



Université Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd

Faculté de Technologie

Département d'Hydraulique

Thèse

Préparée au sein du laboratoire des Risques Naturels et Aménagement du Territoire (LRNAT)

Présentée pour l'obtention du diplôme de :

Doctorat en Sciences

Option : Hydraulique

Sous le Thème :

La plaine de la Merdja entre les risques d'inondations et les risques de pollution. Etude Hydrologique et analyse de la vulnérabilité à la pollution de l'aquifère plio-quadernaire.

Présentée par :

BAAZI Houria

Devant le jury composé de :

M. HOUICHI Larbi	Prof.	Université de Batna2	Président
M. KALLA Mahdi	Prof.	Université de Batna2	Rapporteur
M. GUETTOUCHE Mohamed Said	Prof.	USTHB	Examineur
M. CHIBANE Brahim	Prof.	USTHB	Examineur
M. KABOUR Abdesslem	MCA	C. Universitaire de Mila	Examineur
M. KHEDIDJA Abdelhamid	MCA	Université de Batna2	Examineur

2020/2021

Remerciements

En premier lieu, je remercie Dieu de m'avoir donné la capacité et la force d'achever ce travail de thèse, et qui m'a aidé à dépasser toutes les difficultés que j'ai rencontré.

J'exprime ma profonde reconnaissance et mes sincères remerciements à mon directeur de thèse Pr. Kalla Mahdi, pour sa confiance le long de toutes ces années.

Je voudrais témoigner ma reconnaissance et gratitude extrême au professeur Dridi Hadda pour toute l'aide et la sollicitude qu'elle m'a éprouvé à mon égard tout le long de l'élaboration de cette thèse et surtout pour sa qualité Humaine.

Je suis très reconnaissante à Monsieur le **Pr. Houichi L.** d'avoir accepté de présider mon jury de thèse. Je tiens vivement à remercier **Pr. Guettouche M. S.**, **Pr. Chibane B .** , **Dr. Kabour A.** , **Dr. Khedidja A.**, pour avoir accepté spontanément de se joindre au jury de la thèse ainsi que pour leurs lectures et corrections minutieuses.

Je n'oublierais jamais l'aide et la confiance de la part de mes amies surtout **Wassila, Sana, Zahra .**

Je remercie Mounira de l'université de Constantine pour son aide précieux.

Enfin que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, trouvent ici, l'expression de ma profonde reconnaissance.

Dédicace

À la mémoire de mes parents.

À mes frères et sœurs À toute ma famille.

Résumé :

Ce travail a été réalisé dans une zone semi-aride, il s'agit de l'aquifère alluvial de Tébessa (Nord-Est de l'Algérie). La première partie est dédiée à la caractérisation des eaux souterraines de la plaine. L'étude hydro-chimique a permis d'identifier les sources potentielles de pollution dans la plaine de la Merdja. Effectivement, cette contamination peut avoir plusieurs origines dont les plus importantes sont l'influence des formations lithologiques, l'utilisation de fertilisants dans les domaines agricoles et les rejets domestiques et industriels qui sont déversés dans Oued El Kebir sans aucun traitement préalable. Afin d'évaluer le niveau de vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution, quatre méthodes sont utilisées : DRASTIC, DRASTIR (DRASTIC modifié), SI et GOD couplées à un système d'information géographique (SIG). Par conséquent, trois classes de degré de vulnérabilité à la pollution ont été identifiées par les quatre méthodes (faible, moyenne et élevée). En outre, la validation de ce dernier a été testée en comparant la distribution des nitrates dans les eaux souterraines et les différentes classes de vulnérabilité, puis le calcul des corrélations entre les surfaces de chaque classe de vulnérabilité par les quatre méthodes. Sur la base des résultats obtenus, la méthode SI semble mieux évaluer la vulnérabilité à la pollution par les nitrates, également la méthode DRASTIR a donné un meilleur résultat que la méthode DRASTIC dans le cas de notre zone d'étude.

La deuxième partie a été consacrée à l'étude des inondations dans la ville de Tébessa, dans un premier temps un traitement SIG à l'aide du logiciel ArcGIS a permis d'extraire l'ensemble des caractéristiques nécessaires pour l'étude hydrologiques des cinq oueds qui traversent la ville. Ensuite, l'établissement de cartes d'aléas hydrologiques basées sur les résultats de la modélisation hydraulique qui a été réalisée à l'aide du logiciel HEC -RAS pour des récurrences de 100 et 50 ans. Par ailleurs, l'élaboration de la carte de vulnérabilité, en tenant compte des critères socioéconomiques par la méthode multicritère AHP. Enfin, les deux cartes des risques d'inondation pour les deux récurrences (100 ans et 50 ans) sont obtenues en croisant les deux cartes d'aléas hydrologiques et la carte de vulnérabilité par l'utilisation de l'outil Map Algebra. L'objectif est de déterminer l'étendue de l'inondation et d'identifier les zones exposées aux risques des inondations afin d'aider les décideurs à mieux se prononcer sur la gestion de ce risque.

Mots clés: Plaine, Risque, Pollution, SIG, Ville de Tébessa, Inondation.

Abstract :

This work was carried out in a semi-arid zone, it is the alluvial aquifer of Tébessa (North-East of Algeria),. The first part is dedicated to the characterization of groundwater in the plain. The hydro-chemical study made it possible to identify the potential sources of pollution in the plain of la Merdja. Indeed, this contamination can have several origins, the most important of which are the influence of lithological formations, the use of fertilizers in agricultural fields and domestic and industrial waste which are discharged into Oued El Kebir without any prior treatment. In order to assess the level of vulnerability of groundwater to pollution, four methods are used: DRASTIC, DRASTIR (modified DRASTIC), SI and GOD coupled with a geographic information system (GIS). Consequently, three classes of degree of vulnerability to pollution were identified by the four methods (low, medium and high). In addition, the validation of the latter was tested by comparing the distribution of nitrates in groundwater and the different vulnerability classes, then by calculating the correlations between the surfaces of each vulnerability class using the four methods. On the basis of the results obtained, the SI method seems to better assess the vulnerability to pollution by nitrates, and the DRASTIR method gave a better result than the DRASTIC method in the case of our study area.

The second part was devoted to the study of floods in the city of Tébessa, in a first step a GIS treatment using ArcGIS software allowed to extract all the characteristics necessary for the hydrological study of the five wadis which cross the city. Then, the establishment of the hazard map from the results of the hydraulic modelling which was made with the help of the HEC-RAS software for the 100-year and 50-year recurrences. In addition, the vulnerability map was drawn up, taking into account socio-economic criteria using the AHP multicriteria method. Finally, the two flood risk maps for the two recurrences (100 years and 50 years) are obtained by crossing the two flood hazard maps and the vulnerability map by using the Map Algebra tool (Raster Calculator). The objective is to determine the extent of the flooding and to identify the areas exposed to flood risks

Keywords: Plain, Risk, Pollution, GIS, City of Tébessa, Flood.

ملخص

تم تنفيذ هذا العمل في منطقة شبه جافة ، وهي طبقة المياه الجوفية الغرينية بتبسة (شمال شرق الجزائر). الجزء الأول مخصص لدراسة خصائص المياه الجوفية في السهل. حددت الدراسة الهيدروكيميائية على مصادر للتلوث المحتملة في سهل المرجة. وبالفعل فإن هذا التلوث يمكن أن يكون له عدة أصول أهمها تأثير التكوينات الصخرية واستخدام الأسمدة في الحقول الزراعية والمياه المستعملة سواء كانت منزلية او صناعية التي يتم تصريفها في الوادي الكبير دون أي معالجة. من أجل تقييم مستوى تعرض المياه الجوفية للتلوث ، تم استخدام أربع طرق (DRASTIC و: DRASTIC) (DRASTIR المعدل) و SI و GOD إلى جانب نظام المعلومات الجغرافية (GIS) وكنتيجة لذلك، تم تحديد ثلاث فئات من درجات التعرض للتلوث من خلال الطرق الأربعة (منخفضة ومتوسطة وعالية). ، ومن ثم تم اختبار التحقق من صحة هذا الأخير من خلال مقارنة توزيع النترات في المياه الجوفية وفئات درجات التعرض المختلفة ، ثم عن طريق حساب الارتباطات بين أسطح كل فئة من فئات درجات التعرض للتلوث باستخدام الطرق الأربعة. على أساس النتائج التي تم الحصول عليها ، يبدو أن طريقة SI تقم بشكل أفضل قابلية التعرض للتلوث بالنترات ، وأعطت طريقة DRASTIR نتيجة أفضل من طريقة DRASTIC في حالة منطقة دراستنا

خصص الجزء الثاني لدراسة الفيضانات في مدينة تبسة، في البداية معالجة نظم المعلومات الجغرافية باستخدام برنامج ArcGIS سمح باستخراج جميع الخصائص اللازمة للدراسة الهيدروولوجية للأودية الخمسة التي تخترق المدينة. بعد ذلك، تم إنشاء خريطة مدى الفيضانات من نتائج النمذجة الهيدروليكية التي تم إجراؤها باستخدام برنامج HEC -RAS لتكرار 100 عام و50 عامًا، وومن ثم انجاز خريطة الحساسية للفيضانات، مع مراعاة المعايير الاجتماعية والاقتصادية من خلال طريقة AHP متعددة المعايير. أخيرًا، تم الحصول على خريطتي خطر الفيضانات للتكرار (100 عام و 50 عامًا) بعملية حسابية تشمل خربة مدى الفيضانات و خريطة الحساسية للفيضانات باستخدام أداة Map Algebra Raster Calculator الهدف هو تحديد مدى الفيضانات وتحديد المناطق المعرضة لمخاطر الفيضانات من أجل مساعدة صانعي القرار على اتخاذ قرار أفضل في اسرع وقت لتسيير هذا الخطر.

الكلمات المفتاحية: سهل، خطر، تلوث، نظم المعلومات الجغرافية، مدينة تبسة، فيضان.

TABLE DE MATIERES

Introduction Générale	2
partie 01	
Chapitre 01: Situation géographique Aperçu géologique et Géophysique	
1.Introduction	9
2. Cadre Géographique	9
3. Topographie	10
4. Réseau hydrographique.....	10
5. Couvert végétal d'entraînement	11
6.1. Stratigraphie	12
6.1.1. Trias.....	12
6.1.2. Crétacé.....	13
6.1. 3. Paléocène	13
6.1.4. Eocène	14
6.1. 5. Miocène	14
6.1.6. Pliocène	14
6.1.7. Quaternaire.....	14
2.2. Tectonique	17
2.3. Diapirisme	18
2.4. Les plissements	18
2.5. Fossés d'effondrement	18
2.5. Aperçu géomorphologique	18
3.Géophysique.....	19
3.2. Implantation des profils.....	19
3.4. Interprétation des résultats.....	20
3.4.1. Résultat de la prospection géophysique	20
4.Etude Hydrogéologique	22
4.1. Structure du système	22
4.2. Piézométrie	23
4.2.1. Conditions aux limites.....	24
4.2.2. Carte piézométrique	24
Conclusion	26

Chapitre 02: HYDROCLIMATOLOGIE

1. Introduction	28
2. Caractéristiques climatiques.....	28
2.1. Pluie moyenne annuelle.....	28
2.2. Pluie moyenne mensuelle	29
2.3. Type de climat.....	29
2.3.1. La température	30
2.3.2. Humidité relative.....	31
2.3.3. Le vent	32
2.3.4. Détermination des caractéristiques climatiques :	33
2.3.4.1. Les indices climatiques :	33
2.4. Le bilan climatique de la zone d'étude.....	34
2.4.1. Evapotranspiration et déficit en écoulement.....	34
2.4.1.1. Estimation de l'ETP	34
Formule de Turc	34
Formule de Thornthwaite	35
2.4.1.2. Formule de Blaney Criddle	37
Formule de Turc	38
Méthode de Coutagne :	38
Formule de Thornthwaite	39
2.4.1.4. Estimation des réserves facilement utilisables (RFU).....	39
2.4.1.5. Bilan Hydrologique selon Thornthwaite	40
2.4.1.6. L'infiltration.....	41
2.4.1.7. Formule de vérification.....	41
Conclusion	43

Chapitre 03: QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES

1. Introduction	45
2. Méthodes et stratégie de travail.....	46
2.1. Echantillonnage et analyse	46
2.2. Analyse en Composantes Principales.....	46
2.3. Positionnement Multidimensionnel (Multidimensional Scaling MDS)	47
2.4. Résultats et discussions	48
2.5. Résultats de l'analyse par MDS	51

3. Faciès chimique des eaux.....	52
3.1. Diagramme de Piper.....	52
3.2. Diagramme de SCHOELLER BERKALOFF	54
4. Paramètres physico –chimiques	57
4.1. Température	57
4.2. Conductivité électrique.....	57
4.3. Potentiel hydrogène ou pH	57
4.4. Solides totaux dissous (TDS).....	57
5. Cartographie des paramètres chimiques	57
5.1. Chlorures	58
5.2. Cartes des sulfates	58
5.3. Bicarbonates.....	59
5.4. Calcium.....	60
5.5. Sodium.....	61
5.6. Potassium.....	62
5.7. Magnésium	63
Conclusion	65

Chapitre 04: VULNERABILITE A LA POLLUTION DES EAUX SOUTERRAINES

1. Introduction	67
2. Les méthodes d'estimation de la vulnérabilité	69
3. Etude de la vulnérabilité a la pollution de la plaine de la Merdja	70
3.1. Application de la Méthode de DRASTIC	71
3.1.1. Description des paramètres et réalisation des cartes thématiques.....	73
3.1.1.1. Profondeur de la nappe (D).....	73
3.1.1.2. La recharge efficace (R)	74
3.1.1.3. Nature du matériel aquifère (A)	75
3.1.1.4. La nature du sol (S)	76
3.1.1.5. La topographie (pente)(T).....	77
3.1.1.6. Nature de la zone non saturée (vadose) (I)	78
3.1.1.7. Le paramètre de conductivité hydraulique (C)	79
3.1.1.8. Carte de synthèse (vulnérabilité à la pollution)	80

3.2. Calcul de la vulnérabilité de la nappe alluviale de Tébessa par la méthode DRASTIR (méthode proposée).....	82
3.2.1. Le paramètre de résistivité (R).....	82
3.2.2. Carte de synthèse de la vulnérabilité par la méthode de DRASTIC modifiée (DRASTIR)	84
3.3. Application de la méthode SI (Susceptibility (S) Index (I)).....	85
3.3.1. Le paramètre d'occupation du sol (OS).....	86
3.3.2. Carte de synthèse de la vulnérabilité par la méthode SI.....	87
3.4. Application de la méthode GOD.....	89
3.4.1. Carte des profondeurs de la nappe de la plaine de Tébessa.....	89
3.4.2. Carte Type de lithologie	90
3.4.2. Carte des profondeurs de la nappe de la plaine de Tébessa.....	91
3.4.3. Carte du type d'aquifère de la plaine de Tébessa.....	92
3.4.4. Carte de synthèse de la vulnérabilité par la méthode GOD.....	93
3.5. Les Nitrates	94
3.5. Validité des cartes de vulnérabilité	95
3.5.1. Validité des cartes de vulnérabilité par la répartition spatiale du taux des nitrates	95
3.5.2. Validité des cartes de vulnérabilité par la corrélation entre les surfaces de Chaque classe	96
3.5.3. Etablissement de la carte synthèse des cartes de vulnérabilités par différentes méthodes.....	97
Conclusion	99

partie 02

Chapitre 01: CARACTERISTIQUES MORPHOMETRIQUES DES SOUS BASSINS

1. Introduction :.....	102
2. Caractéristiques morphométriques des bassins Versants :.....	102
2.1. Le découpage des sous bassins versants de Tébessa.....	102
2. Caractéristiques morphométriques des bassins Versants.....	103
2.2. Morphométrie	103
2.2.1. La surface.....	103
2.2.2. Le périmètre.....	103
2.2.3. Indice de compacité.....	104
2.2.4. Le rectangle équivalent.....	105

2.3. Le relief	106
2.3.1. Répartition des surfaces et courbe hypsométrique	106
a) Les résultats des surfaces partielles des sous bassin par tranche d'altitudes.....	107
b) Courbe hypsométrique :	107
2.3.2. Caractéristiques des altitudes	108
2.3.3. Les indice de pente	109
2.3.3.1. L'indice de pente de roche	109
2.3.3.2. Indice de pente globale I_g	109
2.4. Caractéristiques hydrographiques du bassin versant.....	112
2.4.1. La densité de drainage	113
2.4.2. La pente moyenne du cours d'eau principale	114
2.4.3. Coefficient de torrentialité « C_t »	114
2.4.4. Le temps de concentration	115
II.2.4.5. Vitesse moyenne de ruissellement.....	116
Conclusion	117

Chapitre 02: Etude Hydrométrique

1. Introduction	119
2. Analyse des données pluviométriques	119
2.1. Pluie moyenne annuelle.....	119
2.2. Pluies maximales journalières	119
2.3. Choix de la loi d'ajustement :	120
2.3.1. Ajustement de la série pluviométrique à la loi de GUMBEL.....	120
2.3.2. Ajustement de la série pluviométrique par la loi Log Normal ou loi de Galton.....	122
2.3.3. Pluie de courte durée et leurs intensités à différentes Fréquences	124
2.3.4. Intensités maximales à différentes Fréquences	126
4. Evaluation des apports liquides :	128
4.1. Apport moyen annuel : A_0	128
a) Formule de A.N.R.H :	128
b) Formule de SAMIE :	128
c) Formule de TURC :	129
4.2. Coefficient de variation	129
5. Etude des crues.....	130
5.1. Application sur les bassins versants	130

5.1.1. Formule de Mallet – Gauthier.....	131
5.1.2. Formule de Turazza.....	131
5.1.3. Formule de Giandotti.....	134
5.1.4. Formule de Sokolovski.....	134
5.2. Hydrogrammes des crues	137
6. Apport solide	139
6.1. Evaluation des apports solides	139
Formule de GAVRILLOVIC	140
Formule de FOURNIER :	142
Conclusion	143

Chapitre 03: Modélisation Hydraulique

1. Introduction	145
2. Délimitation de la zone d'étude	145
3. Etablissement des cartes d'Aléas	146
3.1. Préparation des données	146
3.1.1. DEM Modèle numérique d'élévation d'une résolution de 12 .5 m.....	147
3.1. 2. DTS Distance de la rivière (distance euclidienne)	147
3.1.4. Carte des pentes	148
3.1.5. Carte TWI (Topography wetness Index)	149
3.1.6. Elaboration de la carte finale d'Aléas d'inondation.....	153
2. Evaluation de l'aléa aux inondations.....	153
2.1. La modélisation hydraulique sous HEC RAS	154
2.3. Présentation des résultats.....	163
Conclusion	169

Chapitre 04 : ANALYSE DE LA VULNERABILITE ET LE RISQUE ASSOCIE

1. Introduction	171
2. Occupation du sol de la région d'étude	171
2.1. Le changement de l'occupation du sol et ses impacts environnementaux	171
2.2. Le changement total de l'occupation du sol	174
2.3. Evolution de l'urbanisme	175
3. Les facteurs intervenant dans l'estimation de la vulnérabilité	175
3.1. Densité de la population par interpolation.....	175

3.2. Tissu urbain	178
3.3. Trame viaire	180
3.4. Carte de vulnérabilité finale.....	181
4. Etablissement de la carte du risque d'inondation	183
5. Proposition des espaces libres, accessibles et sécurisés	186
Conclusion	189
CONCLUSION GENERALE.....	191

LISTE DES FIGURES

Figure 2: Photo(a) d'Oued El-Kébir pollué par les eaux usées et Photo (b) montre l'utilisation de l'eau usée pour irriguer une parcelle d'orge à la plaine de Tébessa (Zereg ,2019).	3
Figure 3: Exemples d'inondations catastrophiques à Tébessa (Presse El Watan ,2018)	4
Figure 1.1 : Situation de la zone d'étude	9
Figure 1. 2 : Carte des altitudes.....	10
Figure 1.3 : Carte du réseau hydrographique	11
Figure 1.4 : Carte d'occupation des sols obtenue à partir de la méthode de classification multispectrale supervisée sous Envi 5.3 (images Landsat 5, 08/06/2010).	12
Figure 1.5 : Résumé schématique de la stratigraphie de la plaine de Tébessa (Duberdieu ,1956 ; Otmanie,1987 ; Bouzeenoune ,1993 ; Vila et al.,2000)	15
Figure 1.6: Géologie de la zone d'étude (Durozoy, 1953)	16
Figure 1.7: Esquisse tectonique de la région de Tébessa, (Vila, 1980).....	17
Figure 1.8: Carte d'implantation des sondages électrique (CGG, 1975).....	19
3.3. Échelle de résistivité	20
Figure 1.9 : Coupe géo électrique (Q, O, L) de la zone de Tébessa (CGG 1975).	21
Figure 1. 10. Coupe géo électrique (U, V, X) de la zone de Ain Chabro (CGG 1975).	21
Figure 1.11. Coupe géo électrique (U, V, X) de la zone de Bekkaria (CGG 1975).....	22
Figure 1.12: Coupe hydrogéologique à travers la plaine de Ain Chabro. In Rouabhia et al. 2009	23
Figure 1.13 : Coupes hydrogéologiques à travers la plaine de Tébessa selon les.....	23
Figure 1.14 : Carte des conditions aux limites	24
Figure :1.15 : Carte piézométrique (Abdeslam I. & al.,2019)	25
Figure 2.3: Climagramme d'EMBERGER.....	30
Figure 2.4 : variation mensuelle de la température.	31
Figure 2.5 : Répartition mensuelle de l'humidité relative.....	32
Figure 2.6 : Vitesse moyenne mensuelle du vent (m/s).....	33
Figure 2.7 : Diagramme Ambrothermique (station Tébessa).	34

Figure 3.1 : Carte d'inventaire des points d'eau (Mai 2006).....	45
Figure 3.2 : Matrice de corrélation.....	49
Figure 3.3 : Scree plot.....	50
Figure 3.4 : Projection sur les 2 premiers axes principaux.....	51
Figure 3.5: Résultats de la Méthode MDS.....	52
Figure 3.6: Diagramme de Piper	53
Figure 3.7 : Représentation sur le Diagramme de Piper des résultats d'analyse	54
Figure 3.8 : Diagramme de Shoeller Berkallof des points de la plaine de Tébessa	55
Figure 3.9 : Diagramme de Shoeller Berkallof des points de la plaine de Tébessa	56
Figure 3.10 : Carte d'isoteneurs en chlore (mg/l)	58
Figure 3.11 : Carte d'isoteneurs en sulfates (mg/l)	59
Figure 3.12 : Carte d'isoteneurs en bicarbonate (mg/l)	60
Figure 3.13 : Carte d'isoteneurs en calcium (mg/l).....	61
Figure 3.14: Carte d'isoteneurs en sodium (mg/l).....	62
Figure 3.15: Carte d'isoteneurs en potassium (mg/l)	63
Figure 3.16 : Carte d'isoteneurs en magnésium (mg/l)	64
Figure 5.1 : Pollution souterraines (source : Jean Villar sciences ,2013).....	67
Figure 5.2 : Drainage des eaux usées par Oued Chabro-Ksob.....	68
Figure 5.3 : Carte des rejets de la plaine de la Merdja	68
Figure 5.4: Diagramme de Vrba et Zaporozec.....	70
Figure 5.5 : Illustration des Paramètres des quatre méthodes utilisées (DRASTIC, DRASTIR, SI et GOD)	71
Figure 5.6: Carte du paramètre (D), profondeur de l'eau de la nappe alluviale de Tébessa	74
Figure 5.7 : Carte du paramètre (R), la recharge de la nappe alluviale de Tébessa	75
Figure 5.8 : Carte du paramètre (A), la nature du matériel la nappe alluviale de Tébessa.....	76
Figure 5.9 : Carte de paramètre (S), nature de sol (la nappe alluviale de Tébessa)	77
Figure 5.10 : carte du paramètre (T) topographie (la nappe alluviale de Tébessa).....	78
Figure 5.11 : Carte du paramètre (I) de la zone vadose (la nappe alluviale de Tébessa)	79
Figure 5.12: Carte conductivité hydraulique (C), (la nappe alluviale de Tébessa).....	80
Figure 5.13: Répartition spatiale et en pourcentage, des degrés de vulnérabilité à la pollution selon la méthode DRASTIC	81
Figure 5.13 : Carte de la résistivité (R), (la nappe alluviale de Tébessa).....	83
Figure 5.14: Degré de vulnérabilité à la pollution par la méthode DRASTIR	84
Figure 5.15: Carte de l'occupation du sol.....	87

Figure 5.16: Degré de vulnérabilité à la pollution par la méthode SI	89
Figure 5.17 : Carte du paramètre (G) type de la nappe	90
Figure 5.18 : Carte du paramètre (O) nature de la zone non saturée.....	91
Figure 5.19: Carte du paramètre (D), profondeur de la nappe	92
Figure 5.20: Degré de vulnérabilité à la pollution par la méthode GOD	94
Figure 5.21: Carte d'isoteneurs en nitrates (mg/l).....	95
Figure 5. 22 : Résultat de la corrélation entre les différentes méthodes de vulnérabilité.....	96
Figure 5.23 : Application de la méthode corrélation de Spearman entre les différentes.....	97
Figure 5.24 : Carte synthèse de la vulnérabilité des eaux souterraines de la plaine de la Merdja	98
Figure 1.1 : Le schémas du découpage les sous bassins versants de Tébessa (source Carte topographique de Tébessa modifiée).....	102
Figure 1.2 : Les rectangles équivalents des Oueds Zaarour (a) et Oued Nagues (b)	106
Figure 1. 3 : la courbe hypsométrique d'oued Zaarour	108
Figure 1.4: la carte des pentes de la zone d'étude	112
Figure 1.5 : Chevelu hydrographique de la zone d'étude.....	113
Figure 2.1 : les courbes pluies de courte durée fréquentielle.....	126
Figure 2.2: la courbe intensité-durée-fréquentiel.	128
Figure 3.1 : Carte des POS.....	146
Figure 3.2 : Carte DEM (digital élévation model)	147
Figure 3.4 : Cartes DTS Distance de la rivière (distance euclidienne)	148
Figure 3.5 : Carte des pentes (degrés)	149
Figure 3.6 : Shémas pour dresser les deux cartes TWI et SPI	150
Figure 3.7: Le principe du codage (direction des flux) (ESRI)	151
Figure 3.8 : Carte de la direction des flux (flow direction)	151
Figure 3.9 : Flow accumulation	152
Figure 3.10 : Carte de TWI.....	153
Figure 3.11 : Les entités modélisées sous HEC RAS.....	154
Figures 3.12 : les digues 1,2 et 3 , a) le profil de terrain naturel, b) digue modélisée	155
Figure 3.13 : La fenêtre RAS Mapper du logiciel HEC RAS.....	156
Figure 3.14 : Le profil transversal d'Oued Seggui.....	157
Figure 3.15: Le profil transversal d'Oued Ghozala.....	157
Figure 3.16 : Le profil transversal d'Oued Ghozala.....	158
Figure 3.17: Le profil transversal d'Oued Refana.....	158

