

UNIVERSITE KASDI MERBAH – OUARGLA
FACULTE DESHYDROCARBURES, DES ENERGIES RENOUVELABLES ET DES
SCIENCES LA TERRE ET DE L'UNIVERS
Département des Sciences de la Terre et de l'Univers.



Mémoire de Master Académique

Domaine : science de la terre de l'Univers

Filière : géologie

Spécialité : Hydrogéologie

THEME

ETUDE HYDROLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE
DE LA RÉGION DE TEBESSA PAR APPLICATION DE
LA TÉLÉDÉTECTION ET SIG

Présenté par

Chikha Belgacem Bilal

Debbar Hocine

Devant le jury :

Président :	<i>Mme MAABDI N.</i>	MAA	Univ. Ouargla
Promoteur :	<i>Pr. DJIDEL M.</i>	Pr.	Univ. Ouargla
Examineur :	<i>Mme BOUCHAGOURA L.</i>	MAA	Univ. Ouargla

Année Universitaire: 2016/2017

«وأنزلنا من المعصرات ماء ثجاجا»

:الآية 14 من سورة النبا

«وترى الأرض هامدة فإذا أنزلنا عليها الماء اهتزت وربت وانبتت من كل زوج بهيج»

:الآية 5 من سورة الحج

«وان من الحجارة لما ينفجر منه الأنهار وان منها لما يشقق فيخرج منه الماء»

:الآية 74 من سورة البقرة

Dédicace

***Nous dédions ce travail
modeste pour ceux qui
sont les plus chères dans
le monde, notre famille
et nos amis offrent un
témoignage toujours
grande satisfaction à la
fin me pointer vers le
droit chemin.***

REMERCIEMENTS

C'est une tâche difficile de trouver les plus justes mots pour exprimer ses « mercis », c'est paradoxalement la dernière page qu'on rédige et qu'on croise en premier.

Avant tout, nous remercions dieu tout puissant de nous avoir donné la volonté et le pouvoir afin d'accomplir ce travail, comme nous tenons à remercier toute personne ayant participé de près ou de loin à l'élaboration de ce présent mémoire et en particulier un très grand remerciement à notre promoteur Monsieur DJIDEL MOHAMMED pour son soutien moral, sa gentillesse et ses conseils judicieux. Il nous a pas ménagé son aide, nous lui en sont profondément reconnaissants.

A Monsieur MEDJANI FETHI pour sa modestie et ses idées claires, pertinentes et encouragements.

Nous adressons aussi nos sincères remerciements à tous les enseignants du département de géologie, les deux options ; Géologie pétrolière et Hydrogéologie.

Qu'il nous soit permis aussi de traduire toute la reconnaissance que nous éprouvons au membres du jury pour avoir accepté d'évaluer le présent mémoire.

Nous tenons également à s'excuser auprès des personnes qui nous ont aidés et les auteurs dont on a utilisés les documents sans les avoir cités dans les remerciements ou dans la bibliographie.

Enfin, nous remercions tout le personnel du département de géologie de l'université de Ouargla.

Table des matières

Liste des figures	IV
Liste des tableaux	VI
Introduction	1
Chapitre I : Description de la zone d'étude	3
1-Situation géographique.....	3
2-Réseau hydrographique :.....	4
3-Couverture végétale :.....	5
4-Géologie :	5
4.1- Stratigraphie :	6
4.1.1-Secondaire.....	6
a-Trias :	6
b-Crétacé inférieur et moyen.....	6
b.1- Aptien :.....	6
b.2- Albien :	7
b.3- Vraconien :.....	7
c-Crétacé Supérieur.....	7
c.1- Cénomaniens :	7
c.2- Turonien :.....	7
c.3- Emschérien (Santonien et Coniacien) :.....	7
c.4- Campanien :	7
c.5- Maestrichtien :	7
4.1.2 Tertiaire.....	8
a-Pliocène inférieur.....	8
a.1- Paléogène :	8
b-Paléogène supérieur	8
b.1- Éocène :	8
c-Néogène.....	8
c.1- Miocène :	8
d-Néogène supérieur.....	8
d.1- Pliocène :	8
4.1.3-Quaternaire.....	8
4.2- Tectonique :.....	11
4.2.1-Plissements :	11
4.2.2-Failles :	11
4.2.3-Fossés d'effondrements :.....	12
4.2.4-Diapirisme :	12
4.3- Conclusion.....	12
5-Étude climatologique	13
5.1- Historique :	13
5.2- Diagramme pluviométrique :.....	15
5.3- Variations mensuelles des précipitations :	15
5.4- Les températures	16
5.5- Calcul du coefficient pluviométrique	17
5.6- Le Bilan hydrique	18
5.6.1-Étude de l'évapotranspiration.....	18
5.6.2-Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP)	18

5.6.3-Estimation de l'évapotranspiration réelle(ETR)	18
5.6.4-Formule de Turc.....	18
5.6.5-Évapotranspiration réelle par la formule de Thornthwaite	19
5.6.6-Estimation des réserves facilement utilisables	19
5.6.7-Calcul de l'infiltration.....	19
5.6.8-Bilan hydrique global, période allant de 72-2009	20
6- Étude Hydrogéologique	21
6.1- Introduction.....	21
6.2- La piézométrie des puits domestiques.....	22
6.3- Carte piézométrique de la période des hautes eaux (mars 2009)	22
6.4- Carte piézométrique de la période des basses eaux (juillet2009)	23
6.5- Carte des conditions aux limites :.....	23
6.6- Détermination des paramètres hydrodynamiques de la nappe profonde.....	24
6.6.1-Cartographie des paramètres hydrodynamiques	24
a-Carte de transmissivité : (Fig.18)	24
b-Carte de perméabilité :(Fig.18)	25
6.7- Conclusion :	26
Chapitre II : Matériels et méthodes	28
1- Matériels	28
1.1- Les données satellitaires	28
1.1.1-Les images (MNT) :.....	28
1.1.2-Les images satellitaires (LANDSAT OLI) :.....	28
1.1.3-Les images Google Earth :.....	28
1.2- Les logiciels utilisés :	28
1.2.1-Global Mapper :.....	28
1.2.2-ArcGis 10.3 :.....	29
1.2.3-ENVI 5.1 :.....	29
1.2.4-Google Earth Pro :	29
1.2.5-Diagrammes :	29
1.2.6-PreeqI v 2.15 : (Parkhurst and Appelo, 1999).....	30
2-Méthodes :.....	30
2.1- La modélisation hydrologique :.....	30
2.1.1-Processus d'extraction du réseau hydrologique :	30
2.1.2-Extraction de la carte des pentes :	31
2.2- Occupation du sol :	31
2.2.1-Les prétraitements des images :	31
a-Empilement des bandes spectrales (Layer stacking)	32
b-Découpage des images (Resize data) pour extraire la zone d'étude :.....	32
c-La composition colorée :	32
d-Rehaussement des images (Enhance) :.....	33
2.2.2-Classifications des images.....	33
a-Indice de végétation (NDVI).....	33
b-ROI.....	33
c-Classifications par Maximum de Vraisemblances :	33
2.3- Hydrochimie :.....	34
2.3.1-Mode échantillonnage :.....	34
2.3.2-Méthodes d'analyses des eaux :.....	36
a-Les analyses sur terrain (Mesures in situ) :	36
b-Analyses au laboratoire :	36
2.3.3-Méthodes de traitement des résultats :.....	36
Chapitre III : Résultats et discussion :	39

1- Hydrologie :	39
1.1- Caractéristique de la forme du bassin versant :.....	39
1.2- Carte des pentes :	39
1.3- Réseau hydrographique :.....	40
2- Occupation du sol :	41
2.1- Photo-interprétation des images satellitaires :.....	41
2.2- Classification supervisée des images :.....	41
2.2.1-Classification par Arbre de décision :.....	42
2.3- Evolution temporelle des états de surface (Change détection).....	42
2.3.1-Les matrices de changements :	42
2.3.2-Les changements saisonniers (Avril 2015 et Aout 2015) :.....	43
2.3.3-Le résultat final des évolutions temporelles durant les 2 dates :	43
2.4- La cartographie des changements :.....	43
2.4.1-Evolution temporelle entre Avril et Aout 2015 :.....	44
2.4.2-L'évolution spatiotemporelle durant la période d'étude :.....	45
3- Hydrochimie :.....	45
3.1- Description des résultats d'analyses chimiques de l'eau :	45
3.1.1-Paramètres physico-chimiques et potabilité des eaux :.....	45
a- Potentiel d'hydrogène (pH) :.....	46
b- La conductivité électrique :.....	46
3.1.2-Les éléments majeurs :.....	46
a- Le calcium (Ca ⁺²) :	46
b- Le magnésium (Mg ⁺²) :	47
c- Le Sodium (Na ⁺) :.....	47
d- Le Potassium (K ⁺) :	48
e- Les Bicarbonates (HCO ₃ ⁻) :	48
f- Les Chlorures (Cl ⁻) :.....	48
g- Les Sulfates (SO ₄ ⁻²) :	48
h- Les nitrates (NO ₃ ⁻):.....	49
3.2- Faciès chimiques des eaux :	50
3.3- Aptitude des eaux à l'irrigation :.....	51
3.4- L'indice de saturation	52
4- Conclusion :	53
Conclusion général	38

Liste des figures

Figure 1: Situation géographique de la région d'étude	3
Figure 2: Réseau hydrographique de la région d'étude.....	4
Figure 3: Coupe géologique schématique au pied de Belkif	8
Figure 4: Carte Géologique de la région d'étude.	9
Figure 5: Colonne stratigraphique : d'après Durozoy et Morel	10
Figure 6: Précipitations annuelles médianes « normales» (1965-95) (d'après étude ANRH-GTZ ,2003) (GHRIEB Lassaad 2011).....	13
Figure 7: Répartition interannuelle des précipitations sur une période de 103 (GHRIEB, 2011)	14
Figure 8: Diagramme pluviothermique de la station de Tébessa. (1972-2009) (GHRIEB, 2011)	15
Figure 9: Variation des moyennes mensuelles annuelles des précipitations/ Station de Tébessa. (1972/2009) (Ghrieb, 2011)	16
Figure 10: Répartition mensuelle des températures 73/2009).....	16
Figure 11: Températures moyennes interannuelles à la station de Tébessa (72/2009).....	17
Figure 12: Représentation graphique du bilan de Thornthwaite/ Station de Tébessa (1972/2009)...	21
Figure 13: Carte d'inventaire des points d'eau (GHRIEB Lassaad 2011)	22
Figure 14: Carte piézométrique Mars 2009/ Plaine de Tébessa (GHRIEB Lassaad 2011)	22
Figure 15: Carte piézométrique Juillet 2009/ Plaine de Tébessa (GHRIEB Lassaad 2011).....	23
Figure 16: Carte des conditions aux limites. (In Djabri 1987).....	24
Figure 17: Variations lithologiques des aquifères.....	24
Figure 18: Carte des Transmissivités * 10 ⁻³	25
Figure 19: Carte des perméabilités * 10 ⁻⁵	25
Figure 20: Illustration de la chaîne de géotraitements pour la délimitation du bassin versant d'un plan	30
Figure 21: Organigramme général du processus d'extraction du réseau hydrologique.....	31
Figure 22: Carte de la répartition des échantillons dans la zone d'étude.....	35
Figure 23: Carte de pentes de la zone d'étude	40
Figure 24: Carte de réseau hydrographique	40
Figure 25: Evolution des états des surfaces de végétation	41
Figure 26: Classification par maximum de vraisemblances.	42
Figure 27: Carte d'évolution temporelle entre 03/04/2015 et 25/08/2015.....	44
Figure 28: Carte de La conductivité électrique	46
Figure 29: Carte de pollution des eaux par les Sulfates (Mg ⁺²).....	47
Figure 30: Carte de pollution des eaux par les Sodium (Na ⁺).....	48
Figure 31: Carte de pollution des eaux par les Sulfates (SO ₄ ⁻²).....	49
Figure 32: Carte de pollution des eaux par les nitrates (NO ₃ ⁻)	49

Figure 33: Facies chimique des eaux par le diagramme de Piper	50
Figure 34: Classification des eaux à l'irrigation en fonction du SAR	52
Figure 35: Variation de l'indice de saturation.....	53

Liste des tableaux

Tableau 1: Récapitulatif des données statistiques.....	14
Tableau 2: Coefficient pluviométrique de la plaine de Tébessa. (72/2009).....	17
Tableau 3: ETR selon L. Turc et C.W. Thornthwaite.....	19
Tableau 4: Résultats de l'infiltration pour les différentes périodes.....	20
Tableau 5: Bilan hydrique global d'après la méthode de Thornthwaite/Station de.....	20
Tableau 6: Campagne d'échantillonnage dans la zone d'étude (2015).....	34
Tableau 7: Norme de potabilité de l'eau.....	37
Tableau 8: Classification des eaux par degrés d'aptitude à l'irrigation par la méthode du SAR (l'Ouvrier, 1976).....	38
Tableau 9: Les longueurs d'ordres des cours d'eau dans la cuvette de Tébessa.....	40
Tableau 10: Synthèse d'évolution de surfaces au cours de la période d'étude.....	42
Tableau 11: Matrice de changements entre Avril et Aout 2015.....	43
Tableau 12: Synthèse d'évolution de surfaces au cours des 2 dates.....	43
Tableau 13: Surfaces occupées par les différentes cultures.....	45
Tableau 14: Résultats des analyses physico-chimiques des eaux souterraines de Tébessa.....	45
Tableau 15: Variation des éléments majeurs des eaux de Tébessa (2015).....	51

Introduction

Introduction

Introduction

L'eau est un élément biologique important en tant que support de vie et facteur du développement des pays. Elle est considérée comme un vecteur privilégié de l'activité humaine.

La quantité et la qualité des eaux dans le monde a connu ces dernières années une grande détérioration, à cause des rejets industriels non contrôlés, de l'utilisation intensive des engrais chimiques dans l'agriculture d'une part ainsi l'exploitation désordonnée des ressources en eau d'autre part. Ces dernières ont produit une modification chimique de l'eau en la rendant impropre aux usages souhaités.

Actuellement l'Algérie se trouve confrontée au manque de réserves superficielles, et à l'exploitation excessive des ressources souterraines ; ajouté à cela la pollution des eaux qui commence à se sentir dans certaines régions. En outre pour remédier à tous ces problèmes, une évaluation quantitative, ainsi qu'une exploitation rationnelle des ressources en eaux superficielles et souterraines s'imposent. 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 est une contribution à l'identification de l'occupation du sol d'une part et la détermination des caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines, et leurs utilisations dans la plaine de Tébessa d'autre part.

Par cette étude et afin d'arriver à notre objectif, nous avons développé les étapes suivantes :

- ✓ Au cours du *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 géomorphologique, étude géologique, étude hydrogéologique et une étude hydroclimatologique).
- ✓ Le *deuxième 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 *troisième 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 multispectrale des images satellitaire.

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 différentes analyses effectuer

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

Chapitre I

Description de la zone d'étude

Chapitre I : Description de la zone d'étude

1- Situation géographique

La région d'étude se situe à l'extrémité Nord-ouest de la wilaya de Tébessa, et elle appartient au domaine de l'Atlas Saharien Oriental, aux confins algéro-tunisiens, précisément, aux monts de Tébessa, qui constitue la partie orientale des monts de Nemmemcha (Figure 1).

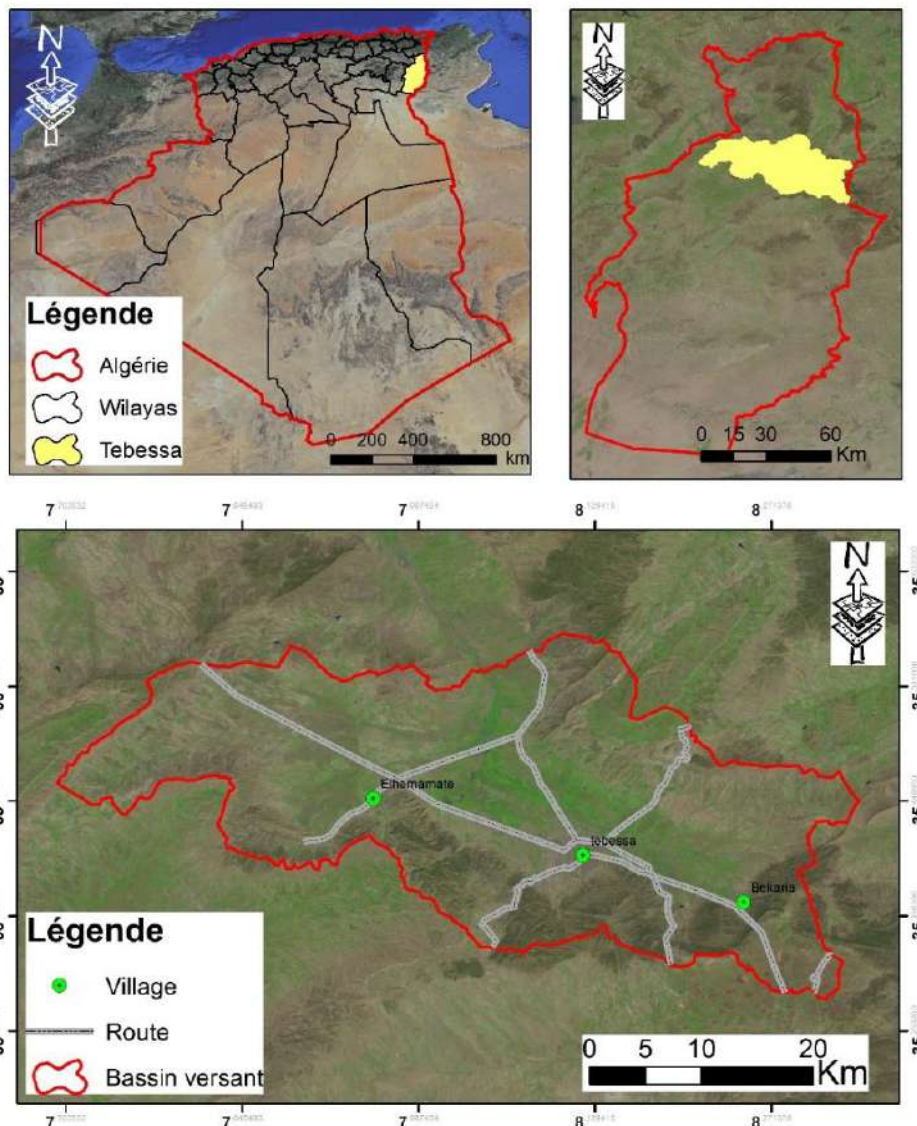


Figure 1: Situation géographique de la région d'étude

La zone d'étude est un sous bassin d'une superficie d'environ 998 km², et couvre les principales villes de : Tébessa, Hammamet et Bekkaria. Les limites administratives peuvent être définies comme suit :

- au Nord-Ouest : par la ville de Meskiana (Willaya de Oum El Bouaghi) ;
- au Sud-Est : par la ville de Tébessa ;
- à l'Ouest : par la daïra de Cheria et Bir Mokaddem.

Concernant les limites géomorphologiques, on peut citer :

- au Nord-Ouest : Dj. belkif.
- au Sud : Dj. Gaaga, Dj. Bouzian, Dj. Mestiri et Dj. Tazbent ;
- à l'Est : Dj. Guenifida et Dj ezitouna ;
- à l'Ouest : Dj. Troubia et Dj. Essen ;

La zone d'étude est comprise entre les coordonnées géographiques suivantes :

- Longitude 7° 50' – 8° 10' Est.
- Latitude 35° 24' – 35° 35' Nord.

