite le lessivage. A Bekkaria la disposition du sable quartzeux et des argiles d'âge pliocène à la surface favorise leur lessivage.

On note aussi que 36 % des échantillons analysés présentent des concentrations élevées en Nitrates dépassant les normes de potabilité avec une valeur maximale de l'ordre de 160 mg/l. Ce qui indique une pollution de cette eau qui est liée à plusieurs facteurs dont le plus important est l'activité agricole où l'utilisation excessive des engrais contribue à l'augmentation des teneurs des nitrates. D'autres facteurs peuvent influencer d'une manière à une autre tel que l'activité pastorale, la mauvaise protection des puits et l'absence de réseaux d'assainissement. Les eaux les plus exposées à la pollution par les Nitrates sont les eaux de la nappe superficielle des zones entourant la ville de Tébessa et Bekkaria.

4.2. Aptitude des eaux à l'irrigation :

La plaine de Tébessa s'étale sur une superficie de plus de 968 km, dont la plus grande partie est à vocation agricole. Cette activité agricole demande beaucoup d'eau afin de subvenir aux besoins des diverses cultures.

Une étude chimique détaillée des eaux pour l'irrigation est nécessaire pour mettre en évidence le danger que présente certains éléments chimiques pour les plantes tiennent compte non seulement des caractères chimiques de l'eau, mais également de la nature des cultures, du type de sols, du climat, des méthodes d'irrigation et des propriétés de drainage du sol.

On a représenté les résultats d'analyses sur le diagramme de Riverside (Fig. 58), qui nous a permis de déduire que les eaux de la région, appartiennent généralement à la troisième et quatrième classe dont le risque de salinisation est moyen à fort. Il ressort de cette classification que dans l'ensemble, les eaux sont d'une qualité admissible pour l'irrigation à 54.54%, médiocre à 36.36% et mauvaise

à 9.11%. Mais pour la plupart des eaux de Tébessa sont très chargées et sont donc de qualité médiocre mais pouvant être utilisées sous certaines conditions : sols très perméable, bon lessivage, plantes tolérables au sel.