Figure 3.18 : Le profil transversal d'Oued Nagues.	159
Figure 3.19: Le profil transversal d'Oued Zaarour.	159
Figure 3.20 : Conditions aux limites pour chaque canal.	160
Figure 3.21 : Conditions aux limites pour chaque canal	161
Figure 3.22 : Paramètre de plan de la simulation	161
.....	162
Figure 3.23 : Paramètre de plan de la simulation	162
Figure 3.24 : Conditions aux limites pour chaque canal.	162
Figure 3.25 : Paramètre de plan de la simulation	163
Figure 3.26 : Les point de contrôles utiliser dans la Présentation des résultats de simulation	164
Figure 3.27 : La simulation de la crue 50 ans	166
Figure 3.28: La simulation de la crue 100 ans	166
Figure 3.29 : Carte de l'aléa hydrologique pour le débit Cinquantennal	167
Figure 3.30: Carte d'aléa hydrologique pour le débit centennal.....	168
Figure4.1 : Diagramme du processus de traitement des images satellitaires pour dresser une carte d'occupation du sol	172
5Figure4.2 : Carte d'occupation des sols (2000)	173
Figure 4.3: Carte d'occupation des sols (2010)	173
Figure 4.4 : Carte d'occupation des sols (2020)	173
Figure 4.4 : Carte du changement total de l'occupation du sol.....	174
Figure 4.5: Carte de l'évolution du développement urbain	175
Figure 4.6 : Le shapefile des données des clients de l'ADE (Algérienne des eaux) (2020) ..	176
Figure 4.7 : Schémas explicatif de la méthode point Density (analyse spatiale).....	176
Figure 4.8 : Carte de Densité de logements	177
Figure 4.9: Carte de densité de la population	178
Figure 4.10 : Carte de vulnérabilité des équipements	180
Figure 4.11: Carte vulnérabilité de la trame viaire.....	181
Figure 4.11 : L'extension AHP	182
Figure 4.12 : Carte de vulnérabilité globale.....	183
Figure 4.14 : Carte des risques d'inondation de la ville de Tébessa (Cinquantennale)	184
Figure4.15 : Carte des risques d'inondation de la ville de Tébessa (Centennale)	185
Figure 4.16 : Localisation des hôpitaux.....	187
Figure 4.17: Localisation des équipements de sûreté.....	187

Figure 4.18: Proposition des espaces libres, accessibles et sécurisés	188
---	-----

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Echelle de résistivité des formations géologiques (Djabassi ,2019)	20
Tableau 2 Coordonnées du poste pluviométrique de Tébessa	28
Tableau 3 Variation des précipitations mensuelle de la station de Tébessa	29
Tableau 4 Répartition mensuelle de La température moyenne annuelle.	30
Tableau 5 répartition mensuelle de l'humidité relative moyenne annuelle	31
Tableau 6 Répartition mensuelle de la vitesse de vent annuelle	32
Tableau 7 les résultats de L'ETP selon la formule de TURK.....	35
Tableau 8 Les résultats de L'ETP selon la formule de Thornthwaite	36
Tableau 9 les résultats de L'ETP selon la formule de Blaney Criddle.....	37
Tableau 10 Les résultats de L'ETP de la station de Tébessa	37
Tableau 11 Les résultats de L'ETR selon la formule de Thornthwaite	41
Tableau 12 les résultats de billon hydrique selon Thornthwaite.....	42
Tableau 13 Statistiques Descriptives des éléments chimiques	46
Tableau 14 Poids attribués pour les paramètres de DRASTIC (Aller et al ,1987)	72
Tableau 15 Notations accordées aux paramètres de la méthode de DRASTIC.....	72
Tableau 16 Surface et surface en pourcentage de chaque classe par la méthode DRASTIC ...	81
Tableau 17 Poids attribués pour les paramètres de DRASTIR (DRASTIC modifiée)	82
Tableau 18 Valeurs accordées au paramètre résistivité de la méthode de DRASTIC	83
Tableau 19 Surface et surface en pourcentage de chaque classe par la méthode DRASTIR ...	85
Tableau 20 Poids attribués pour les paramètres de SI	85
Tableau 21 Principales classes d'occupation du sol et valeurs correspondantes d'occupation	86
Tableau 22 Notation et pondération selon l'occupation du sol.....	86
Tableau 23 Critère d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode SI.....	87
Tableau 24 Surface et surface en pourcentage de chaque classe par la méthode SI	88
Tableau 25 Cotes attribuées au paramètre « impact de la zone vadose ».....	90
Tableau 26 Cotes attribuées au paramètre Profondeur de l'eau en (zone captive et libre).	92
Tableau 27 Cotes attribuées au paramètre type d'aquifère.....	92
Tableau 28 Surface et surface en pourcentage de chaque classe par la méthode GOD	93

Tableau 29 Le découpage du bassin versant en cinq (5) sous bassins.	103
Tableau 30 La superficie des sous bassins versants.	103
Tableau 31 Le Périmètre des sous bassins versants.	104
Tableau 32 Longueur des talwegs principaux.....	104
Tableau 33 Altitudes minimale et maximale des sous bassins.	104
Tableau 34 Les paramètres morpho-métriques des sous bassins.	105
Tableau 35 Répartition en pourcentage de la surface élémentaire du SB1.	107
Tableau 36 Caractéristiques des altitudes.	109
Tableau 37 classifications O.R.S.T.O.M.	110
Tableau 38 classifications O.R.S.T.O.M.	111
Tableau 39 Les résultats des sous bassins sont pris dans le tableau :	111
Tableau 40 la densité de drainage des sous bassins :	113
Tableau 41 pente moyenne du cours d'eau principale	114
Tableau 42 Coefficient de torrentialité et la fréquence des sous bassins :	115
Tableau 43 Le temps de concentration des sous bassins	116
Tableau 44 la vitesse moyenne de ruissellement :	116
Tableau 45 Coordonnées du poste pluviométrique de Tébessa	119
Tableau 46 Caractéristiques de la série avec N=42ans.....	120
Tableau 47 Calcul de PJ max selon les fréquences	122
Tableau 48 Calcul de PJ max selon les fréquences	123
Tableau 49 Résultat d'ajustement	124
Tableau 50 Les valeurs de b.....	125
Tableau 51 Pluie de courte durée et leurs intensités à différentes fréquences	125
Tableau 52 Pluie de courte durée et leurs intensités à différentes fréquences	127
Tableau 53 Evaluation des apports liquides des sous bassins.....	129
Tableau 54 coefficient de variation des sous bassins	130
Tableau 55 Valeur de coefficient de ruissellement C Fréquence Période de Retour	132
Tableau 56 Valeur de temp de concentration Tc	132
Tableau 57 Pluies de courte durée pour le sous bassin SB1.....	132
Tableau 58 Pluies de courte durée pour le sous bassin SB2	132
Tableau 59 Pluies de courte durée pour le sous bassin SB3	133
Tableau 60 Pluies de courte durée pour le sous bassin SB4	133
Tableau 61 Pluies de courte durée pour le sous bassin SB5	133
Tableau 62 Débits de crues au sous bassin n°1.....	135

Tableau 63 Débits de crues au sous bassin n°2.....	135
Tableau 64 Débits de crues au sous bassin N°3.....	136
Tableau 65 Débits de crues au sous bassin N°4.....	136
Tableau 66 Débits de crues au sous bassin N°5.....	136
Tableau 67 Les différentes valeurs de	137
Tableau 68 Hydrogrammes des crues de différentes périodes de retour sous bassin N°1.	138
Tableau 69 Caractéristique de perméabilité.....	140
Tableau 70 l'apport solide des sous bassins	140
Tableau 71 Apport solide moyen annuel des sou bassins selon la formule de Gavrilovic....	141
Tableau 72 Apport solide moyen annuel des sou bassins selon la formule.....	142
Tableau 73 les Paramètres de cinq Oueds qui traversent la ville de Tébessa	156
Tableau 74 Résultats de simulation.....	164
Tableau 75 Résultat de simulation par les deux scénarios.....	165
Tableau 76 Echelle qualitative caractérisant une précision de classification	173
Tableau 77 Pertes et gains de l'occupation du sol	174
Tableau 78 Les indices de la vulnérabilité.....	182
Tableau 79 La matrice de la détermination des niveaux de la vulnérabilité.....	183
Tableau 80 Les équipements touchés par les inondations	186

Liste d'abréviations

ACP : Analyse en Composantes Principales

ADE : Algérienne des eaux

ASF : Alaska Satellite Facility

DEM: Digital élévation model

DTS: Distance to stream

ESRI: Environmental Systems Research Institute.

MDS ; Multidimensional Scaling

MRC : la Municipalité Régionale de Comté

NDVI : L'indice de végétation par différence normalisé

PDAU : Plan directeur d'Aménagement d'urbanisme

POS : Plan d'occupation des sols

R+1 : rez-de-chaussée + un étage

RPA : Règlement para sismique Algériens

SIG : Système d'information Géographique

TWI : Topography wetness Index

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction Générale

Tout au long de l'histoire, les populations du monde entier ont utilisé les eaux souterraines comme source d'eau potable et, aujourd'hui encore, plus de la moitié de la population mondiale dépend des eaux souterraines pour survivre (UNESCO, 1992). Effectivement, la qualité des eaux dans le monde a connu ces dernières années une grande détérioration, à cause des rejets industriels non contrôlés, l'utilisation intensive des engrais chimiques dans l'agriculture ainsi que l'exploitation désordonnée des ressources en eau (Debieche, 2002). De par ses nombreux avantages pour les usages anthropiques, l'eau souterraine est souvent plus convoitée que l'eau de surface du fait, en autres, de son accessibilité et sa disponibilité en permanence pour une large gamme d'agents économiques (Fatah Ameur, 2017). L'utilisation des eaux souterraines a progressé avec des avantages socio-économiques importants, peu d'attention a été accordée à la gouvernance, à la conservation et à la protection de cette ressource (Kulkarni et al., 2015). Ainsi la dégradation de la qualité des eaux souterraines est progressivement devenue une préoccupation universelle.

Bien que l'eau soit un élément indispensable à la vie. En revanche, elle peut provoquer des inondations, et quoiqu'il en soit ces dernières sont nécessaires pour renouveler la fertilité des sols car elles déposent périodiquement de nouveaux nutriments et des sédiments fins. Cependant, elles sont, de toutes les catastrophes naturelles qui frappent le monde chaque année, les plus fréquentes, les plus dommageables et les plus mortelles (Pulvirenti et al., 2011). Elles sont la source de près de la moitié des décès occasionnés par les catastrophes naturelles au cours des 50 dernières années (Marion, 2012), et sont responsables de près du tiers des pertes économiques au niveau mondial (James, 2008).

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. Notre pays se compte parmi les régions déficitaires les plus sérieusement exposés à la rareté de l'eau à l'échelle du bassin méditerranéen (Zereg, 2019), où la disponibilité de l'eau douce atteindra 378 m³/hab/an en 2025 et 309 m³/hab/an avant 2050 (UN, 1995).

Les inondations en Algérie font partie des risques majeurs auxquels est confronté notre pays, concernant ce risque, il est important de noter que les conditions climatiques de l'Algérie la prédisposent aux crues et aux inondations qui sont classées parmi les catastrophes naturelles les plus fréquentes et les plus désastreuses touchant l'ensemble du territoire atteignant parfois l'ampleur d'une catastrophe nationale. A cet égard, on peut citer quelques exemples d'inondations catastrophiques sur les plans humain, matériel et économique, et liées à de fortes précipitations ayant généré des crues dévastatrices Figure ???.

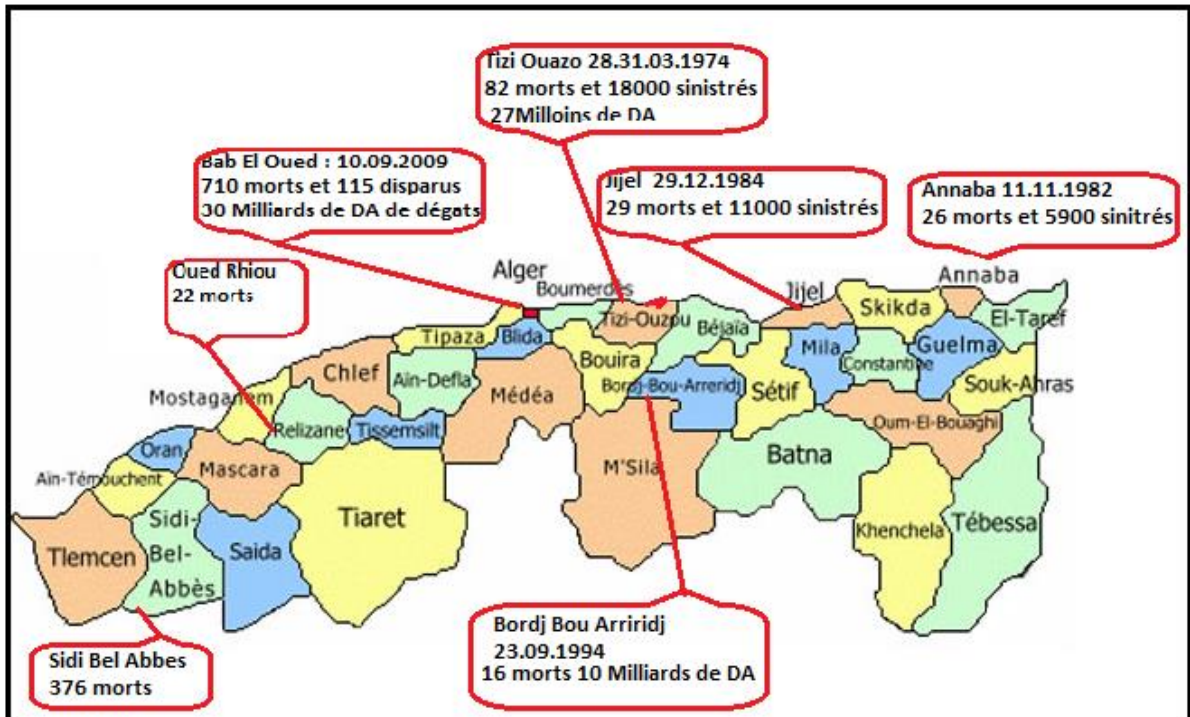


Figure 1 : Quelques exemples d'inondations catastrophiques en Algérie

La plaine de Tébessa (El Merdja) objet de notre travail de recherche, est une zone à vocation de grande culture et d'élevage. Les eaux souterraines constituent une source importante d'eau dans cette zone. La qualité des eaux souterraines de cette région s'est fortement détériorée ces dernières années en raison des rejets domestiques incontrôlés, de l'utilisation intensive d'engrais chimiques dans l'agriculture, des petites industries qui sont déversées dans la plaine sans traitement préalable et de l'exploitation désordonnée des ressources en eau. C'est pourquoi, la qualité alimentaire de cette eau est une préoccupation croissante, en plus de l'utilité de l'évaluation et de la prévision des risques potentiels découlant du milieu naturel est évident surtout lorsqu'on sait que la profondeur de l'eau ne dépasse pas quelques mètres au centre de la plaine. (Kachi ,2007).



Figure 2: Photo(a) d'Oued El-Kébir pollué par les eaux usées et Photo (b) montre l'utilisation de l'eau usée pour irriguer une parcelle d'orge à la plaine de Tébessa (Zereg ,2019).

Bien que, dans cette recherche les eaux superficielles ne seront pas étudiées. Mais, il y a aussi, celles qui arrivent en quantités de plus en plus importantes ces dernières années suite aux précipitations intenses et probablement dû aux changements climatiques, causant ainsi des inondations catastrophiques, à chaque fois que des fortes précipitations se produisent et, elles sont actuellement plus fréquentes et plus dévastatrices. La ville de Tébessa est envahie depuis des années par des crues qui provoquent des inondations désastreuses, encore plus récemment. Nous aborderons ce risque à travers les cinq oueds qui traversent la ville.

La ville de Tébessa est une ville frontière, sa situation géographique, lui a permis de recueillir plusieurs civilisations antiques, elle possède un patrimoine culturel matériel et immatériel riche, plein de valeurs, c'est pourquoi il faut penser à des actions de sauvegarde préventives, pour garder leurs aspects uniques en assurant la transmission de ces ressources aux futures générations. Malgré l'importance de cette ville, cependant elle souffre des problèmes cités affectant la croissance économique et le développement de la ville. Par exemple le 15 septembre 2018 La ville, abritant aujourd'hui une population de près de 250 000 habitants, a vu ses quartiers, ses paysages, ses boulevards et, en général, son architecture, bouleversés de fond en comble, et dans le sens que l'on peut aisément deviner : négatif. (Presse EL Watan ,2018).



Figure 3: Exemples d'inondations catastrophiques à Tébessa (Presse El Watan ,2018)

Plusieurs études ont déjà été réalisées sur la plaine dont des mémoires de Magister et des thèses de Doctorat, des publications dans des journaux internationaux, ces dernières ont confirmés le rôle principal de l'agriculture ainsi que la nature des formations géologique dans la détérioration de la qualité des eaux souterraines, (Djabri 1987, Gouidia ,2000, Rouabhia 2004-2009, Zereg 2010, ,Zereg 2019 , Chlih Fatha 2019) , Gherieb 2011, Djabassi 2019,).

Afin d'aider les décideurs et les gestionnaires, des Systèmes d'Information Géographique (SIG) sont utilisés puisqu'ils sont considérés comme l'un des meilleurs outils pour recueillir toutes les données, les analyser et visualiser plusieurs couches d'informations sur un même support. A cet effet, ce travail consistera, dans une première phase, à dresser une carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la ville de Tébessa qui va nous permettre de répondre aux exigences d'exploitation des eaux souterraines et la prévention contre les risques de pollution, puis dans la seconde phase, à établir une carte des inondations qui permettra d'évaluer et représenter l'étendue spatiale des zones submergées lors des crues ou d'inondations, et pour mieux évaluer les risques des inondations dans la ville de Tébessa qui est exposée à des inondations provoquées par les cinq oueds qui traversent cette dernière .En conséquence , L'utilisation combinée des deux logiciels HEC-RAS et ARC GIS permettra de proposer une protection contre ce risque le long des cours d'eau qui traversent la ville de Tébessa.

Afin de mieux expliquer l'approche adoptée pour chacun des différents thèmes abordés, une présentation de la procédure à suivre est nécessaire, le travail envisagé est ainsi divisé en deux parties :

La première partie concernera l'étude de la qualité des eaux souterraines, elle comprend les chapitres suivants :

- Chapitre1 présentera les particularités géologiques, géophysiques et géomorphologiques de la zone d'étude, également la géométrie de l'aquifère sera matérialisée à l'aide de coupes et cartes établies en se basant sur des études antérieures.
- Chapitre 2 portera sur l'étude statistique des paramètres hydro climatologiques pour établir un bilan climatique de la zone d'étude. En effet ,cette partie est très importante dans le cas de la présente étude, dans le but d'expliquer l'apport en eau pour les nappes et aussi le cas d'excès d'apport conduisant à un risque d'inondation au niveau des différents oueds qui traversent la ville.
- Chapitre3 sera consacré à l'application de certaines méthodes d'analyse statistique multidimensionnelle en plus de l'approche hydrochimique classique afin, de caractériser les eaux souterraines de la région étudiée.
- Chapitre 4 se concentrera, par le biais de la cartographie, sur l'évaluation de, la vulnérabilité de la nappe alluviale de Tébessa qui sera étudiée selon quatre méthodes DRASTIC, GOD, SI et DRASTIR (DRASTIC modifiée).

Dans la deuxième partie, nous aborderons les chapitres suivants :

- Chapitre 1 visera à déterminer les principales caractéristiques morphologiques, hydrographiques et physiques des cinq sous-bassins hydrographiques qui influencent la variation du régime hydrologique de la région étudiée, provoquant également les inondations qui affectent la ville de Tébessa.
- Chapitre 2 sera dédié à l'étude et l'analyse des séries pluviométriques afin de déterminer les périodes de retour et les fréquences des événements pluviométriques majeurs. Également, un calcul des débits liquides et débits solides sera effectué à l'aide de formules empiriques en raison du manque de données hydrométriques, ce qui permettra le dimensionnement des ouvrages de protection contre les inondations.
- Chapitre 3 traitera les étapes à suivre pour dresser deux cartes d'aléas hydrologiques pour les deux récurrences 100 ans et 50 ans, en se basant sur les fonctionnalités qu'offre le logiciel HEC-RAS combiné avec le logiciel Arc Gis.
- Chapitre 4 s'attachera à limiter des enjeux exposés sur la base d'une analyse multicritère (AHP) afin de cartographier les zones qui s'inscrivent dans la vulnérabilité, puis deux cartes d'inondation seront établies pour les deux récurrence centennale et cinquennale par utilisation du logiciel ARC Gis, en dernier l'élaboration d'une carte des espaces libres, accessibles et sécurisés. Ainsi, les résultats obtenus peuvent contribuer à prévoir des aménagements adaptés pour minimiser les dégâts causés par ce risque.
- En dernier, une conclusion Générale après une brève synthèse des différentes parties abordées et des principaux résultats obtenus. En fin, des propositions concrètes pour assurer la protection et la gestion de la ressource.

PARTIE I

Chapitre 1
Situation géographique,
Aperçu géologique et
Géophysique

1.Introduction

L'objectif de ce chapitre est de déterminer les différentes caractéristiques morphométriques de la plaine qui influent sur la variation du régime hydrologique. De même une synthèse des connaissances géologiques, géophysique et hydrogéologiques est développée dans ce chapitre sur la base des études antérieures. Des coupes géologiques schématisant la succession des faciès, ainsi que des levés tectoniques et géophysiques sont présentés. Cela permettra d'évaluer les processus d'acquisition de la minéralisation en termes de réactions géochimiques pour connaître l'origine des sources de pollution afin de caractériser la qualité des eaux souterraines de la région.

2. Cadre Géographique

Ville frontalière avec la Tunisie, la ville de Tébessa (Thevest) est située à l'extrême Est de l'Algérie aux portes du désert, à environ 30 km au sud-est d'Annaba.

La région d'étude, appartient au domaine de l'atlas saharien oriental, aux confins Algéro-Tunisiens, précisément aux monts de Tébessa, qui constituent la partie orientale de ceux de N'emmancha. Elle est limitée :

- Au Nord, par les communes de Boulhaf dyr et commune Bir Dheb ;
- Au Nord-Est, par les Daïras de Rass El Ayoun et El Kouif ;
- À l'Ouest, par la commune de Gourigour ;
- Au Sud-Ouest, la Daïra de Bir Mokkadem ;

La zone d'étude a une superficie approximative de 123 km² et fait partie du bassin d'Oued Ksob qui appartient à la Medjerda qui est un sous-bassin de Mellègue, et elle est limitée par :

- Djebel Hamzal Djebel Kuif au nord ;
- Djebel Bouramane, Doukane, Bekkaria , et Djoua au sud ;
- Djebel Serdiess et Djebel kcheid à l'Ouest ;
- Djebel Djebissa ,Djebel Teiba ,Djebel Rhekab à l'Est.

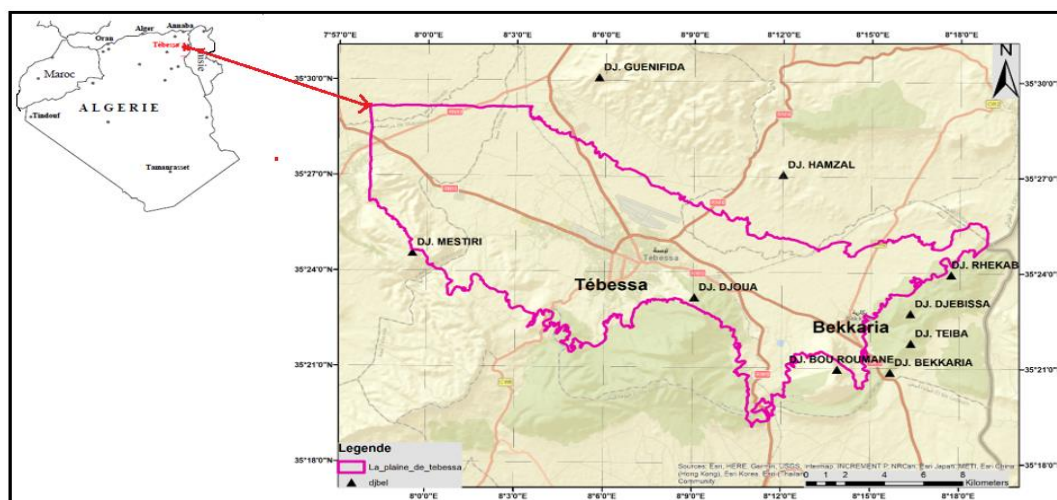


Figure 1.1 : Situation de la zone d'étude

3. Topographie

La zone d'étude a une topographie plus ou moins plate, sous la forme de bassins juxtaposés entourés de montagnes. L'altitude varie de 1712m, qui est le plus haut sommet de la région (DJ. Doukkane) à 800m, qui est l'altitude la plus basse, dans la plaine de Tébessa. Ainsi, le relief de la plaine favorise l'inondation de la ville, qui cause parfois des dommages. Importants tels que ceux enregistrés au cours des dernières années.

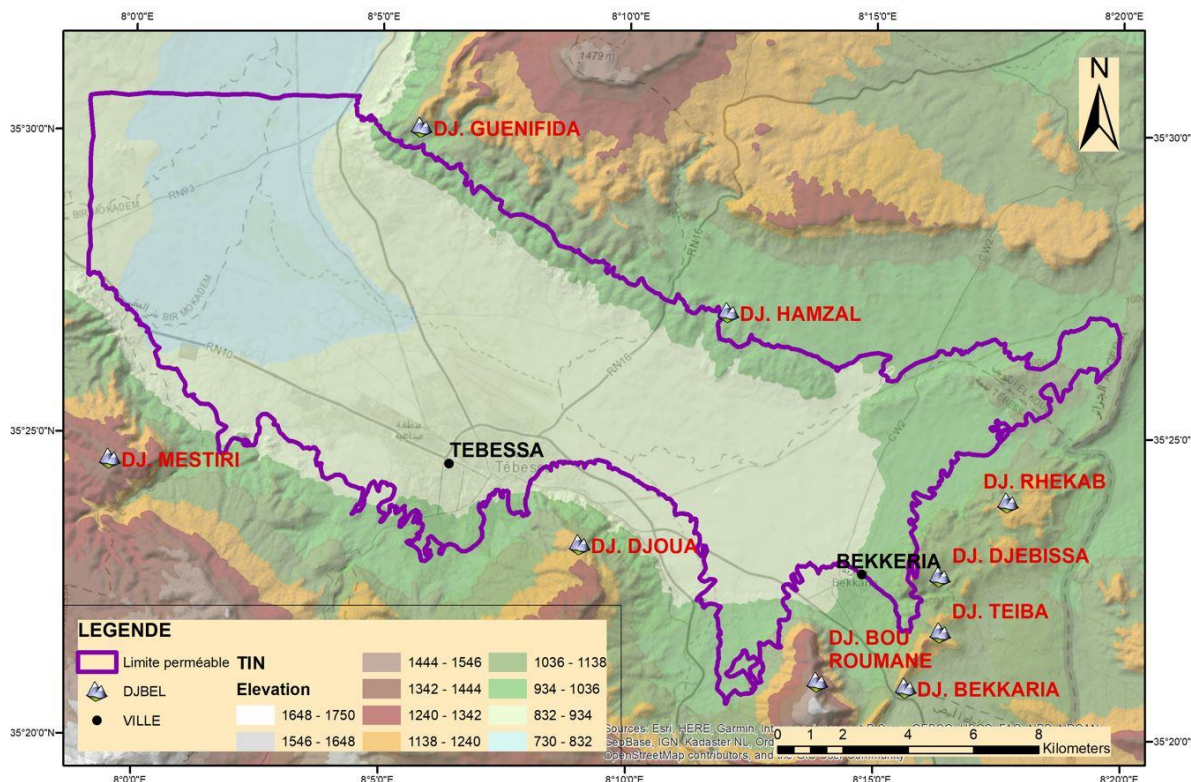
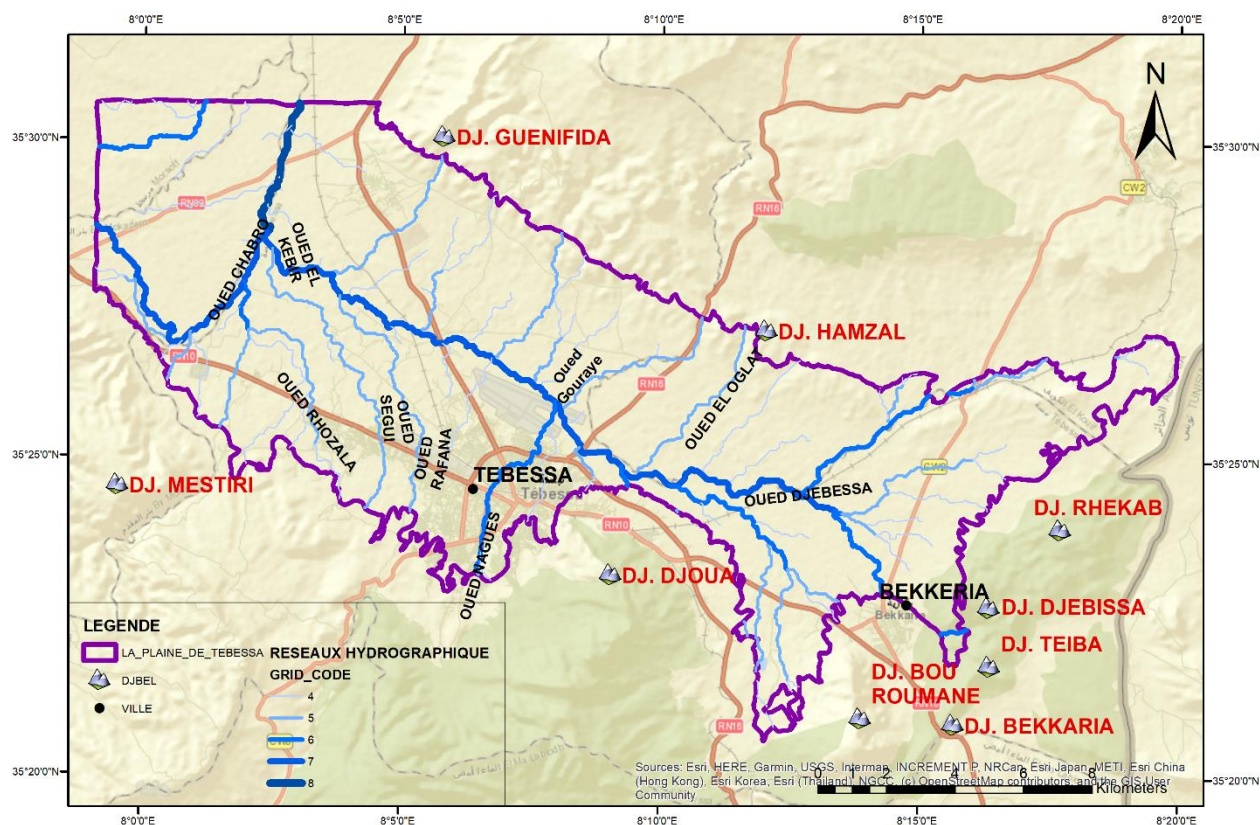


Figure 1. 2 : Carte des altitudes

4. Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique de la région d'étude est dense et bien ordonné. Quelques oueds se trouvent dans la partie nord comme Oued Oglet, oued Djebissa et Oued Gouraya ; ces oueds ne traversent pas la ville. Par contre, cinq affluents de l'Oued El Kebir (Oued Nagues, Oued Ghozala, Oued Segui, Oued Rafana et Oued Zaarour) traversent la ville de Tébessa, ces derniers jouent un rôle important dans les inondations de cette dernière, par contre l'Oued Boukaz est situé dans la partie ouest de la plaine. Toutes les eaux de surface du bassin versant entourant la plaine au nord, au sud et à l'est sont collectées par les oueds Chabro et El Kebir qui les drainent vers l'oued Ksob qui se jette dans l'oued Mèllégue, ce dernier faisant partie du grand bassin de la Medjerda.