2- Réseau hydrographique :

La région d'étude est marquée par un réseau hydrographique bien développé avec de nombreux oueds (Fig. 2), dont l'écoulement est temporaire. Ces oueds sont les suivants : oued Serdiess, oued Ksob, oued Boudiss, oued Bouakous et oued Chabro, ces deux derniers sont les plus importants oueds caractérisant la région. L'oued Bou Akous rejoint l'oued Ksob qui se jette dans oued Méllégue, lequel s'inscrit dans le grand bassin de Medjerda.

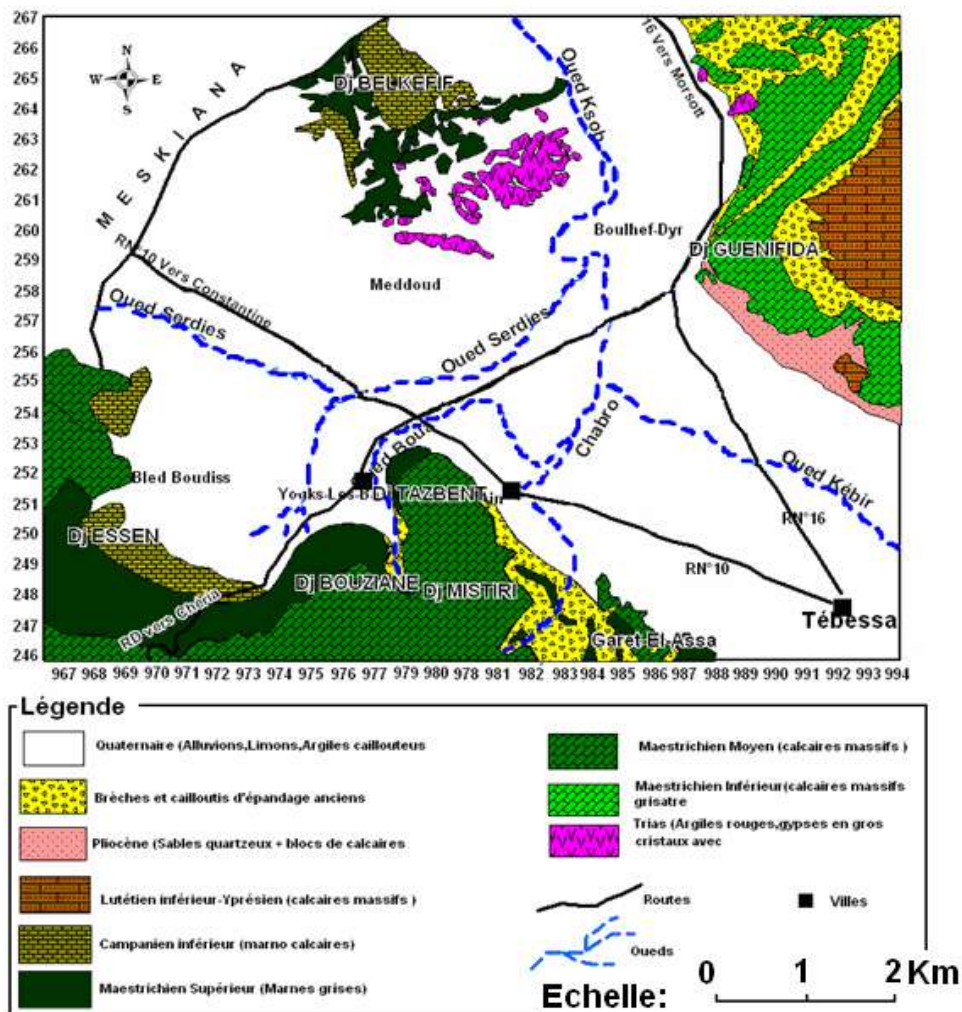


Figure 2: Réseau hydrographique de la région d'étude (SEGHIR, 2008)

3- Couvert végétal :

Le couvert végétal de la zone d'étude est constitué généralement de forêts, de maquis et de reboisement, le reste de surface se répartissent entre des terres agricoles et des terres improductives. Le développement de l'agriculture est fortement compromis par les caractéristiques du sol, des écoulements, et de l'intensité de l'action humaine. Les forêts de Hammamet sont essentiellement peuplées de pin d'Alep, une essence qui s'adapte le mieux aux conditions climatiques de la région, et n'exige pas beaucoup d'eau (200 mm/an) mais nécessite un sol à base de calcaire.

4- Géologie :

La géologie est un moyen d'investigation très utile en hydrogéologie, car elle permet le repérage des formations susceptibles d'être aquifères, et de suivre leur évolution dans l'espace et dans le temps. En se basant aux anciens travaux géologiques régionaux de nombreux auteurs, le bassin étudié correspond à des formations autochtones constituée essentiellement de :

- très importantes assises carbonatées d'âge campanien ;
- divers recouvrement marquant le quaternaire.

Il faut signaler que la région de Hammamet n'a jamais fait l'objet de levés géologiques détaillés sauf sa partie Nord qui est couverte par la feuille de Meskiana n° 204. Le seul travail connu remonte à l'époque coloniale avec la Carte Topographique de Hammamet n° 205 (échelle 1/50000) que l'Institut de Géologie National a publié en 1950. On peut citer les références suivantes :

- Durozoy et Dubourdiou (1951) ont décrit le fossé d'effondrement de Tébessa et le fossé de Hammamet ;
- Durozoy (1956) a établi la stratigraphie de la région et a donné les premiers rapports descriptifs de la tectonique Plio-quaternaire ;
- Kowalski, Boudoukha, Hemila et Pharizat (1997), ont contribué à la reconnaissance du fossé d'effondrement de Tébessa dont l'objectif principal était de montrer les différents stades d'effondrements du graben de Tébessa (confins algéro-tunisiens) et la tectonique de la phase pliocène et plio-quaternaire.

L'étude lithologique et stratigraphique des faciès permet de donner plusieurs informations sur :

- La description des différents faciès et l'établissement d'une colonne stratigraphique synthétique des différentes strates ;
- La description des formations géologiques susceptibles d'être aquifères. Pour cela, on distingue :
 - ✓ Un milieu poreux, composé de sables et graviers qui correspondent généralement aux

nappes d'eaux superficielles (nappes phréatiques) ;

- ✓ Un milieu fracturé rencontré dans les formations carbonatées (d'âge Maastrichtien et Turoniens) qui correspond aux nappes d'eaux profondes.

Généralement la zone d'étude est caractérisée par une stratigraphie allant du trias au quaternaire, comme on va le montrer dans les paragraphes suivants (Durosoy, 1956) :

4.1- Stratigraphie :

La description stratigraphique et lithologique de la région d'étude se présente de bas en haut comme suit (Fig.2) :

4.1.1 Secondaire

a- Trias :

Généralement, les formations de cet étage n'affleurent pas dans la zone d'étude ; mais existent probablement en grande profondeur, comme cela est prouvé par l'inclinaison remarquable des calcaires du Turonien de Dj. Es. Senn. Elles sont probablement poussées du côté oriental par le diapir triasique. Des roches gypseuses du Trias sont observables au côté sud de Dj. Belkif et Bouhalala, ce Trias étant caractérisé par la présence des argiles rouges, des gypses fragmentés en gros cristaux avec des lentilles de calcaire et de dolomie. Dans la zone d'étude le trias affleure au Hammamet Sud et Nord. Il affleure largement aux pieds de Dj. Belkif à l'ouest d'un oued, puis encore plus à l'ouest à 400 m au Nord-Est de koudiat El-Alia. Tous ces affleurements sont assez réduits, le plus important étant celui situé à l'ouest de koudiat El-Gada. Il est allongé NE-SW sur 300m et 50m de large, et est constitué d'un ensemble de 30 à 40 m d'épaisseur surmonté de dolomies bréchiqes en bancs sub-verticaux (Morel, 1955 ; Othmamime, 1987).

Les meilleurs affleurements se situent au sud des collines de koudiat El-Alia Sidi Yahia, dans la plaine, qui semble correspondre au cœur de diapir Hammamet-Belkif, dont l'extrémité SW se situerait à Youkous - les bains (un affleurement de trias est signalé aux environs de Youkous - les bains sur la carte géologique au 1/50000 (Othmamime, 1987). Le trias est représenté par de grandes masses de gypses gris - bleuté et parfois rougeâtre, et par des argiles vertes et bariolées. Ce faciès, indique l'existence d'importantes lagunes où se sont déposées de grandes quantités de marnes, de gypse et probablement de sel (Morel, 1955 ; Buisson, 1974).

b- Crétacé inférieur et moyen

b.1- Aptien :

Il est formé par des bancs de calcaires à Orbitolines, souvent bréchiqes à ciment dolomitique ou calcique. Dans la partie méridionale du Dj. Belkif, ces calcaires sont englobés dans le Trias diapirique, avec une épaisseur qui dépasse 100 m.

b.2- Albien :

Il affleure près de Dj. Bouroumane où il est formé par des calcaires en bancs bruns épais sur une épaisseur de 90 m. Ces assises forment une grande partie des pentes moyennes du versant Ouest de Bouroumane. Cet étage ne se trouve pas dans la zone d'étude, peut-être à cause du diapirisme accentué lors de cette période, cependant selon le dernier article de J-M. VILLA (2001) il existe près de Dj. Belkif

b.3- Vraconien :

Il est bien développé dans la zone de Bouroumane et Hammamet, et il existe probablement en profondeur dans le fossé de Hammamet. Cet étage est caractérisé par un ensemble de calcaires et de marnes calcaires grisâtres en plaquettes, renfermant des empreintes d'Ammonites.

c- Crétacé Supérieur**c.1- Cénomaniens :**

Il affleure dans la partie Nord-ouest du fossé de Hammamet à l'Est de Dj. Essen, sous la forme de marnes bleues violettes à intercalation de lumachelles. Ces marnes sont connues aussi au sud de Dj. Belkif dans l'anticlinal de Haméimat et dans la zone orientale du Dj. Ozmor (Tella)

c.2- Turonien :

Il se subdivise en deux parties, le turonien inférieur et le turonien supérieur. La base du Turonien inférieur est représentée par des marnes calcaires grisâtres, dont l'épaisseur est de l'ordre de 60 m. Le sommet du Turonien inférieur est représentée par des calcaires beiges qui constituent les falaises du Dj. Essen ; Dj. Belkif, kef Daheche, Dj. Tella (chaîne d'Ozmor). Le Turonien supérieur se présente en marnes grises, alternées avec des marnes vertes d'une épaisseur d'environ 150 m.

c.3- Emschérien (Santonien et Coniacien) :

C'est une série épaisse et monotone de marnes grises ou vertes, contenant dans sa partie supérieure des niveaux de calcaires lumachelliques sur une épaisseur de 250 m.

c.4- Campanien :

Le Campanien (inférieur et supérieur) est caractérisé par une série des marnes grises ayant une épaisseur de 200 m. Le Campanien moyen présente dans le relief une nouvelle corniche entre celle du Turonien et du Maestrichtien, il passe sensiblement aux formations marneuses qui font le passage entre Campanien supérieur et Maestrichtien inférieur.

c.5- Maestrichtien :

Le Maestrichtien inférieur est représenté par des éboulis au pied des reliefs. Le Maestrichtien supérieur est une formation puissante de calcaires massifs blancs bien lités renfermant de nombreuses empreintes d'Inocérames. Leur épaisseur est de l'ordre de 80 à 100 m, mais atteint 200 m au sud-ouest de Youkous (Hammamet).

4.1.2 Tertiaire

a- Pliocène inférieur

a.1- Paléogène :

(Dano-Montien et Tanetien) : Il se caractérise par une formation marneuse couverte au sommet par des marno-calcaires, refermant plusieurs couches phosphatées sur une épaisseur de 10 à 15m.

b- Paléogène supérieur

b.1- Éocène :

Il est caractérisé par des formations calcaires très épaisses à rognons de silex et de boules de lumachelles. Il affleure dans les parties Nord-ouest (Gourigeur) et au sud-Est de Hammamet (Tazbent). De l'autre côté du fossé de Tébessa il apparaît à Dj. Dyr-Gastel.

c- Néogène

c.1- Miocène :

Il n'affleure ni dans la région d'étude (Hammamet), ni dans ses environs les plus proches.

d- Néogène supérieur

d.1- Pliocène :

Il est composé par des argiles et des conglomérats, et il affleure près de Dj. Belkifif, et dans la partie orientale du fossé de Morsott, ainsi que dans la partie orientale du fossé de Hammamet au sud de l'embranchement de la route vers Bir D'heb.

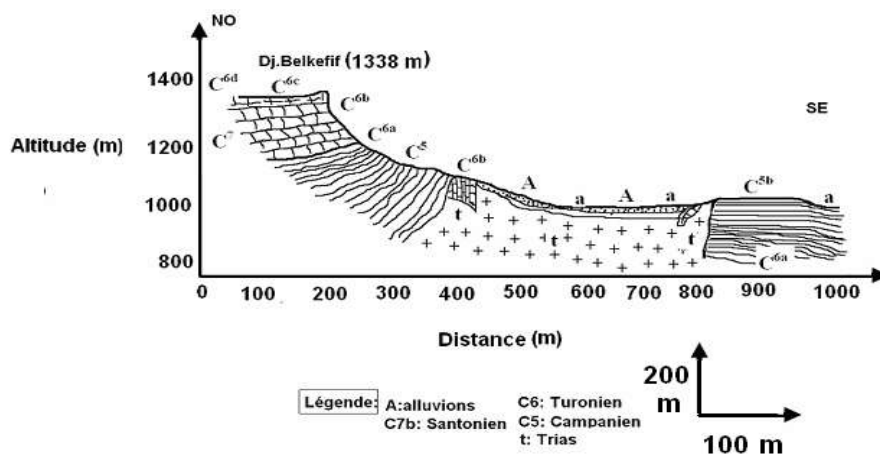


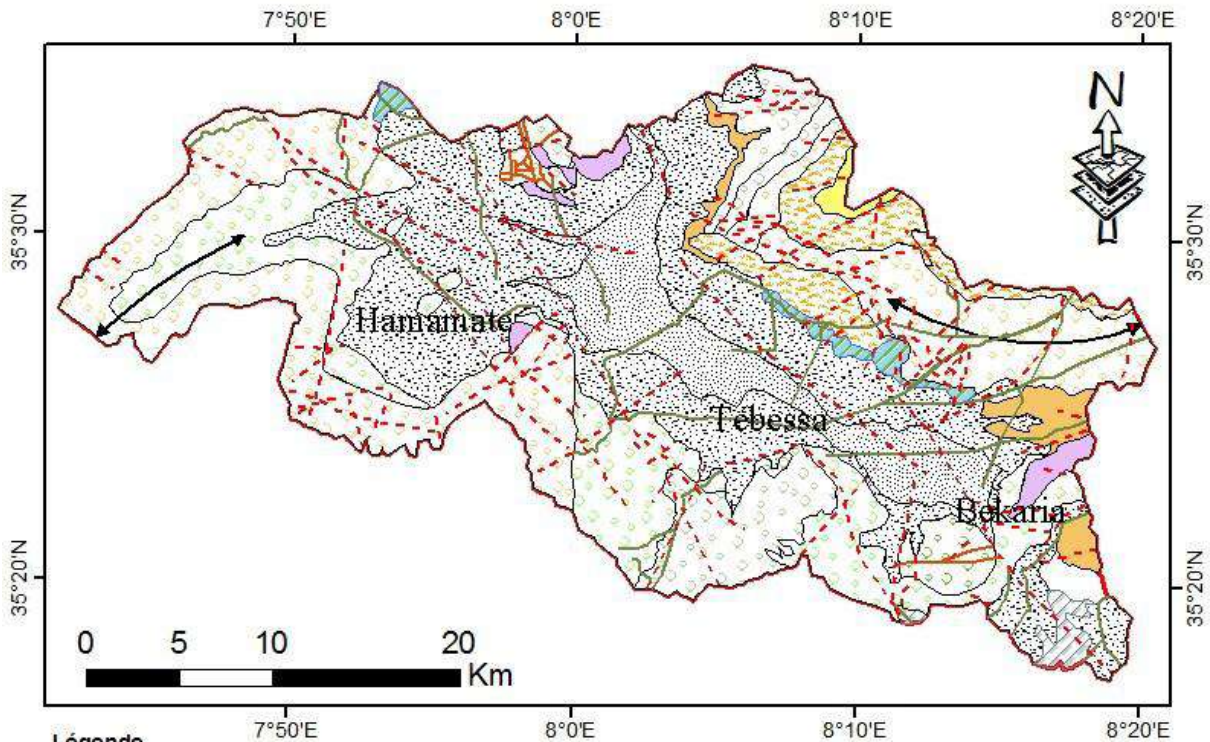
Figure 3: Coupe géologique schématique au pied de Belkifif

4.1.3 Quaternaire

Il est représenté par le remplissage du fossé de Hammamet et de Tébessa, et occupe une surface importante principalement dans les plaines et aux pieds des montagnes. Il s'agit de :

- a- **Villafranchien supérieur (Pléistocène inférieur)**, qui se caractérise par des galets ;
- b- **Pléistocène moyen**, représenté par des argiles sableuses ;
- c- **Pléistocène supérieur**, formé par des galets et des graviers ;

- d- **Holocène**, composé essentiellement par des matériaux visibles dans les vallées de Youkous ;
- e- **Eboulis actuels**, qui se trouve aux pieds des reliefs calcaires avec un épandage important. Ces dépôts sont, en majeure partie, déposés sur les séries marneuses du Crétacésupérieur.



Légende

Structures

- <all other values>
- ↔ Anticinale
- Chevauchement au contact anormal - déterminée
- - - Chevauchement au contact anormal - supposée
- Faille déterminée
- - - Faille supposée
- Limite géologique - déterminée
- Trace de stratification

géologie_Interp

- <all other values>
- A Quaternaire (Holocène): Alluvions actuelles -sables-graviers, limons et argiles
- Crétacé inférieur (Aptien): Calcaire et grès
- Crétacé inférieur (Albien): Grès, calcaires ocre et argiles
- Crétacé supérieur (Cénomaniens): Calcaire jaunes, marnes et gypse et dolomies
- Crétacé supérieur (Coniacien et Santonien): Calcaires
- Crétacé supérieur (Turonien): Calcaires et marnes
- Eocène inférieures et moyennes (Ypresien et Lutétien inférieures): Calcaires à silex et marno-calcaires, parfois à gypse
- Eocène moyen (Lutétien supérieur): Marnes, argiles et localement conglomérats
- Mio-pliocène: Argiles et conglomérats, calcaires lacustres
- Miocène moyen (Helvétien): Argiles, marnes et grès
- Paléocène-Maestrichtien: Marno-calcaires
- Pliocène-Quaternaires: Cailloux (grès et conglomérats) et marnes
- Quaternaire (Holocène): Alluvions actuelles et récentes par endroit éboulis des pentes et accumulation de piémont (sables-graviers et argiles) et molasses
- Trias: Gypse, argiles et dolomies noires
- bassin01

Figure 4: Carte Géologique de la région d'étude.