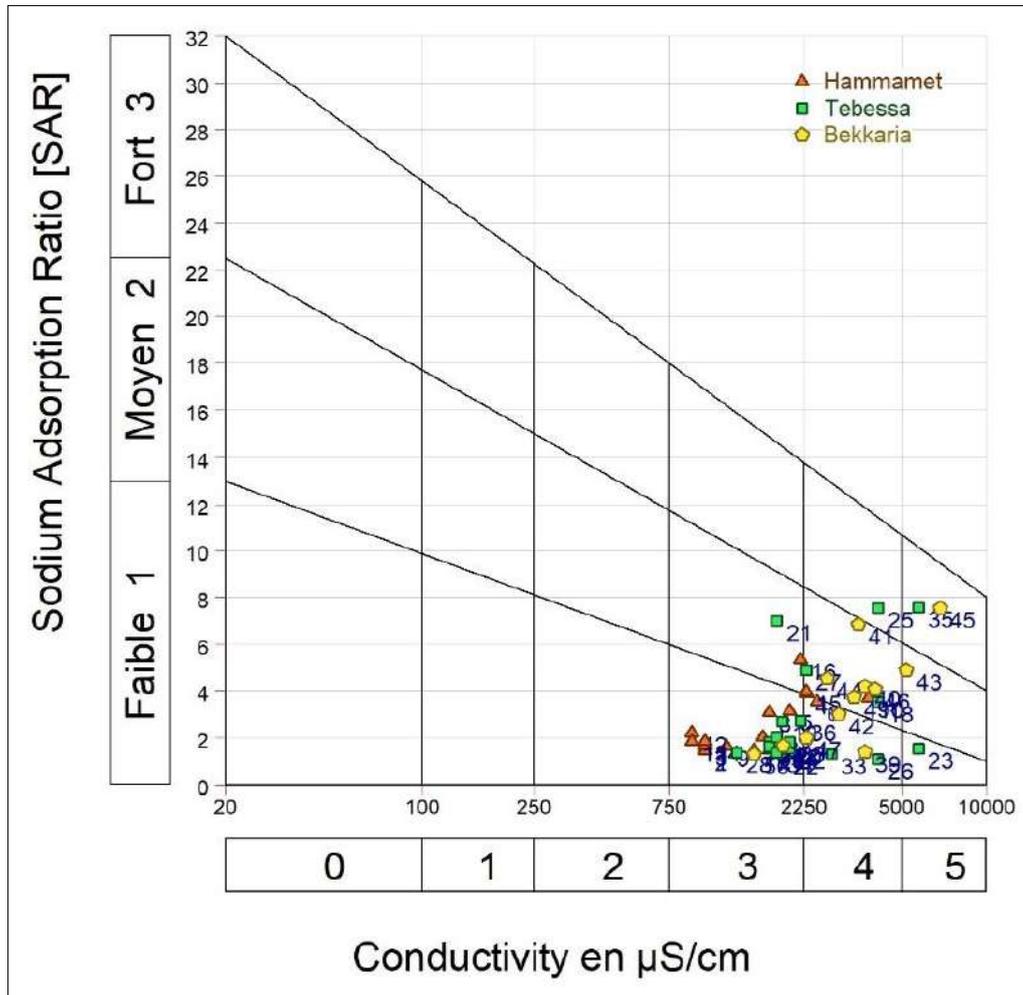


FIGURE 55. CLASSIFICATION DES EAUX A L'IRRIGATION EN FONCTION DU SAR

5. Conclusion :

Dans cette partie la délimitation du bassin versant et l'extraction du réseau hydrographique ainsi que la réalisation de la carte des pentes par utilisation des images MNT, ont pu quantifier le drainage des eaux de surface et leurs parcours dans la cuvette. Nous avons en premier lieu réalisé des cartes du couvert végétal de la région de Tébessa, par la classification supervisée par le maximum des vraisemblances. Cette dernière a montré une bonne correspondance entre les classes et les vérités terrain.

Les cartes de classifications des dates 04/04/2018 et 27/08/2018, nous ont donné un type de résultats qui sont la matrice de changement quantifiant les surfaces d'occupation du sol et leurs évolutions spatio-temporelles et la cartographie pour identifier les distributions spatiales des changements.

Donc la diminution importante du couvert végétal dans ce bassin versant indique le comportement saisonnier des exploitations agricoles. Elles représentent la principale source de l'économie de la population de la région.

L'étude qualitative des eaux souterraines (nappe superficielle) du bassin de Tébessa montre qu'elles sont salées avec une conductivité très élevée. Le faciès chimique est Sulfaté Magnésien vu les fortes concentrations en sulfates et magnésium.

L'interprétation de l'évolution des teneurs en nitrates, met en évidence une dégradation de l'état naturel des eaux souterraines qui indique la pollution de cette eau :

- La dégradation liée à plusieurs facteurs dont le plus important est l'activité agricole où l'utilisation excessive des engrais contribue à l'augmentation des teneurs des nitrates.
- Les eaux de l'irrigation et celle de la pluie jouent un rôle majeur dans le transport des ions du nitrate du sol vers les nappes.

Malgré cette diversité chimique, les eaux restent généralement aptes à la consommation humaine, excepté les puits se trouvant à proximité d'exploitations agricoles. Aussi pour l'irrigation, elles sont bonnes à admissibles à l'exception des puits (P11, P17, P30, P32, P34, P38, P39, P44 et P46) qui sont mauvaises.