5. Couvert végétal d'entraînement

Afin d'établir la carte d'occupation du sol, nous avons utilisé la méthode de classification multispectrale supervisée et l'utilisation des nouvelles techniques, telles que la télédétection, le SIG. Ainsi, les images satellitaires du capteur Thematic Mapper (TM) du satellite Landsat 5, acquises le 08/06/2010 avec une résolution spatiale de 30 mètres, supervisées sous le logiciel ENVI 5.3 (Environment for Visualizing). Par conséquent, les classes identifiées représentent l'espace vert (forêts et terres agricole, eau, sol nu et tissu urbain), les résultats trouvés sont validés par le coefficient kappa qui a une valeur de 0.9756.

La couverture végétale de la zone d'étude est favorisée par ses conditions climatiques. De même, le développement de l'agriculture est fortement lié aux caractéristiques du sol et à l'intensité de l'activité humaine. En général, la région de Tébéssa, est connue par le pin d'Alep et le genévrier de Phénicie qui occupent des sols calcaires. De plus, l'alfa pousse sur la marne et le grès, les cultures céréalières irrégulières poussent sur les sols alluviaux, on trouve encore des forêts de protection qui sont constituées de chêne vert. D'autre part, le reste de la zone est divisé entre les terres agricoles et les terres improductives.

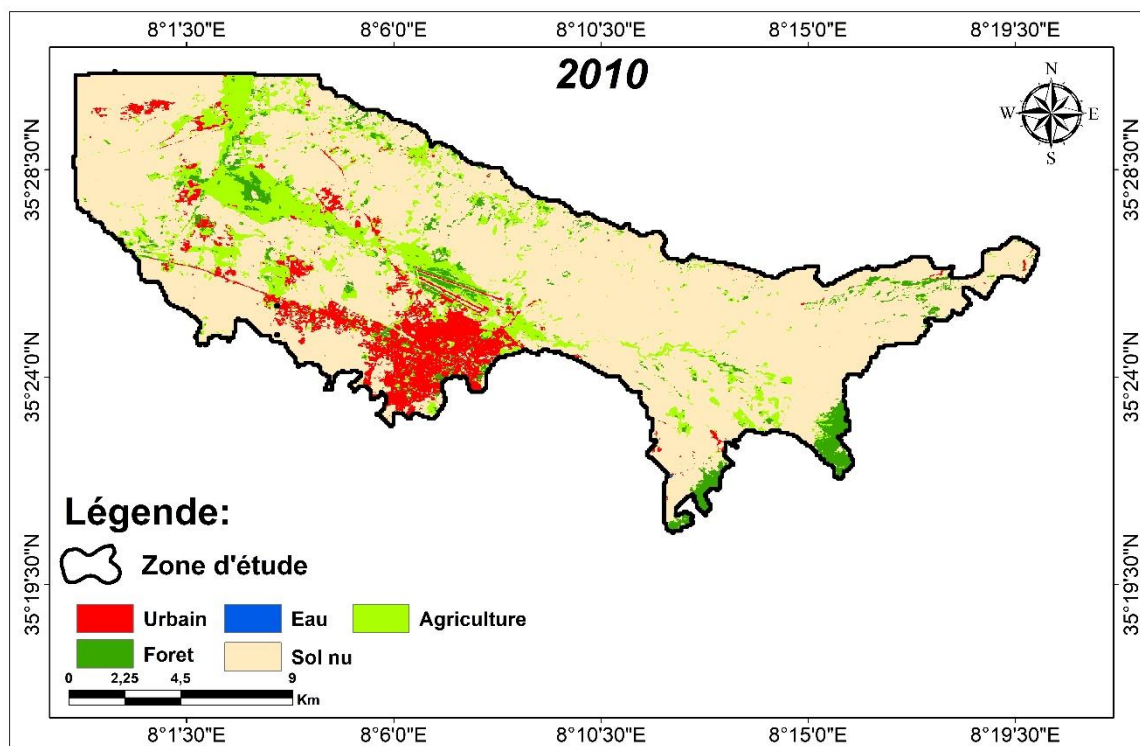


Figure 1.4 : Carte d'occupation des sols obtenue à partir de la méthode de classification multispectrale supervisée sous Envi 5.3 (images Landsat 5, 08/06/2010).

6.1. Stratigraphie

La plaine de Tébéssa fait partie de la structure autochtone Nord-aurésienne (Aurès N'émécha) de l'atlas saharien (G.Durozoy 1956, Kowalski W.M. et al, 2000). Selon la nature géologique de cette zone, il existe différents types de formations que l'on peut regrouper en trois ensembles :

- Une formation carbonatée représentée par d'importantes couches calcaire - marneuses et de marnes d'âge Crétacé, très visibles en bordures de la plaine ;
- Une formation triasique diapirique disloquant des formations carbonatées au niveau du Djebel Djibessa ;
- Un important dépôt alluvionnaire mio-plio- quaternaire qui est visible sur la totalité de la plaine et surtout au piedmont des reliefs accidentés en discordance avec les formations précédentes.

6.1.1. Trias

Il apparaît sous la forme d'un diapir dans la région de Bekkaria (Djebel Djebessa). Il est également représenté par des argiles et du gypse, ces argiles sont taillées par des oueds sur des épaisseurs considérables. De même, cette formation est constituée de calcaires dolomitiques rouges en grands bancs et de dolomie en plaques noires et qui ont une énorme influence sur la salinité de l'aquifère.

6.1.2. Crétacé

- **L'Aptien** : gros bancs massifs et épais, de calcaires bréchiques à ciment dolomitique, de calcaires graveleux et bioclastiques à orbitolines et de mollusques. Parfois, on rencontre des couches intermédiaires de quelques couches de marnes violacées ou vertes rougeâtres. En outre, la présence de quelques lamellibranches, Moule internes des gastéropodes au niveau du djebel Bouroumane. Cette composition peut atteindre 450 mètres d'épaisseur.
- **L'Albien Vraconien** : Albien est marqué par l'alternance de bancs de calcaire brun, épais et très dur, et de bancs de calcaire rudiste. De plus, son épaisseur varie de 10 à 60 mètres avec la présence de marne noire. En outre, le Vraconien est bien caractérisé par des plaques de calcaire gris et de petits bancs. Ces bancs constituent le fond des pentes du Djebel Bouroumane.
- **Cénomaniens** : Au sommet, environ 300 mètres de marnes grises sont intercalées de calcaires contenant des lumachelles à huîtres, Echinodermes et Ammonites. Vers le bas, on rencontre des marnes grises, peu verdâtres sans intercalations calcaires. Il est présent à l'Est de Djebel !
- Au sommet, environ 300 mètres de marne grise sont entrecoupés de calcaires contenant des lumachelles à huîtres, des échinodermes et des ammonites. Bien que, Vers le bas des marnes grises, peu verdâtres sans intercalation de calcaire. Il est localisé à l'est du Djebel Djébessa.
- **Turonien Inférieur** : gros bancs de calcaires gris contenant des gastéropodes et de rares Madréporaires. De même, quelques niveaux de calcaires plus argileux en bancs moins épais, qui constituent des inocérames allongés.
- **Turonien supérieur** : des bancs de calcaires individualisées qui apparaissent au niveau de sa base, elles contiennent en outre des lumachelles et des foraminifères. D'autre part, elle est marquée par des intervalles fréquents, qui s'étendent jusqu'au Coniacien, avec une épaisseur de 50 m, elle est également représentée par une formation marneuse de 150 m d'épaisseur.
- **Coniacien-Santonien** : une série épaisse de 250 m constituée de marnes noires ou vertes. Maastrichtien Inférieur : les marnes grises qui le caractérisent sont souvent masquées par les éboulis, bien qu'au pied de la Draa Mzara au-dessus d'Ain Chabro, les marnes changent en marnes blanches et en calcaires. Cependant, le Maastrichtien inférieur, comprend des calcaires grisâtres massifs, contenant parfois de nombreuses traces d'inocérame, justifiant leur appartenance à ce sous-étage.
- **Maastrichtien Supérieur** : une série de marnes noires avec quelques intercalations calcaires à la base, et quelques passages de gypse ou pyrite. De même, les ammonites et les foraminifères caractérisent l'âge du Maastrichtien supérieur.

6.1.3. Paléocène

- **Paléocène Inférieur** : Il est constitué de 75 à 100 m de calcaires argileux gris, un peu crayeux, en petits bancs, alternant des marnes grises. La microfaune de globigérines caractérise le Danien.
- **Paléocène Moyen** : Une formation marneuse grise et homogène et au sommet, de rares bancs argilo-calcaires à faible teneur en phosphate apparaissent.
- **Paléocène Supérieur** : calcaire marneux blanc en petites berges souvent noduleux à silex. Ensuite, la présence de quelques intercalations de phosphate, notamment à la base. Cette formation est très visible à Dj Dyr et El Kouif et elle caractérise le Thanétien.

6.1.4. Eocène

- Yprésien- Lutétien Inférieur : des bancs de calcaires massifs, de gros silex, des huîtres et des Lumachelles, notamment à Djebel Dyr.

6.1. 5. Miocène

- Miocène Moyen (Langhien-Serravalien) : Une série régressive de sable, la série dans sa partie basale est littorale, elle devient deltaïque, puis fluviale au sommet, on rencontre une croûte ferrugineuse continentale.
- Miocène Supérieur (Turonien) : Une série de sable fluvial. Au sommet, cette formation sableuse devient argileuse avec quelques passages de gypse.

6.1.6. Pliocène

- Villafranchien : des argiles rouges et des conglomérats au pied du djebel Djebissa. Ces derniers recouvrent en grande partie le calcaire de l'éocène en bordure de la plaine près de Bekkaria. Les sédiments de ce stade sont le comblement des fossés et caractérisent le Pliocène supérieur.
- Matériel d'épandage ancien : des cailloutis et d'argile peu épais. Il est également représenté par des éboulis de cône de déjection de la destruction des calcaires maestrichtiens.

6.1.7. Quaternaire

- Alluvions anciennes : Au pied des massifs calcaires, il y a de grandes brèches dans les marnes. Leur épaisseur est de quelques mètres. Des anciennes alluvions composées d'argile et de gravier a été formé à partir de marnes de Sénonien ou de Cénomaniens. Il est probable que les galets proviennent des calcaires maestrichtiens. L'épaisseur de cette formation varie entre 300 - 400 m.
- Limons récents : Des dépôts alluvionnaires qui se sont développées dans la grande vallée de l'Oued El Kebir.

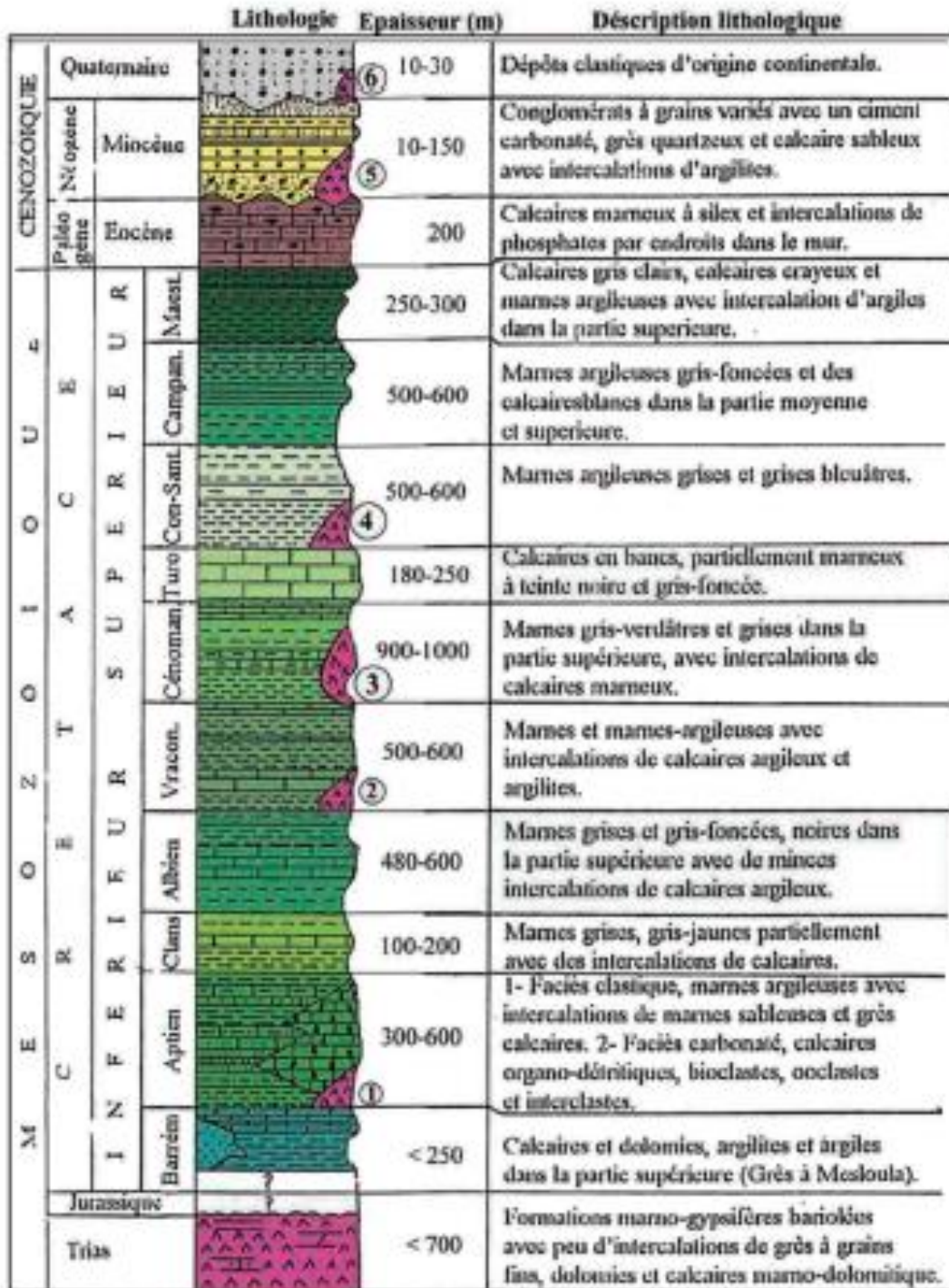


Figure 1.5 : Résumé schématique de la stratigraphie de la plaine de Tébessa (Duberdieu ,1956 ; Otmanie,1987 ; Bouzeenoune ,1993 ; Vila et al.,2000)

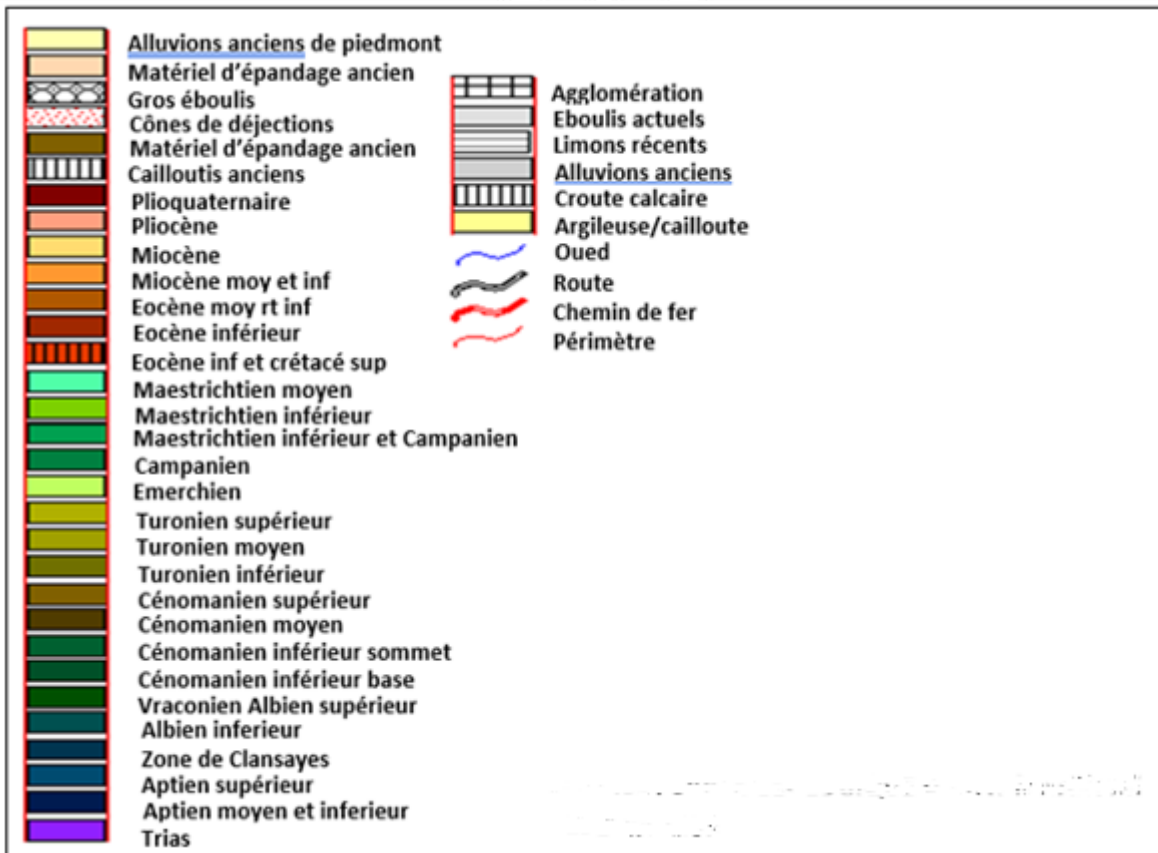
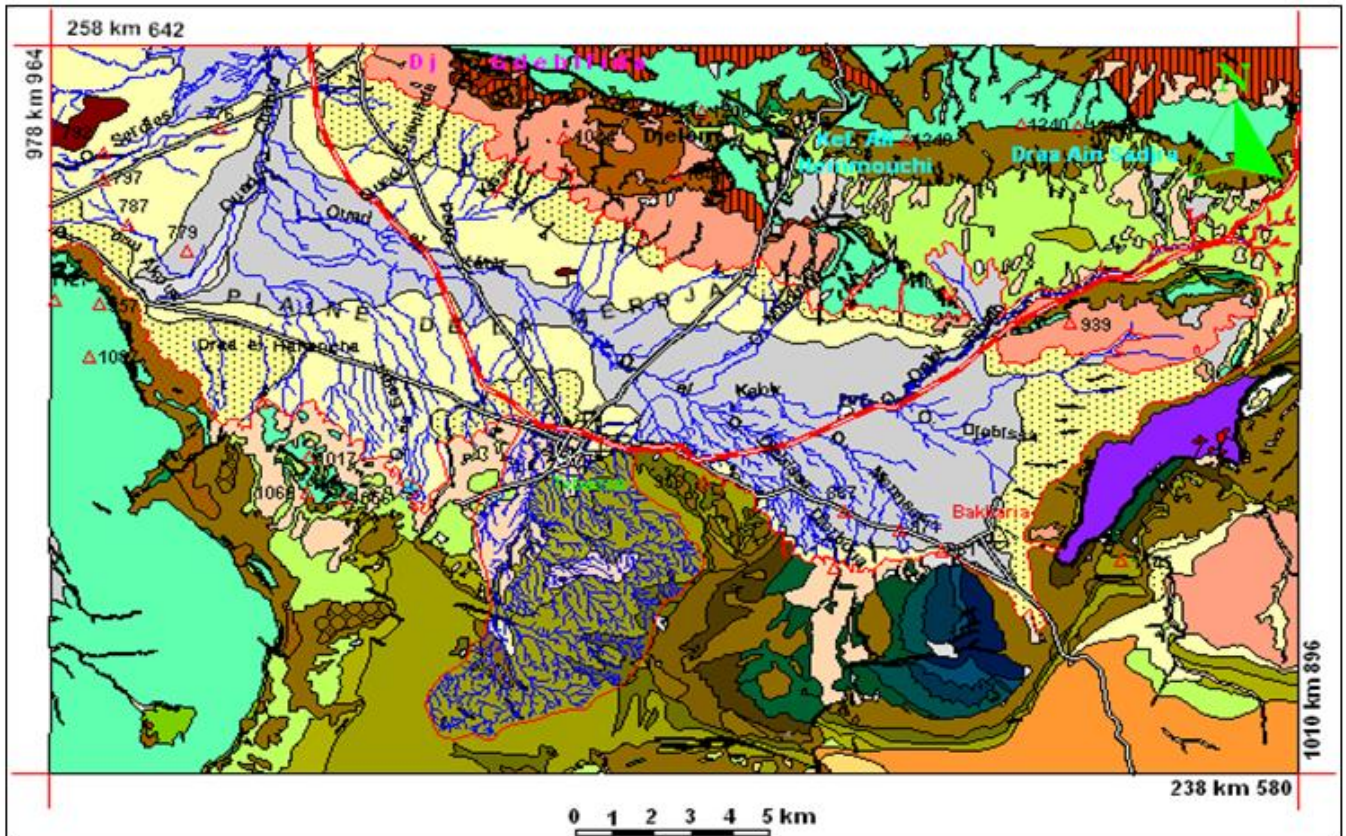


Figure 1.6: Géologie de la zone d'étude (source : Durozoy 1953)

2.2. 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. (Seghir Karima,2008).

En Algérie orientale, la phase majeure a été considérée comme étant comprise entre l'Eocène et le Miocène (Dubourdieu et Durozoy, 1950 ; Dubourdieu, 1956 ; Blès, 1969 ; Blès et Fleury, 1970 ; Vila, 1980 ; Kazi-Tani, 1986). Il en résulte un plissement de direction (NE-SW) dit direction atlasique.

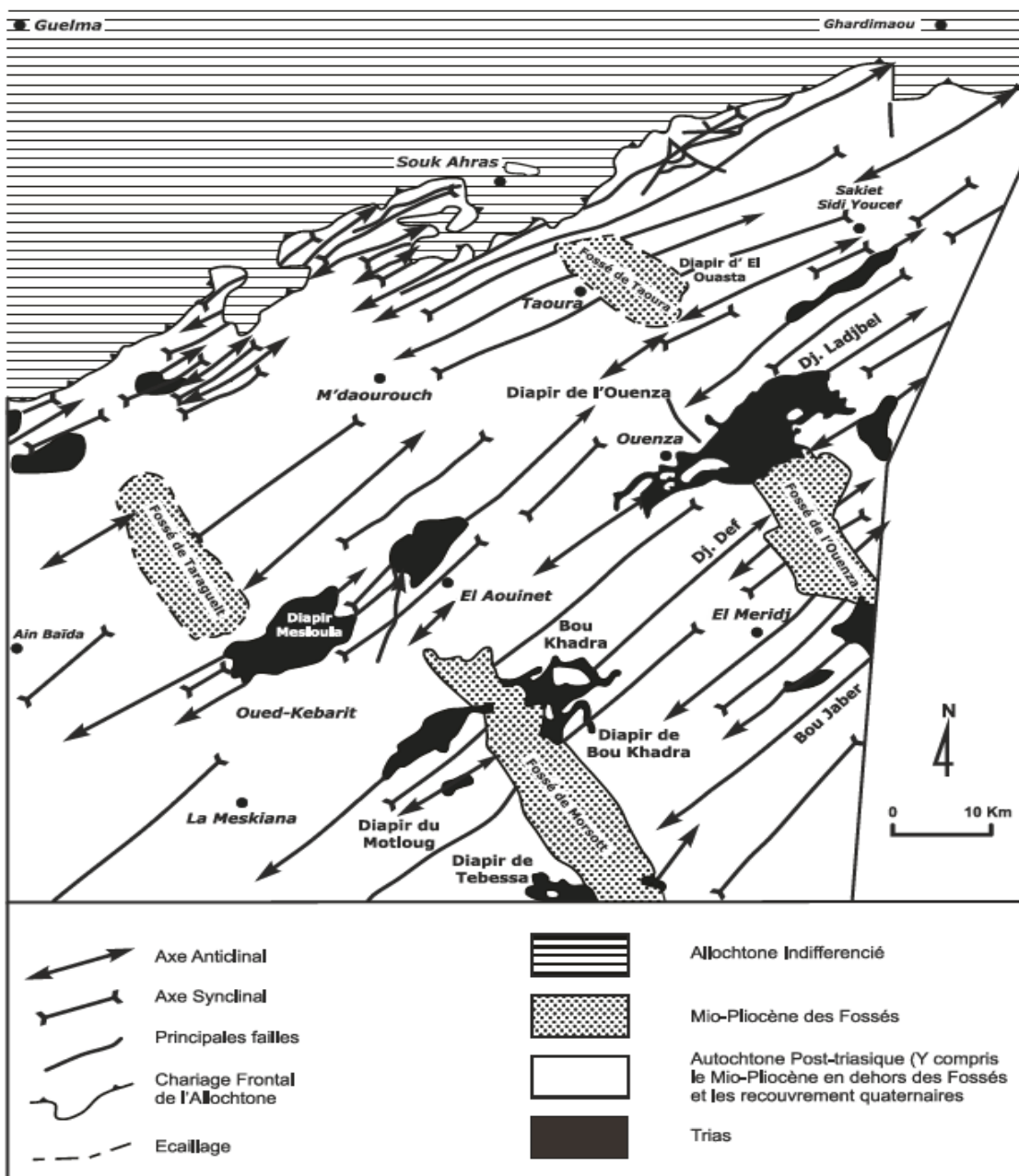


Figure 1.7: Esquisse tectonique de la région de Tébessa, (Vila, 1980)

2.3. Diapirisme

Dans cette zone le diapirisme est manifesté à des différentes étapes c'est-à-dire diapirisme polyphasé (Dubourdiou, 1956 ; Masse et Chikhi-Aouimeur, 1982; Perthuisot, 1992; Aoudjehane et al, 1992; Bouzenoune, 1993; Kowalski et Hamimed, 2000), les formations triasiques sont portées à la surface suite aux phases de distension albo-aptienne et tertiaire-quadernaire, entre lesquelles une phase compressive éocène (fini-lutétienne) s'est manifestée. Le déclenchement de phénomènes halocinétiques est lié à la distension en blocs basculés qui a caractérisé l'Atlas saharien oriental durant le crétacé, après fracturation du substratum anté-salifère (Vila, 1980). La mobilisation du matériau salifère est favorisée par son fluage et l'existence de zones fragiles dans la couverture post-salifère, elle provoque ainsi son ascension et sa migration vers le haut (Salmi-Laouar, 2004).