EPS	ERE	Syst per	Sous Syst époque	Etages	Symbole	Coupe	Faciès et fossiles	
150	QUATERNAIRE				q		Limons, argiles, galets, cailloutis, et éboulis actuels.	
250	TERTIAIRE	NEOGENE	MIOC-ENE	Plio-villa franchien	Pg		Dépôts argilo-gonclomératiques	
250				Tortonien	m		Faciès littoraux, sables quartzeux avec une grande abondance de grain de glauconie. faciès continental, Sables quartzeux.	
				Serravallien				
				Langhien				
				Burdigalien				
200		PALEOGENE	EOC-ENE	Lutétien	E		Calcaire Calcaire à silex.	
				Yprésien				
100			PALE-OCENE	Thanitien	P		Marno-calcaire et phosphate Marnes.	
				Danien				
200		SECONDAIRE	CRETACE	Supérieur SENONIEN	Maestrich-tien	C ₉		Calcaire en banc blanchâtre renferme des « <i>Inocerames</i> » Marne grisâtre
200	Campan-ien				C ₈		Marne grise à intercalation de bancs de calcaires blanc crayeux avec des nombreux filons du calcite dans la partie inférieure.	
250	Emschér-ien				C ₇		Marne avec intercalation des bancs lumachelliques.	
150	Inférieur			Turonien Supérieur	C _{6b}		Calcaires massifs beiges, par fois roses localement dalomités.	
100				Turonien Inférieur	C _{6a}		Marno-calcaire gris à patine rousse (100m), ensuite calcaire marneux à « <i>Inocérames</i> » allongé à test noir.	
90				Cénomani-en	C ₅		Marnes grises très fossilifères. Marnes à filons de calcite et à intercalation de minces lits de calcaires très dures.	
				Albien	C ₂		Bancs de calcaires, bruns, épais	
100				Aptien	C ₁		Gros bancs de calcaires souvent bréchiques à « <i>Orbitolines</i> » et rudistes.	
-	TRIAS				TRIAS	t		Argiles rouges, marnes gypsifères.

Figure 5: Colonne stratigraphique(d'après Durozoy et Morel, 1956)

4.2- Tectonique :

Les différentes phases tectoniques, ayant affecté l'Atlas Saharien oriental, ont engendré dans l'ensemble des zones atlasiques le percement du matériel triasique (diapirisme), les plissements des séries sédimentaires et la formation des fossés d'effondrement. Ces phases diffèrent d'une époque à une autre, en style et en direction. Les plus importantes sont détaillées dans ce qui suit:

4.2.1 Plissements :

La région frontalière algéro-tunisienne est caractérisée par des plis à grands rayons de courbures dont l'ossature est formée par des calcaires du crétacé. Les anticlinaux substitués par des vastes structures synclinales sont souvent percées dans leurs charnières par du trias diapir, leur orientation est NE- SW, les plus importants sont : l'Ouenza, Boudjaber, Def, Mesloul, Belkif qui forment les anticlinaux, pour les synclinaux on distingue oued El Ksob, Aichemia, Haouds'ghir.

Ces plis (anticlinaux, synclinaux), résultent des compressions Néogène dont la phase majeure a été considérée comme étant comprise entre l'éocène et le miocène, en raison de l'existence d'une discordance entre le miocène et les sédiments du crétacé et de l'éocène (Dubourdion, 1956 ; Dubourdion et Durozoy, 1950 ; Beles et Fleury, 1969 ; Villa, 1980). Morel (1955) a signalé, dans les environs de djebel Belkif, deux directions de plis plus récents que ceux de la phase finie.

Il existe deux phases de plissement post-Miocène dans les environs de Tébessa :

- ✓ les plissements du pliocène inférieur contemporains de l'effondrement du fossé de Morsott (contrainte maximale N20°E, direction des plis N90-135°E) ;
- ✓ les plissements du villafranchien, contemporains de l'effondrement du fossé de Tébessa (contrainte maximale N80°E, direction des plis N160-170°E°).

Le fossé de Hammamet a le même âge que celui de Tébessa, mais il est plus récent que celui de Morsott. Le substratum des fossés de Tébessa et de Hammamet est constitué d'une mosaïque de horst et de grabens.

4.2.2 Failles :

Les fracturations qui ont enregistré dans les couches de Maestrichtien sont des diaclases et se répartissent clairement en deux directions, le premier est de N110°E recoupée par la deuxième direction qui est N20°E. Le substratum de ce fossé basculé est constitué d'un système de horsts et de grabens orientés SW-NE, donc la fracturation ancienne ne semble pas jouer un rôle orographique important dans le paysage ; en revanche, elle a exercé une grande influence sur l'érosion.

Depuis l'éocène, ce sont ces failles qui ont accompagné les plissements facilitant ainsi les écrasements des charnières anticlinales. La Tectonique post-miocène a, par contre, joué un rôle

orographique très important dans la région, et c'est à cette phase qu'on attribue les grandes failles qui présentent des rejets importants à orientation NW-SE orthogonalement aux structures atlasiques de type jurassiens. Celles-ci ont défini de nombreux fossés d'effondrement dans la région (Hammamet-Morsott-Tébessa)

4.2.3 Fossés d'effondrements :

La réactivation d'anciens accidents au cours de la phase tectonique distensive a donné naissance à des fossés d'effondrements orientés NW-SE à E-W (Dubourdiou, 1956 ; Smati, 1986 ; Bouzenoune, 1993) qui se sont manifestés après les grands plissements post-miocène (Dubordiou et Durozoy, 1950). Selon Othmanine (1987) et Bonzenoune (1993), le graben de Tébessa-Morsott s'est ouvert par de petites failles orientées N140-160°E à la suite d'une phase tectonique distensive NE-SW postérieure pour Bismuth (1973), Chikhi (1984), et Benayed et al (1990).

Ces premières manifestations d'effondrements et les grabens ont commencé au cours de la distension crétacé et l'effondrement majeur a eu lieu durant le Miocène (Aquitaniens-Turonien), comme de montre la

Diapirisme :

L'atlas saharien oriental est marqué par de nombreux pointements de masses d'évaporites triasiques affleurant sur une bande de 80 km et ayant une direction NE-SW. Ils sont considérés comme des diapirs ayant percé leur couverture à différentes étapes de leur évolution (Dubourdion, 1956 ; Thibieroz et Madre, 1976 ; Bonzenoune, 1993 ; Harkati, 1992 ; Busson 1974). Un Diapirisme précoce s'est produit à l'Aptien et à l'Albien dans les monts de Mellègues et semble intervenir dans un contexte de mobilité tectonique particulier. Les indices de cette activité qui ont été enregistrées dans la sédimentation permettent d'identifier les différentes phases de percement diapiriques. On distingue :

- La phase Cénomaniens à Dj. Lorbeus (Perthuiset 1978), au Dj. Chambi (Chikhi et al 1984) et envisagé au Dj. Belkfif (Othmanine 1987) ;
- La phase Crétacé supérieur à Fedj El Adoum dans le sillon Tunisien (Laatar 1980) et à Khenchela (Camoin et al 1990) ;
- La phase Luticiens supérieur à Dj. Echcheid (Tunisie septentrionale) (Perthuisot, 1972) ;
- La phase Miocène à l'Onenza et à BouKhadra (Dubourdiou, 1956).

4.3- Conclusion

La région d'étude fait partie du bassin d'effondrement de la plaine de Tébessa-Morsott-Hammamet, qui est comblée par des sédiments d'origine continentale, formés essentiellement d'alluvions anciennes et récentes, d'argiles, de grès, de cailloutis de calcaires. La dominance de ces formations a donné une bonne perméabilité au sol. Cela est confirmé par les logs

stratigraphiques des forages réalisés dans la zone d'étude. Ce bassin d'effondrement est entouré par des reliefs importants. Ceux-ci sont formés d'un ensemble de synclinaux à faciès prédominants de calcaires et de calcaires marneux qui s'étalent du Trias jusqu'au Maestrichtien. Cette série plissés, exposées à l'érosion à partir de l'Oligocène et recouverte par le Miocène ; l'ensemble du Crétacé et du Miocène érodé, est recouverte uniquement par le Plio-Quaternaire, et présente des plis et des failles au niveau de ces formations. L'interférence de deux types de tectonique cassante a beaucoup contribué à la réalisation du schéma structural. En effet, ces rides d'orientation SW-NE, sont associées à l'érosion dominante et à une tectonique cassante importante, ont joué un rôle très important dans la formation des systèmes hydrogéologiques les plus stratégique de la région d'étude (Seghir, 2008).

5- Étude climatologique

Les caractéristiques climatiques ont une influence directe sur les réserves des eaux souterraines, de ce fait il est impératif de connaître leurs évolutions dans le temps et dans l'espace. Aujourd'hui de nombreuses questions se posent concernant l'avenir de la planète terre vis-à-vis des changements des caractéristiques climatiques. Le continent africain reste le plus exposé aux soubresauts du climat.

5.1- Historique :

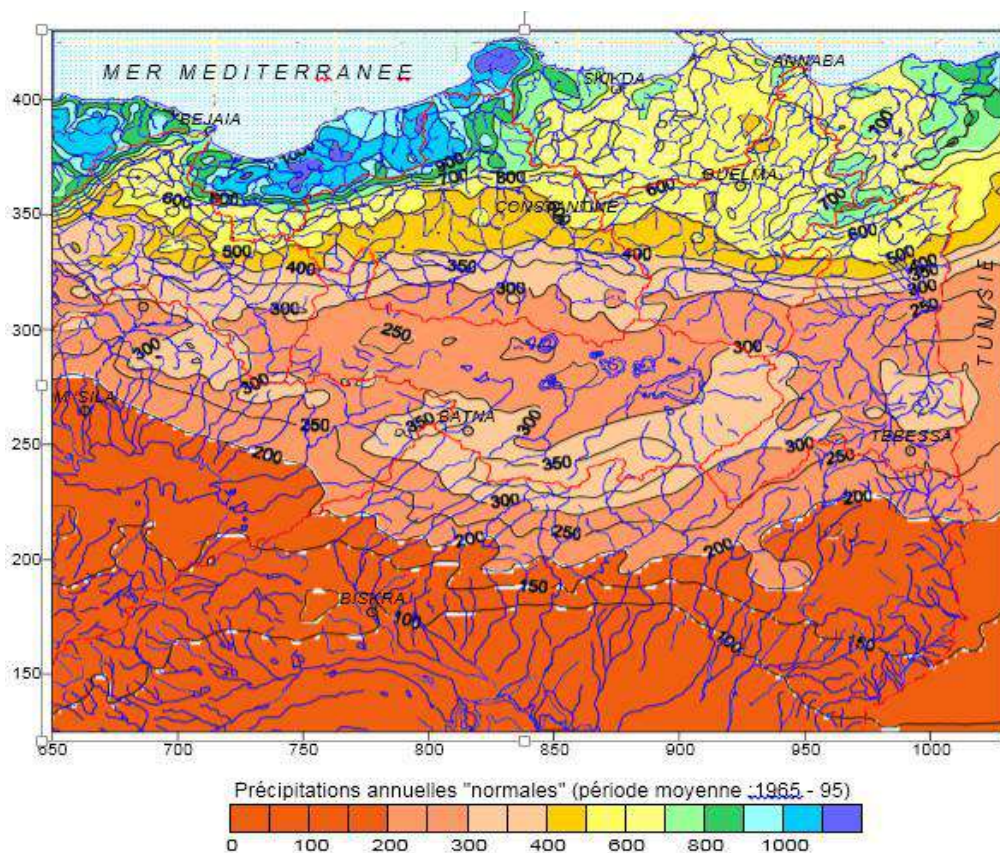


Figure 6: Précipitations annuelles médianes « normales » (1965-95) (d'après étude ANRH-GTZ, 2003)
(GHRIEB Lassaad 2011)

La station météorologique de référence fonctionne depuis plus d'un siècle (103 ans), les enregistrements de précipitations ont été réalisés sur deux sites différents, le premier, le plus ancien est géré par l'ANRH, le second datant de 1972 est situé près de l'aéroport. Les mesures de températures sont réalisées au niveau du deuxième site uniquement. La carte de répartition des précipitations établie par l'ANRH dans la période qui s'étale du 1965 à 1995 (fig. 05), montre que les précipitations sont de l'ordre de 300 mm/an, ce qui constitue un faible apport.

Les précipitations enregistrées sur 103 années, nous ont permis d'étudier l'évolution des précipitations. La valeur moyenne calculée (346.83 mm)

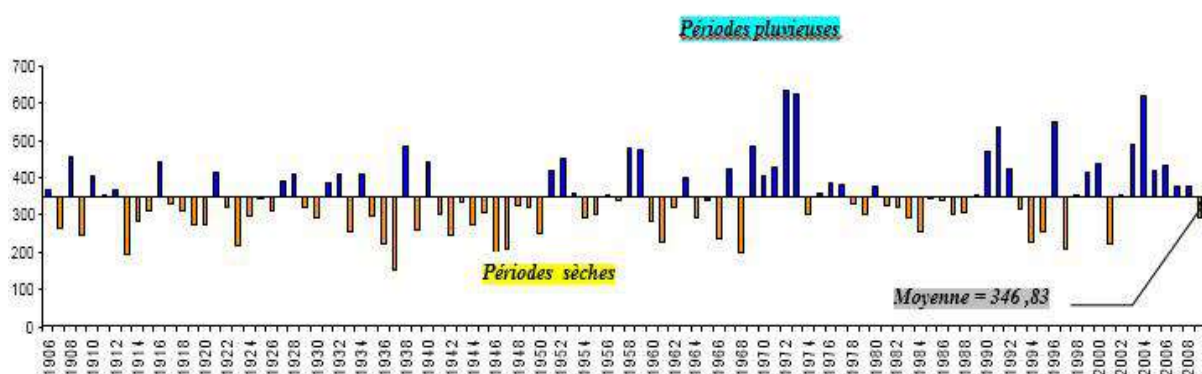


Figure 7: Répartition interannuelle des précipitations sur une période de 103 (GHRIEB, 2011)

Les précédentes interprétations nous permettent de tirer les constatations suivantes, résumées dans le tableau 2

Tableau 1: Récapitulatif des données statistiques

Périodes	Max (mm)	Min (mm)	Moyenne (mm)	Ecart type
1906-2006	634.7	154.1	346.83	95.29
1906-1925	457.4	193.1	323.25	71.63
1926-1945	483	154.1	325.37	82.24
1946-1965	479	193.4	331.56	82.49
1966-1985	634.7	195.5	369.91	112.35
1986-2009	618.8	207.4	377.87	112.40

La précipitation moyenne calculée sur cent trois années est de l'ordre de 346.83 mm, au cours de cette même période le maximum et le minimum atteignent respectivement 634.7 mm et 154.1mm.

Au cours de la période allant de 1906 à 1925, la précipitation moyenne atteint 323.25 avec un maximum de précipitations de l'ordre de 457,4 mm (1908) et un minimum de 193.1 mm (1913). La période 1926-1945 présente une valeur moyenne des précipitations de l'ordre de 325.37 mm le maximum de pluviosité atteint 483,40 mm (1938) et le minimum est de l'ordre de 154,1 mm (1937).

La pluviosité atteint son maximum pour cette période de 1946-1965 avec 479 mm (1958) et son

minimum en 1946 avec 193.4mm. La moyenne calculée est de 331,56mm.

Cette période (1966-1985) montre un minimum de 195.5mm en 1968 et un maximum de pluviosité en 1972 avec 634.7mm. .la moyenne est de 369.91mm.

Pendant la période 1986-2009 un maximum de pluviosité est enregistré en 2004 avec 618.8mm et un minimum de 207.4mm en 1997. La moyenne atteint une valeur de 377,87mm

Ce qui explique la hausse des précipitations plus ou moins considérables par rapport au début du siècle (Ghrieb, 2011).

5.2- Diagramme pluviothermique :

Les valeurs des précipitations et des températures enregistrées au niveau de la station de l'aéroport de Tébessa sur une période de 38 années, permettent l'établissement du diagramme (fig. 08), ce dernier montre la succession de deux saisons l'une sèche et l'autre humides.

La première s'étale du mois de mai jusqu'au mois d'octobre la seconde va du mois de novembre jusqu'au mois d'avril compris. Les deux saisons durent en moyenne six mois par an (Ghrieb, 2011).

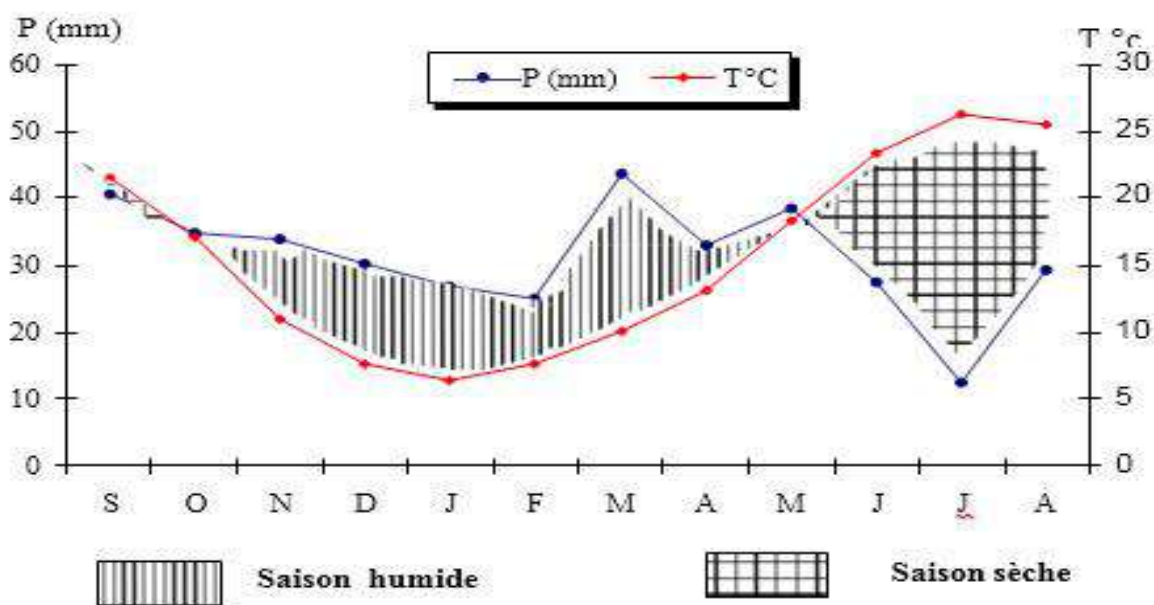


Figure 8: Diagramme pluviothermique de la station de Tébessa. (1972-2009) (GHRIEB, 2011)

5.3- Variations mensuelles des précipitations :

La courbe de variation des moyennes mensuelles des précipitations, sur une période de 38 ans (1972-2009) (fig. 09), montre que le mois de septembre (40.63 mm) est le plus pluvieux, par contre le mois de juillet avec 12.49 mm est le moins pluvieux.