Conclusion générale

Conclusion générale

La plaine de Tebessa se trouve dans la région semi-aride de l'Algérie, où les précipitations varient de 300 à 600 mm. Les températures estivales peuvent atteindre 40°C. Cette situation de sécheresse accentue l'appauvrissement des ressources en eau, surtout au cours de la dernière décennie. De plus, la région de Tebessa et les villages environnants (Bekkaria, Hammamet) ont connu une forte croissance avec l'implantation de nouvelles industries et fermes. Tous ces facteurs génèrent parfois des effets très défavorables sur la qualité de l'eau, entraînant généralement une augmentation de la teneur en sel.

Les données hydrochimiques de la région de Tebessa ont fourni des informations utiles sur la qualité des eaux souterraines de l'aquifère peu profond qui peuvent être utilisées pour déterminer si les eaux souterraines conviennent à des fins domestiques et agricoles. La qualité des eaux souterraines révèle que les valeurs de conductivité présentent un danger pour la consommation alors que l'eau a une salinité élevée due principalement à la concentration en sulfates et magnésium qui donne à l'eau le faciès sulfaté magnésien. Plus de 50 % des échantillons d'eau ne sont pas affectés par les risques liés à la salinité et au sodium ; ils conviennent donc à l'irrigation. Les relations établies entre les concentrations des éléments majeurs ont permis une meilleure caractérisation de l'eau, en particulier le mode d'acquisition de la minéralisation. Cette dernière est principalement contrôlée par les processus géochimiques de dissolution et/ou de précipitation (dissolution de la calcite à l'entrée de l'eau dans l'aquifère, puis dissolution de la dolomite accompagnée de précipitation de la calcite dans l'aquifère) et par les échanges de bases avec les minéraux argileux.

L'évolution des logs de molalité des éléments majeurs en fonction du log du facteur de concentration (CF) montre que la salinité de ces eaux est causée par les minéraux évaporés (gypse, anhydrite et halite), et surtout par la halite largement sous-saturé qui peut se dissoudre d'avantage, entraînant ainsi une augmentation de la concentration globale. Bien que les éléments dérivés des minéraux carbonatés n'évoluent pas en proportion du facteur de concentration logarithmique et participent aux précipitations.

L'étude de la vulnérabilité par la méthode DRASTIC a montré que la plaine alluviale de la région de Tebessa a une vulnérabilité moyenne dans la totalité de sa surface avec un degré fort au centre proche de la ville de Tebessa. Puisque ses zones sont généralement caractérisées par une activité agricole, l'emploi des fertilisants doit être contrôlé et rationnel.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Aller L., Bennett T., Lehr J., Petty R., Hackett G. (1987). DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings: U.S. environmental protection agency report EPA 600/2- 87/035, p 622.
- Aoudjehane M., Bouzenoune A., Rouvier H., Thibieroz J. (1992). Halcinèse et dispositifs d'extrusions du Trias dans l'Atlas Saharien Oriental (NE Algérie). Géol. Médier, Marseillaise, XIX, PP. 273-287.
- Bagnouls F. et Gaussen H. (1953). Saison sèche et indice thermique xéothermique. Doc. Carte product. Végét, sér. Généralités, 3(1), 47 p.
- Beghoul M. (1974). Etude géologique de la légion des Hamimat (Sud-Est Constantinois). Application à la recherche pétrolière dans les confins algéro-tunisiens. Thèse DocL Ing., Univ. P. et M. Curie (Paris VI), 69p.
- Bertrand Marcel. (1896). Existence du Trias gypseux en Algérie (B. S. G. F., (3e), XXIV, p. 1184.
- Birot P. et Dresch J. (1953). La Méditerranée et le Moyen-Orient*. Tome I. La Méditerranée occidentale. Paris, P.U.F. (Collection Orbis), gr. in-8°, 551 p. 56.
- Blès J.I., (1969). Contribution à l'étude des déformations cassantes de la feuille Morsott (S-E Constantinois Algérie). Les micro-fractures et leurs relations avec les failles et les plis. Publ. Serv. Carte Géol. Algérie, N.S. Bull. 39, p. 7-17.
- Bles J.L. et Fleury J.J. (1970). Carte géologique au 1/50 000 de Morsott, avec notice explicative. Alger, Service géologique de l'Algérie.
- Bouchagoura et al. (1996). Synthèse hydrogéologique du système alluvial Hammamet- Tébessa-Bekkaria, Mémoire d'Ing. Univers. Annaba, 84p.
- Bouzenoune A. (1993). Minéralisations périadiapiriques de l'Aptien calcaire : les carbonates de fer du gisement hématitique de l'Ouenza (Algérie Orientale). Thèse de Doctorat, Université Paris VI, 209 p.
- Bouzenoune A. (1993). Minéralisations périadiapiriques de l'Aptien calcaire : les carbonatès de Fer du gisement hématitique de l'Ouenza (Algérie orientale). Doc, Univ Pierre et Marie Curie, Paris VII, 207p.
- Capot-Rey Robert (1953). Problèmes morphologiques et érosion des sols dans le Tell algérien. Cahiers Outre-Mer VI no 21 pp 88-91.