2.4. Les plissements

Dans le cadre régional, l'Atlas Saharien appartient à l'avant pays autochtone des confins Algéro-Tunisiens, définie par J.M. Vila en 1980. Il a subi des plissements importants qui ont affecté les assises crétacées, donnant une série d'anticlinaux et de synclinaux. (Chlih Fadha, 2019)

2.5. Fossés d'effondrement

L'effondrement dans toute la région étudiée n'est observable qu'après la phase atlasique fini-lutétienne qui se manifeste dans l'Atlas Saharien par des plis dirigés SW-NE (GHRIEB L. 2007).

En effet, la réactivation d'anciens accidents au cours de la phase tectonique distensive a donné naissance à des fossés d'effondrements orientés NW-SE 0 E-W (G.Dubourdiou 1956, Bouzenoune 1993) qui se sont manifestés après les grands plissements post-miocène (G.Dubordieu et G.Durozoy 1950). Selon Othnanine (1987) et Bouzenoune (1993). Le graben de tébessa –Morsott s'est ouvert par de petites failles orientés N140-160°E à la suite d'une phase tectonique distensive NE-SW postérieure Bismuth(1973).

2.5. Aperçu géomorphologique

La plaine de Tébessa correspond à un grand fossé d'effondrement qui recoupe orthogonalement des plis d'axes SW-NE. De grandes fractures, disloquant ces structures, ont donné à la région sa physionomie actuelle. La plaine est entourée de deux grands ensembles de masses calcaires, entrecoupés de dépressions.

2. 5.1. Les monts septentrionaux Le passage des hautes plaines de Mellegue aux monts de Tébessa se manifeste par le rétrécissement des plaines et par l'accentuation des unités géomorphologiques tel que le val perché de Dyr et celui de Bou Rbaia. La majorité des plis dans cette bordure septentrionale sont tranchés par des failles transversales NW-SE. (Ghrieb, 2007).

2.5.2. Les monts méridionaux Au sud, le fossé d'Ain Chabro tranche les monts de Nememcha, interrompant les formes du relief qui possédaient, auparavant, une certaine symétrie. Le relief devient de plus en plus complexe à l'Est de Djebel Doukkane ; la barrière orientée E-W s'incline vers le Nord-Est où elle ferme la plaine de Tébessa. Cette barrière se présente en petits massifs tels que Djebel Anoual, Djebel Azmor, Djebel Bouroumane et celui de Djebissa

3. Géophysique

Afin de comprendre le mécanisme de circulation des eaux souterraines dans les différents systèmes aquifères, des travaux ont été réalisés dans la zone d'étude, tels que des sections hydrologiques, des cartes piézométriques et prospections géophysiques. Des cartes piézométriques et prospections géophysiques effectuées dans la région ont été effectuées par le C.G.G (compagnie générale de géophysique (1970) et (1975) et SPOJXPORT ((1978).... Ainsi, 681 sondages électriques ont été forés.

Premièrement, la société CGG a réalisé 242 sur la ligne AB=1000 m et 105 SE sur la ligne AB=3000 m. Deuxièmement, la même société en 1975 a réinterprété les résultats de 1970. Enfin, l'étude STROJEXPORT de 1978 a réalisé 80 SE sur la ligne AB=6000 m, 242 SE sur la ligne AB=2000 m et enfin 12 SE sur la ligne AB=1000 m.

3.2. Implantation des profils

Les profils ont été orientés SW – NE, suivant lesquels les sondages électriques ont été réalisés, comme l'illustre la carte ci-dessous.

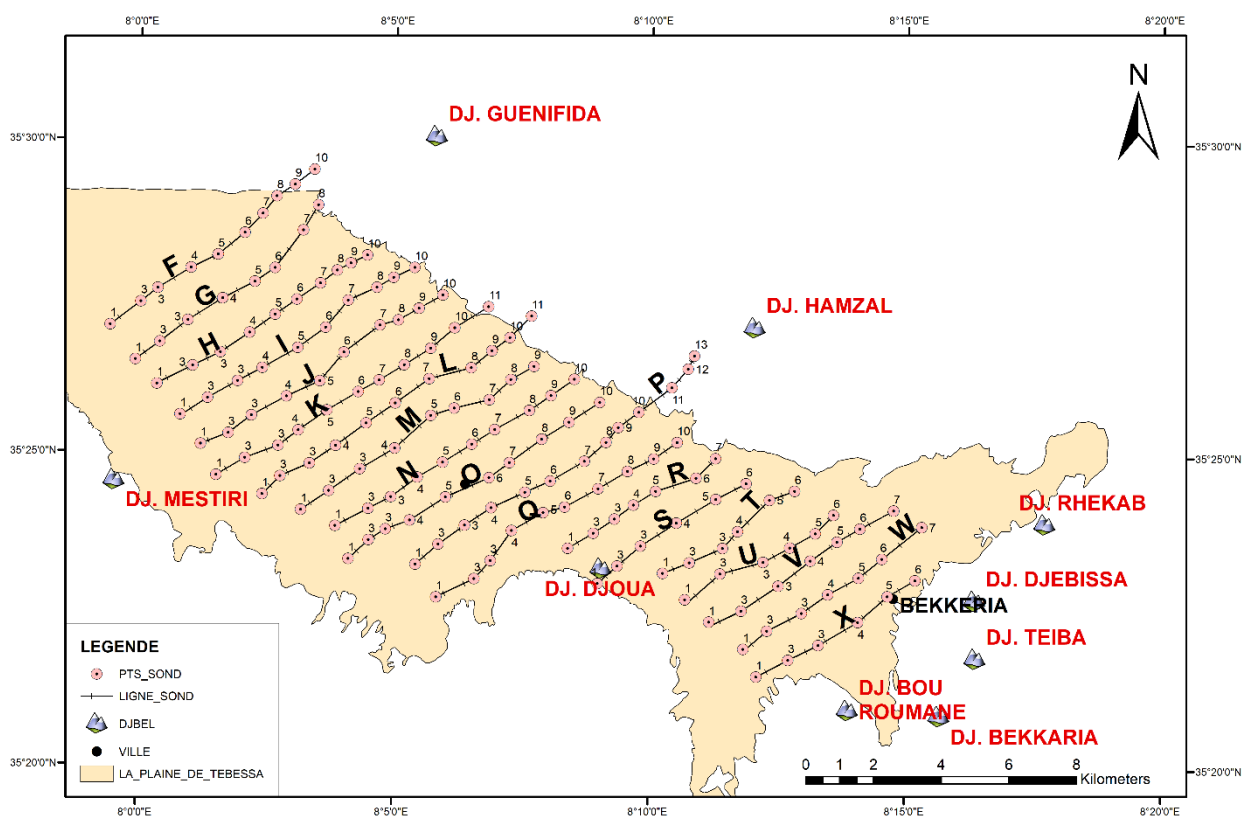


Figure 1.8: Carte d'implantation des sondages électrique (CGG, 1975).

3.3. Échelle de résistivité

Dans le but d'obtenir des valeurs de résistivités, nous avons utilisé les résultats de quelques forages ainsi les formations affleurantes. En effet, ces résistivités sont fréquemment des valeurs moyennes, ceci est dû à la complexité des formations qui ne permet pas d'obtenir une seule valeur de la résistivité pour une même formation. Mais aussi, le problème persiste encore pour les matériaux de remplissage parce qu'ils sont constitués de niveau argileux, sableux à graviers (Kachi S.,2010).

Tableau 1 Echelle de résistivité des formations géologiques (Djabassi ,2019)

Étage géologique	Formations Géologiques	Résistivité (ohm.m)
Quaternaire	- Limons salés du centre de la plaine	1 - 3
	- Limons et argiles	5 - 10
	- Alluvions argilo-sableuses	15 - 20
	- Alluvions sableuses	25 - 50
	- Éboulis secs	300 - 400
	- Éboulis humides	70 - 100
Plio-quaternaire	- Marnes à gypse du Villafranchien	0.5 - 2
	- Alluvions caillouteuses du Pliocène	30 - 50
	- Alluvions argileuses du Pliocène	3 - 5
Éocène	- Calcaire blanc à silex Éocène moyen	100-200
Crétacé	- Marnes noires du Dano-Montien	2 - 8
	- Marnes noires du Dano-Montien	100 - 1000
	- Calcaire Maestrichtien	5 - 10
	- Marnes et Calcaire marneux Emscheriens	50 - 1000
	- Calcaire Turonien	5 - 25
	- Marnes et Marno-calcaire Cénomaniens	150 - 200
	- Calcaire-Dolomie Aptien	variable suivant le faciès
	- Trias	

3.4. Interprétation des résultats

3.4.1. Résultat de la prospection géophysique

Afin de relier la géophysique à la géologie, quelques profils, réalisés lors de la prospection électrique, ont été utilisés. Chacun de ces profils montre la distribution spatiale des résistivités, regroupées en trois horizons P1, P2 et P3, qui se succèdent de manière irrégulière. Chacun de ces horizons se caractérise par sa résistivité et sa position. Sur la base de l'extension de ces horizons et de leur répartition, trois zones peuvent être distinguées comme suit :

- Tébessa : Les valeurs de résistivité oscillent entre 2 Ω . m à 2 0 Ω . m, elles sont considérées comme très faibles en raison de la présence de certains sédiments fins d'origine évaporitiques et aussi de quelques niveaux argileux. En revanche, dans certaines régions, la résistivité devient très élevée, et cette augmentation peut s'expliquer par l'existence de gravier, et une augmentation de résistivité est également observée près de la limite nord.

- *Ain Chabro* : La résistivité de cette zone varie de 20 Ω. m à 100 Ω. m. Alors que l'épaisseur de la zone perméable est mince au centre (125m) et très épaisse aux bords (275m) (ZIREG S.,2010), en particulier celle du bord sud, ce qui peut s'expliquer par la présence de gravier calcaire et de gravier avec quelques passages argileux.
- *Bekkaria* : Vu la présence de gravier cailloutis calcaires, sables (Profil X et M) et quelques traces d'argile (Profil Q et V), la résistivité est plus au moins faible, elle varie entre 10 Ω. m et 50 Ω. m.

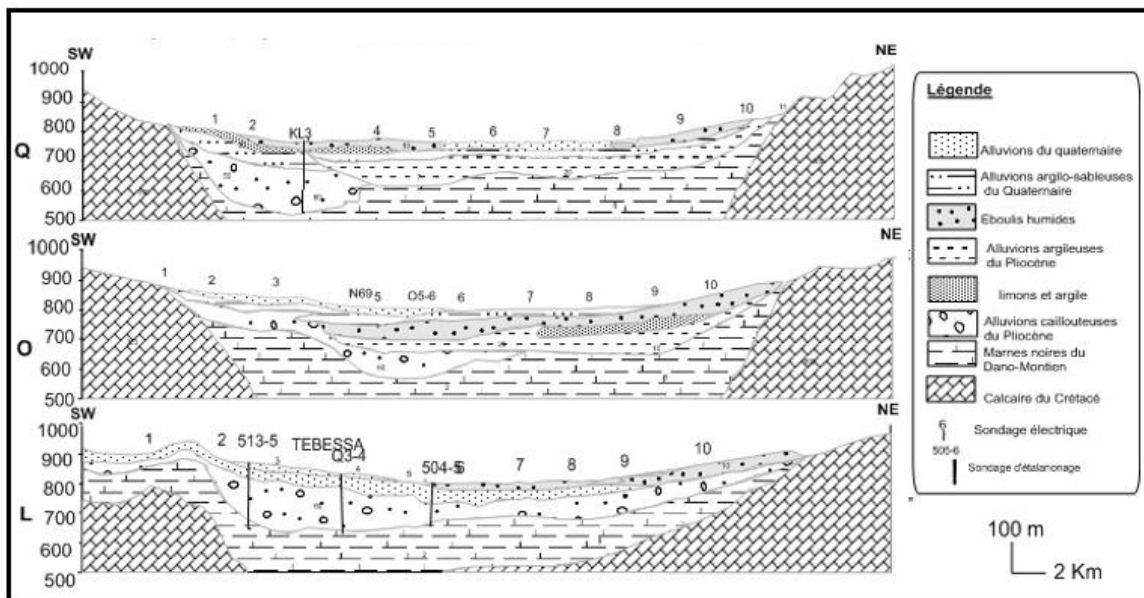


Figure 1.9 : Coupe géo électrique (Q, O, L) de la zone de Tébessa (CGG 1975).

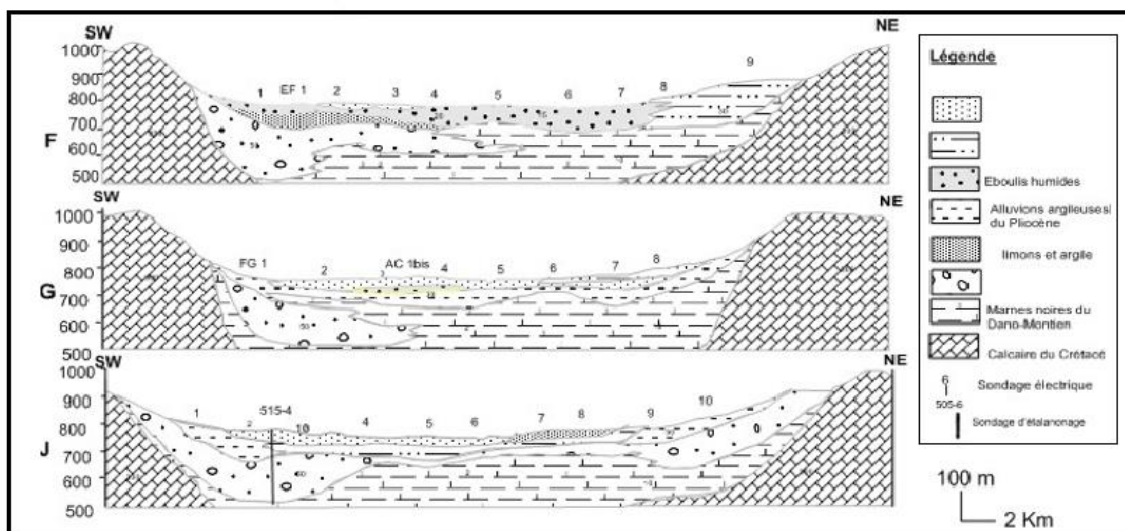


Figure 1. 10. Coupe géo électrique (U, V, X) de la zone de Ain Chabro (CGG 1975).

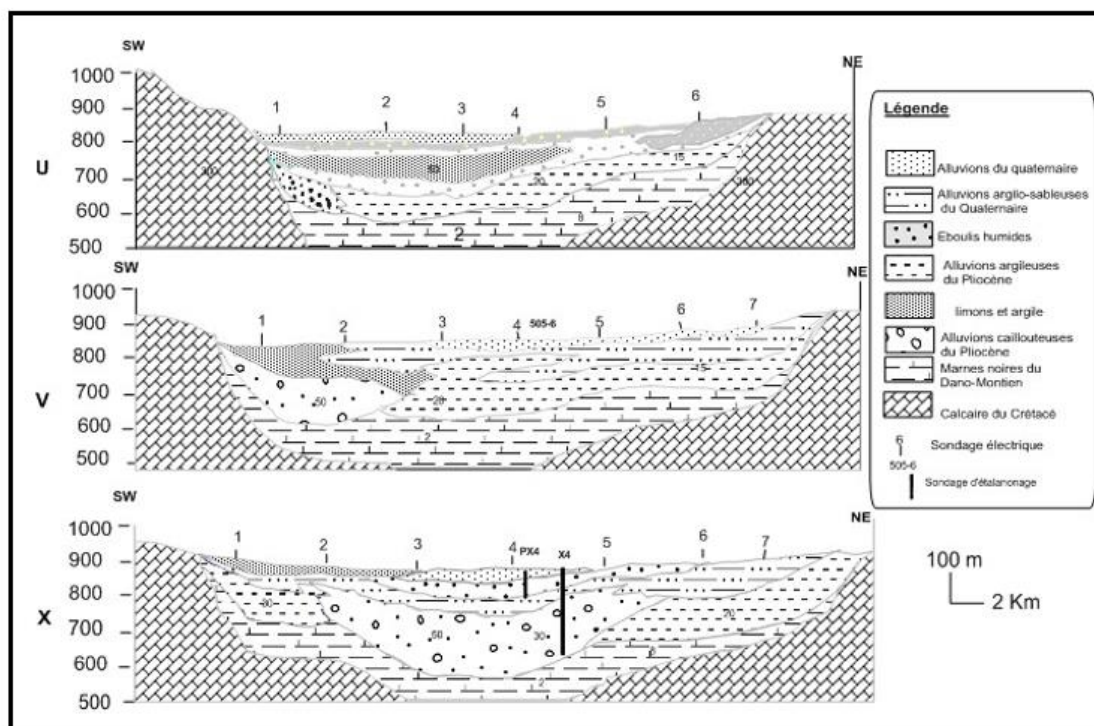


Figure 1.11. Coupe géo électrique (U, V, X) de la zone de Bekkaria (CGG 1975).

En effet, grâce à ces travaux géophysiques que les formations aquifères de la plaine de Tébessa ont pu être identifiées et même des forages ont été réalisés. Ainsi l'exploitation de ces formations alluviales de la zone (Zereg ,2019).En conséquence, le système aquifère de la plaine de Tébessa est formé essentiellement par un manteau alluvial d'âge quaternaire (Djabri, 1987 ; Rouabhia, 2004-2009) composé d'une alternance d'argile et de sables ou de cailloutis calcaires d'une épaisseur qui varie entre 10 et 400 m encaissé dans un bassin d'effondrement d'âge plio-quaternaire, ouverte vers le Nord-Ouest, les calcaires Turoniens, Maestrichtiens et Campaniens constituant les reliefs en bordures Nord Est et Sud de la plaine, forment également d'importants Aquifères.

4. Etude Hydrogéologique

L'hydrogéologie est un outil de base pour la connaissance des systèmes aquifères. En effet elle accorde un intérêt particulier aux nappes d'eau souterraines. En plus, elle utilise des moyens et des méthodes pour une meilleure compréhension de leur comportement, dont celui hydrodynamique ; transmissivité, perméabilité, sens d'écoulement, conditions aux limites,... etc. ,la fonction capacitive du réservoir, la distribution spatiale des charges et des potentiels hydrauliques, relations existant entre les différents systèmes .

4.1. Structure du système

L'étude de la structure géologique et hydrogéologique du système aquifère de Tébessa a permis de mettre en évidence l'existence de deux horizons qui méritent d'être décrits :

- L'un, contenu dans des formations alluviales (Sables, Cailloutis et Argiles remaniées...), sur une importante étendue, mais d'une épaisseur variable.
- L'autre, dans des formations calcaires, se rencontre surtout aux bordures, alors qu'au centre il paraît qu'il n'est pas encore atteint par les forages.

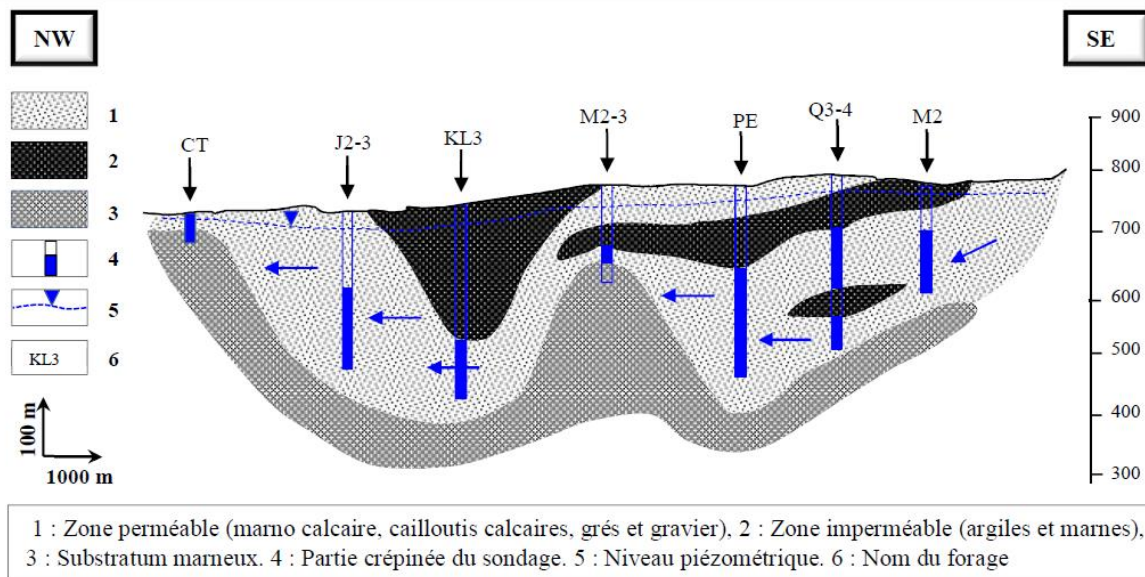


Figure 1.12: Coupe hydrogéologique à travers la plaine de Aïn Chabro. In Rouabhia et al. 2009

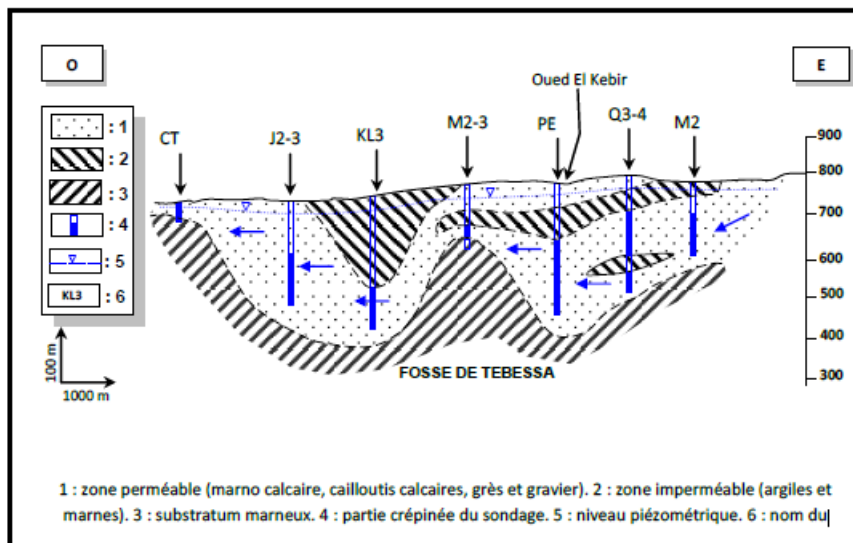


Figure 1.13 : Coupes hydrogéologiques à travers la plaine de Tébessa selon les

4.2. Piézométrie

L'étude de la piézométrie et de la cartographie qui en résulte est d'une importance capitale connaissance de la morphologie des systèmes aquifères, de leurs conditions aux limites de leur comportement hydrodynamique... etc. Le tracé de ces cartes donne une idée de la direction de

l'écoulement des eaux souterraines, de l'alimentation en eau souterraine, des liens possibles entre les différentes unités et de l'évolution temporelle de la surface piézométrique.

4.2.1. Conditions aux limites

La carte des conditions aux limites est élaboré afin de mieux comprendre le fonctionnement hydraulique, cette dernière est la synthèse de quelques travaux (Djabri, 1987; Rouabhia, 2004-2009 ; Zereg, 2010 ; Lakhneche, 2012 ; Belmiloud, 2010 ; Gherieb, 2011), qui explique les conditions aux limites définissant le système aquifère de la région d'étude. Le sens d'écoulement de l'eau souterraine suit celui d'Oued el-Kébir sur un axe Sud-Est Nord- Ouest, l'aquifère est caractérisée par une limite à flux entrant à l'Est, au Nord et au Sud-Est. Une limite à flux sortant est située à l'Ouest flux sortant est située à l'Ouest. Au sud, la limite est à flux entrant qui constitue la limite la plus importante en matière de recharge de la nappe, car dans cette partie l'aquifère est en contact direct avec les formations carbonatées qui représente aussi un autre système aquifère voisin. (Zereg,2019).

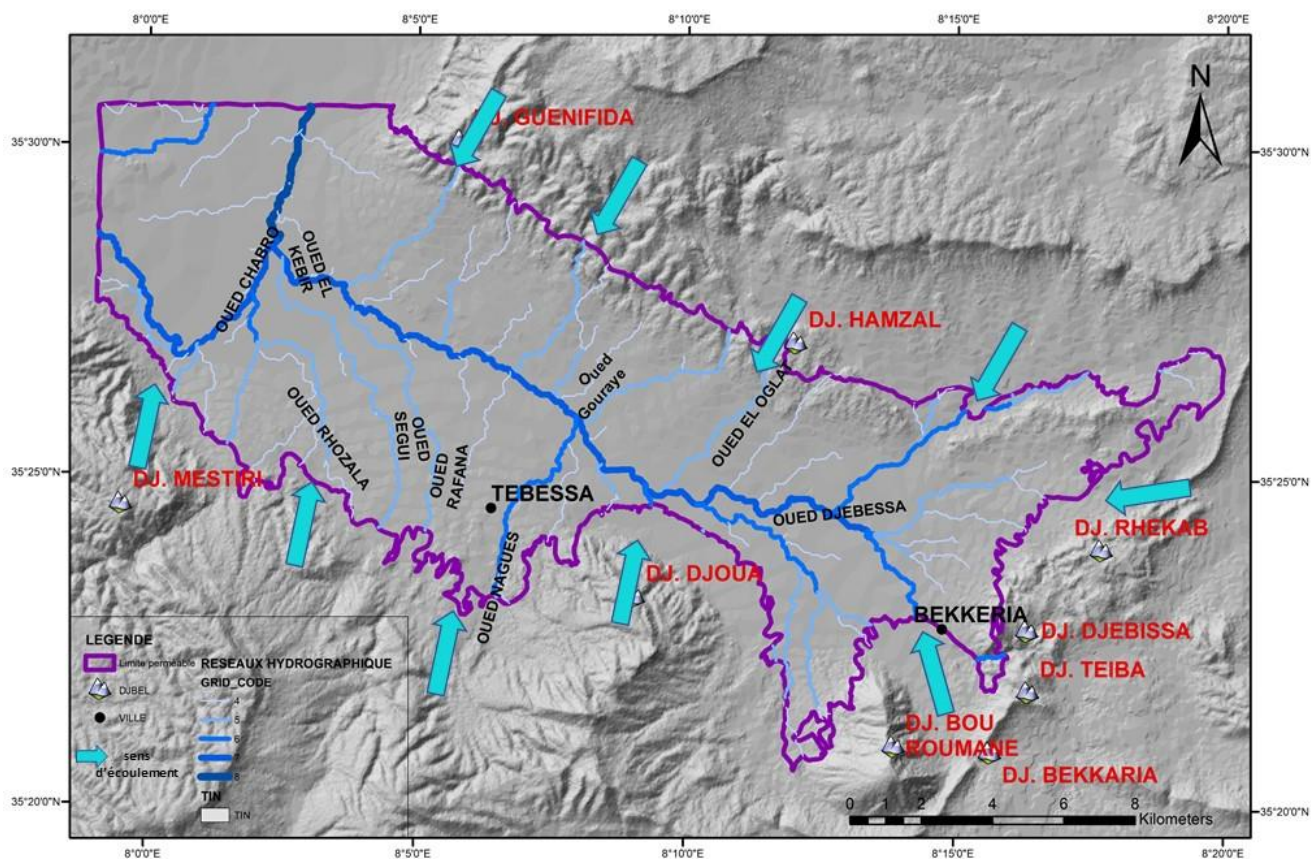


Figure 1.14 : Carte des conditions aux limites

4.2.2. Carte piézométrique

La carte piézométrique (Figure 1.15) révèle trois secteurs différents. En premier lieu, la zone de Bekkaria où l'espacement des courbes est régulier, avec des lignes de courant de direction est-ouest. L'alimentation de cette zone se fait par les bordures de la plaine. En second lieu, la

zone de Tébessa, une morphologie des courbes assez régulière, d'où l'influence du pompage sur les puits et les forages et également l'alimentation de la nappe est assurée par les apports des bordures. Tandis que à l'aval dans le secteur Tébessa Hammamet, sur l'axe de Oued-El-Kébir ; un rabattement très important qui se distingue dans la zone qui est exploitée par les forages alimentant la ville de Tébessa en eau potable et qui sont en pompage continu, provoquant ainsi un gradient important qui génère une menace de transmission des polluants vers la nappe.