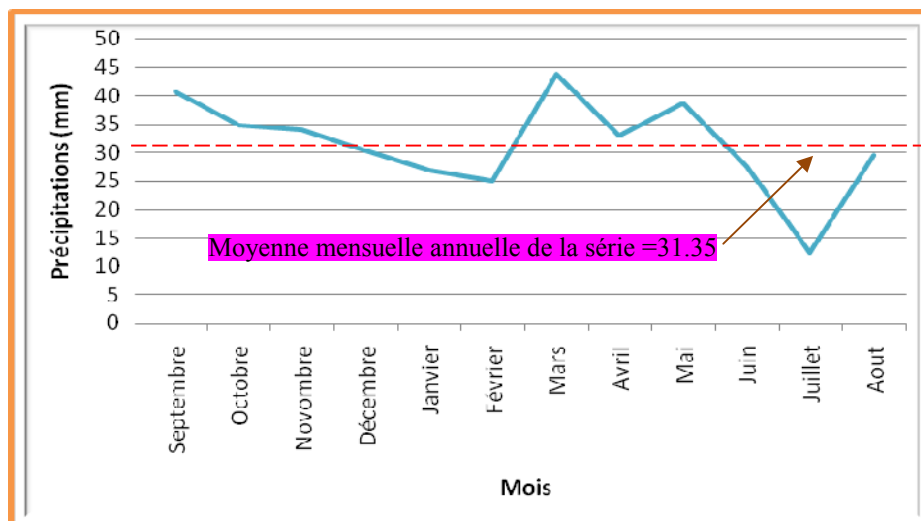


Figure 9: Variation des moyennes mensuelles annuelles des précipitations/ Station de Tébessa. (1972/2009) (Ghrieb, 2011)

5.4- Les températures

La température est le deuxième élément important dans l'étude du climat, elle joue un rôle important dans la détermination des paramètres climatiques particulièrement la détermination du bilan hydrologique. Pour réaliser notre travail, nous nous sommes basé sur les données recueillies à la station de Tébessa aéroport. La période considérée s'étale de 1972 à 2009. L'observation des températures enregistrées montre :

- L'échelle mensuelle (Fig. 10) les hivers sont très froids et humides, les étés sont chauds et secs avec des enregistrements de température minimale de 6.57°C au mois de janvier et maximale de 26.17 °C au mois de juillet (Ghrieb, 2011).

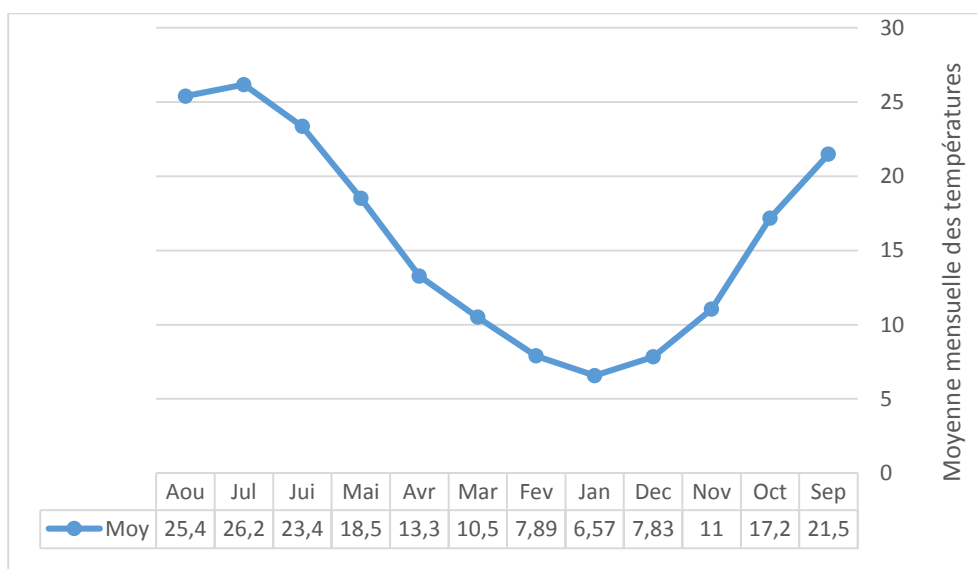


Figure 10: Répartition mensuelle des températures 73/2009)

- À l'échelle annuelle, on note une fluctuation thermique de faible amplitude (de 13,14°C à

19,08°C) donnant une certaine constance de l'allure générale. La moyenne annuelle est de 15.66°C. (Fig. 11).

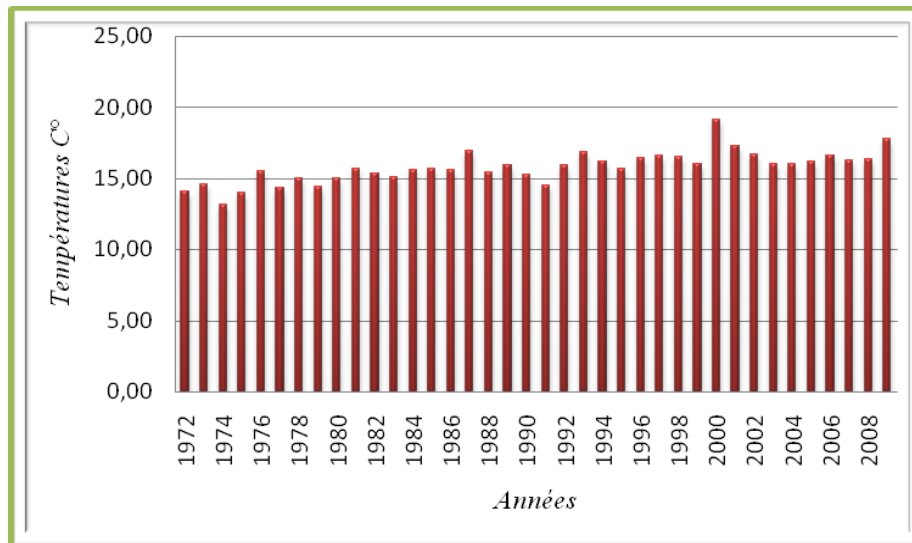


Figure 11: Températures moyennes interannuelles à la station de Tébéssa (72/2009)

5.5- Calcul du coefficient pluviométrique

$$Cp = 365 \times Pi/Pn$$

Avec :

P : précipitation, Pi : précipitation du mois du rang.

n. : nombre de jours par mois, Cp : exprime le caractère plus ou moins pluvieux du mois.

On peut écrire la formule précédente sous la forme :

$$Cp = (365/n_i) \cdot (Pi/P) = K \cdot (Pi/P)$$

Avec :

K : coefficient dépendant du nombre de jours du mois considéré.

Si : n = 31 jours k = 365/31= 11.77.

Si : n = 30 jours k = 365/30 = 12.16.

Pour le mois de février 28 jours chaque trois ans et une fois 29 jours,

k = 365/ (28 jours .3 ans +29)/4 = 12.92.

Pour la station de Tébéssa avec p = 376.20 mm on a : Cp = k Pi/P.

Tableau 2: Coefficient pluviométrique de la plaine de Tébéssa. (72/2009)

Mois	Saison humide						Saison sèche					
	Nov.	Dec.	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juill.	Aout	Sept.	Oct.
K	12.16	11.77	11.77	12.92	11.77	12.16	11.77	12.16	11.77	11.77	12.16	11.77
Pi	36.63	30.52	26.90	25.94	40.06	31.19	38.17	27.85	12.02	29.27	40.25	32.37
Cp	1.18	0.95	0.84	0.89	1.25	1.01	1.19	0.90	0.38	0.92	1.30	1.01

Saison humide : Cp (sh) = 6.13

Saison sèche : $C_p(ss) = 5.70$

$$R = C_p(sh)/C_p(ss)$$

$$6.13 / 5.70 = 1.08 \quad 1 < R < 1.75 \text{ (Climat semi-aride).}$$

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 de novembre jusqu'au mois d'avril et par une faible température. L'autre sèche de forte température atteignant leur maximum au mois de juillet. (Ghrieb, 2011)

5.6- Le Bilan hydrique

Le bilan hydrique exprime le processus que suit une quantité d'eau arrivant au sol par précipitation ou neige avant de se retourner à l'atmosphère.

Le bilan hydrologique naturel peut se calculer par la formule suivante (Castany, 1982) :

$$P = ETR + R + I$$

ETR : Evapotranspiration annuelle (mm), *I* : Infiltration, *P* : Précipitation, *R* : Ruissellement.

5.6.1 Étude de l'évapotranspiration

C'est un terme important du cycle hydrique qui résulte de deux phénomènes, l'un physique (l'évaporation), l'autre biologique (la transpiration) ; l'évapotranspiration est fonction de plusieurs facteurs (l'humidité, la température, l'insolation et le couvert végétale).

5.6.2 Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP)

Pour l'estimation de l'ETP, on utilise la formule de Thornthwaite.

$$ETP \text{ (mm/mois)} = 16 (10T / I)^a \cdot k$$

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

$$I = \sum i \quad a = (1.6/100) I + 0.5$$

T : Température moyenne du mois considéré en °C

ETP : Évapotranspiration potentielle du mois considéré en mm.

K : coefficient de correction de la latitude, *I* : indice thermique annuel.

I : indice thermique mensuel.

5.6.3 Estimation de l'évapotranspiration réelle(ETR)

Les pertes d'eau d'un sol atteignent l'ETP si elles sont supérieures ou égales au stock d'eau de la RFU. En cas d'insuffisance elles sont limitées à une quantité plus petite, cette limite est appelée l'évapotranspiration réelle (Castany, année). Cette estimation se fera à partir des formules de Turc, de Coutagne et de Thornthwaite.

5.6.4 Formule de Turc

Cette formule permet d'évaluer directement l'ETR annuelle d'un bassin à partir de la hauteur annuelle de pluie et de la température moyenne annuelle.

$$\boxed{\text{ETR} = P / (0.9 + P^2 / L2)^{1/2} \text{ (mm/an)}}$$

$L = 300 + 25T + 0.05 T^3$ (facteur qui tient compte des échanges de chaleur).

P : Précipitation moyenne annuelle en mm,

T : Température moyenne annuelle en °C.

5.6.5 Évapotranspiration réelle par la formule de Thornthwaite

Pour l'établissement du bilan mensuel on utilise l'évapotranspiration potentielle et réelle moyenne par la méthode de C.W. Thornthwaite. Ce bilan repose sur l'hypothèse suivante :

- La satisfaction de l'ETR est prioritaire sur l'écoulement.
- Le calcul de l'ETR peut s'effectuer suivant deux cas :
 - 1^{er} cas : $P > ETP \Rightarrow ETR = ETP$ on a alors un excédent.
 - 2^{ème} cas : $P < ETP \Rightarrow ETR = P + RFU$.

Sur le tableau suivant (Tab. 06) figurent les valeurs de l'ETR en (mm) et en (%) d'après les deux méthodes ; Turc et Thornthwaite d'où on remarque une différence nettement distincte.

Tableau 3: ETR selon L. Turc et C.W. Thornthwaite

Méthode	ETR (mm)	ETR (%)
Thornthwaite	341.20	90.69
Turc	354.44	95.49

5.6.6 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.
- Le type de la couverture végétale.

Ricard (1974), dans son travail a calculé la RFU, en tenant compte du coefficient de rétention (CR). Cette dernière est égale à 26 mm.

5.6.7 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 4: Résultats de l'infiltration pour les différentes périodes.

Périodes	Infiltration (mm)	Infiltration (%)
1972/2009	11.0	2.92
1999/2009	14.1	3.49
1972/1973	179.5	28.28
1996/1997	00	00

5.6.8 Bilan hydrique global, période allant de 72-2009

Tableau 5: Bilan hydrique global d'après la méthode de Thornthwaite/Station de

Mois	T°C	i	K	Pr	ETP	BH	RFU	ETR	Def	Exc
Sep	21,48	9,1	1,03	40,63	99,5	-58,9	0,0	40,6	58,9	0,0
Oct	17,17	6,5	0,97	34,79	64,4	-29,6	0,0	34,8	29,6	0,0
Nov	11,04	3,3	0,86	33,86	27,3	6,6	6,6	27,3	0,0	0,0
Dec	7,83	2,0	0,81	30,3	14,5	15,8	22,4	14,5	0,0	0,0
Jan	6,57	1,5	0,87	26,79	11,6	15,2	26,0	11,6	0,0	11,7
Fev	7,89	2,0	0,85	25,03	15,4	9,7	26,0	15,4	0,0	9,7
Mar	10,5	3,1	1,03	43,65	30,0	13,6	26,0	30,0	0,0	13,6
Avr	13,28	4,4	1,10	32,93	47,5	-14,6	11,4	47,5	0,0	0,0
Mai	18,52	7,3	1,21	38,68	91,2	-52,5	0,0	50,1	41,1	0,0
Jui	23,36	10,3	1,22	27,55	135,6	-108,1	0,0	27,6	108,1	0,0
Jul	26,17	12,3	1,24	12,49	166,7	-154,2	0,0	12,5	154,2	0,0
Aou	25,4	11,7	1,16	29,51	148,4	-118,9	0,0	29,5	118,9	0,0
Tot	15,8	73,4		376,2	852,1	-475,9		341,2	510,8	35,0

T : température mensuelle en C⁰,

i : indice thermique,

k : coefficient de latitude,

ETP : évapotranspiration potentielle en (mm),

BH : Bilan Hydrique,

Formules de vérification :

$$P = \sum ETR + \sum EX ETP = \sum ETR + \sum DA$$

$$A.N : P = 341.2 + 35 = 376.20$$

$$A.N : ETP = 341.2 + 510.8 = 852.1$$

Commentaire sur le bilan hydrique

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. 6).

La figure ci-dessous (Fig. 12) illustre les résultats du (tableau06) sur 37 ans (72/2009), 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 septembre (40.63 mm) où l'ETP atteint en janvier un minimum (11.6 mm).

L'ETP atteint son maximum au mois de juillet (166.7 mm) où les précipitations atteignent (12.49 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).

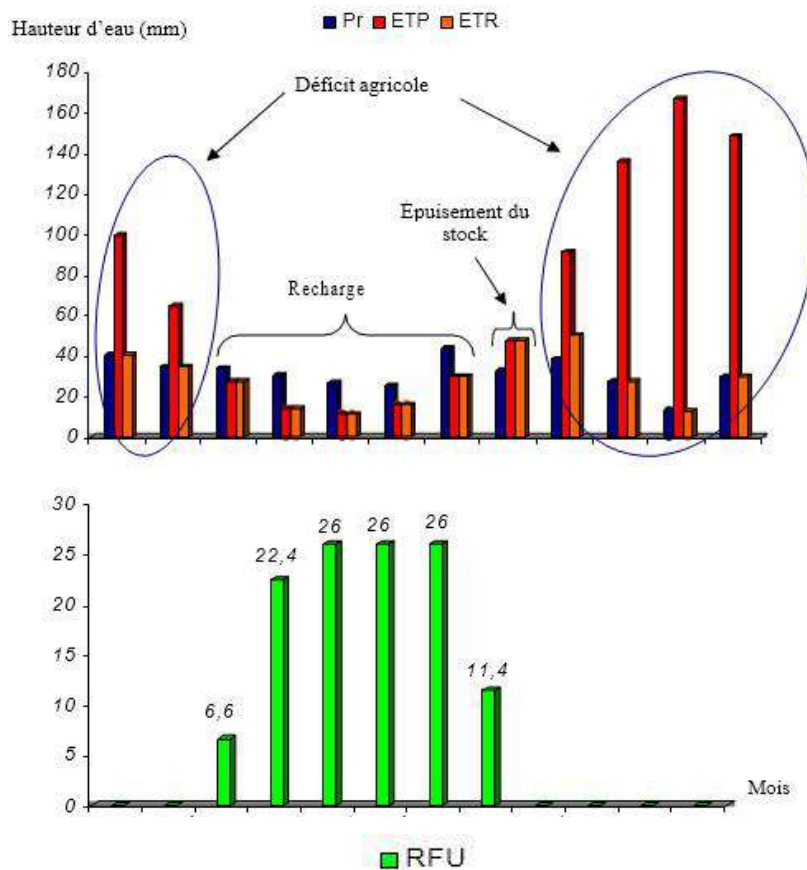


Figure 12: Représentation graphique du bilan de Thornthwaite/ Station de Tébessa (1972/2009).

6- Étude Hydrogéologique

L'hydrogéologie constitue un outil de base pour la connaissance des éléments permettant la définition des caractéristiques d'une nappe. L'interprétation piézométrique nous permet la détermination du sens de l'écoulement des eaux et ainsi définir les relations existant entre les différents systèmes.

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

6.1- Introduction

La plaine de Tébessa recèle trois niveaux d'eau (P1, P2 & P3), ces niveaux sont captés soit par des puits domestiques cas du niveau P1 soit par des forges, cas des autres niveaux. Notre travail porte sur le niveau P1, capté par des puits et le P3 capté par des forages profonds. Notons, que le niveau P2 a été exploité dans le cadre du Plan National de Développement Agricole et nous

ne disposons d'aucun renseignement sur ces ouvrages.

6.2- La piézométrie des puits domestiques

On a utilisé 02 cartes piézométriques, une se rapportant à la période des hautes eaux (mars 2009) et l'autre à la période des basses eaux (juillet 2009).

Les mesures sont réalisées à l'aide d'une sonde piézométrique de 100 m à double signalisation (sonore et lumineuse). La cartographie piézométrique a été réalisée par interpolation triangulaire, en utilisant le logiciel Surfer 8 (Golden software, 2002).

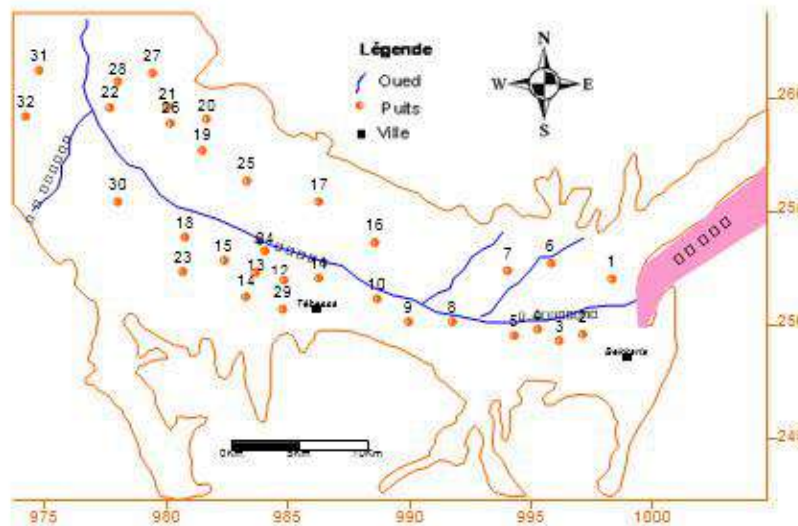


Figure 13: Carte d'inventaire des points d'eau (GHRIEB Lassaad 2011)

6.3- Carte piézométrique de la période des hautes eaux (mars 2009)

L'analyse de cette carte révèle la même morphologie que la carte piézométrique du mois de Mars 2007, cependant les fluctuations sont 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.53). Ces changements sont probablement dues aux effets de pompage

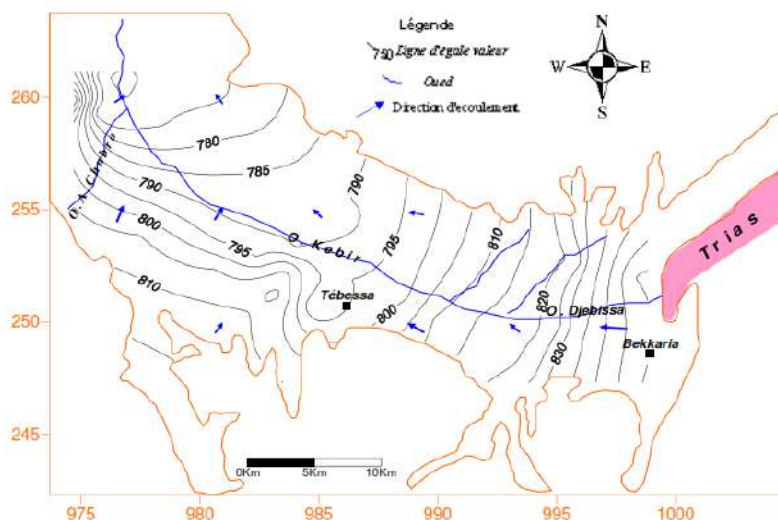


Figure 14: Carte piézométrique Mars 2009/ Plaine de Tébessa (GHRIEB Lassaad 2011)

6.4- Carte piézométrique de la période des basses eaux (juillet 2009)

La présente carte relative à la période des basses eaux (juillet 2009) (fig.13), comparée aux précédentes ne montre aucun changement.