- Castany G. & Margat J. (1977). Dictionnaire français d'hydrogéologie. BRGM Service géologique national, Orléans, 249 p.
- Champagne L. et Chapuis R.P. (1993). Evaluation de la vulnérabilité à la pollution des formations aquifères de la MRC de Montcalm selon la méthode DRASTIC. Rev Sc Tech Eau ; 26 ; pp. 76-169.
- Chevinine A., Popov Y., Douha D.J., Benzeroual M. (1989). Rapport sur les résultats de l'étude géologique complémentaire des feuilles 124 (Oued Kebarite), 125 (Ouenza), 150 (El-Aouinet) et 151 (Boukhadra) pour la préparation à l'édition des cartes géologiques au 1/50000. Partie 1, texte (1987-1988) O.R.G.M. Algérie. In *Bentahar Fatima, (2010), Evolution tectono-sédimentaire de l'aptien de la région de telidjene Tébessa, Algérie Nord-Orientale. Mémoire Magister, Université de Tebessa, 119p.*
- De Martonne E. (1926). Aréisme et Indice d'aridité. Comptes Rendus de L'Academy of Science, Paris, 1395-1398.
- Deleau P. et Laffitte R. (1951). Carte géologique du Nord-Est Algérien, échelle 1/500000. Service de la Carte Géologique de l'Algérie.
- Djabri L. (1987). Contribution à l'étude hydrogéologique de la nappe alluviale de la plaine d'effondrement de Tébessa - Essai de modélisation - Thèse de Doc. Ing. de l'Univ. des Sci. et Tech. de Franche-Comté - Besançon - 176 p.
- Dozet S., Ferjancic V., Gojkovic M. et Ivankovic J. (1985). Carte géologique de l'Algérie au 1/50000. Feuille 150. El Aouinet. Édité. Service de la carte géologique de l'Algérie, avec notice explicative. 6 p.
- Droubi A. (1976). Géochimie des sels et des solutions concentrées par évaporation – Modèle thermodynamique de simulation - Application aux sols salés du Tchad. Mémoire des Sciences Géologiques 46, 177 p.
- Dubief J., (1950). Évaporation et coefficient climatiques au sahara. Tra. Inst. Rech. Sci. Paris. Tome 6.344p.
- Dubourdiou G., (1956). Etude géologique de la région de l'Ouenza (confins algéro-tunisiens). Publications du service de la carte géologique de l'Algérie, Alger, N.S., 10, 659 p.
- Durozoy G. et Bouillon M. (1956). Carte géologique de l'Algérie au 1/50000. Feuille 206. Tébessa. Service de la carte géologique de l'Algérie, avec notice explicative.
- Emberger L. (1932). Sur une formule climatique et ses applications en botanique. La Météorologie, 92-93:423-432.