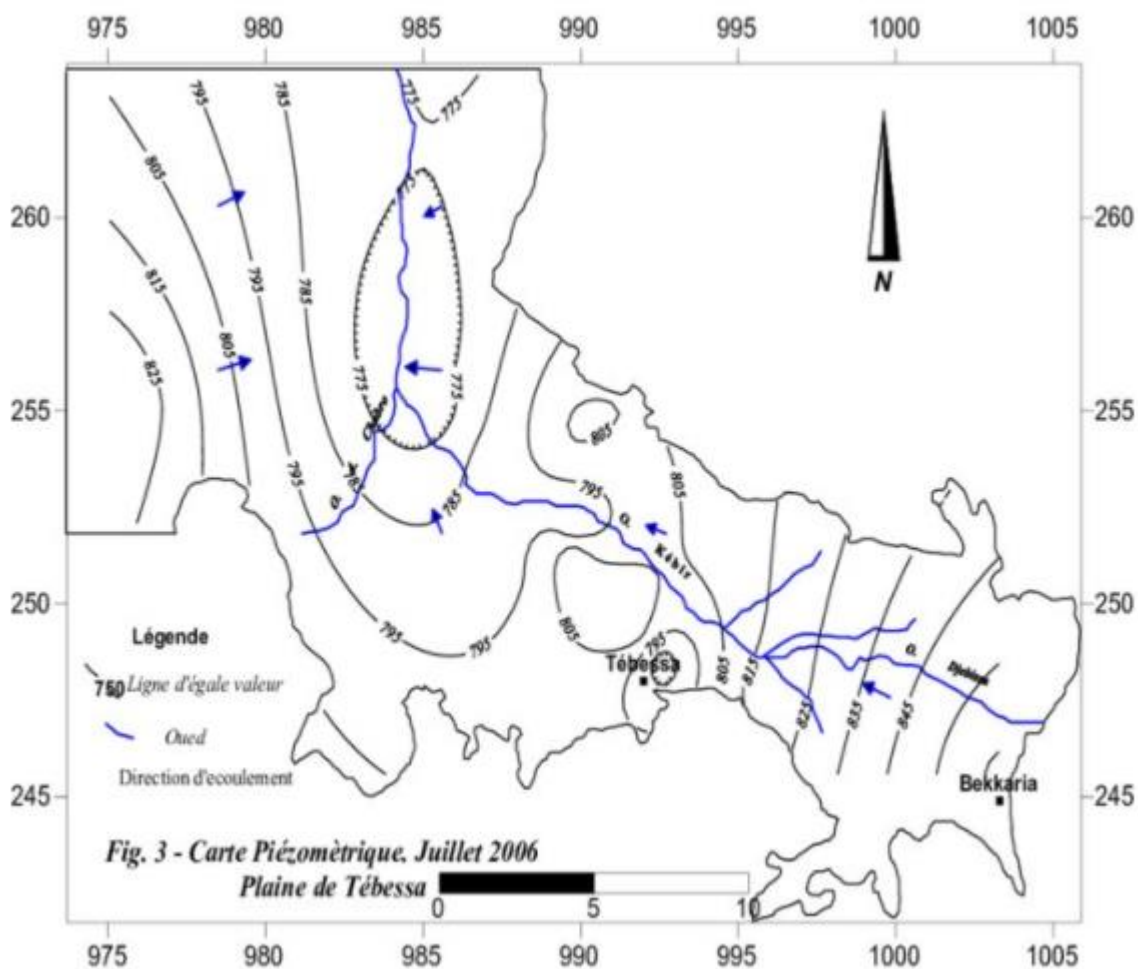


Figure :1.15 : Carte piézométrique (Abdeslam I. & al.,2019)

Conclusion

Située aux confins Algéro-tunisiens, la région de Tébessa est essentiellement à vocation agricole. En outre, la plaine d'El Merdja, ses eaux drainent Oued El Kebir et ses affluents tels que Oued Serdiès, Oued Chabro et Oued Djebissa .

Le relief de la plaine varie de 1000 à 1712 m d'altitude, tandis que l'altitude de la plaine est d'environ 850 m.

L'environnement géologique de Tébessa (Durozoy,1956), consiste en des formations autochtones, plissées et fracturées. Le mésozoïque est caractérisé par un Trias diapirique (argiles gypsifères, calcaires, dolomies) et d'épaisses séries crétacées débutant à l'Aptien. Le Crétacé inférieur est composé de calcaires récifaux à intercalations d'argiles, mais surtout marneuses, le Crétacé supérieur comprend des calcaires intercalés de marnes. Au cénozoïque, le Paléocène inférieur est composé de calcaires argileux ; le Paléocène moyen et supérieur sont constitués de marnes et de calcaires argileux. L'Eocène est essentiellement calcaire.

D'après les travaux d'auteurs (Villa, 1980) et (Ble,1960) et (Kawalski, 1996), cette région, en marge de la chaîne des Maghrébides, a été affectée par deux types de plissements atlasiques, NE-SW et NW-SE, d'âges postérieur au Lutécien et antérieur au Miocène marin transgressif.

Au cours du Plio-quadernaire, la tectonique de distension a généré plusieurs effondrements comblés par les dépôts Plio-quadernaires. Le Plio-villafranchien comprend des conglomérats de cailloutis à matrice argileuse, des sables argileux et des graviers quartzeux

L'étude géophysique nous a permet de voir l'existence de différentes formations aquifères où affleurent les formations alluvionnaires (graviers, galets, sables, qui s'intercalent avec des argiles) d'âge quadernaire qui constituent le matériel de remplissage du bassin. La carte des conditions aux limites révèle que le sens d'écoulement des eaux souterraines suit le sens d'écoulement du cours d'eau, les résistivités des formations varient de 20 à 100 Ω m. Quant au premier niveau supposé être aquifère et qui correspond à la nappe phréatique, il est constitué de matériel à porosité d'interstice se déposant avec quelques discontinuités et des épaisseurs variables. Les résistivités varient de 5 à 100 Ω m. En tenant compte de la nature du matériel de remplissage et sa relation avec la répartition de la résistivité, la zone étudiée est caractérisée par une hétérogénéité du matériel aquifère.

L'étude de la piézométrie dans le temps et dans l'espace a révélé que cet aquifère est le principal réservoir de l'AEP de la plaine de la Merdja et que le niveau piézométrique est instable en raison d'un pompage excessif et continu.

CHAPITRE 2

HYDROCLIMATOLOGIE

1. Introduction

Les caractéristiques climatiques et spécialement les précipitations qui facilite l'augmentation de la recharge des nappes d'eau souterraine et donc la réserve, pour cela il est obligatoire de connaître leur évolution dans le temps et l'espace. L'objectif principal de ce chapitre est d'établir un bilan hydrique pour une période donnée, dont les principales composantes sont les précipitations et la température.

2. Caractéristiques climatiques

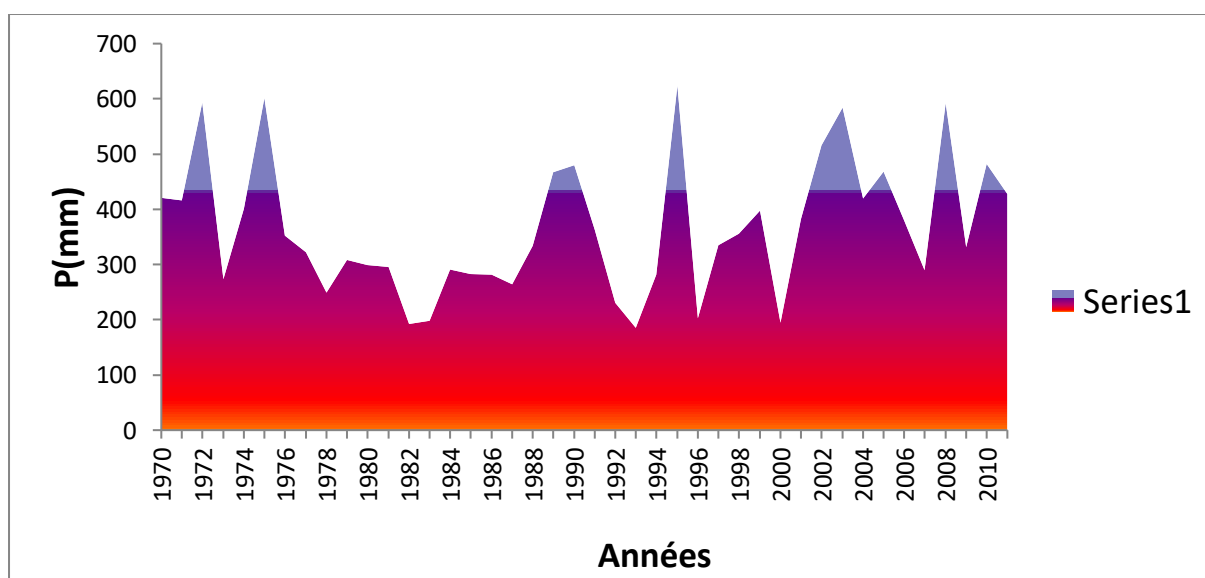
L'estimation des précipitations moyennes (annuelle et mensuelle) est faite à partir de la station pluviométrique de Tébessa (120301).

Tableau 2 Coordonnées du poste pluviométrique de Tébessa

Nom de la station	Code	Coordonnées			Nombre d'années observées
		X	Y	Z	
TEBESSA	12 03 01	991.9	247.2	890.0	42

2.1. Pluie moyenne annuelle

Les précipitations annuelles moyennes représentatives de l'ensemble des sous-bassins versants étudiés sont déterminées à partir des observations enregistrées à la station pluviométrique de Tébessa. Les données traitées appartiennent à une période de 42 ans (1970/71 à 2010/11).



4Figure 2.1: Variation des précipitations interannuelle de la station de Tébessa

2.2. Pluie moyenne mensuelle

Tableau 3 Variation des précipitations mensuelle de la station de Tébessa

mois	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Jui.t	Aout
P(mm)	40.14	3.13	29.41	27.05	39.71	26.62	40.79	30.01	39.96	27.07	13.82	23.84

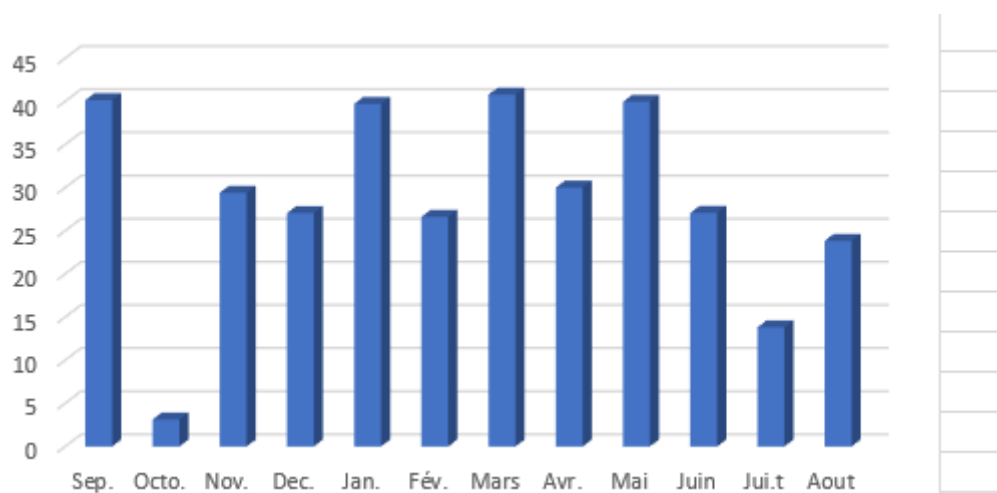


Figure 2.2.: Variation des précipitations mensuelle de la station de Tébessa

2.3. Type de climat

Avec :

Q : l'indice climatique d'Emberger ;

P : précipitation moyenne annuelle (mm) ;

M : moyenne des maximal du mois le plus chaud (degrés/kelvin) ;

m : moyenne des minimal du mois le plus froid (degrés/kelvin).

$$Q = 36,76$$

Pour la station de Tébessa sur une période de 42 ans (1970/2011), Q est évalué à 35.76, d'après le dit diagramme on peut dire que le climat de Tébessa est le climat semi-aride.

La

2.3.1.

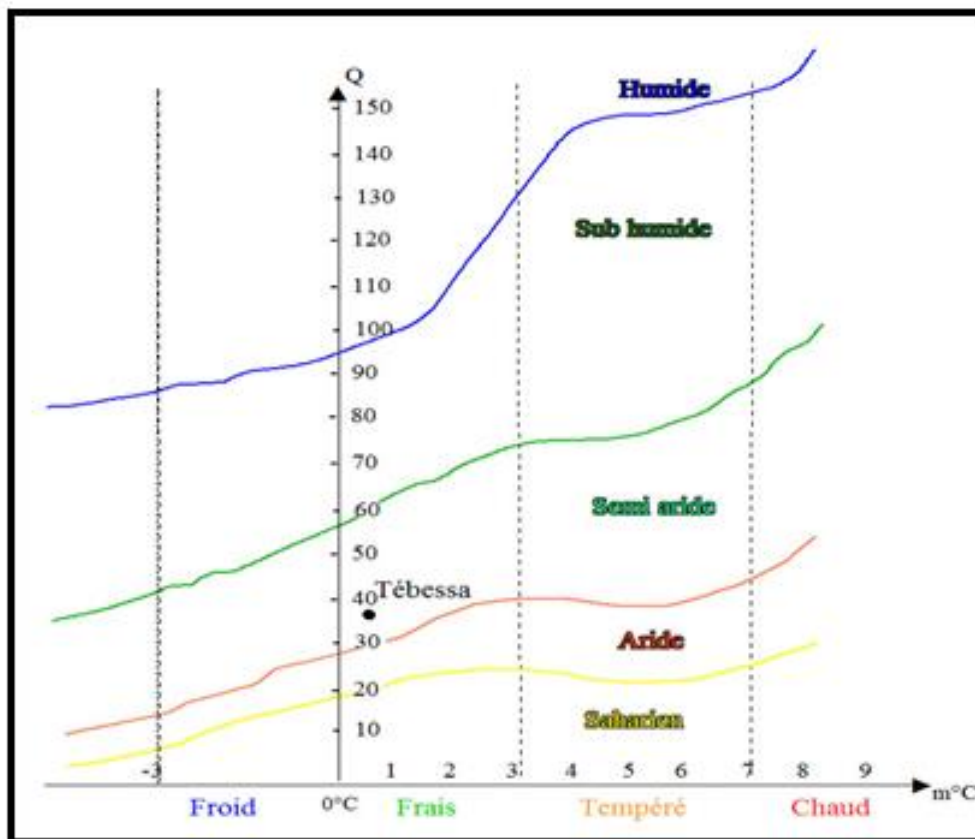


Figure 2.3: Climagramme d'EMBERGER

température

La température est l'un des principaux facteurs conditionnant le partage des eaux météoriques. Elle conditionne l'enneigement, le gel, la fonte des neiges et la condensation. Aussi, elle influe sur l'évaporation ainsi que sur la vapeur d'eau atmosphérique qui alimente les précipitations. Le mois le plus chaud est le mois de Juillet avec une température moyenne mensuelle de 25,5°c et le mois le plus froid est le mois de Janvier avec une température moyenne mensuelle de 5 ,1°c et une température moyenne annuelle est égale à 15.4 °c.

Tableau 4 Répartition mensuelle de La température moyenne annuelle.

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai.	Jiu.	Juil.	Aout.	Année
Tc° min	9.85	5.65	-0.5	-2.45	-3.45	-2.85	-1.2	0.8	4.75	9.75	13.35	13.45	4
Tc° max	35.5	30	24.35	19.8	19.6	20.9	24.3	28.1	33.6	38	39	39.33	29.25
Tc°	21.3	16.2	10.9	7.6	6.3	7.9	9.9	12.8	17.8	22.8	26.2	25.2	15.4

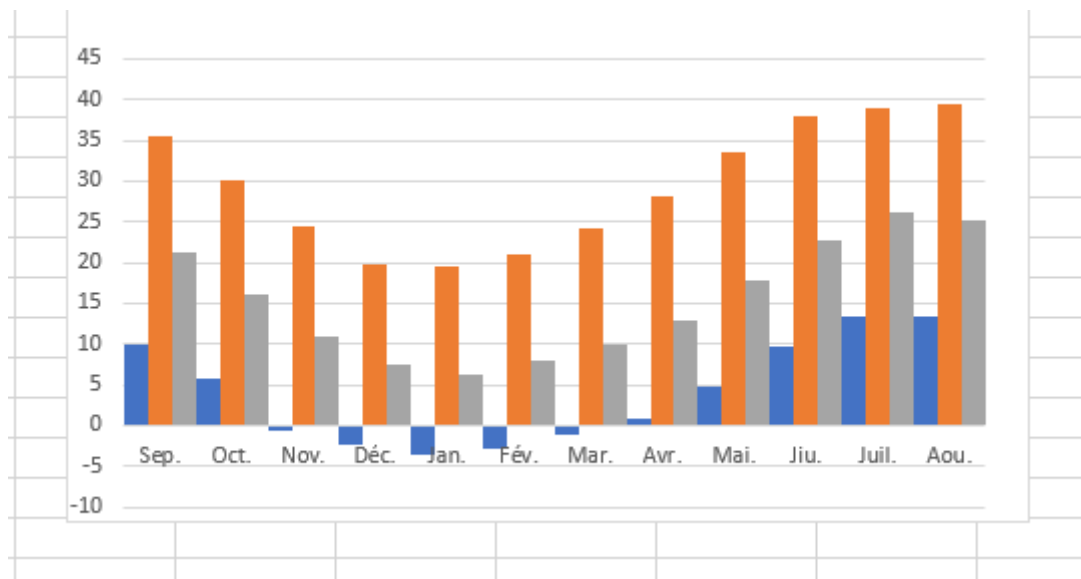


Figure 2.4 : variation mensuelle de la température.

2.3.2. Humidité relative

C'est le rapport de la tension de vapeur réelle (observée) « e » sur la tension de vapeur saturante « es » de la même température, exprime en pourcentage (%).

$$\varepsilon = \frac{e}{e_s} 100$$

L'humidité relative est à l'origine des précipitations, elle régit l'évaporation de l'eau sur la végétation, le sol ou les nappes d'eau.

Tableau 5 répartition mensuelle de l'humidité relative moyenne annuelle

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.	Avril.	Mai.	Juin.	Juil.	Aout.	Année
H (%)	56.9	62.9	70	71.4	71.1	67.9	66.3	61.65	57.97	48.4	40.1	46.2	60.1

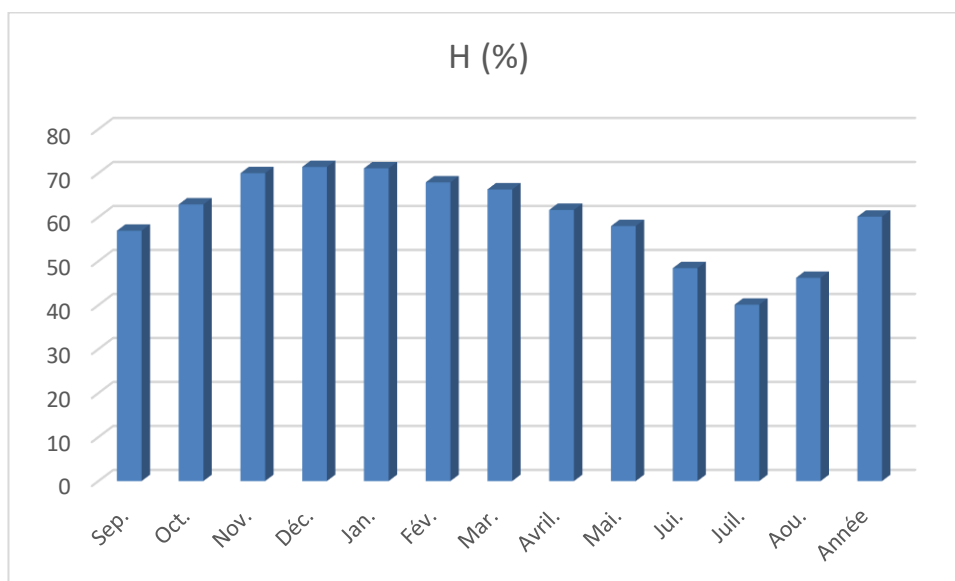


Figure 2.5 : Répartition mensuelle de l'humidité relative.

2.3.3. Le vent

Les vents locaux ont parfois plus d'importance que les vents généraux. Les vents d'altitude sont modifiés dans leurs directions et intensités du fait du relief, Les vents dans la région se caractérisent par une direction prédominante le l'oued et du nord - ouest.

Les vitesses moyennes du vent dans la région ne dépassent pas 3,2 m/s, et les vitesses moyennes les plus petites sont égales à 2,2 m/s. Les mois d'octobre et novembre s'annoncent comme les mois les plus calmes, tandis que les mois de Mars et Avril sont les mois les plus exposés au vent. Les vents chauds et secs provoquent un abaissement simultané de l' humidité atmosphérique et une augmentation brutale de la température ce qui indique une augmentation de l' évapotranspiration.

Tableau 6 Répartition mensuelle de la vitesse de vent annuelle

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Jui.	Juil.	Août	Année
V (m /s)	2.7	2.5	2.8	3.0	2.7	3.1	3.8	3.9	3.7	3.2	3.2	2.6	3.1

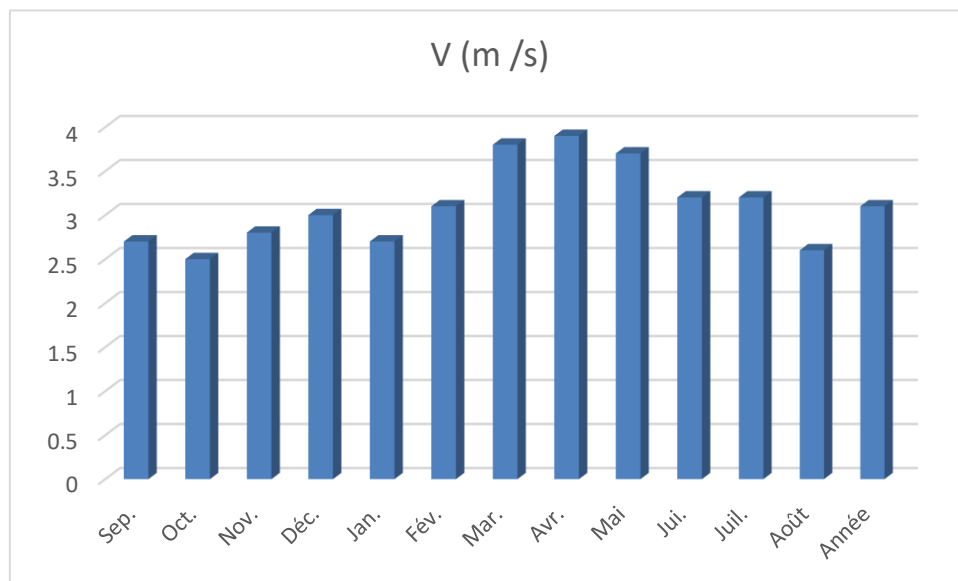


Figure 2.6 : Vitesse moyenne mensuelle du vent (m/s)

2.3.4. Détermination des caractéristiques climatiques :

La caractérisation globale du climat doit être exprimée par des indices caractéristiques faisant appel à l'humidité et à la température.

2.3.4.1. Les indices climatiques :

- L'indice d'aridité de Martonne :

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

Cet indice prend en compte les précipitations annuelles P et les températures annuelles moyennes T .

La station de *Tébessa* : $I = 15.90$.

Pour *Tébessa* enregistre la valeur $15,90$ spécifique à un climat de type *semi-aride*

P : précipitations annuelles moyennes (mm).

T : températures annuelles (°C).

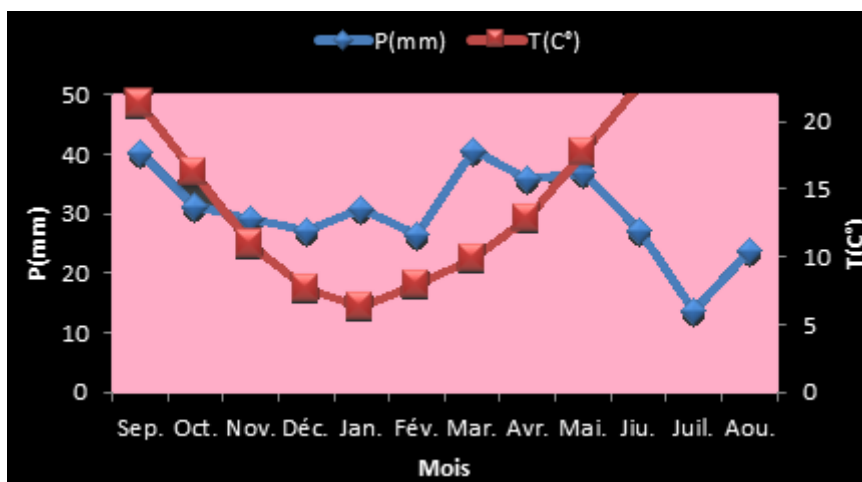


Figure 2.7 : Diagramme Ambrothermique (station Tébessa).

la superposition de la courbe de précipitation et de la température mensuelle dans un même graphe, nous conduit à l'établissement d'un diagramme qu'on l'appelle ombrothermique,

Le diagramme relatif à la station de Tébessa met en évidence deux périodes bien distinctes :

- La première humide débute au mois de novembre et se termine au mois de mai, durant cette période la pluviosité connaît deux épisodes pluvieux, la première au mois de novembre et la second commence au mois de Février et se termine au mois de mars.
- La deuxième est sèche et s'étale du mois de juin Jusqu'au mois d'Octobre durant cette dernière la région de Tébessa reçoit des précipitations orageuses, ce qui la diffère des régions littorales.

2.4. Le bilan climatique de la zone d'étude

2.4.1. Evapotranspiration et déficit en écoulement

2.4.1.1. Estimation de l'ETP

Le calcul de l'évapotranspiration a été abordé par plusieurs auteurs à l'aide des formules empiriques, ces formules permettent de calculer les moyennes annuelles du pouvoir évaporant à partir des données météorologiques. Nous essayerons d'utiliser celles qui nous paraissent les mieux adoptées.