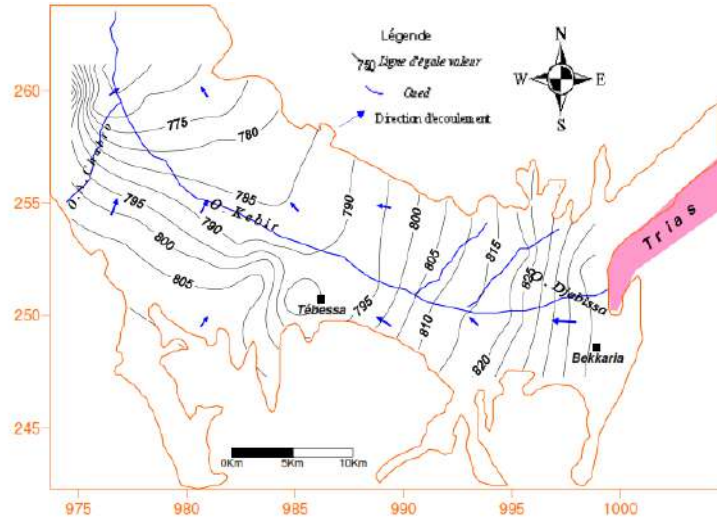


Figure 15: Carte piézométrique Juillet 2009/ Plaine de Tébessa (GHRIEB Lassaad 2011)

6.5- Carte des conditions aux limites :

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. (Fig. 16).

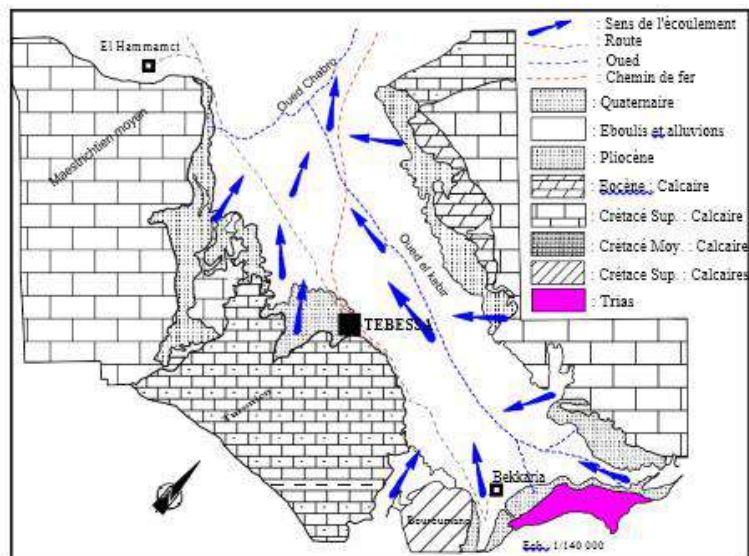


Figure 16: Carte des conditions aux limites. (In Djabri 1987).

6.6- Détermination des paramètres hydrodynamiques de la nappe profonde

La nappe profonde étant sollicitée par un grand nombre de forages. Ces derniers captent différentes formations (fig.15), ainsi dans la région de Bekkaria, l'aquifère peut être constitué soit par des calcaires fissurés (Zi Bis), soit par des sables (A89), alluvions (W2bis). Il en est de même pour les autres zones (Tébessa et Ain Chabro).

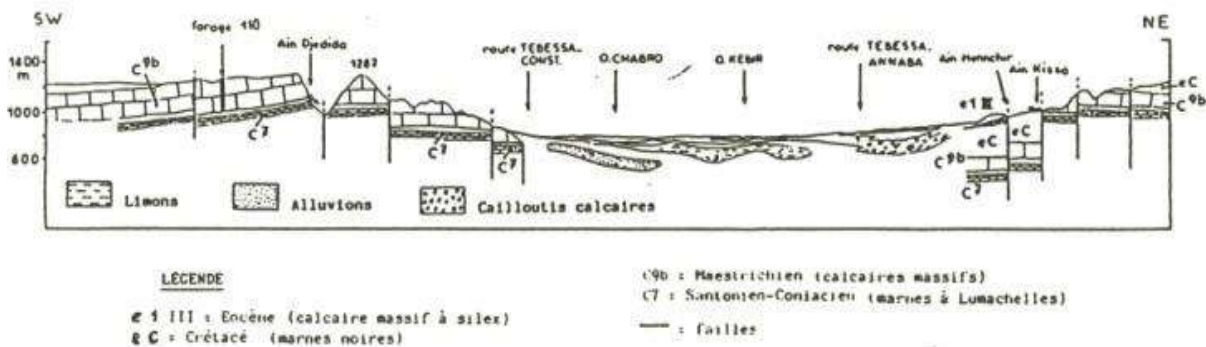


Figure 17: Variations lithologiques des aquifères.

6.6.1 Cartographie des paramètres hydrodynamiques

a- Carte de transmissivité : (Fig.18)

Elle présente une morphologie variable due à l'hétérogénéité de la nappe aquifère. Cette variation révèle trois secteurs :

À l'ouest secteur de Ain chabro ; la transmissivité est importante elle atteint $3,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, ceci est due à la présence de gros graviers (cailloutis de calcaire qui caractérise l'aquifère).

Au secteur de Tébessa, la transmissivité connaît une diminution remarquable. Au centre de la plaine les valeurs sont faibles, de l'ordre de $0,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ résultant des formations argileuses et marneuses. Sur les bordures méridionales calcaires, les valeurs deviennent plus importantes atteignant $3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

Secteur de Bekkaria : la transmissivité devient sensiblement élevée pour atteindre des valeurs de $1,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, cette augmentation est due à la présence des formations sableuses.

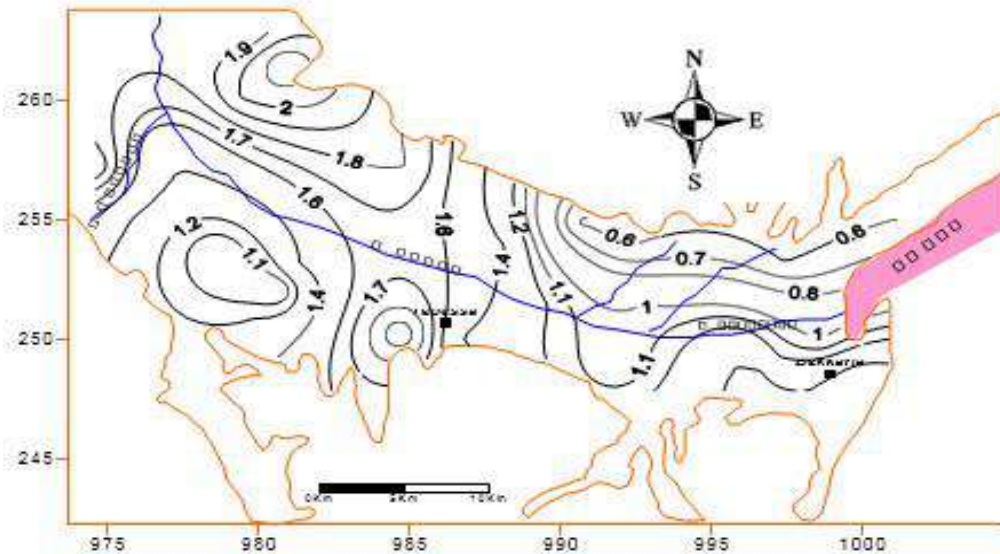


Figure 18: Carte des Transmissivités * 10^{-3}

b- Carte de perméabilité :(Fig.18)

- ✓ Secteur de Ain Chabro : Caractérisé par des valeurs élevées, pouvant atteindre $4 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$.
- ✓ Secteur de Tébessa : Les valeurs deviennent faibles au centre de la plaine à cause de la présence des formations imperméables (argile et marne), elles sont de l'ordre de $6 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$.
- ✓ La bordure méridionale est caractérisée par des valeurs élevées dues à l'influence des calcaires de bordure alimentant la nappe latéralement. Les valeurs peuvent atteindre $3 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$, cette variation est due à l'hétérogénéité de la géologie au niveau de ce secteur.
- ✓ Secteur de Bekkaria : Les valeurs sont relativement importantes dans cette zone, elles oscillent entre $6 \cdot 10^{-6}$ et $1,4 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$

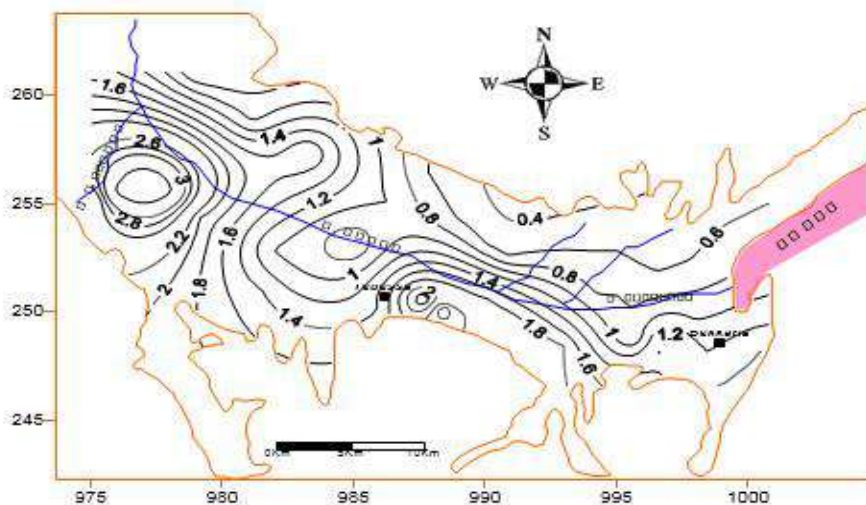


Figure 19: Carte des perméabilités * 10^{-5}

6.7- Conclusion :

Les cartes piézométriques réalisées montrent un écoulement dirigé de l'Est vers l'Ouest conformément à la topographie, en effet Bekkaria est située à 900m d'altitude par rapport contre Tébessa 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.

L'examen de l'historique de la Piézométrie, montre une baisse du niveau piézométrique entre 1974 et 2009, il atteint cinq à six mètres à Ain Chabro, cinq mètres au centre de la plaine et de quinze à vingt mètres à l'Est vers Bekkaria.

La perméabilité est caractérisée par des valeurs élevées, pouvant atteindre $4 \cdot 10^{-5}$ m/s au secteur de Ain Chabro et oscillent entre $6 \cdot 10^{-6}$ et $1.4 \cdot 10^{-5}$ m/s au secteur de Bekkaria. Ces valeurs deviennent faibles au centre de la plaine (secteur de Tébessa) à cause de la présence des formations imperméables (argile et marne), elles sont de l'ordre de $6 \cdot 10^{-6}$ m/s. A la bordure méridionale est caractérisée par des valeurs élevées dues à l'influence des calcaires de bordure alimentant la nappe latéralement avec des valeurs peuvent atteindre $3 \cdot 10^{-5}$ m/s, cette variation est due à l'hétérogénéité de la géologie au niveau de ce secteur.

Chapitre II

Chapitre II

Matériels et méthodes

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Chapitre II : 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- Matériels

1.1- Les données satellitaires

1.1.1 Les images (MNT) :

Un Modèle Numérique de Terrain (MNT) est une représentation 3D de la surface d'un terrain ou d'une planète, créée à partir des données d'altitude du terrain. Le MNT ne prend pas en compte les objets présents à la surface du terrain tels les plantes et les bâtiments.

Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) fait référence à des fichiers matriciels et vectoriels topographiques fournis par deux agences américaines : la NASA et la NGA (ex-NIMA). Ces données altimétriques ont été recueillies au cours d'une mission de 11 jours en février 2000 par la navette spatiale Endeavour (STS-99) à une altitude de 233 km en utilisant l'interférométrie radar.

1.1.2 Les images satellitaires (LANDSAT OLI) :

Afin d'étudier l'évolution des états de surface de la plaine de Tébessa, nous avons analysé deux scènes d'images Landsat 8 « p193 r35 » et « p193 r36 » de deux dates différentes (Aout 2015 et Avril 2015). Cette scène contient 12 bandes. On a utilisé les 6 bandes multispectrales (3 du visible et trois infrarouges) qui sont : OLI2, 3, 4, 5, 6 et 7 à 30 m de résolution.

1.1.3 Les images Google Earth :

Un deuxième jeu de données a été utilisé pour la mise en place de la cartographie diachronique de l'occupation du sol pour les dates les plus récentes. En effet, les images satellitaires de Google Earth de très haute résolution (Images Spot, filiale d'Astrium) ont permis de bien identifier les différentes classes et de faire la correspondance avec leur réponse spectrale sur les images satellitaires « Landsat » de 2 dates. Elles ont aussi servi pour la vérification et la validation des classifications.

1.2- Les logiciels utilisés :

1.2.1 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.

1.2.2 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, Flèches «Nord» et autres éléments.

1.2.3 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.

1.2.4 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 habitant d'une métropole peut localiser son restaurant préféré, obtenir une vue en 3D des immeubles de la métropole, 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.

1.2.5 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, Reverside, ... etc.).

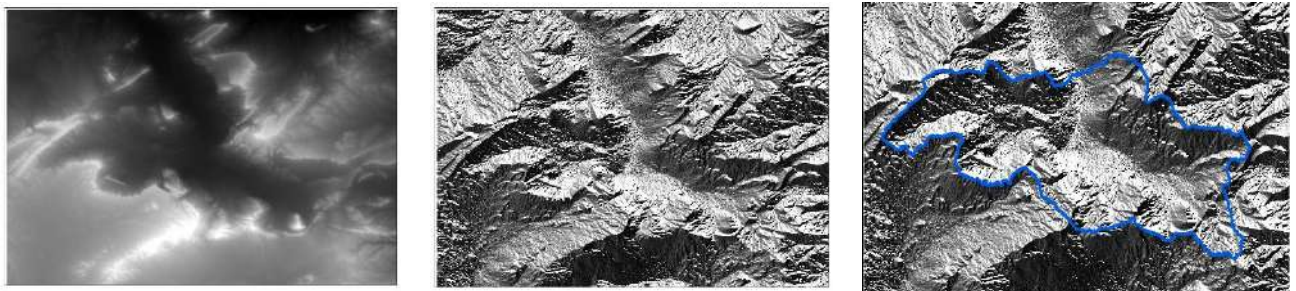
1.2.6 PreeqcI v 2.15 : (Parkhurst and Appelo, 1999)

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).

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.



MNT rempli (Fill)

Calcul des directions des flux

limite du bassin versant

Figure 20: Illustration de la chaîne de géotraitements pour la délimitation du bassin versant d'un plan

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 hydrologique :

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 21.

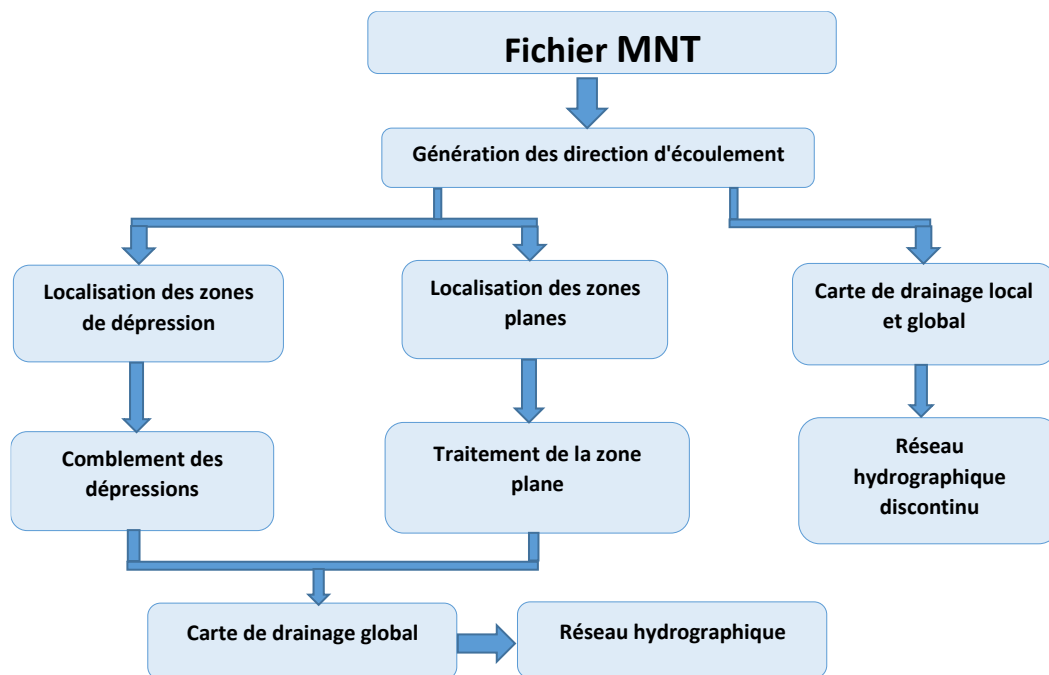


Figure 21: Organigramme général du processus d'extraction du réseau hydrologique

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 degrés. (Heyd et al. 2012)

2.2- Occupation du sol :

2.2.1 Les prétraitements des images :

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. 22) :

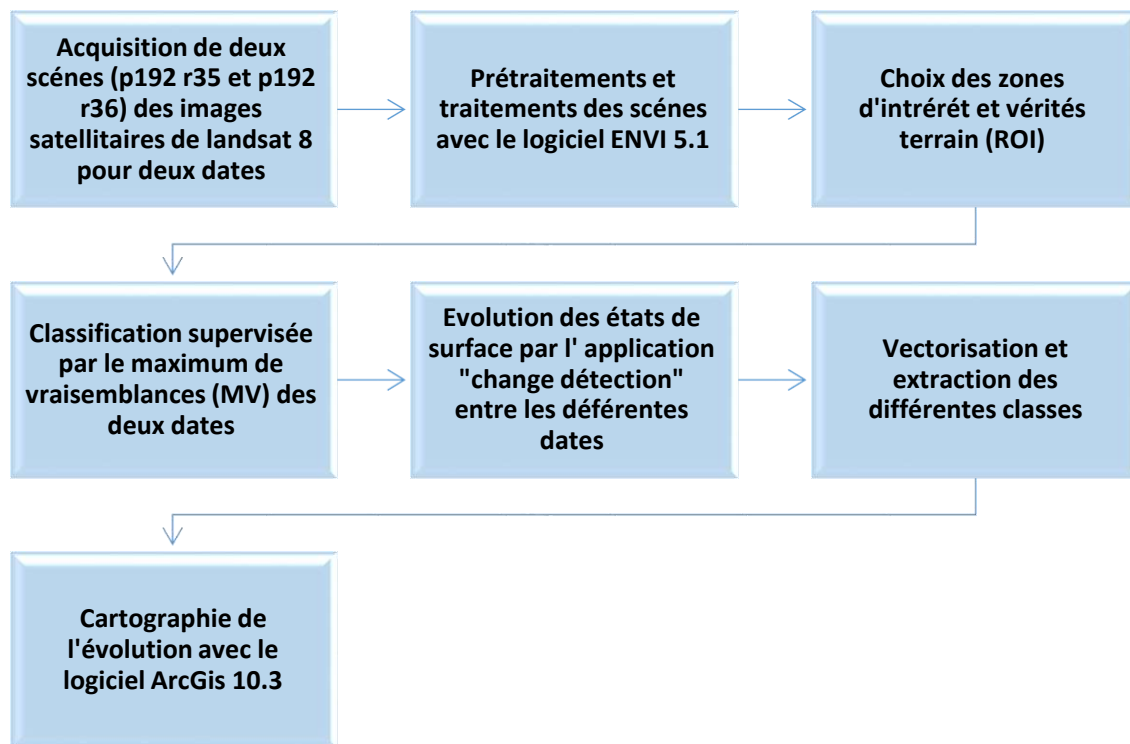


Figure 22 : Organigramme du processus général de traitements des images Landsat8

a- Empilement des bandes spectrales (Layer stacking)

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).

b- Découpage des images (Resize data) pour extraire la zone d'étude :

Pour l'extraction du secteur d'intérêt et la correction géométrique de l'image LANDSAT 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.

c- La composition colorée :

Dans l'exploitation des images LANDSAT, 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 6 (MIR), 5 (PIR) et 4 (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.

d- Rehaussement des images (Enhance) :

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).