- Gausse H., Bagnouls F. (1952). L'indice xérothermique. Bulletin de l'Association de Géographes Français, 222-223 pp. 10-16.
- Ghrieb L. (2011). Impact de la minéralisation des formations triasiques sur la qualité de l'eau et du en zone semi-aride : Cas de la plaine Bekkaria-Tébessa (Extrême Nord-est Algérien). 143p.
- Gouaidia L. (2000). Approche Hydrochimique d'une nappe en Zone semi-aride cas de la nappe alluviale de la plaine de Tébessa extrême Nord-est Algérien. Mémoire de magister Univ. Annaba.
- Gunie R. (2002). Analyse des techniques d'élaboration de Modèles Numériques de Terrains et des méthodes d'extraction automatique du réseau hydrographique pour l'amélioration des études de bassins versants, 52 p.
- Hamza M.A., Added A., Frances A., Rodriguez R., Ajmi M. et Abdeljaoued S. (2008). Évaluation de la vulnérabilité à la pollution potentielle de la nappe côtière alluvionnaire de Meltine-Ras Djebel-Raf Raf (Nord-est tunisien) selon les méthodes paramétriques DRASTIC, SINTACS et SI ». Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science, vol. 21, n° 1, 2008, p. 75-86.
- Hamza M.H., Added A., Rodriguez R., Abdeljaoued S., Ben Mammou A. (2007). A GIS based DRASTIC vulnerability and net recharge reassessment in an aquifer of a semiarid region (Metline-Ras Jebel-Raf Raf aquifer, Northern Tunisia). J. Environ. Manage 84p.
- Isabel D., Gelinat P. et Aubrey F. (1990). Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines au Québec. Rev Sc Tech Eau, 23 p.
- Jourda J.P., Kouamé K.J., Adja M.G., Deh S.K., Anani A.T., Effini A.T., Biémi J. (2007). Evaluation du degré de protection des eaux souterraines : vulnérabilité à la pollution de la nappe de Bonoua (Sud-est de la Côte d'Ivoire) par la méthode DRASTIC. Session Environnement/Eau, 11p.
- Kowalski W.M., Hamimed M., Pharisat A. (2002). Les étapes d'effondrement des grabens dans les confins algéro-tunisiens. Bulletin du Service Géologique de l'Algérie, vol. 13, n°2, pp. 131-152.
- Masse J.P. & Chikhi-Aouimeur F. (1982). La plateforme carbonatée de l'Ouenza (Sud Constantinois, Algérie). Organisation et dynamique durant l'aptien supérieur. Géol. Méditer, Marseille, Vol, IX, n°3, p 259-267.

- Metz, M., Mitasova, H., Harmon, R. S. (2011). Efficient extraction of drainage networks from massive, radar-based elevation models with least cost path search, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 667-678. doi: 10.5194/hess-15-667-2011.
- Mohamed R.M. (2001). Evaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution de l'aquifère alluvionnaire de la plaine d'El Madher, Nord-Est algérien, selon la méthode DRASTIC. *Sciences et changement planétaires / sécheresse*, vol. 12, n°2, pp. 95-101.
- Moran R., E. et Wentz D.A., (1974). Trace element content of a stream affected by metal mine drainage, Bonanza, Colorado, International symposium on water-rock interaction, Prague, pp. 22.
- Morel F. (1957). Etude géologique du Djebel Bekfif. Publ. Serv. Carte Géol. Algérie, N. S.
- Nedjari-Bellahsene, S. et Nedjari, A. (1984). Le Boukhadra : Esquisse paléogéographique aptienne. 5^{ème} séminaire nationale des Sciences de la Terre, Alger, pp.102.
- Othmanine A. (1987). 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 3^{ème} Cycle, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, France, 221 p.
- Othmanine A. (1987). Les minéralisations en fluorine, barytine, Pb, Zn et fer sidéritique autour du fossé de Tébessa-Morsott (Algérie). Relation entre paléogéographie aptienne, diapirisme, structure et métallogénie. Thèse de 3^{ème} cycle, Univ, Pierre et Marie Curie, Paris VI Fr, 221p.
- Parkhurst D.L et Appelo. C.A.J. (1999). User's guide to PHREEQC version2: a computer program for speciation, batch-reaction, one dimensional transport and inverse geochemical calculations. USGS, Water-resources investigations report 994259.
- Parkhurst DL, Thorstenson DC, Plummer LN. (1980). Phreeqc. A computer program for geochemical calculations. US Geol. Survey Water Resource Invest. Rept. 80-96.
- Perthuisot V. et Rouvier H. (1992). Les diapirs d'Algérie et de Tunisie : des appareils varies, resultats d'une evolution structurale et petrogenetique complexe, *Bull. Sot geol. France*. 163 (6). 751-760
- Perthuisot V. (1994). Structures et géométrie des diapirs maghrébins. Essai de synthèse. Mémoires du Service Géologique de l'Algérie. N°6. pp.153-159,
- Pohl W., Amouri M., Kolli O., Scheffer R. et Zachmann D. (1986). A new genetic model for the North African metasomatic siderite deposits. *Mineralium Deposita*, vol. 21, p. 228-233.