Formule de Turc

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

$$ETP = \frac{t}{t + 15} (I_g + 50)k$$

ETP : Evapotranspiration potentielle mensuelle (mm) ;

t : Température moyenne mensuelle de l'air (C°);

Ig : Radiation globale moyenne mensuelle reçue au sol (calorie /cm²/jour) ;

k : Un coefficient égal à 1 si l'humidité relative hr est supérieure à 50% si non

$$k = 1 + \frac{50-hr}{70}$$

Si la radiation globale Ig n'est pas mesurée, on pourra l'évaluer à partir de la durée d'insolation h par la formule :

$$\left[0.18 + 0.62 \frac{h}{H}\right] \quad I_g = I_g A$$

IgA : radiation globale théorique (cal/cm²/jour)

H : durée théorique des jours du mois

Tableau 7 les résultats de L'ETP selon la formule de TURK

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan .	Fév.	Mar.	Av.	Mai	juin.	Juil.	Aout.
T C°	21.3	16.2	10.9	7.6	6.3	7.9	9.9	12.8	17.8	22.8	26.2	25.2
Iga	733.9	583.9	469.55	421.1	557.2	703.1	852.8	966.3	1013.5	981.7	879.42	879.42
H	379.2	347.3	321.42	308.5	311.9	330.8	330.2	392.1	418.00	430.98	427.53	408.58
Ig	439,0	294,5	248,18	215,9	237,8	280,9	362,7	457,6	549,75	623,47	576,89	648,04
K	1.03	0.98	0.95	0.9	0.87	0.86	1.03	1.03	1.21	1.21	1.45	1.1
ETP	93,68	54 ,8	37,06	37,06	37,32	52,31	79,87	117,4	229,24	228,56	247,62	147,89
Total ETP : 1478,5 mm												

Formule de Thornthwaite

$$ETP = 16 \left(\frac{10T}{I}\right)^a$$

Ou :

ETP : évapotranspiration potentielle en (mm)

T : température moyenne mensuelle en °C

I: indices thermique annual

$$i = (0.2T)^{1.514}$$

$$i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1.514}$$

$$I = \sum_1^{12} i$$

Avec :

a: l'exposant climatique donnée par la formule

$$a = \left(\frac{1.6}{100}\right) I + 0.5$$

k: coefficient d'ajustement

Tableau 8 Les résultats de L'ETP selon la formule de Thornthwaite

Mois	Sep.	Oc.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aout
T C°	21.3	16.2	10.9	7.6	6.3	7.9	9.9	12.8	17.8	22.8	26.2	25.2
i	8.97	5.93	3.25	1.88	1.42	2.00	2.81	4.15	6.84	9.95	12.28	11.57
I	71.06											
a	1.64											
K	1.03	0.98	0.95	0.9	0.87	0.86	1.03	1.03	1.21	1.21	1.45	1.1
ETP	96.84	61.8	32.27	17.86	13.13	19.0	27.56	42.0	72.13	108.26	135.98	127.57
ETPc	99.74	60.6	30.66	16.08	11.43	16.37	28.39	43.26	87.28	130.99	197.17	140.33
Total ETP : 754.46 mm												
Total ETPc : 862.27 mm												

Pour corriger les valeurs de l'ETP, il faut les multiplier par un coefficient k qui dépend de la latitude.

Cette estimation a été faite à partir des données les plus disponibles dans les stations météorologiques se sont les données des températures moyennes mensuelles interannuelles à la station de Tébéssa, cela veut dire qu'elle représente des résultats fiables de l'ETP dans la région concernée.

2.4.1.2. Formule de Blaney Criddle

Cette formulation s'effectue en deux temps : le premier concerne uniquement le terme climatique de l'ETP, tandis que le second introduit les coefficients cultureux pour obtenir à l'ETP de culture, d'après (Blaney-Cridele) L'ETP est calculé selon la formule suivante :

Avec : $ETP = K (8.13 + 0.46 t) P$

ETP : Evapotranspiration potentielle mensuelle de référence en mm ;

t : Température moyenne (degré Celsius.) pendant le mois considéré.

P : Pourcentage d'éclairement pendant le mois considéré qui ne dépend que de la latitude de lieu étudié.

K : Coefficient empirique dépendant de la culture.

Le coefficient k est un coefficient variable selon les cultures et la région, pour notre zone

les mois de septembre à avril représentent la saison humide pour laquelle nous avons

pris $k_c = 0.7$, et de Mai à Août représentent la saison sèche avec $k_c = 1.1$

Tableau 9 les résultats de L'ETP selon la formule de Blaney Criddle

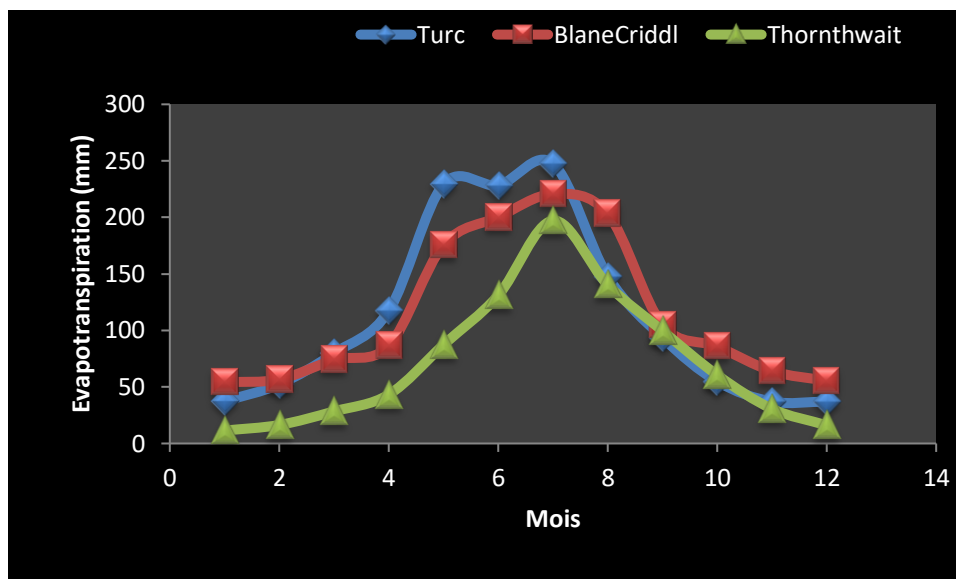
Mois	Sep.	Oc.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aout
T C°	21.3	16.2	10.9	7.6	6.3	7.9	9.9	12.8	17.8	22.8	26.2	25.2
P(%)	8,36	7,87	6,96	6,81	7,01	6,89	8,34	8,81	9,78	9,78	9,94	9,37
K	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	1,1	1,1	1,1	1,1
ETP	104.9	85.84	64.04	55.42	54.11	56.74	74.05	86.45	175.55	200.29	220.67	203.27
Total ETP : 1381.35mm												

Après les calculs des trois méthodes précédentes, on peut comparer leurs résultats par la superposition graphique des courbes d'ETP de cela, nous pouvons déduire que :

- Sur la base des résultats obtenus, estimons que la méthode de Thornthwaite donne des valeurs proches de la réalité, ce qui nous conduira au calcul du bilan à partir des résultats donnés par Thornthwaite.

Tableau 10 Les résultats de L'ETP de la station de Tébessa

Mois	Juin.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Totale
Turc	37.32	52.31	79.87	117.3	229.2	228.5	247.6	147.8	93.68	54.88	37.06	37.06	1362.8
Blane Criddl	54.11	56.74	74.05	86.45	175.5	200.2	220.6	203.2	104.9	85.84	64.04	55.42	1381.5
Thornt. hwaite	11.43	16.37	28.39	43.26	87.28	131	197.2	140.3	99.74	60.57	30.66	16.08	881.75
En (mm)	41	55	69	97	125	195	251	223	139	97	55	41	1388



2.4.1.3. L'évapotranspiration réelle (ETR)

L'évapotranspiration réelle est la quantité d'eau évaporée (transpirée) effectivement par le sol, les végétaux et les surfaces d'eau libre d'un bassin versant.

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

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 \frac{P^2}{L^2}}}$$

P : précipitation moyenne annuelle de la station en (mm). P= 365.84mm

L : pouvoir évaporant ($L=300+25T+0,05T^3$). L = 696.858

T : températures moyennes annuelles en c°.

ETR= 340.38

Méthode de Coutagne :

Le déficit d'écoulement équivalent de l'évapotranspiration réelle est donné par l'expression :

$$ETR=P- \lambda p^2$$

P : Le déficit d'écoulement équivalent de l'évapotranspiration réelle est donné par l'expression :

$$ETR = P - \lambda p^2$$

P : précipitation moyenne annuelle de la station en (m).

λ : indice lié à la température, $\lambda = 1/0.8 + 0.14T$

T : température moyenne annuelle en $^{\circ}\text{C}$ ($T = 15,4^{\circ}$)

Cette formule n'est pas applicable que pour $1/8 \lambda < P < 1/2 \lambda$

Application :

$$P = 365.84 \text{ mm}$$

$$T = 15.4^{\circ}\text{C}$$

$$\lambda = 3.40$$

$P < 1/8 \lambda$, dans ce cas la formule de COUTAGNE n'est pas applicable.

Formule de Thornthwaite

La méthode de Thornthwaite a été établie en se basant sur de nombreuses expériences, remarque que cette méthode est inégalement valable selon les zones climatiques. L' ETP au niveau de cette formule sera calculé en fonction de la température à condition de considérer des surfaces suffisamment étendues et des pas de temps assez longs.

Le calcul de l'ETR peut s'effectuer suivant deux cas :

$$1^{\text{er}} \text{ cas : } p > ETP \Rightarrow ETR = ETP$$

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

2.4.1.4. Estimation des réserves facilement utilisables (RFU)

Il représente la quantité d'eau stockée dans le sol. Facilement utilisable par les plantes, son degré de saturation dépend de plusieurs facteurs :

- La nature, la lithologie et l'épaisseur de la couche parcourue par les racines ;
- Le climat de la région ;
- Le type de la couverture végétale.

RFU de Tébéssa est évalué en tenant compte de la nature du sol et du type de culture.

D'après la formule de J. Richard (1979) :

$$\frac{1}{3} Da \times He \times p$$

RFU : Réserve facilement utilisable en mm ;

Da : Densité apparente du sol (Da = 1,4 pour Tébessa) ;

He : Humidité équivalente du sol (He = 25%)

p : Profondeur de la couche de la terre parcourue par les racines en m ; (p = 0.248m)

$$RFU = 0.029 \text{ m.}$$

RFU = 29 mm c'est la valeur maximale de la RFU

2.4.1.5. Bilan Hydrologique selon Thornthwaite

Le suivi du bilan hydrique des sols est une opération complexe car il n'existe pas actuellement d'appareil simple pour mesurer en routine le volume d'eau du sol.

Cette méthode est basée sur la notion de réserve en eau facilement utilisable. Admettons que le sol est capable de stocker une certaine quantité d'eau (La RFU); cette eau peut être reprise pour l'évapotranspiration par l'intermédiaire des plantes. De même, la satisfaction de l'ETP a priorité sur l'écoulement, c'est-à-dire qu'avant qu'il n'y ait d'écoulement, il faut avoir satisfait le pouvoir évaporant (ETP =ETR), par ailleurs la complétion de la RFU est également prioritaire sur l'écoulement. Le bilan est établi à l'échelle mensuelle.

L' équation du bilan d' après « Thornthwaite » exprimant l' égalité des pertes et des gains qui est définie comme suit :

$$P = ETR + R + I.$$

P : précipitations moyennes annuelles en (mm).

ETR : évapotranspiration réelle annuelle en (mm).

R : lame ruisselée en (mm).

I : lame infiltrée en (mm).

Ruissellement de surface :

$$R = \frac{P^3}{3(ETP)^2}$$

R : ruissellement en (mm).

P : précipitations moyennes annuelles en (mm).

ETP : évapotranspiration potentielle en (mm).

$$R = 21.01 \text{ mm}$$

2.4.1.6. L'infiltration

L'infiltration représente la quantité d'eau qui pénètre dans le sol et le sous-sol pour alimenter les aquifères. Bien que le paramètre est difficile à évaluer car, il échappe aux mesures directes, mais il peut être déduit a partir de l'équation du bilan hydrique :

$$P = ETR + R + I.$$

$$I = P - (ETR + R).$$

I: infiltration en (mm).

P: précipitations annuelles en (mm).

R : ruissellement de surface en (mm).

ETR : évapotranspiration.

$$I = 4.45 \text{ mm}$$

Tableau 11 Les résultats de L'ETR selon la formule de Thornthwaite

mois	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mar	Avr.	Mai	juin.	Juil.	Aout	Totale
P (mm)	40.14	31.34	29.61	26.82	30.71	26.62	40.89	36.01	37.64	27.55	14.20	23.84	365.84
T°c	21.3	16.2	10.9	7.6	6.3	7.9	9.9	12.8	17.8	22.8	26.2	25.2	15.4
i	8.97	5.93	3.25	1.88	1.42	2.00	2.81	4.15	6.84	9.95	12.28	11.57	71.06
K	1.03	0.98	0.95	0.9	0.87	0.86	1.03	1.03	1.21	1.21	1.45	1.1	-
ETP	96.84	61.81	32.27	17.86	13.13	19.04	27.56	42.00	72.13	108.26	135.98	127.57	754.46
ETPc	99.74	60.57	30.66	16.08	11.43	16.37	28.39	43.26	87.28	130.99	197.17	140.33	881.75
RFU	0	0	7.56	15.06	29	29	29	11.29	0	0	0	0	-
ETR	40.14	31.34	22.05	11.76	1.71	-2.38	11.89	24.72	37.64	27.55	14.20	23.84	340.38
EX	0	0	0	0	2.50	10.25	12.5	0	0	0	0	0	25.25
DA	59.6	29.23	0	0	0	0	0	0	49.64	103.44	182.97	116.49	541.37

2.4.1.7. Formule de vérification

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

$$P = 340.38 + 25.25 = 365.84 \text{ mm}$$

$$ETP = \sum ETR + \sum D_a$$

$$ETP = 340.38 + 541.37$$

$$ETP = 881.75 \text{ mm}$$

L'évapotranspiration est le paramètre le plus important, puisqu'il conditionne l'abondance ou la disette en eau ; cette connaissance est fondamentale pour tout projet qui vise

à protéger l'environnement, étant donné l'importance de ce paramètre dans le bilan, son évaluation sera déterminée avec beaucoup de soins.

Tableau 12 les résultats de bilan hydrique selon Thornthwaite

Précipitation		Evapotranspiration Réelle ETR		Ruissellement R		Infiltration	
En (mm)	En (%)	En (mm)	En (%)	En (mm)	En (%)	En (mm)	En (%)
365.84	100	340.38	93.04	21.01	5.74	4.45	1.21

Conclusion

Le périmètre d'étude est caractérisé par un climat semi-aride de type continental (hiver froid et été chaud), (fortes pluies à l'échelle des temps réduits).

La variabilité de la pluie moyenne mensuelle est nettement remarquable, elle est relativement élevée au mois de mars et faible au mois de juillet.

La moyenne des précipitations annuelle pour une période de 42 ans est estimée à 365.84mm et une température moyenne annuelle de l'ordre de 15.4 °C avec un maximum au mois de juillet égal à 25.87 °C et un minimum au mois de janvier égal à 6,52°C.

Sur une échelle moyenne, la région est marquée par une forte évapotranspiration réelle de 340.387mm mobilisant 93,06% des précipitations.

La région a connu une longue période de sécheresse durant laquelle le déficit agricole a pu atteindre une somme annuelle de 541,37 mm.

Le coefficient de ruissellement de 21.01mm mm, et l'infiltration de 4.45 mm représentent des valeurs très faibles par rapport aux précipitations entrantes qui jouent un rôle très important à l'alimentation des oueds et des nappes existant dans la zone d'étude.

CHAPITRE 3 : QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES

1.Introduction

L'étude de la chimie des eaux est une méthode de prospection hydrogéologique qui permet la caractérisation des aquifères. En effet, la composition chimique des eaux souterraines dépend en grande partie du type de roche encaissante, des évolutions hydrodynamiques des écoulements, de la profondeur des écoulements (température) et de la zone climatique.

L'objectif de ce chapitre est de déterminer la qualité chimique des eaux du point de vue des faciès chimiques, tout en visualisant à l'aide des cartes en iso-teneurs, la répartition et l'évolution spatiale des concentrations en éléments chimiques dissous.

Dans ce but, des échantillons au nombre de 20 points ont été prélevés lors de la campagne de Mai (2006), choisis de manière à assurer une bonne répartition spatiale sur l'ensemble de la plaine ;

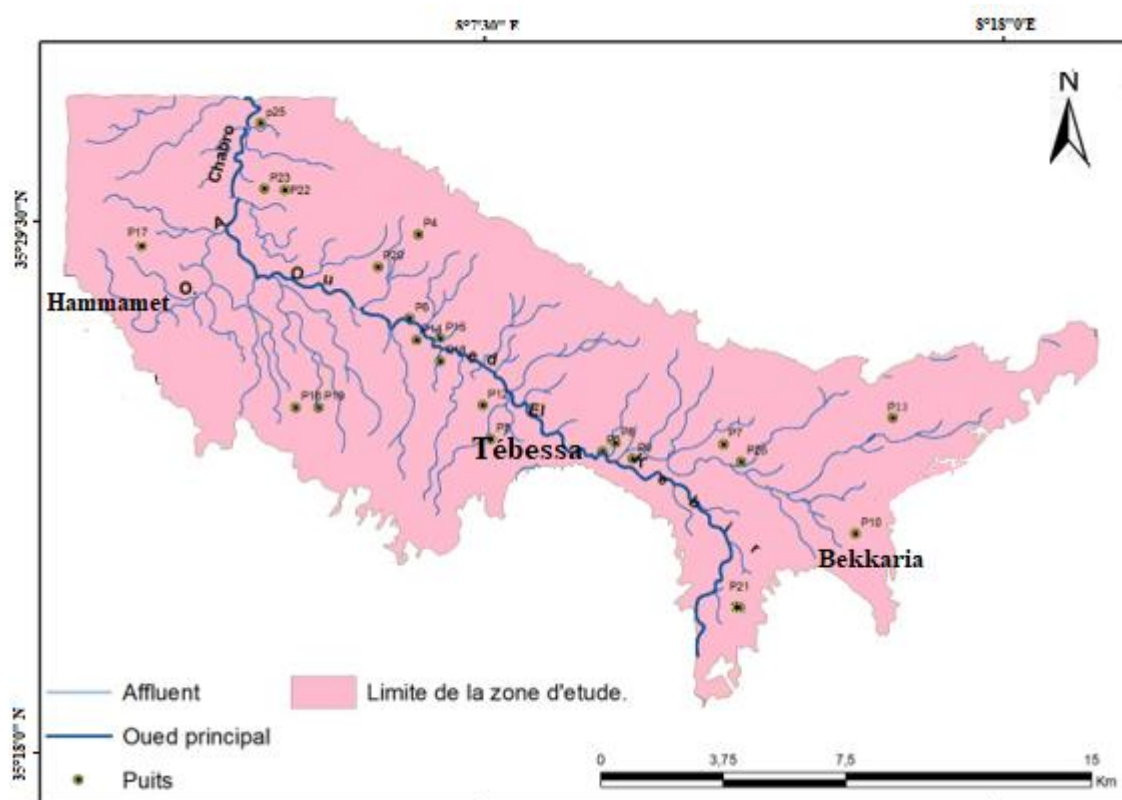


Figure 3.1 : Carte d'inventaire des points d'eau (Mai 2006)

Les analyses chimiques sont effectuées au laboratoire de L'ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydriques) de Constantine. L'analyse et l'interprétation des échantillons ont porté essentiellement sur les éléments chimiques majeurs suivants :

- Les cations : Na, Mg, Ca, et K;
- Les anions : HCO_3 , SO_4 , NO_3 , et Cl.

2.Méthodes et stratégie de travail

2.1. Echantillonnage et analyse

Des échantillons d'eau de nombre de 20 ont été prélevés des puits et forages captant la nappe. Ces prélèvements ont été effectués à la fin de la saison pluviale Mai 2006. Les paramètres physico-chimiques, pH, température et conductivité électrique ont été mesurés *in situ* à l'aide d'une sonde multi-paramètres WTW. L'analyse des ions majeurs a été effectuée par absorption atomique à flamme pour les cations et par colorimétrie pour les anions (Rodier, Bazin et al. 1996) au laboratoire de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) de Constantine.

Tableau 13 Statistiques Descriptives des éléments chimiques

Variable	CE	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na.	K	Cl	S04 ²⁻	HCO ₃	NO ₃
Min.	1351	96	58	86	1	110	204	165	1
1st	1736	132	66.25	106	1	172.5	351	293	7
Median	1981	158	84	122	2.5	220	392	369	30.5
Mean	1900	159.6	85.5	141.2	4.85	216.9	420.2	352.4	41.5
3rd	2112	194.5	101.5	178	8	251	452.5	409	62.75
Max.	2402	226	124	225	14	375	900	451	120

2.2. Analyse en Composantes Principales

L'objectif de l'Analyse par ACP est de passer de l'espace des données à un espace factoriel afin de réduire le nombre de variables et de rendre l'information moins redondante. Ceci revient à remplacer les variables x_1, \dots, x_p qui sont a priori corrélées par de nouvelles variables appelées composantes principales c_1, \dots, c_p non corrélées. Ces variables sont combinaisons linéaires des x_j , elles sont de variance maximale et obtenues par maximisation d'inertie.

L'analyse en Composantes principales est très utilisée pour la caractérisation de la qualité des eaux (Mishra 2010 ; Chaïb and Samraoui 2011 ; Wu, Wang et al. 2011 ; Kebede and Kebede 2012). Chaïb and Samraoui (2011) ont appliqué cette méthode afin de caractériser les eaux l'oued Kebir-Est (Algérie) ce qui leur a permis d'identifier les principales causes de dégradation et d'évaluer la qualité physicochimique des eaux de cet et ses principaux affluents. Mishra (2010) lors d'un suivi de la rivière Gange à Varanasi, a utilisé l'ACP pour extraire les paramètres qui sont les plus importants dans l'évaluation de la qualité de ces eaux et a conclu que seulement quatre facteurs principaux ont été identifiés comme étant responsables de la structure des données expliquant 90 % de la variance totale de l'ensemble de données. Mahapatra, Sahu et al. (2012) a appliqué l'analyse en composantes principales pour classer les échantillons d'eau en quatre catégories différentes, cette classification sera utile aux planificateurs pour prendre à l'avance des mesures d'amélioration afin de prévenir la contamination des eaux souterraines.

2.3 Positionnement Multidimensionnel (Multidimensional Scaling MDS)

Le positionnement multidimensionnel (Kruskal 1964) ou analyse des proximités est un cas particulier d'analyse multivariée avec lequel on peut à partir d'un ou plusieurs tableaux de distances ou de dissimilarités entre n objets (individus), reconstituer une image dans un espace euclidien. Elle vise à représenter au mieux des objets dans un espace visualisable, de façon à ce que les distances entre les objets dans cet espace soient aussi proches que possible des dissimilarités initiales (Manolova 2011). L'espace optimal étant obtenu par minimisation du critère Stress (Standardized Residual Sum of Squares) (Kruskal 1964). Soient d_{ij} , δ_{ij} respectivement dissimilarités et distances réelles.

$$\text{Stress} = \left(\frac{\sum_{ij} \sum_{ij} (\delta_{ij} - d_{ij})^2}{\sum_{ij} \sum_{ij} (d_{ij})^2} \right)^{1/2}$$

MDS repose sur une approche itérative illustré par la

1. initialisation (aléatoire ou non) des coordonnées des objets dans le plan,
2. calcul des distances entre objets dans le plan,
3. calcul des disparités entre les distances dans le plan et les distances dans l'espace d'origine,
4. calcul d'une fonction de coût à partir de ces disparités,
5. mise à jour des coordonnées des objets dans le plan et retour à l'étape 2.

Il existe deux types de MDS : (i) la MDS métrique et (ii) NMDS non métrique cette dernière à l'avantage de n'avoir aucune hypothèse faite sur la fonction de transformation sous-jacente (Manolova 2011). Cette caractéristique la rend la technique applicable à plusieurs domaines d'études (Zhang 2007). La méthode MDS non métrique est basée sur la minimisation du critère :

$$\text{Stress} = \left(\frac{\sum_{ij} \sum_{ij} (f(\delta_{ij}) - d_{ij})^2}{\sum_{ij} \sum_{ij} (d_{ij})^2} \right)^{1/2}$$

où f est une fonction monotone croissante (à déterminer par l'algorithme de résolution) des dissimilarités (P.Faye, P.Courcoux et al. 2011). Les valeurs de Stress proches de zéro indiquent que les résultats de l'analyse MDS sont raisonnables et fiables.

Plusieurs auteurs ont utilisé la MDS afin de caractériser la qualité des eaux (Yerel and Ankara 2010; Wu, Wang et al. 2011).

Wu, Wang et al. (2011) à l'aide d'une analyse par MDS ont identifié la variabilité spatiale et temporelle de la qualité hydrochimique de l'eau dans un système côtier subtropical, Daya Bay, Chine. Le groupe I a été identifié comme étant principalement lié aux activités anthropiques, tant dis que le groupe II étant principalement lié aux échanges d'eau de mer en provenance de la mer de Chine méridionale.

Vargas-González et al. (2014) a travers une analyse par NMDS sur des échantillons d'eaux du Golf de Californie ont montré l'existence de conditions hydrologique différentes à chaque saison. Les différences marquées entre l'été et l'hiver sont attribuées d'une part à la température de l'eau et à la biomasse phytoplanctonique et d'autre part aux conditions estivales de La Salada Cove.

2.4. Résultats et discussions

L'analyse par ACP en utilisant le logiciel R© avec les packages adoptés Factominer, Factoextra et Performance Analytics. La liaison existante entre toutes les variables prises deux à deux et les coefficients de corrélations entre ces différentes variables sont donnés par la matrice de corrélation (Figure 2). En effet, des corrélations parfaites ont été enregistrées en premier lieu entre le Calcium et la Conductivité Electrique ($r=0.84$). Ceci indique que l'essentiel de la Conductivité Electrique des eaux de la zone d'étude provient du Calcium. En plus d'être corrélé avec CE, le Calcium et le Magnésium sont tous les deux fortement corrélés entre eux ($r=0.90$), ce qui confirme leur origine qui est la dissolution des formations carbonatés, et les formations gypseuses (évaporite). De même, une corrélation assez importante entre le Chlore et le Magnésium ($r=0.69$) a été enregistré. Les sulfates sont bien corrélés au sodium ($r=0.67$), il existe de fortes corrélations avec la conductivité électrique, et ce qui peut être expliquée par la dissolution des formations évaporitique. Encore, une corrélation assez importante entre les valeurs des nitrates et celles du potassium ($r=0.69$), ce qui prouve leur provenance qui est la dissolution des engrais chimiques suite à l'utilisation abusive des fertilisants. De plus, une corrélation relativement élevée entre Cl et Ca (0,68) a été observée. Ceci est dû aux mécanismes d'acquisition de la charge saline des eaux perturbées par plusieurs phénomènes, tels que les échanges basiques qui caractérisent les eaux fortement minéralisées, le lessivage des niveaux d'évaporation et la dissolution du gypse et de l'halite qui peuvent augmenter respectivement la teneur en ions calcium et chlorure. En outre, une forte relation entre le Cl et K (0.74) cela tend à prouver qu'une partie des chlorures provient de la dissolution de KCl mais que la majorité de ces cations pourraient provenir de la dissolution d'autres minéraux. La relation non significative entre les sulfates et le calcium et le magnésium est probablement due au fait que les ions calcium et magnésium sont impliqués dans les phénomènes de dissolution/précipitation aux échanges de base sur les minéraux argileux. En revanche, le TDS est lié aux éléments principaux, Ca, Mg, CE et SO₄ avec un coefficient de corrélation qui varie entre 0.67 et 0.97.