2.2.2 Classifications des images

Pour faire la classification par « Maximum de Vraisemblances » du couvert végétal de la zone d'étude, il faut calculer l'indice normalisé de végétation « NDVI » d'une part, et de déterminer le seuil exact caractérisant la végétation d'autre part.

a- Indice de végétation (NDVI)

On a calculé le NDVI (Normalize Difference Végétation Index) pour chaque date. C'est un indice de végétation qui se définit comme la différence normalisée des mesures de réflectance spectrale acquises dans les zones de longueurs d'onde «Proche Infra-Rouge » (*PIR*) et (*Rouge*).

$$NDVI = \frac{PIR - Rouge}{PIR + Rouge}$$

Le NDVI est directement lié à l'activité photosynthétique des plantes et donc à la capacité d'absorption énergétique de la canopée du couvert végétal. Il agit comme indicateur de la biomasse chlorophyllienne des plantes. En termes de réflectance dans le PIR et le Rouge, la neige et les nuages se comportent à l'inverse des plantes vertes.

b- ROI

Il s'agit de sélectionner un minimum de 30 pixels spectralement représentatif de chaque signature spectrale identifiée précédemment. Cet échantillon, ou « aire d'entraînement » est défini à l'écran par la numérisation d'un ou plusieurs polygones pour chaque classe spectrale.

Sur base des polygones ainsi définis, l'extraction automatique des valeurs de pixels contenues à l'intérieur des polygones et le calcul de leur moyenne et écart-type produiront la signature spectrale de chaque classe à partir des 3 canaux de l'image Landsat.

Pour la représentation cartographique, les différentes classes spectrales associées à un même taxon d'occupation du sol doivent être regroupées en une seule classe.

c- Classifications par Maximum de Vraisemblances :

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.

2.3- 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 Tébessa afin de mettre en évidence l'influence de la nature lithologique sur leur composition chimique. Les puits de cette 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 traité et discuté les différentes résultats d'analyse des données obtenus dans les eaux souterraines de Tébessa on a besoin de définir les principaux méthode à suivre avec bien sur les différentes matériel 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).

2.3.1 Mode échantillonnage :

Une campagne (2015) de prélèvement de 33 échantillons (Tab. 07), Ils sont conditionnés 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 2 sous zones : la ville de Tébessa, Bekaria et la ville de Hammamet

Tableau 6: Campagne d'échantillonnage dans la zone d'étude (2015)

Compagnes	Date de Prélèvement		Nombre d'échantillons	
2	2015		33	
Points	Cordonnées Géographique		Cordonnées UT M	
	Latitude	Longitude	X (m)	Y (m)
P44	35°24'0.400"N	8°15'28.272"E	1003950	247300
P22	35°23'0.760"N	8°15'0.496"E	1003100	245700
P46	35°22'0.640"N	8°14'0.376"E	1002500	245200
P20	35°23'0.440"N	8°12'0.670"E	999000	246100
P21	35°23'0.960"N	8°11'0.848"E	998150	246700
P24	35°23'0.080"N	8°10'0.976"E	996300	246900
P25	35°24'0.200"N	8°10'0.460"E	995900	247350
P32	35°24'0.880"N	8°9'0.488"E	995000	247500
P14	35°24'0.680"N	8°9'0.312"E	995100	248100
P11	35°24'0.320"N	8°9'0.076"E	994250	248650
P26	35°25'0.640"N	8°9'0.284"E	994900	250150

P27	35°26'0.840"N	8°10'0.068"E	995550	252000
P38	35°24'0.040"N	8°8'0.036"E	993700	247870
P39	35°24'0.800"N	8°8'0.356"E	992650	248550
P34	35°24'0.080"N	8°8'0.224"E	992800	248250
P29	35°25'0.800"N	8°6'0.420"E	990600	250200
P16	35°26'0.400"N	8°6'0.216"E	990550	250850
P30	35°25'0.760"N	8°6'0.078"E	990100	250350
P17	35°26'0.200"N	8°6'0.900"E	989650	251750
P19	35°27'0.880"N	8°5'0.088"E	988800	252700
P18	35°26'0.840"N	8°5'0.748"E	988250	252300
P28	35°28'0.760"N	8°4'0.260"E	987000	256100
P55	35°29'0.840"N	7°55'0.200"E	973000	256700
P54	35°29'0.440"N	7°55'0.512"E	973300	256550
P07	35°28'0.320"N	7°55'0.164"E	974100	255800
P06	35°28'0.240"N	7°56'0.004"E	975150	255750
P05	35°28'0.680"N	7°56'0.248"E	975800	255250
P47	35°27'0.320"N	7°55'0.216"E	973900	253850
P50	35°27'0.880"N	7°55'0.200"E	973000	254350
P09	35°27'0.440"N	7°55'0.432"E	973250	253250
P02	35°25'0.520"N	7°53'0.940"E	971400	250800
P03	35°25'0.720"N	7°53'0.776"E	970750	250450
P01	35°25'0.960"N	7°54'0.440"E	971950	249200

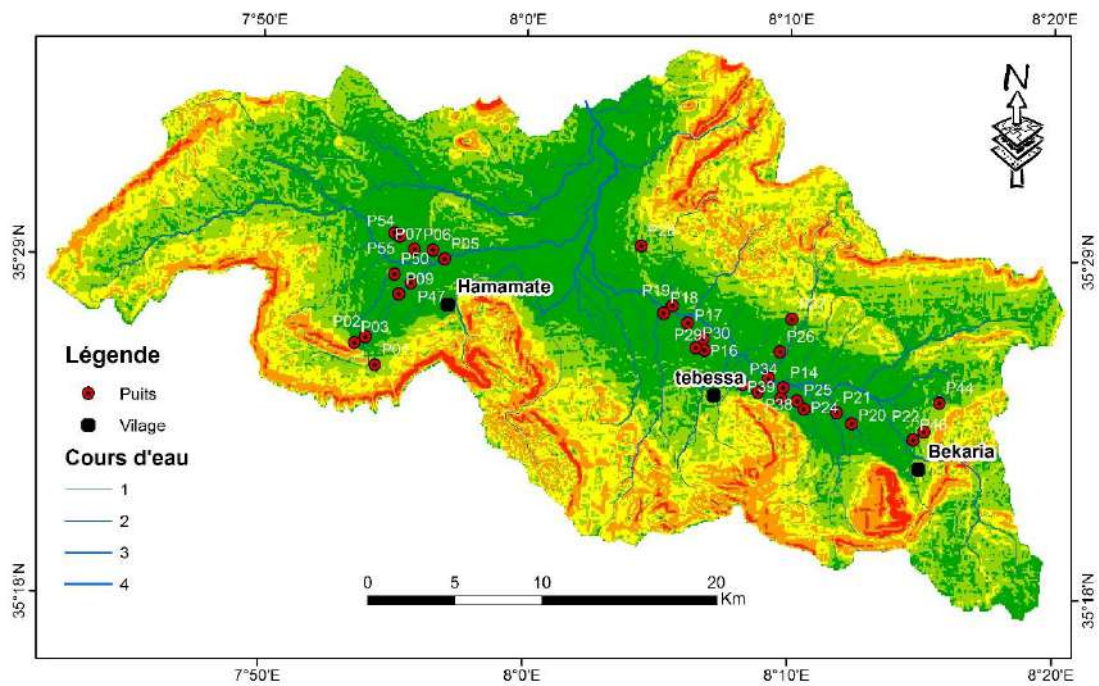


Figure 22: Carte de la répartition des échantillons dans la zone d'étude

2.3.2 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 $\text{Mg}^{+2} = \text{TH} - \text{Ca}^{2+}$ (Rodier, 2009)

2.3.3 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 ($\text{IS} = \log(Q) / \log(K_{ps})$) des minéraux dissous dans l'eau.
- ✓ La détermination de la potabilité des eaux : Les analyses physico-chimiques des eaux souterraines de Tébéssa obtenu sont comparées avec des normes de potabilité de l'eau qui sont représenté dans le Tableau 07 suivant :

Tableau 7: Norme de potabilité de l'eau

Paramètres	Unités	Valeurs maximales admissibles		
		Algérie (1)	France (2)	OMS (3)
Couleur	mg/l de platine Pt/Co	15	15	15
Turbidité	NTU	5	2	1
Saveur	Taux de dilution à 25 °C	4	3	/
Odeur	Taux de dilution à 25 °C	4	3	/
Résidu sec	mg/l	1500	1500	/
Température	°C	25	25	/
Concentration en ions hydrogène	Unité pH	≥ 6,5 et ≤ 9	≥ 6,5 et ≤ 9	≥ 6,5 et ≤ 8,5
Conductivité	µS/cm à 20 °C	2800	≥ 180 et ≤ 1000	400
TDS	mg/l	/	/	< 600
Dureté totale (TH)	Degré français °F	200 (mg/l en CaCO ₃)	15	10
Calcium	mg/l en CaCO ₃	200	100	/
Magnésium	mg/l de Mg ²⁺	150	50	/
Sodium	mg/l	200	200	200
Potassium	mg/l	12	12	12
Alcalinité	mg/l en CaCO ₃	500	/	/
Chlorures	mg/l	500	250	250
Sulfates	mg/l	400	250	250
Nitrates	mg/l de NO ₃ ⁻	50	50	50
Nitrites	mg/l NO ₂ ⁻	0,2	0,1	3
Ammonium	mg/l	0,5	0,1	0,5
Phosphate	mg/l	0,5	/	/
Fluorures	mg/l	1,5	1,5	1,5
Silices	mg/l	/	/	≤ 10

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

(2) : Selon l'arrêté du 11 janvier 2007 (J.O.R.F.), France.

(3) : 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, 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 :

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}} (mg/l)$$

Cinq classes d'eau ont été définies : excellente, bonne, admissible, médiocre, mauvaise (Tab.09).

Tableau 8: Classification des eaux par degrés d'aptitude à l'irrigation par la méthode du SAR (l'Ouvrier, 1976).

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

Chapitre III

Chapitre III

Résultats et discussion

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Chapitre III : Résultats et discussion :

Dans cette partie, nous allons examiner les différents résultats obtenus dans ce travail avec l'interprétation de celle-ci. Soit pour le travail de cartographie par l'outil télédétection avec l'interprétation des résultats de différents traitements multispectrales des images satellitaire, ainsi que la partie hydrochimie avec l'interprétation des résultats des analyses physicochimiques des eaux des zones d'études. Enfin un aperçu sur la géochimie afin d'avoir une idée sur le comportement géochimique de ces eaux vis-à-vis le milieu encaissant.

1- Hydrologie :

Le traitement de l'image satellitaire MNT Par Global Mapper et ArcGis a permis de délimité 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 allongé

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 5 % située entre l'altitude 780 m et 1000 m
- ❖ Classe 3 : de 5 à 10% située entre l'altitude 1000 m et 1100 m

- ❖ Classe 4 : de 10 à 20 % située entre l'altitude 1100 m et 1280 m
- ❖ Classe 5 : > 20 % située entre l'altitude 1280 m et 1380 m

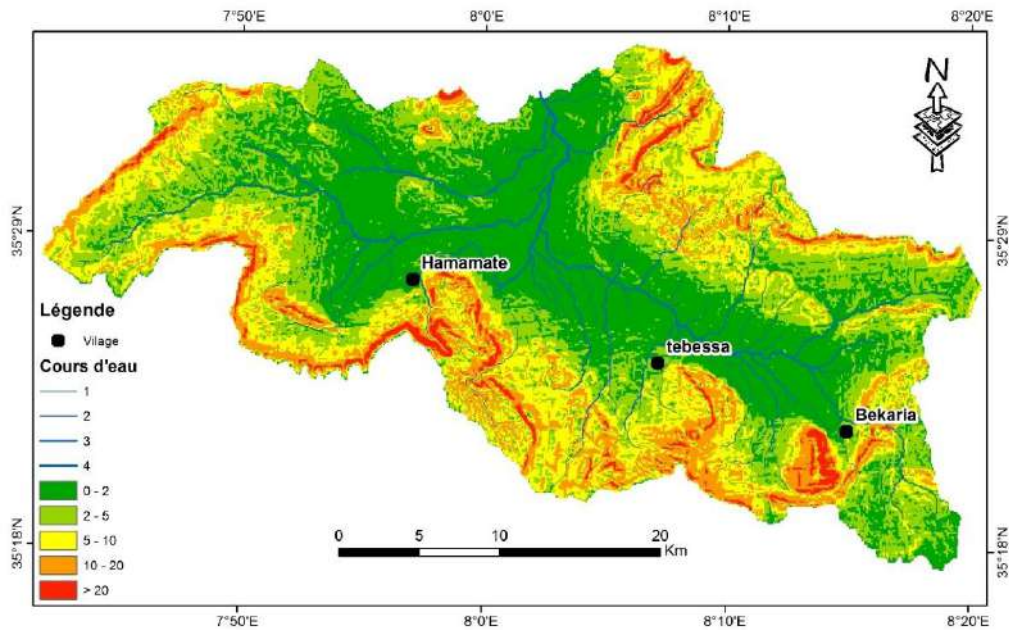


Figure 23: Carte de pentes de la zone d'étude

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 Tébessa est très développé, près de 470 km de cours d'eau drainent ce bassin versant

Tableau 9: Les longueurs d'ordres des cours d'eau dans la cuvette de Tébessa

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

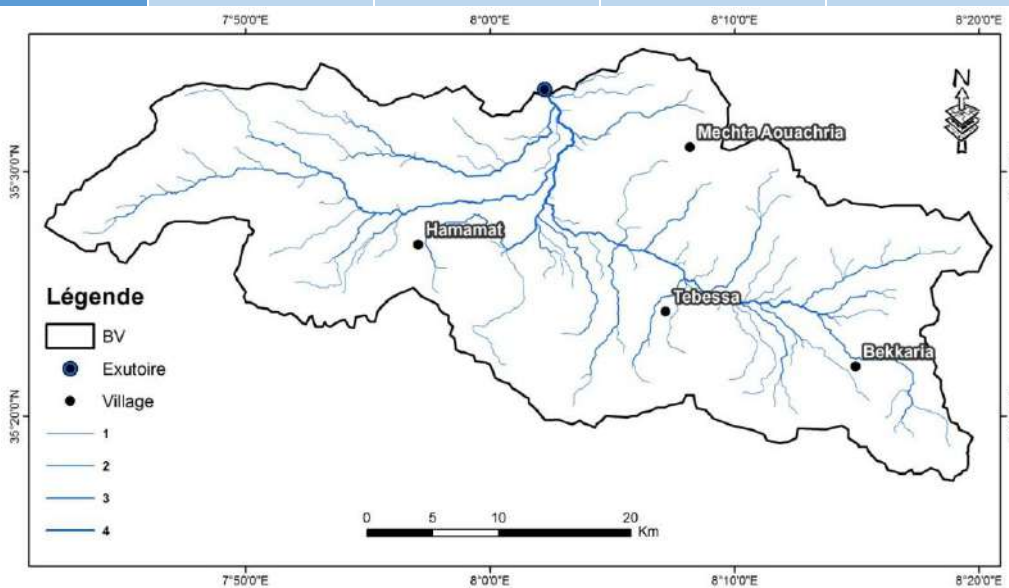


Figure 24: Carte de réseau hydrographique

2- Occupation du sol :

Le traitement de l'image satellitaire OLI de Landsat8 du 03/04/2015 et 25/08/2015 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 2015 et Aout 2015 (Fig. 25), 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.

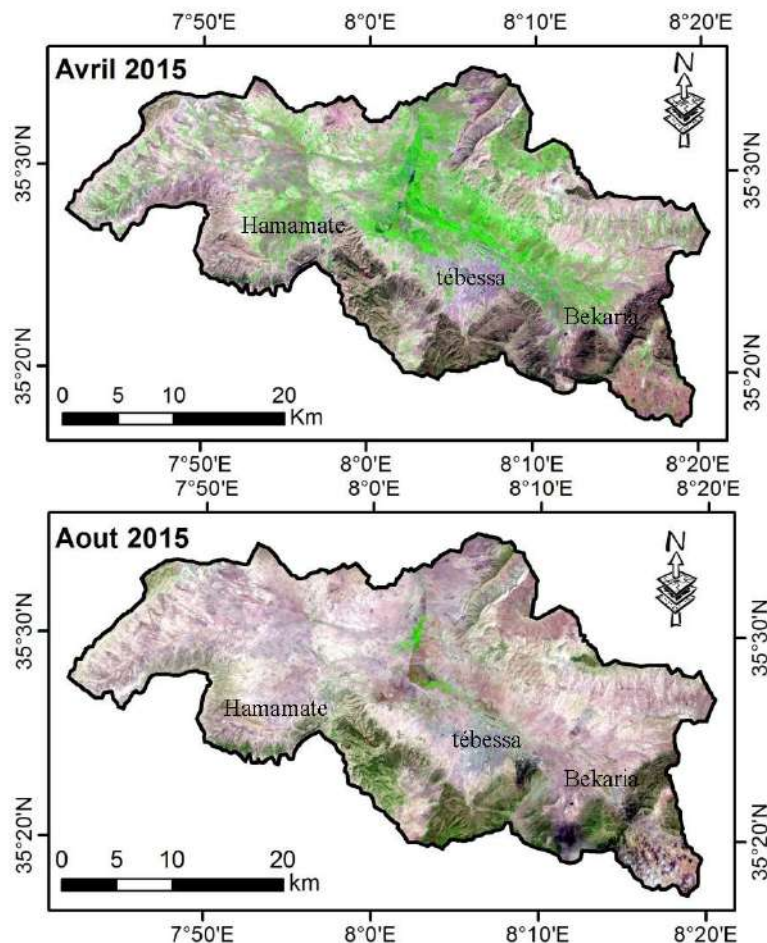


Figure 25: La composition colorée (B6, B5, B4) montrant l'évolution des états des surfaces de la végétation

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 aidés à effectuer la phase d'apprentissage par échantillonnage (ROI) des classes (Villages, Végétation et Sol nu).