- Ricard, J. (1979). Evaluation des ressources d'un aquifère d'après l'analyse du bilan en eau. Application au système aquifère de Tébessa Morsott (Algérie). Thèse 3ème cycle, USTL, Montpellier II, 86 p.
- Rodier J. (2009). L'Analyse de l'eau. 9ème édition. Dunod, Paris. 1511p.
- Rouvier H. et al. (1985). Deposits and salt beaging diapirs in southern Europe and north African– Econ. Geol., vol 30. n°3. pp.666 .687.
- Salmi-Laouar S. (2004). Contribution à l'étude géologique et gîtologique des minéralisations Pb-Zn-Ba-F dans la région de Messkiana : exemple des indices d'Essouabaa et de M'Kheriga (Atlas Saharien Oriental, Algérie). Thèse de Magister, USTHB, Alger.
- Seghir K. (2008). Vulnérabilité à la pollution, protection des ressources en eaux et gestion active du sous-système aquifère de Tébessa Hammamet (Est Algérien). 151p.
- Sheppard S.M.F., Charef A. et Bouhlef S. (1996). Diapirs and Zn-Pb mineralization: A general model based on Tunisian (N. Africa) and Gulf Coast (U.S.A.) deposits. Soc. of Geo/. Special Publication, n°4, pp.230-243.
- Thibitroz J. et Madre M., (1976). Le gisement de sidérite du djebel Ouenza (Algérie) est contrôlé par un golfe de la mer aptienne. Bulletin de la Société d'Histoire naturelle d'Afrique du Nord. t.67, fasc.3-4, p. 125-150.
- Thorntwaite, C.W., (1948). An approach towards a rational classification of climate. Geographical Review 38, pp 55-94.
- Valles V, Bertrand R, Bourgeat F, N'diaye M.K. (1989). Le concept d'alcalinité résiduelle généralisée et l'irrigation des sols sodiques - Application aux sols du Kouroumari (Mali) et de la vallée de l'oued Medjerdah (Tunisie). L'agronomie tropicale 44-3, 157-163.
- Vila J. M. (1994). 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, N° 6, pp. 105-152.
- Vila J.M. (1980). La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro-Tunisiens. PhD of Science, University Pierre et Marie Curie, Paris VI.
- Vila, J.M. (1996). Mise au point et données nouvelles sur les terrains triasiques des confins algérotunisiens: Trias allochtone « glaciers de sel » sous-marins et vrais diapirs. Mém. Serv. Géol. Algérie, n°6, pp. 105-152.
- Zerdazi A. (1990). Etude gravimétrique du Mole d'Aire de l'Atlas Sahraoui septentrional oriental (Nord-Est de l'Algérie), Thèse de doctorat Sciences. Univ de l'Ausane. Suisse. 213 p.