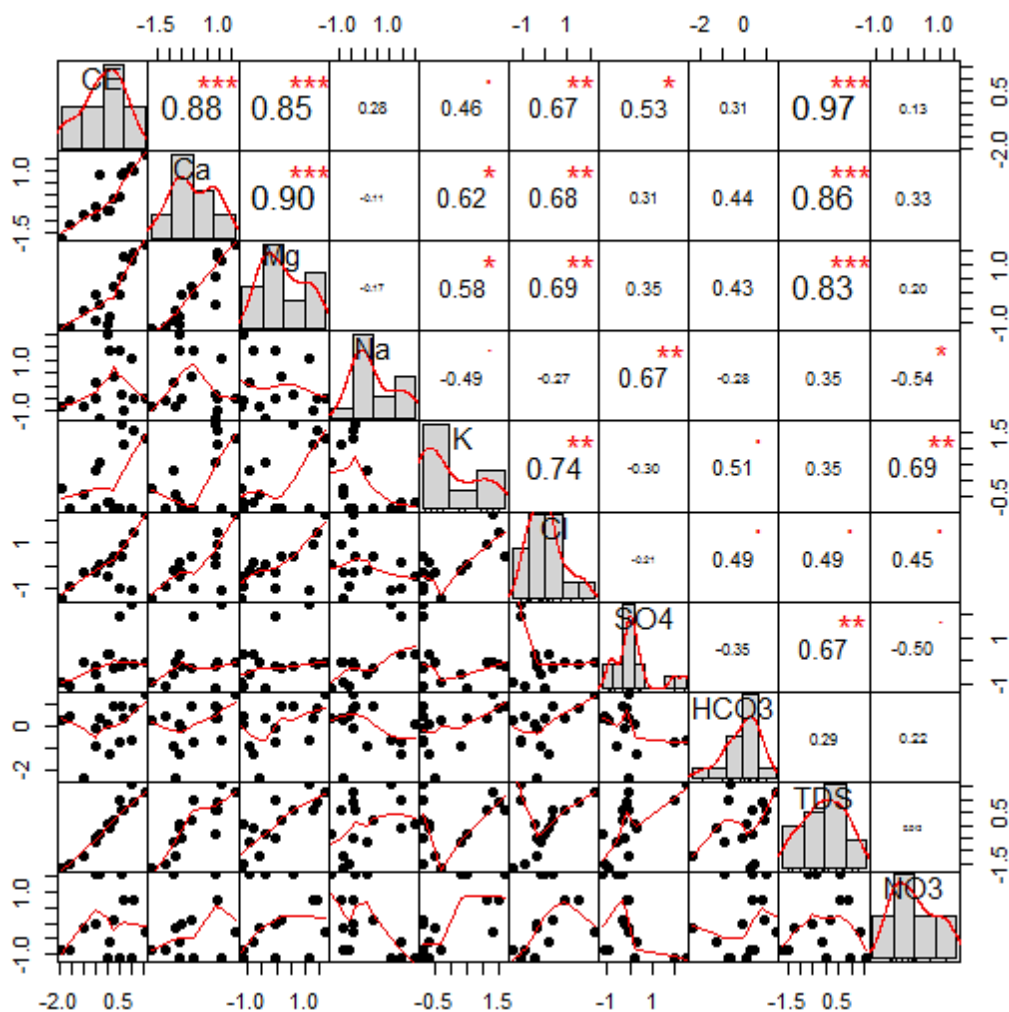


Figure 3.2 : Matrice de corrélation

Afin de confirmer les interprétations faites ci-dessus et visualiser plus aisément l'influence des paramètres physico-chimiques entre eux et sur la qualité des eaux de la plaine de Tébessa. Les résultats nous ont permis de détecter deux axes qui portent 80.3 % de 'information contenue dans ces variables. Les projections faites sur les deux axes montrent que l'axe 1 résume 50.1% de l'information et décrit les variables liées à la minéralisation (Cl, Mg, SO4, conductivité électrique, Ca, NO3 et K). Il peut être considéré comme un gradient de minéralisation lié à l'intensité de la pollution apportée par les déversements urbains et industriels d'eau usées(Bouزيد-Lagha and Djelita 2012) .

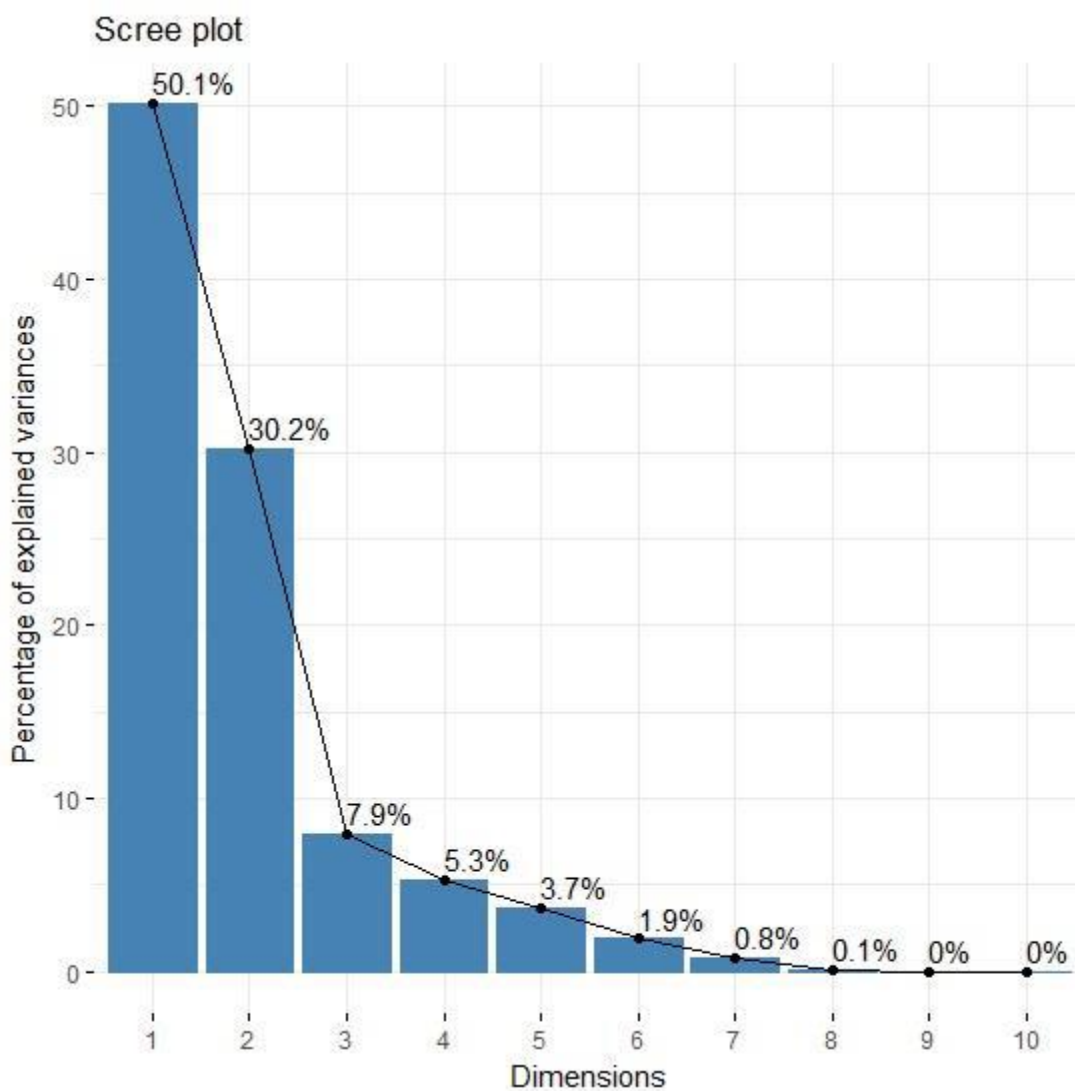


Figure 3.3 : Scree plot

Les projections faites sur les deux premiers axes (Figure 3.3) montrent que : l'axe 1 résume 50.1% de l'information et décrit les variables liées à la minéralisation : (Cl, Ca, Mg et CE). L'axe F2 exprime 30.2 % de l'information initiale, il est corrélé positivement par les nitrates et le potassium, elle est liée à l'activité agricole qui est due à l'utilisation des engrais (Rouabhia et al, 2009).

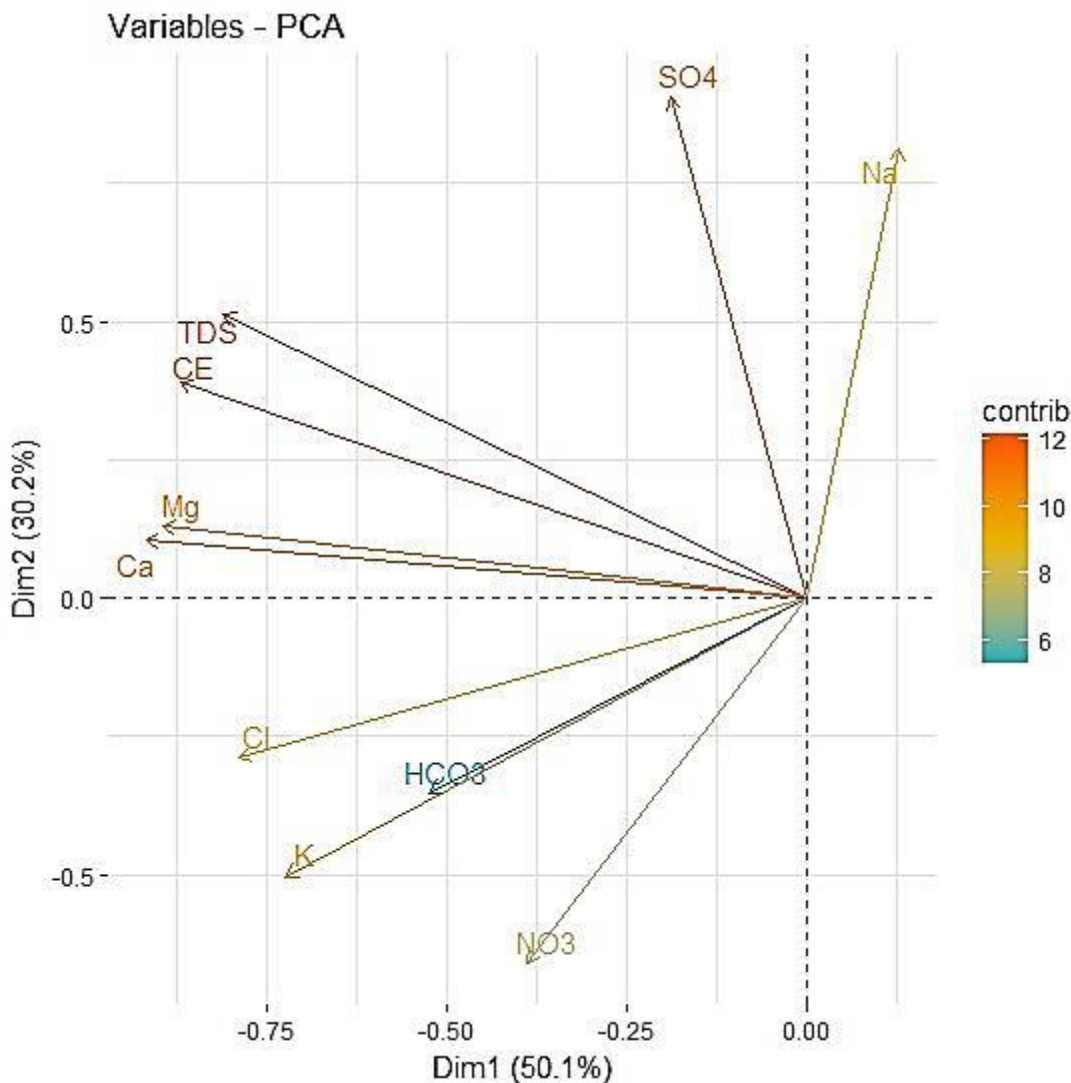


Figure 3.4 : Projection sur les 2 premiers axes principaux

2.5. Résultats de l'analyse par MDS

L'analyse par MDS effectuée avec R confirme les résultats trouvés par l'ACP. En effet, cette dernière a permis de subdiviser le site en trois groupes de puits, qui diffèrent par leur qualité physico-chimiques (Figure 3.5).

Le premier groupe G1 comprend les puits contenant de fortes concentrations de NO₃, Ca, K, Cl, Mg, SO₄ et la conductivité électrique qui est étroitement liée à la pollution causée par les rejets d'eaux usées urbaines et industrielles (Rouabhia,2009) et (Zereg,2019).

Concernant le deuxième groupe G2, d'une part, il maintient la relation entre les deux éléments NO₃ et K provoqués par les engrais utilisés en agriculture et d'autre part, la relation entre Ca, Mg et SO₄ due à la géologie formations de la région avec des valeurs moyennes. Le groupe 3 reflète la forte relation entre TDS, Mg, SO₄ et Ca qui certifie la salinité de cette eau résultant de l'interaction à long terme entre elle et les différentes formations géologiques.

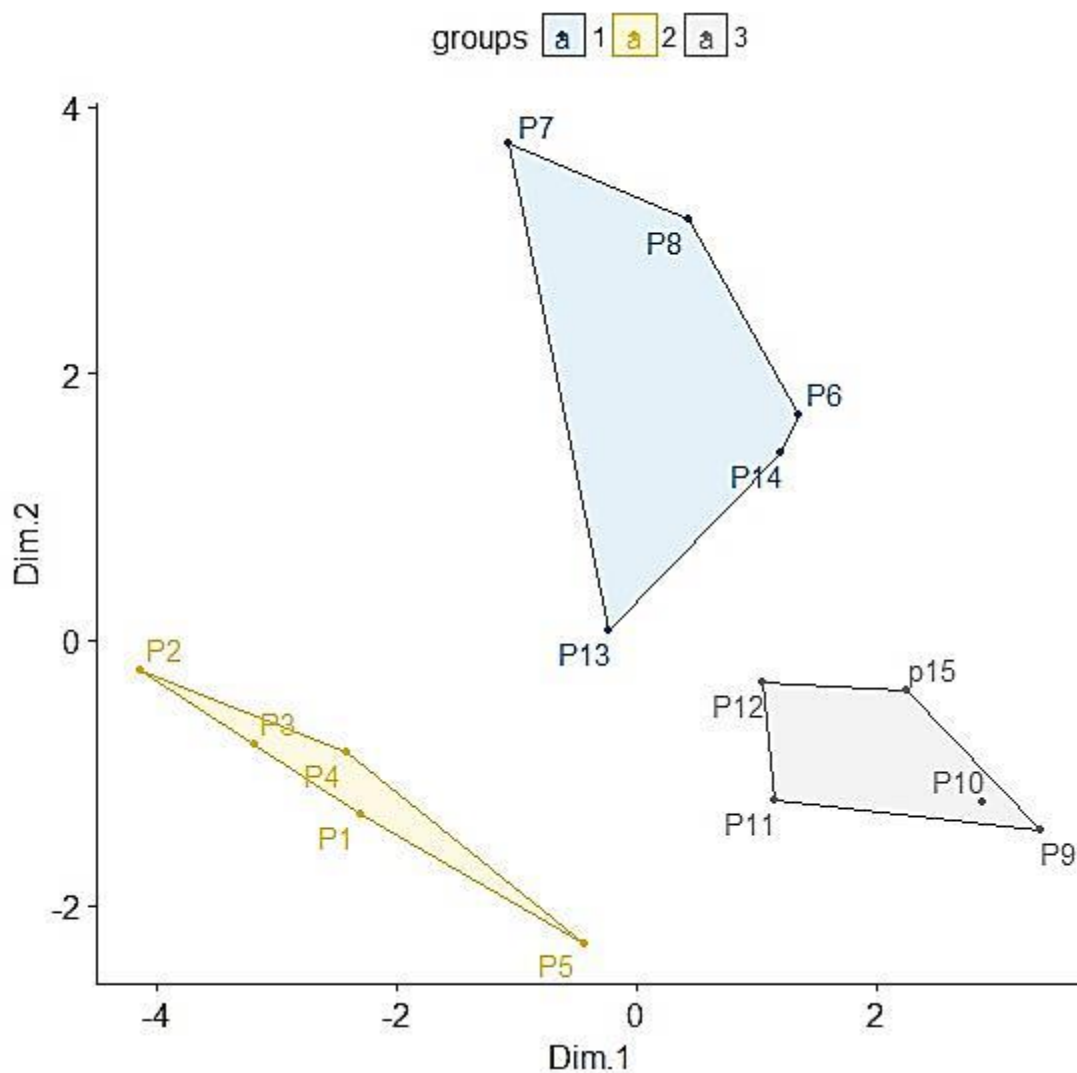


Figure 3.5: Résultats de la Méthode MDS

3. Faciès chimique des eaux

La description de la composition des eaux naturelles est déterminée, en hydrologie par les faciès chimique, le classement et la comparaison des eaux naturelles selon les échantillons analysés nécessite l'utilisation de représentation graphique. De ce fait, plusieurs représentations sont utilisées parmi lesquelles on peut citer, le diagramme à coordonnées rayonnantes, le diagramme semi-logarithmique de Scholler –Berkaloff et le diagramme de Piper. Les deux dernières représentations graphiques qui ont été retenues et utilisées dans ce travail.

3.1. Diagramme de Piper

Le diagramme de Piper est l'une des façons les plus classiques de comparer les compositions chimiques des eaux naturelles permet une représentation des cations et anions sur deux triangles spécifiques dont les côtés témoignent des teneurs relatives en chacun des ions majeurs par rapport au total de ces ions.

La position relative d'un résultat sur chacun de ces triangles permet de préciser en premier lieu la dominance cationique et anionique. A ces deux triangles, est associé un losange sur lequel est reportée l'intersection des deux lignes issues des points identifiés sur chaque triangle. Ce point d'intersection représente l'analyse globale de l'échantillon. Cette position permet de préciser le faciès de l'eau naturelle concernée.

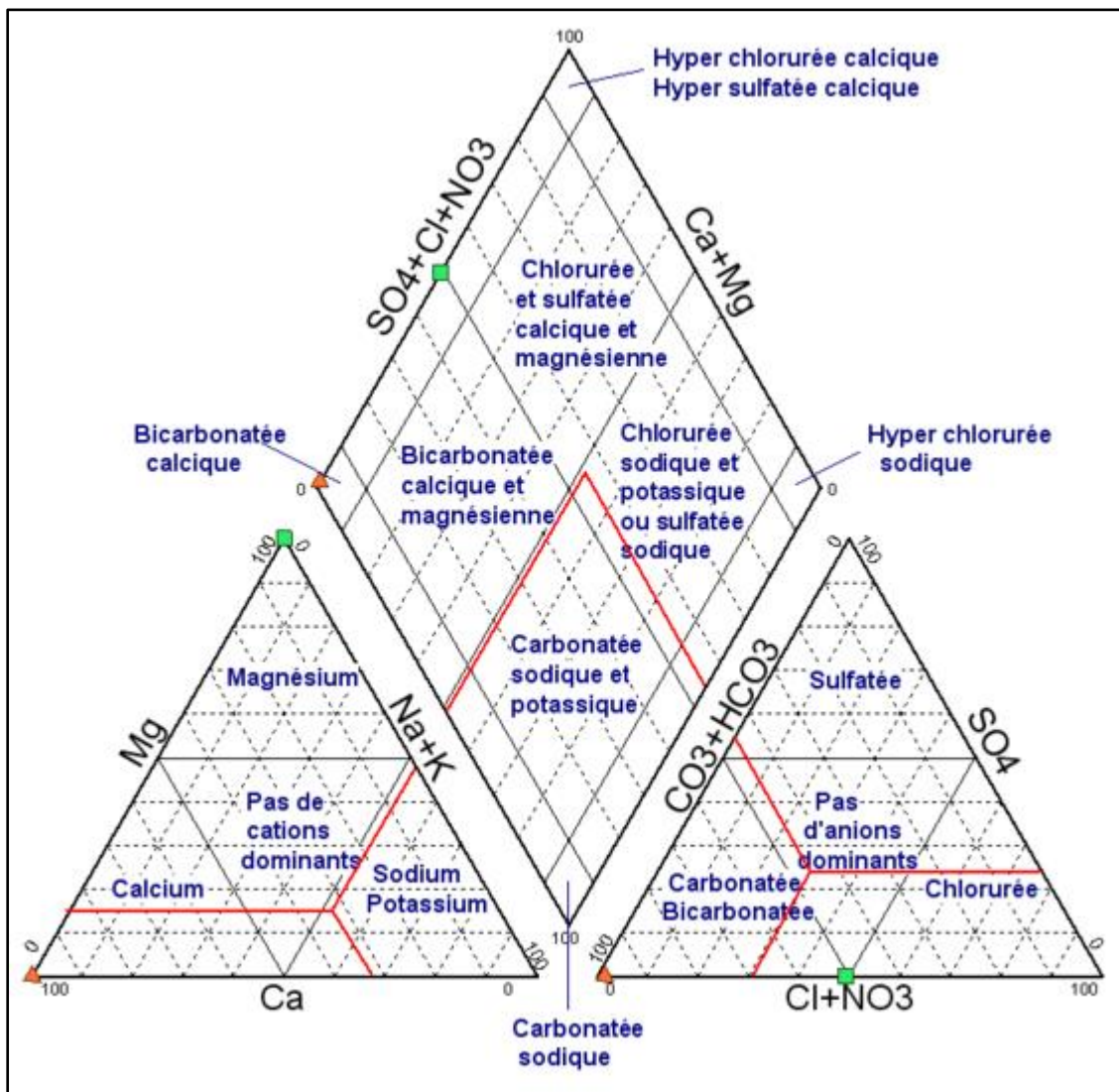


Figure 3.6: Diagramme de Piper

La représentation des analyses chimiques sur le diagramme losangique de Piper (Figure 3.3), nous a permis d'avoir une approche globale de la composition chimique des eaux souterraines de la plaine.

En effet, dans le triangle des cations, nous constatons que la majorité des points sont regroupés dans la partie où il n'y a pas de cations dominants, avec une légère tendance de quelques points vers le pôle sodique et calcique. Par contre dans le triangle anions, nous distinguons qu'il y a une tendance vers le pôle sulfaté, cependant quelques points très proches du pôle chloruré et du pôle bicarbonaté sont remarquables. Selon la projection dans le losange

synthétisant le faciès global, la totalité des échantillons appartient à la famille des eaux chlorurées, sulfatées, calciques et magnésiennes.

Le diagramme global affirme l'incidence de la géologie sur la qualité des eaux de la plaine de Tébessa. Le calcium provient des eaux des bordures, alors que le magnésien tire son origine des argiles qui s'intercale au niveau de plusieurs cotés dans la stratification des couches qui composent l'aquifère. Alors que les sulfates et les chlorures sont liés à l'activité anthropique.

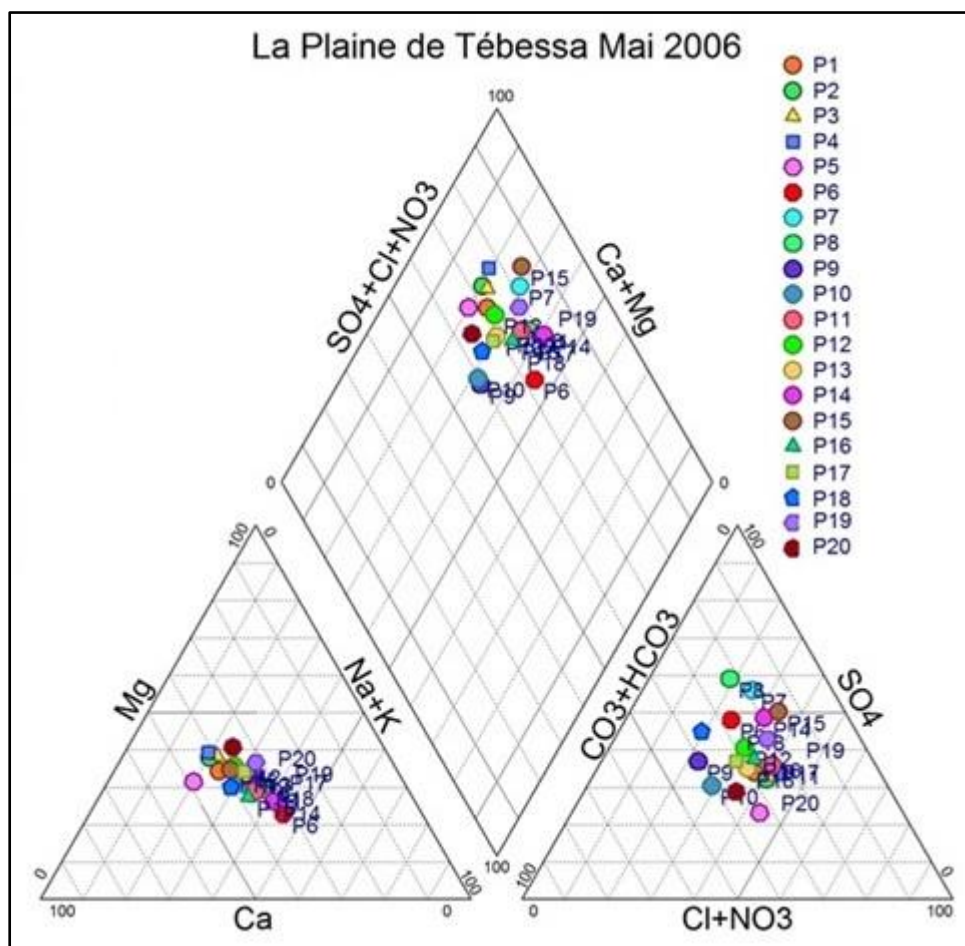


Figure 3.7 : Représentation sur le Diagramme de Piper des résultats d'analyse

3.2. Diagramme de SCHOELLER BERKALOFF

Le diagramme de SCHOELLER BERKALOFF permet de représenter le faciès chimique de plusieurs eaux. Chaque échantillon est représenté par une ligne brisée. La concentration de chaque élément chimique est figurée par une ligne verticale en échelle logarithmique. La ligne brisée est formée en reliant tous les points figurant les différents éléments chimiques. Lorsque les lignes se croisent, un changement de faciès chimique est mis en évidence.