2.2.1 Classification par Maximum de vraisemblances :

On peut noter la différence des deux images concernant le couvert végétal (Fig. 26) :

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.

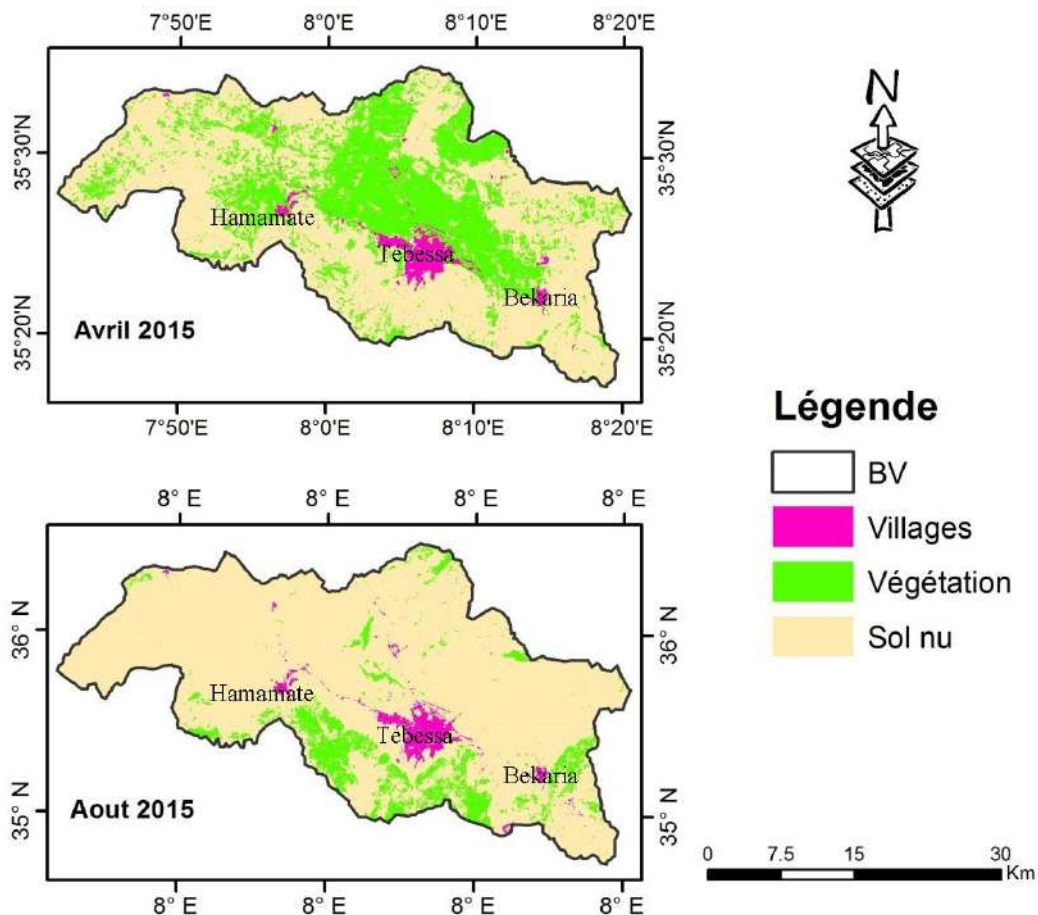


Figure 26: Classification par maximum de vraisemblances.

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.11). Cette étape indique une diminution du couvert végétale et par conséquent une augmentation du sol nu dans le temps

Tableau 10: Synthèse d'évolution de surfaces au cours de la période d'étude

Surface (Km2)	Végétation	Sol nu
Avril 2015-Aout 2015	-222	222

2.3.2 Les changements saisonniers (Avril 2015 et Aout 2015) :

Le tableau 11 fait ressortir une nette évolution saisonnière des surfaces de végétation entre *Avril 2015* et *Aout 2015*, avec notamment une diminution du couvert végétal.

La surface du couvert végétal (Tab. 12) 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 apparait pour les forêts à cause de leurs couleur plus sombre que les terres agricoles.

Tableau 11: Matrice de changements entre Avril et Aout 2015.

		Avril			Class Total
		Village	Végétation	Sol nu	
Aout	Classes				
	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 Tébessa (Tab. 13) 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 12: Synthèse d'évolution de surfaces au cours des 2 dates

Surface (Km ²)	Avril-Aout 2015
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 forets 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 signature spectrales.

2.4- La cartographie des changements :

La présentation de la carte (Fig. 27) fait ressortir visuellement une nette évolution de surfaces de végétation en deux saisons de changements (Avril 2015) et (Aout 2015) dans la zone de Tébessa. A

l'aide du logiciel ArcGis 10.3 on a réalisé la carte d'évolution après extraction des différentes classes issues d'ENVI sous forme vecteurs (shape files).

2.4.1 Evolution temporelle entre Avril et Aout 2015 :

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.

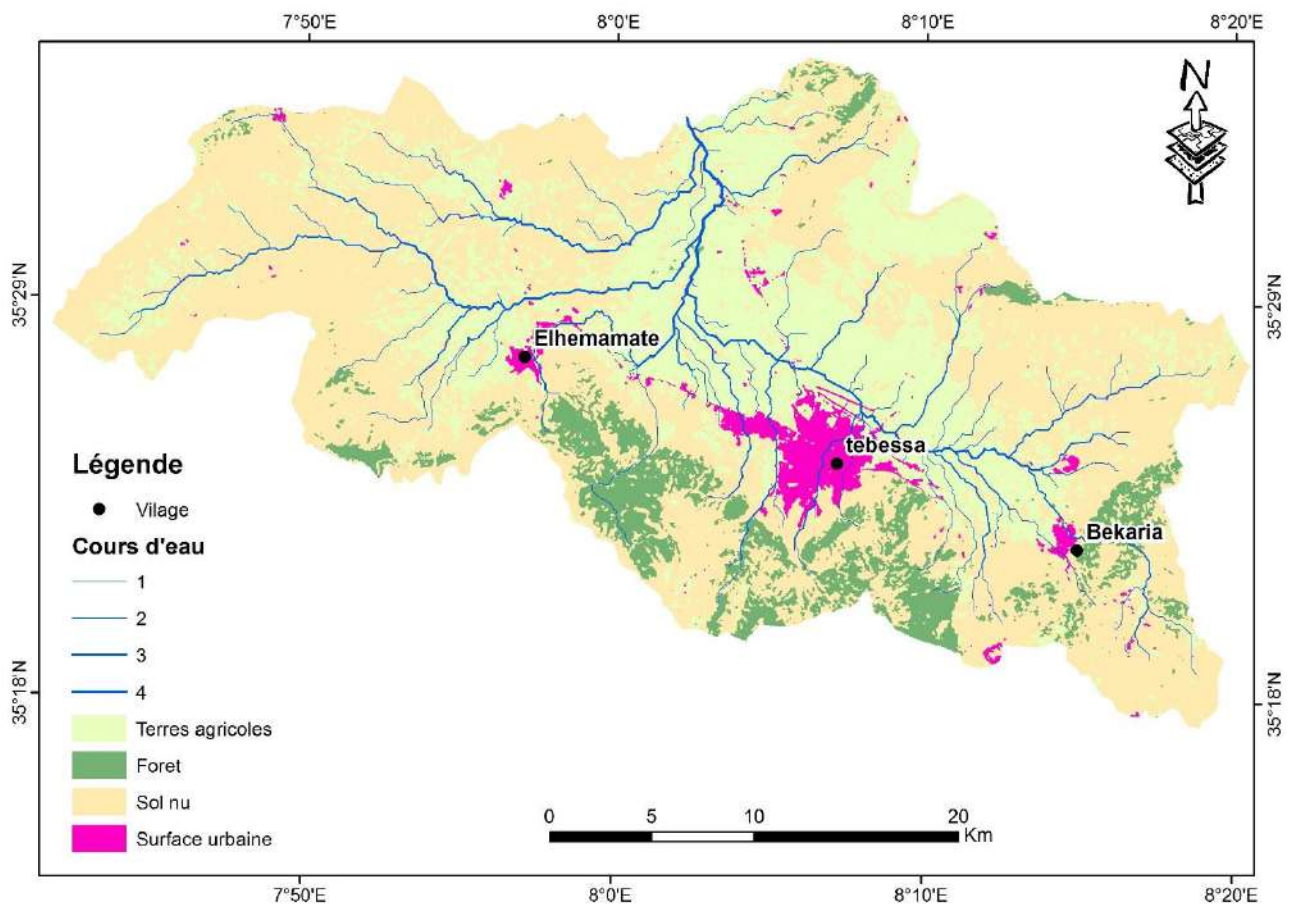


Figure 27: Carte d'évolution temporelle et d'occupation du sol (entre 03/04/2015 et 25/08/2015)

2.4.2 L'évolution spatiotemporelle 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. 26). Cette dernière est subdivisée en 3 classes principales qui sont : « Terres agricoles », « Forêts » et « Sol nu »

Tableau 13: Surfaces occupées par les différentes 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. 24) on a pu calculer les surfaces des classes (Tab.14). 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- Hydrochimie :

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.

3.1- 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 14.

3.1.1 Paramètres physico-chimiques et potabilité des eaux :

Tableau 14: Résultats des analyses physico-chimiques des eaux souterraines de Tébessa

Paramètres		pH	CE	TDS	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺
			(µs/cm)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(m/l)
Paramètres statistiques	Moyenne	7.93	2444.54	1518.2	126.25	117.25	195.29
	Ecart-type	0,27	1310.10	819.85	101.11	57.96	173.02
	Minimum	7	900	558	43	29	62
	Maximum	8.66	6800	4216	520	305	840
Normes		≥ 6,5 et ≤ 9 (1) et (2) ≥ 6,5 et ≤ 8,5 (3)	2800 (1) ≥ 180 et ≤ 1000 (2) 400 (3)	< 600 (3)	200 (1) 100 (2)	150 (1) 50 (2)	200 (1), (2) et (3)

Paramètres		K ⁺	HCO ₃	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻
		(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)
Paramètres statistiques	Moyenne	5.82	310	275	546.18	56.78
	Ecart-type	6.63	82.18	258.82	454.89	44.87
	Minimum	1	171	60.35	140	6
	Maximum	40	580	1199.9	2800	160
Normes		12 (1), (2) et (3)	/	500 (1) 250 (2) et (3)	400 (1) 250 (2) et (3)	50 (1), (2) et (3)

a- 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.

b- 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 µs/cm indiquant la forte minéralisation des eaux souterraines de Tébessa. L'écart-type est de l'ordre 1310.10 µs/cm reflète la variation des valeurs de la conductivité électriques, entre 900 µs/cm à 6800 µs/cm comme valeur maximale. Tous les échantillons dépassent les normes de l'OMS.

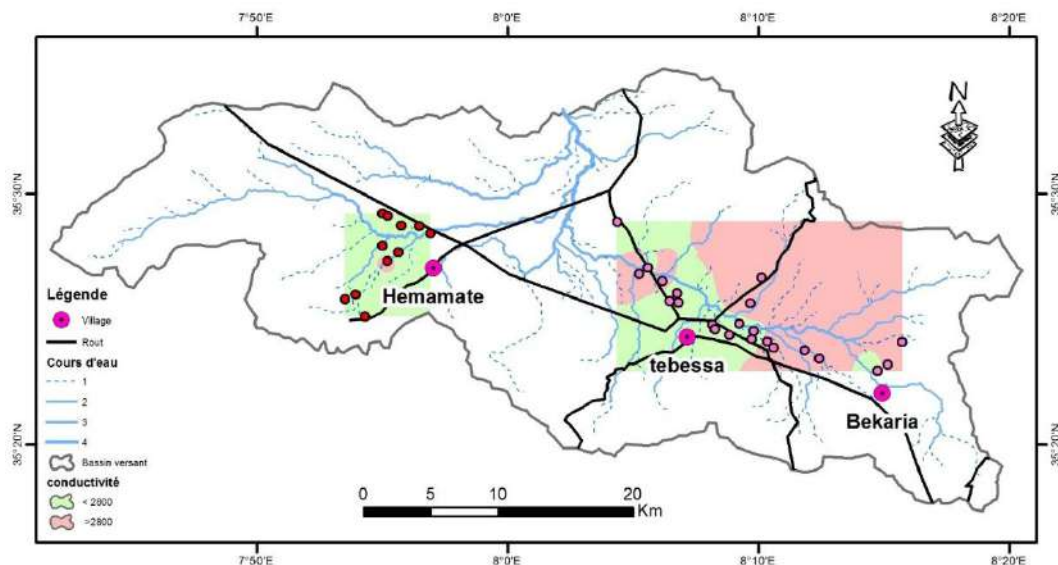


Figure 28: Carte de La conductivité électrique

Cette figure a montré que la conductivité ionique dépasse les normes Algériennes dans le nord et nord-est de la ville de Tébessa et le nord de Bekkaria.

3.1.2 Les éléments majeurs :

a- Le calcium (Ca²⁺) :

Le tableau 14 montre que la moyenne des concentrations dépasse les normes françaises 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

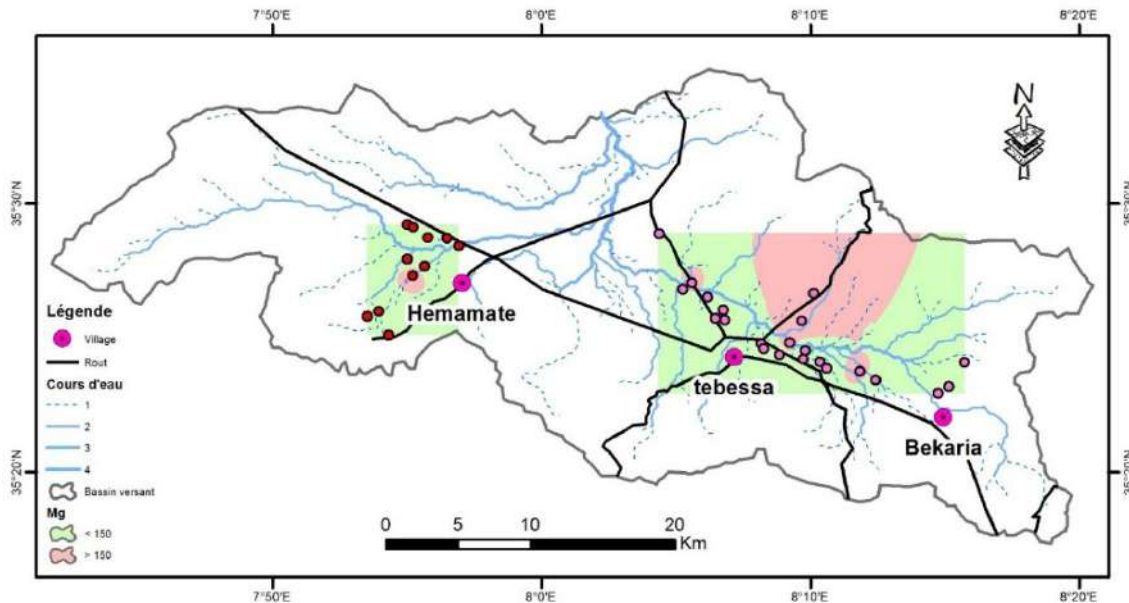


Figure 29: Carte de pollution des eaux par le Magnésium (Mg^{+2})

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 Bekaria.

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.

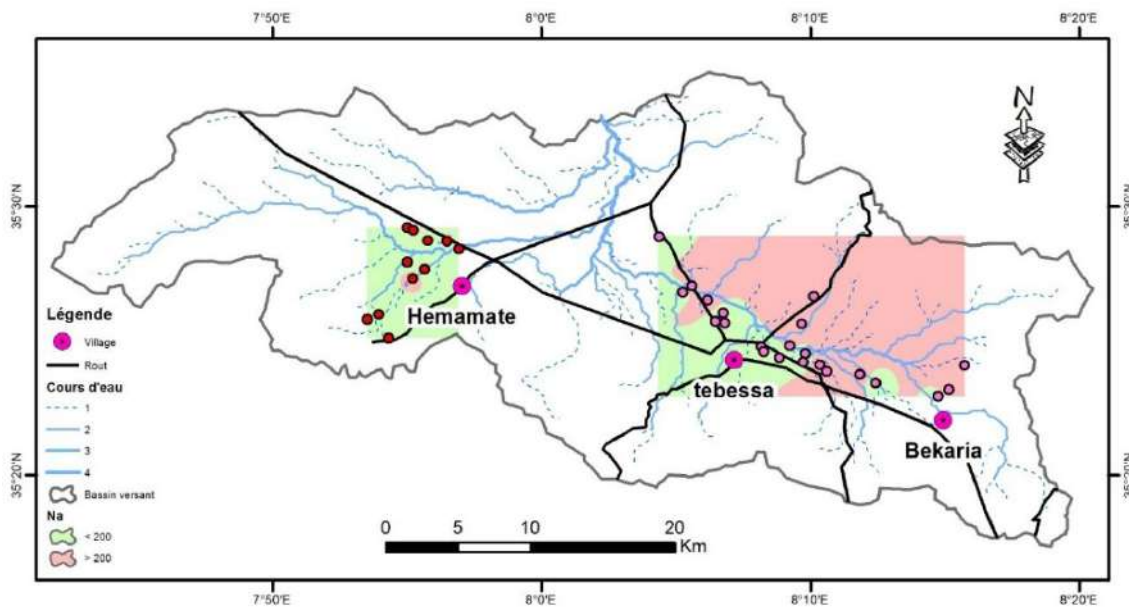


Figure 30: Carte de pollution des eaux par les Sodium (Na^+)

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 et les normes françaises 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 Tébéssa 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.

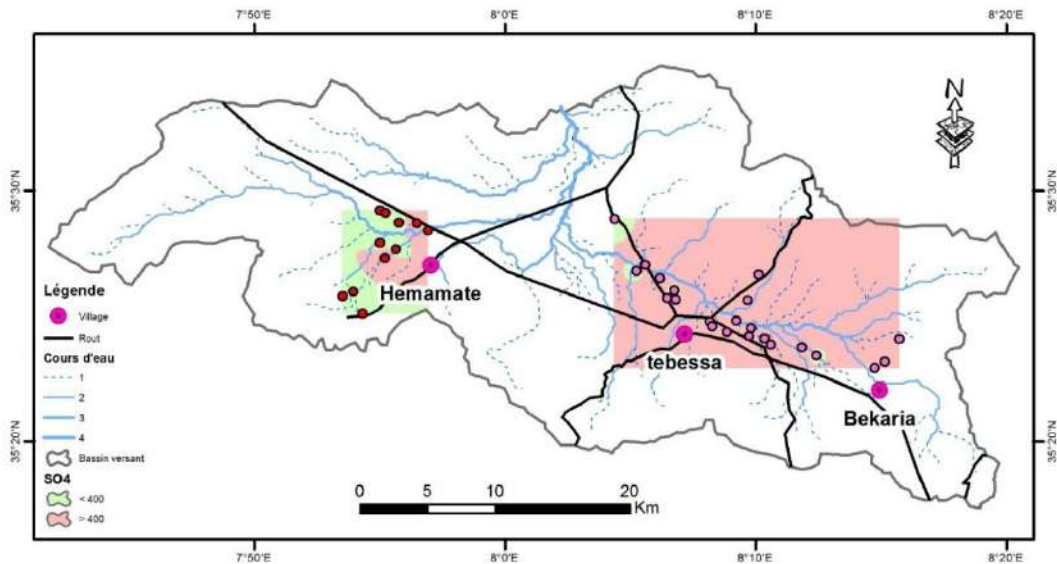


Figure 31: Carte de pollution des eaux par les Sulfates (SO₄-2)

La concentration des sulfates (SO₄) dépasse les normes algériennes presque dans toute la zone d'étude.

h- Les nitrates (NO₃⁻) :

Parmi les 33 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.

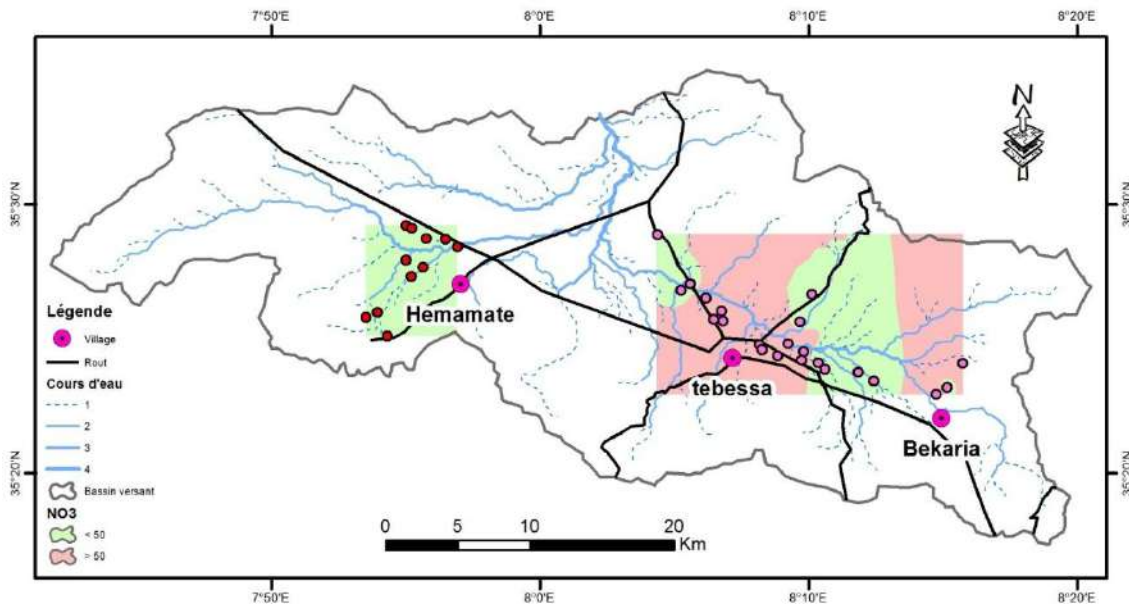


Figure 32: Carte de pollution des eaux par les nitrates (NO₃-)

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

3.2- Faciès chimiques des eaux :

La projection des eaux de Tébessa dans le diagramme de piper (Fig.33) appelle les commentaires suivants :

- Le triangle des anions, les eaux se répartissent entre le pôle sulfaté avec une dominance de 60 % et le pôle chloruré caractérisée par une dominance de 40 % des eaux étudiées.
- Le triangle des cations, la plupart des eaux se rapprochent du pôle Magnésienne avec une dominance pour plus de 60 %. On constate toutefois que quelques-unes évoluent vers le pôle calcique avec une dominance de 40 %.
- Dans le losange, les eaux se répartissent en trois faciès liés à l'existence des transitions évaporitiques dans les formations calcaires :
 - ✓ Des eaux *Sulfaté Magnésienne*.
 - ✓ Des eaux *Bicarbonate et Sulfaté Magnésienne*.
 - ✓ Des eaux *Chloruré et Sulfaté Magnésienne*.

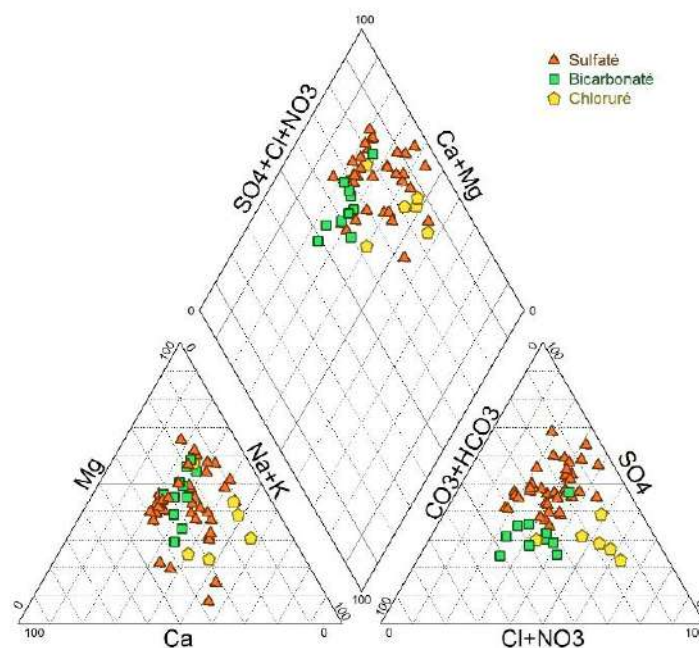


Figure 33: Faciès chimique des eaux par le diagramme de Piper

La comparaison des moyennes et des écart-types des éléments chimiques majeurs, pour les 33 échantillons des eaux prélevées (Tab.16), 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 Magnésienne.

Tableau 15: Variation des éléments majeurs des eaux de Tébessa (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

3.3- 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, 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 tolérantes très bien le sel.

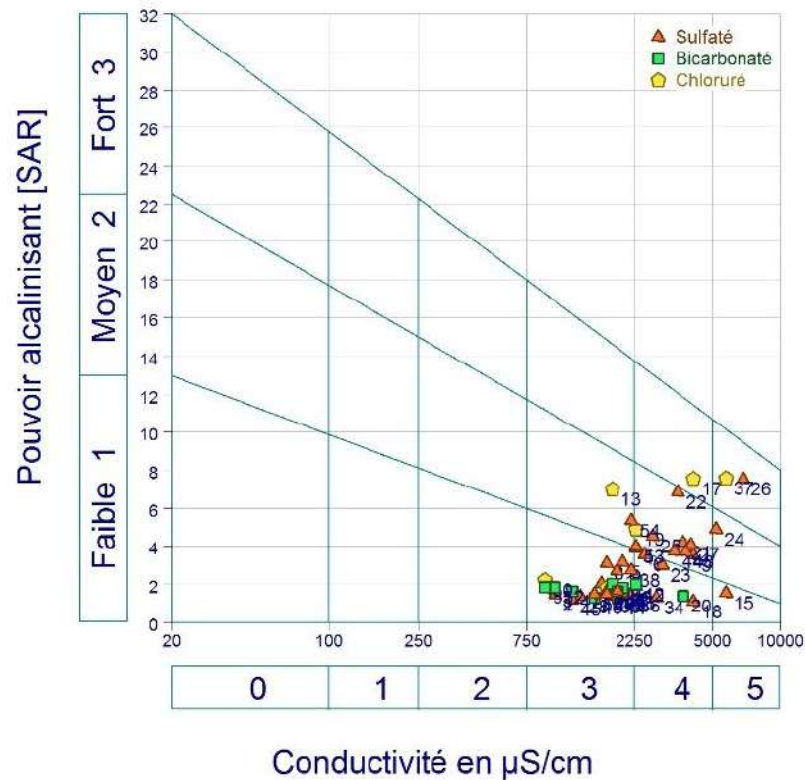


Figure 34: Classification des eaux à l'irrigation en fonction du SAR

3.4- L'indice de saturation

D'après les indices de saturation vis-à-vis des minéraux considérés on a remarqué que :

- ✓ Le groupe des carbonates est sursaturé, ce qui indique la précipitation de la *Calcite*, la *Aragonite* et la *Dolomite*.
- ✓ Le groupe des évaporites : Les minéraux sulfatés sont proches de la saturation (*Anhydrite* et *Gypse*) et largement sous-saturés vis-à-vis des minéraux chlorurés (*Halite* et *Sylvite*) (Fig. 38). Les minéraux évaporitiques présentent toujours un état de sous-saturation même si les ions Na^+ , Cl^- et SO_4^{2-} sont à forte concentration vu leurs fortes solubilités.

L'indice de saturation montre que les minéraux carbonatés tendent à précipiter sous la forme de dolomite, calcite et aragonite par contre, les minéraux évaporitiques, cas de l'Halite et de la Sylvite sont loin de la saturation et sont toujours aptes à la dissolution. Par contre l'Anhydrite et le Gypse sont proches de l'équilibre et tendent vers la saturation.

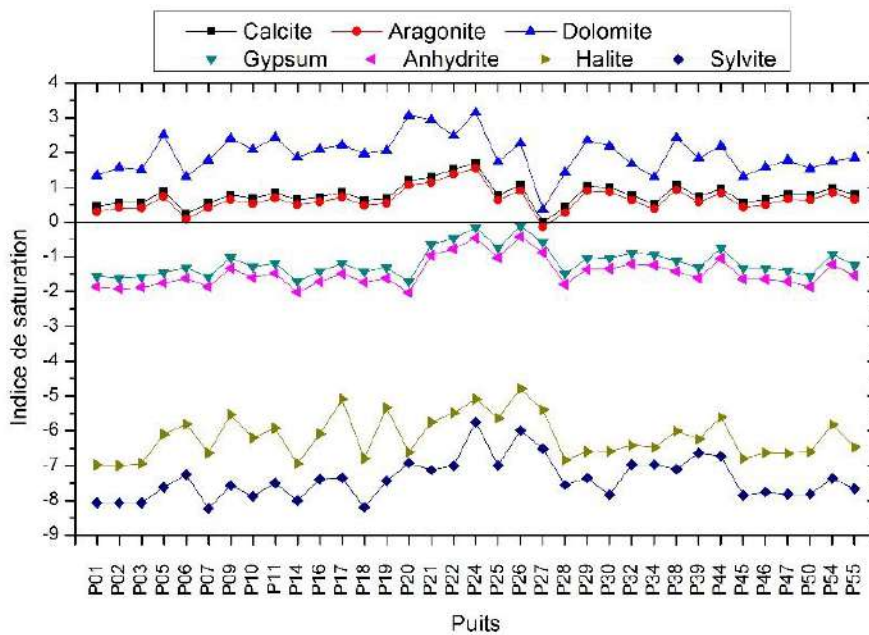


Figure 35: Variation de l'indice de saturation

4- 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 03/04/2015 et 25/08/2015, nous a donné un types 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 élevées. 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 général

Conclusion général

Conclusion général

Le bassin versant de la région de Tébessa est soumis à des conditions climatiques semi-arides ce qui a appauvri le bassin en réserves en eau de surface. Donc les eaux souterraines jouent un rôle fondamental dans la stabilité des populations rurales dans la région de Tébessa. Elles sont exploitées par des puits, des sources et des forages ; drainées par différentes techniques traditionnelles et modernes utilisées pour extraire les eaux des nappes pour l'alimentation en eau potable et l'irrigation. Elles font donc l'objet de notre étude qui porte essentiellement sur le côté quantitative et qualitative des eaux souterraines et le besoin en ses eaux en surface.

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 déterminer le drainage des eaux de surface et leurs parcours dans la cuvette. Les cartes de classifications des dates Avril et Aout 2015, nous a permis la quantification des surfaces du couvert végétal. Leurs évolutions temporelles nous a permis l'identification les types de cultures des exploitations agricole pendant l'année 2015. La combinaison des résultats de ces méthodes utilisées et les données de terrain nous a confirmé le besoin de cette région a l'utilisation des eaux souterraines surtout pour l'irrigation, vu la vocation agricole de la région. Ainsi l'occupation du sol déterminée et quantifiée par les méthodes de traitements des images satellitaires (Télédétection) ont montrées les zones à risques de pollution comme les exploitations agricoles et les surfaces urbaines.

L'étude qualitative des eaux souterraine basée sur une illustration graphique (diagrammes de Piper, et Riverside) et cartographique (cartes hydrochimiques), les eaux souterraines de la plaine de Tébessa révèlent (60%) un des faciès chimique Sulfaté Magnésien due à la géologie de l'aquifère et la surface et le temps d'interaction eau-roche.

Malgré cette diversité chimique, les eaux restent généralement aptes à la consommation humaine selon les normes de potabilité algérienne, a l'exception des puits qui se trouve à proximité d'exploitations agricoles et les surfaces urbaines. 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.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- 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.
- Castany G. (1968) : Principe et méthode hydrogéologique. DUNOD, Edit, Paris ; 236 p
- Chikhi-Aouimeur F. (1980) : Les Rudistes de l'Aptien supérieur de djebel Ouenza (Algérie NE). Paléontologie, Contexte stratigraphique et paléogéographie. Thèse 3^{ème} cycle, USTHB, Alger, 114 p
- Dubourdiou G. (1956) : Étude géologique de la région de l'Ouenza (confins algéro-tunisiens). Thèse des Sciences, Paris, Publications du Service de la Carte Géologique de l'Algérie, Bulletin N° 10, Vol. 1, 659 p.
- Dubourdiou G. (1956) : Étude géologique de la région de l'Ouenza (confins algéro-tunisiens). Thèse des Sciences, Paris, Publications du Service de la Carte Géologique de l'Algérie, Bulletin N° 10, Vol. 1, 659 p.
- Durosoy (1956) : Carte géologique de TEBESSA N° 206 et notice de carte
- Durozoy G. (1956) : Carte géologique de Tébessa. Feuille 206.
- Ghrieb L (2011) : impact de la mine'ralisation des formations trtasiques sure la qalité da l'eau et du en zone SEMI- ARIDE : Cas de la plaine Bekkaria-Tébessa (Extrême Nord-est Algérien). 143p.
- Heyd C., Alleaume S., et Argillier C., (2012) : Méthode de délimitation et extraction des données
- 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.
- 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, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, France, 221 p.
- 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.
- Perthuisot V., (1994) : Structures et géométrie des diapirs maghrébins. Essai de synthèse. Mémoires du Service Géologique de l'Algérie. N°6. pp.153-159,

- Perthuisot V., (1994) : Structures et géométrie des diapirs maghrébins. Essai de synthèse. Mémoires du Service Géologique de l'Algérie. N°6. pp.153-159, 5., 1994
- Rodier J., (2005), « L'analyse de l'eau », 8ème édition, 120p.
- Rodier J., (2009), L'Analyse de l'eau. 9^{ème} édition. Dunod, Paris. 1511p.
- 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.
- Telali Y. (2016) Contribution à l'étude hydrogéologique, hydrochimique de la plaine de Tamlouka (Nord-Est Algérien).63 p.
- 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.

Données :

Image satellitaire. 2014-04-07/ 2014-09-14/ 2015-04-10 et Images MNT : [http : www.google Earth.com](http://www.googleEarth.com) / [http : www.landsat.usgs.gov.com](http://www.landsat.usgs.gov.com)

الملخص:

حوض تبسة يعتبر منطقة فلاحية هامة اقتصاديا، مع 30.5% من الأراضي الصالحة للزراعة، وتقع في شرق الجزائر حيث تعتبر المياه الجوفية هناك هي المصدر الرئيسي للمياه. مع التنمية الصناعية وخاصة الزراعية، والانفجار الديموغرافي والسكاني يؤثر سلبا على جودة وإمكانات هذه الاحتياطات.

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو تحديد استعمالات الأراضي في الحوض الهيدروغرافي لتبسة وتحديد نوعية المياه الجوفية واستخداماتها. ولتحقيق ذلك لا بد من معرفة الجوانب المناخية، الجيولوجية، الجيومورفولوجية والهيدروكيميائية في المنطقة، مع استخدام معالجة صور الأقمار الصناعية (Landsat8)، نموذج الارتفاع الرقمي والتحليل الكيميائي للمياه الجوفية.

ويظهر هذا العمل أن الشكل الطبوغرافي (حوض) من منطقة الدراسة هو العامل الرئيسي، والذي يعكس ظروف الصرف بالحوض الهيدروغرافي خاصة في ظل ظروف مناخ شبه الجاف. وقد سمحت خرائط التصنيفات للموسمين من عام 2015 وتطوراتها من تحديد وتقدير مساحات المزارع الفلاحية. عموما المياه الجوفية الضحلة بحوض تبسة ليست صالحة للشرب وذات جودة مقبولة للري بنسبة 55%.

الكلمات المفتاحية: DEM، صور لاندسات، تصنيف، GIS، التلوث، مستجمعات المياه.

Résumé :

Le bassin versant de Tébessa est une zone à vocation agricole socio économiquement importante, avec 30.5% des terres cultivables, située à l'Est algérien où les eaux souterraines représentent la principale source d'eau. Le développement industriel et surtout agricole, associé à l'essor démographique réduit de plus en plus la qualité et le potentiel de ces réserves.

Notre objectif est l'identification de l'occupation du sol dans le bassin versant de Tébessa et la détermination qualitative des eaux de la nappe superficielle et leurs utilisations. Pour atteindre cet objectif il est indispensable de connaître les conditions hydroclimatiques, lithologiques, géomorphologiques et hydrochimiques de la région, à l'aide de l'utilisation et les traitements des images satellitaires (Landsat8), des images MNT et des analyses chimiques.

Ce travail montre que le caractère morphologique (cuvette) de la zone d'étude est le principal paramètre, ce qui traduit des conditions de drainage du bassin surtout sous les conditions d'un climat semi-aride. Les cartes de classifications des 2 saisons en 2015 et leurs évolutions ont permis l'identification et la quantification des exploitations agricoles. Généralement les eaux de la nappe superficielle du bassin versant de Tébessa sont non potable et une qualité admissible à 55% pour l'irrigation.

Mots-Clés : MNT, Images Landsat, Classification, SIG, Pollution, Bassin versant.

Abstract:

The Tébessa catchment area is a socio-economically important agricultural area with 30.5% of arable land in eastern Algeria where groundwater is the main source of water. Industrial and especially agricultural development, coupled with demographic growth, increasingly reduces the quality and potential of these reserves.

Our objective is the identification of land use in the Tébessa watershed and the qualitative determination of surface water and their uses. To achieve this objective it is essential to know the hydroclimatic, lithological, geomorphological and hydrochemical conditions of the region, using the use and processing of satellite images (Landsat8), DEM images and chemical analyzes.

This work shows that the morphological character of the study area is the main parameter, which reflects drainage conditions of the basin especially under the conditions of a semi-arid climate. The maps of classifications of the two seasons in 2015 and their evolution allowed the identification and the quantification of the farms. Generally, the waters of the surface water table in the Tébessa watershed are not potable and have an admissible quality of 55% for irrigation.

Keywords: DEM, Landsat images, Classification, GIS, Pollution, Watershed.