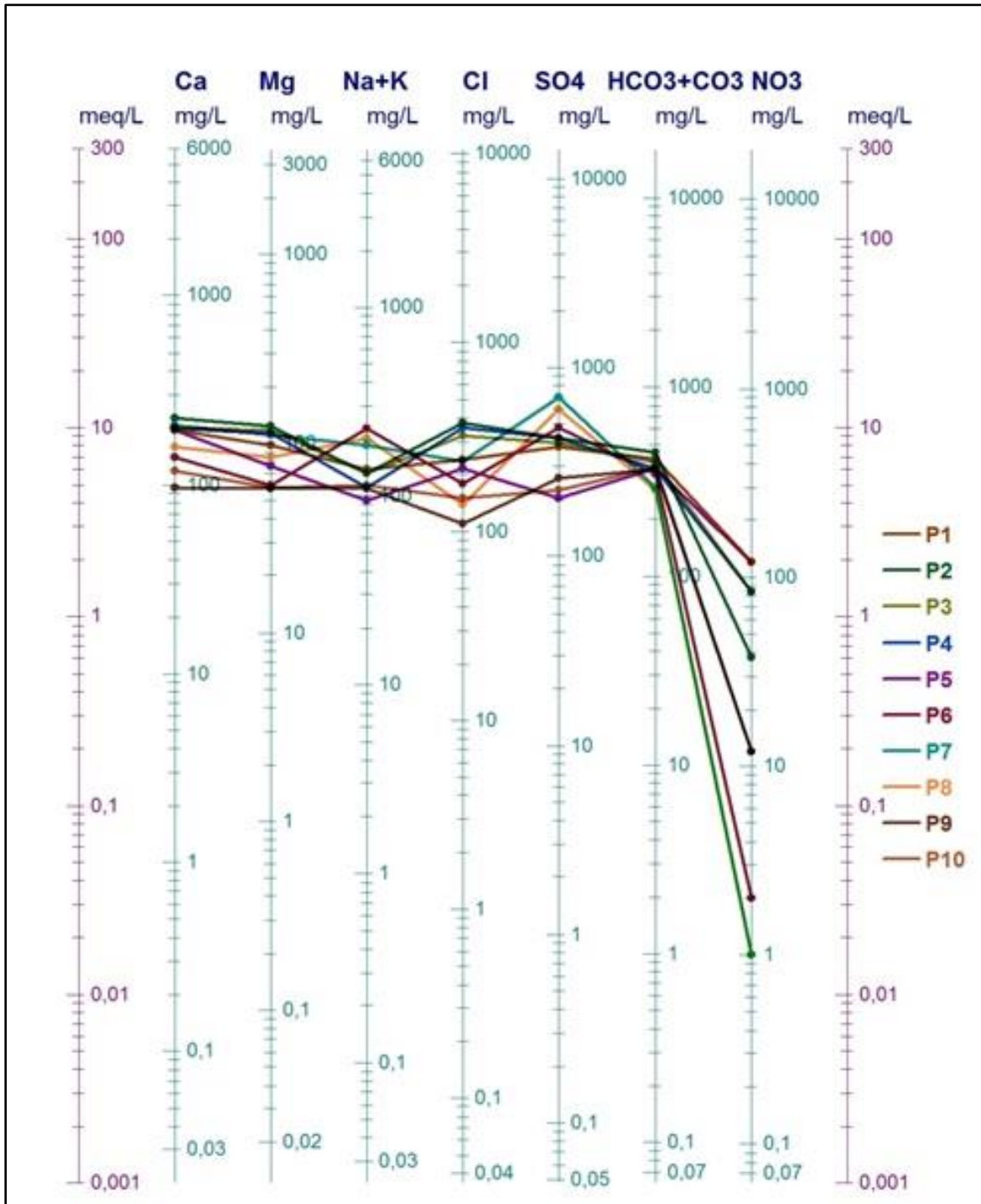


Figure 3.8 : Diagramme de Shoeller Berkallouf des points de la plaine de Tébessa

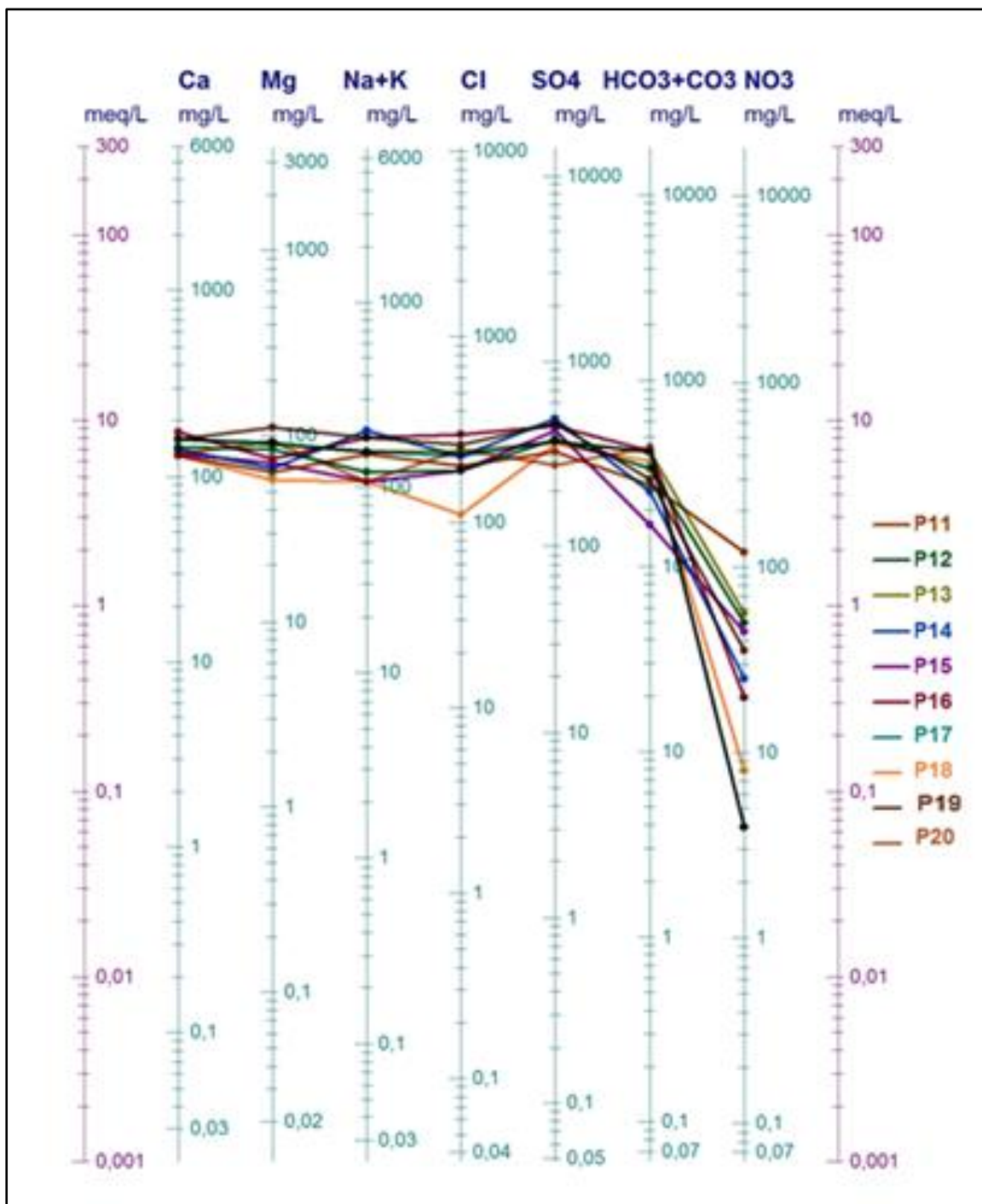


Figure 3.9 : Diagramme de Sholler Berkalfol des points de la plaine de Tébessa

D'après le diagramme de Sholler Berkalfol (Figure 3.4. a et 3.4.b), nous confirmons premièrement un faciès sulfaté calcique, permettant de dire que la minéralisation des eaux est liée aux ions SO_4^- et Ca^{++} , secondairement un faciès Chloruré calcique, parfois sulfaté magnésien et sodique. Les fortes concentrations en sulfates et en chlorure indiquent un état de pollution en rapport avec les activités anthropiques. Par contre le calcium provient des eaux de bordures, alors que le magnésien tire son origine des argiles.

4. Paramètres physico –chimiques

4.1. Température

La température a une influence sur la solubilité des minéraux et surtout des gaz ,Elle joue un rôle dans la dissociation des sels dans l'eau ,donc sur la conductivité électrique et aussi dans la détermination du pH (Rodier, Bazin et al. 1996). Au cours de cette étude, les mesures de température ont été réalisées à l'aide d'une sonde WTW Ph/Cond. De façon générale, les températures des eaux des de prélèvement varient de 17° à 25°C.

4.2. Conductivité électrique

Les fluctuations de la charge chimique ,traduite par la conductivité électrique ,sont une fonction linéaire des ions dissous .En effet la mesure de la conductivité électrique donne un aperçu sur la minéralisation des eaux de la nappe .Elle accroît avec l'augmentation de la teneur de l'eau en sels dissous .La variation de la minéralisation de l'eau et régit plusieurs facteurs (Chibane 2010)

D'après les Normes, les eaux de surface de la nappe alluviale de Tébessa varient entre une eau de qualité médiocre mais utilisable et une eau avec une minéralisation excessive (760 ($\mu\text{S}/\text{cm}$) -4777 ($\mu\text{S}/\text{cm}$). La forte minéralisation se manifestent surtout dans le secteur Nord –Est. De même, un accroissement de la conductivité du Sud-Ouest vers Nord-Est de la plaine. Cette augmentation que l'on peut attribuer au lessivage des formations traversées et la température de l'eau.

4.3. Potentiel hydrogène ou pH

C'est une grandeur numérique mesurable qui permet d'évaluer l'acidité d'une eau (Rodier, Bazin et al. 1996).A un pH 7 ,une eau .Une eau est dite neutre quand le pH égale à 7, elle est dite Acide quand son pH est inférieur a 7,une fois le pH est supérieur à 7 l'eau est dite basique. Le potentiel ou pH d'une eau est le logarithme décimal négatif de l'activité des ions hydrogènes. Dans le cas de la plaine de Tébessa les valeurs du pH oscillent entre 7 et 7.5.

4.4. Solides totaux dissous (TDS)

La concentration des solides totaux dissous (TDS) caractérise la minéralisation de l'eau usuellement, on considère les eaux douces ($\text{TDS} < 1\text{g}/\text{l}$) , les eaux faiblement salés (1 à 5g/l), saumâtres (5 à 10g/l),salines (10g/l < TDS > 50g/l) et les saumures ($\text{TDS} > 50\text{g}/\text{l}$).

Les solides totaux dissous, nous les avons obtenus par calcul à l'aide des résultats de la chimie des ions. Les résultats, montrent que les eaux de la plaine sont dans leur majorité des eaux faiblement salées (1 à 5g/l).

5. Cartographie des paramètres chimiques

L'outil Cartographique est un moyen pour illustrer la distribution spatiale des paramètres chimiques dominants et caractérisant les faciès chimiques qui présentent une influence sur la qualité des eaux. En effet, des cartes des iso valeurs des éléments qui paraissent les plus inquiétants du point de vue qualité et pollution, ont été établies.

5.1. Chlorures

Le chlorure est un ion très peu répandu dans la matrice des roches carbonatés .A cause de sa charge négative qui l'exclut de l'adsorption (Achleb, Mania et al. 2001), les concentrations de dissolution ou de précipitation. De ce fait, il est considéré comme conservé et une augmentation de sa teneur dans les eaux peut être liée soit à un processus physique tel que l'évaporation intense quand le niveau d'eau de la nappe est proche de la surface, à des apports d'eaux usées (pollution anthropique) ou à des intrusions d'eau issue des lessivages des terrains salés (évaporites). En présence de sodium dans l'eau, une concentration en chlorures supérieur à 250mg/l donne un gout salé.

Les valeurs des chlorures dans notre d'étude varient entre 110 mg/l et 601 mg/l(Figure 3.5) .Les fortes concentrations sont localisées aux bordures et dans le centre le long de l'oued El Kebir dont les valeurs peuvent dépasser la valeur admissible (200mg/l). Ces fortes valeurs sont dues au lessivage des marnes et des calcaires dolomitiques de la bordure d'une part et d'autre part au lessivage des sédiments du Quaternaire couvrant ce secteur. En effet La présence d'alluvions et de sédiments, d'origine évaporitique, à la surface du sol facilite le lessivage. Également à Bekkaria la disposition des sables quartzeux et les argiles d'âge Pliocène à la surface favorisent leur lessivage.

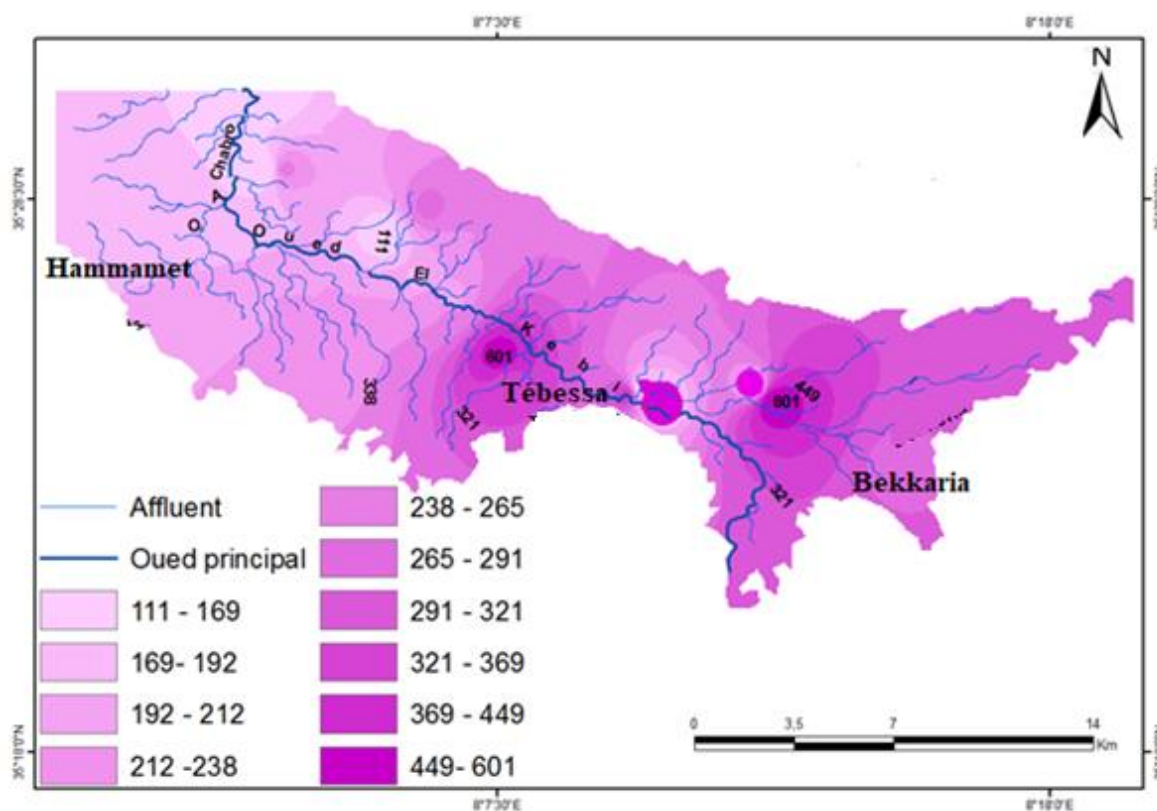


Figure 3.10 : Carte d'isoteneurs en chlore (mg/l)

5.2. Cartes des sulfates

Les sulfates apparaissent dans les eaux naturelles dans une gamme étendue de concentrations. La concentration de l'ion sulfates est essentiellement due à l'oxydation de la

pyrite et la dissolution du gypse. Les sulfates peuvent provenir également des engrais utilisés en agriculture tels que les superphosphates et les sulfures d'ammonium et de potassium. Ils sont facilement entraînés dans les eaux souterraines par les eaux de drainage et d'infiltration.

Pendant la période de lessivage des formations gypsifères engendrent la dilution du trias qui augmente la concentration des sulfates. Notamment Djebel Djebissa qui à l'origine des fortes teneurs en sulfates enregistrées dans la région de Tébessa (Figure 3.6) qui peuvent atteindre 700 mg/l. Ces concentrations s'élèvent dès qu'on s'éloigne de l'Est vers l'Ouest suivant le sens d'écoulement des eaux souterraines.

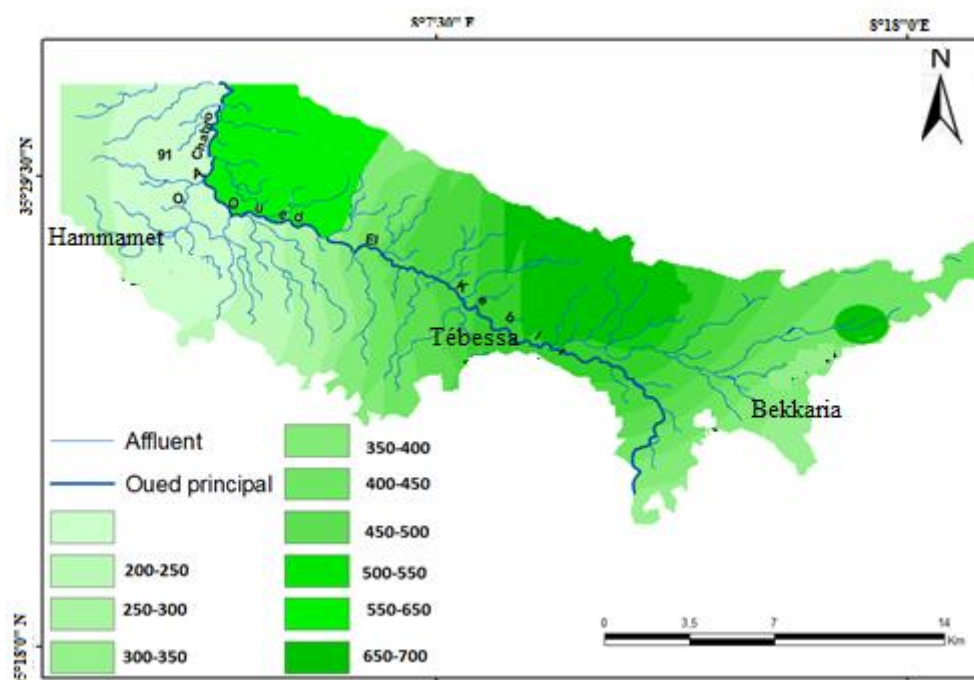


Figure 3.11 : Carte d'isoteneurs en sulfates (mg/l)

5.3. Bicarbonates

Dans tout aquifère carbonaté, les teneurs en bicarbonates, des eaux sont très souvent liées aux formations carbonatées ((Giraud Lachassagne et al. 2000). La nature acide des précipitations couplées à la présence de CO₂ d'origine biogénique dans le sol confèrent aux eaux de pluie un fort pouvoir de dissolution vis à vis des carbonates.

Les teneurs en bicarbonates les plus élevées (Figure 3.7) se trouvent dans les bordures Sud-Ouest de la région de Tébessa et également au nord de Boulhaf –Edyr, Confirmant ainsi, l'apport latéral en eau à travers les bordures. De même, à Bekkaria une augmentation remarquable des valeurs a été remarquée, à cause de l'origine de ces eaux qui est due aux formations des calcaires de Djebel Bouramane.

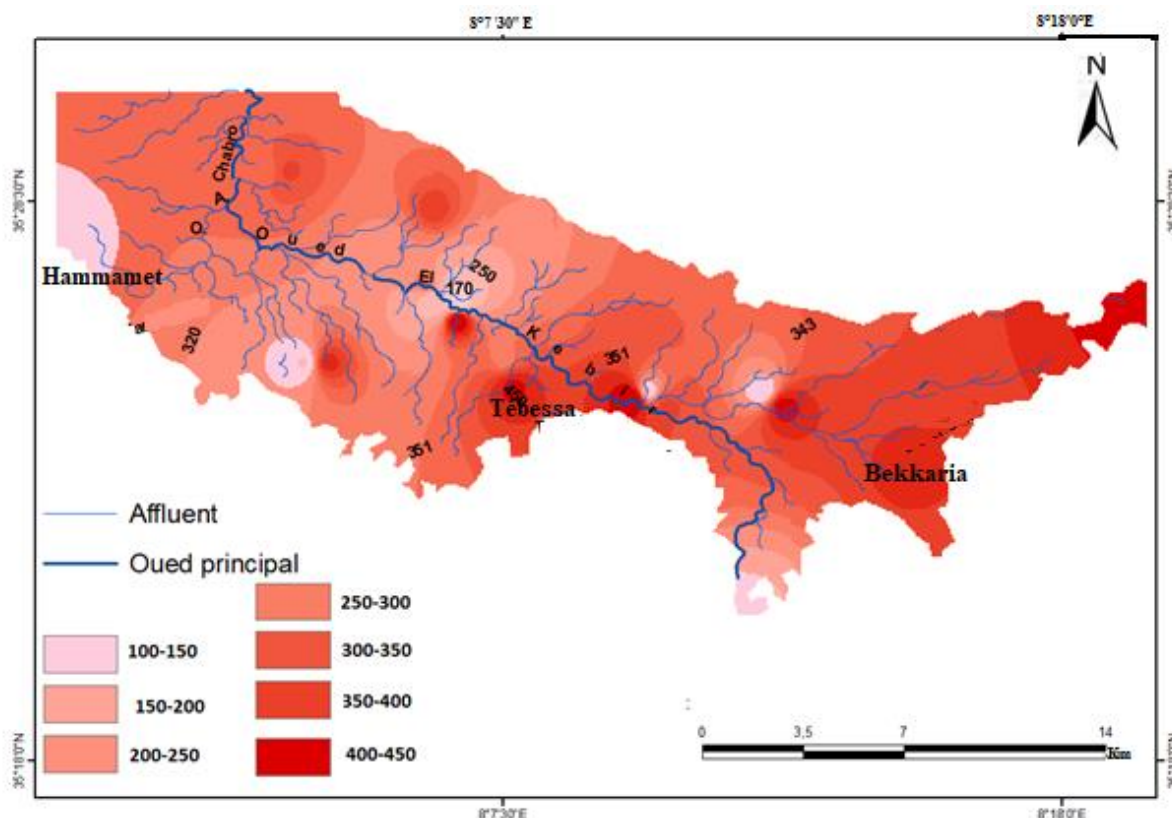


Figure 3.12 : Carte d'isoneurs en bicarbonate (mg/l)

5.4. Calcium

Sur toute l'étendue de la nappe les concentrations sont importantes. L'origine de ces teneurs est liée aux apports qui se font par les bordures latérales et à la dissolution du gypse de Djebel Djebissa, notamment à Tébessa les concentrations sont importantes que ce soit sur la bordure méridionale où bien au centre de la plaine. A noter que ce secteur constitue une zone d'accumulation des éléments chimiques migrant d'autres lieux, suivant les axes des écoulements.

A Bekkaria, l'accroissement des concentrations se fait de l'Est vers l'Ouest. Il est semblable à celui des chlorures, ce qui confirme la prédominance du faciès chloruré-calcique. Les argiles constituant les alluvions anciennes de piedmont d'âge quaternaire peuvent donner du calcium par échange de base.

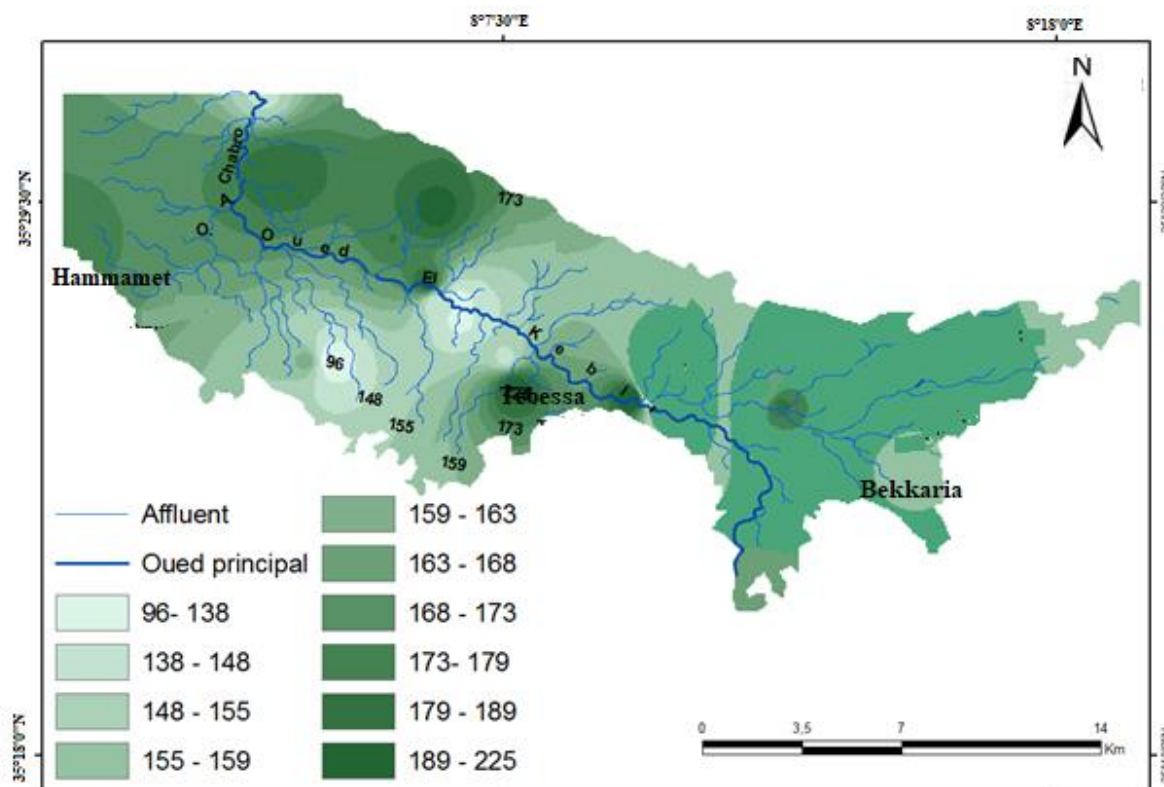


Figure 3.13 : Carte d'isoteneurs en calcium (mg/l)

5.5. Sodium

Du fait de sa solubilité, l'ion sodium se trouve fréquemment dans les eaux souterraines. IL peut Provenir de l'altération des sels minéraux (silicates) et des venues d'eau salées et des rejets d'eau usées domestiques et industrielles. Certains phénomènes sont responsables de la variation de sa teneur. On dénombre parmi ceux-ci, les interactions de l'eau avec la matrice argileuse des formations carbonatées, l'évapotranspiration responsable d'une diminution de sa teneur peuvent être attribuées à des intrusions d'eau saline.

Les teneurs élevées qui se trouvent sur la carte en particulier à l'Est et au centre de la carte, du fait du lessivage des formations évaporitiques de Djebel Djebissa à L'Est, ceci a pour cause le phénomène d'échange de base, c'est-à-dire les argiles libèrent le sodium et captent le calcium produit par la dissolution du gypse entraînant ainsi une dominance du sodium.

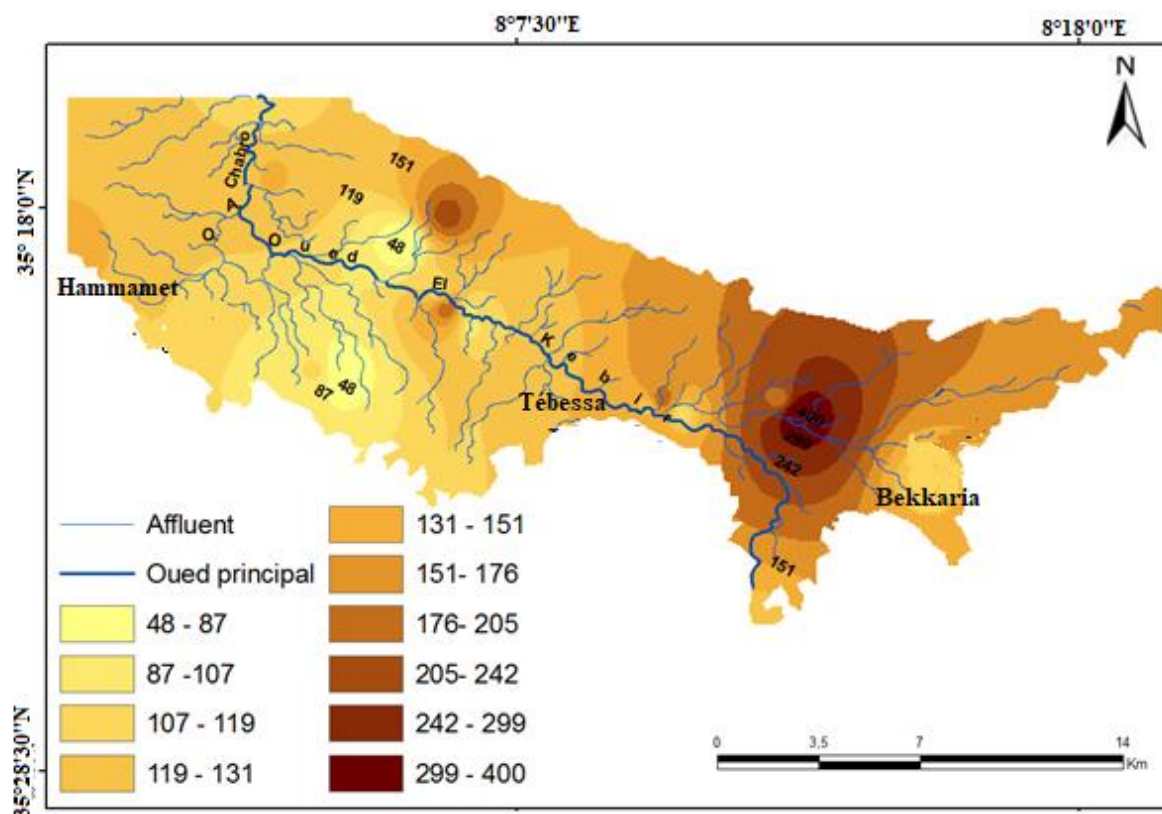


Figure 3.14: Carte d'isoteneurs en sodium (mg/l)

5.6. Potassium

Le potassium est l'élément le moins répandu dans les eaux naturelles ; il est utilisé comme engrais sous forme de KCl et de K_2SO_4 . Il est très souvent lié aux minéraux argileux présents

La carte réalisée des iso teneurs du potassium (Figure 3.10) révèle que quelques points de prélèvement dépassent la valeurs admissible (12mg/l). Ces fortes teneurs peuvent être rattachées à une intrusion saline ou à une pollution agricole (Giraud, Lachassagne et al. 2000).

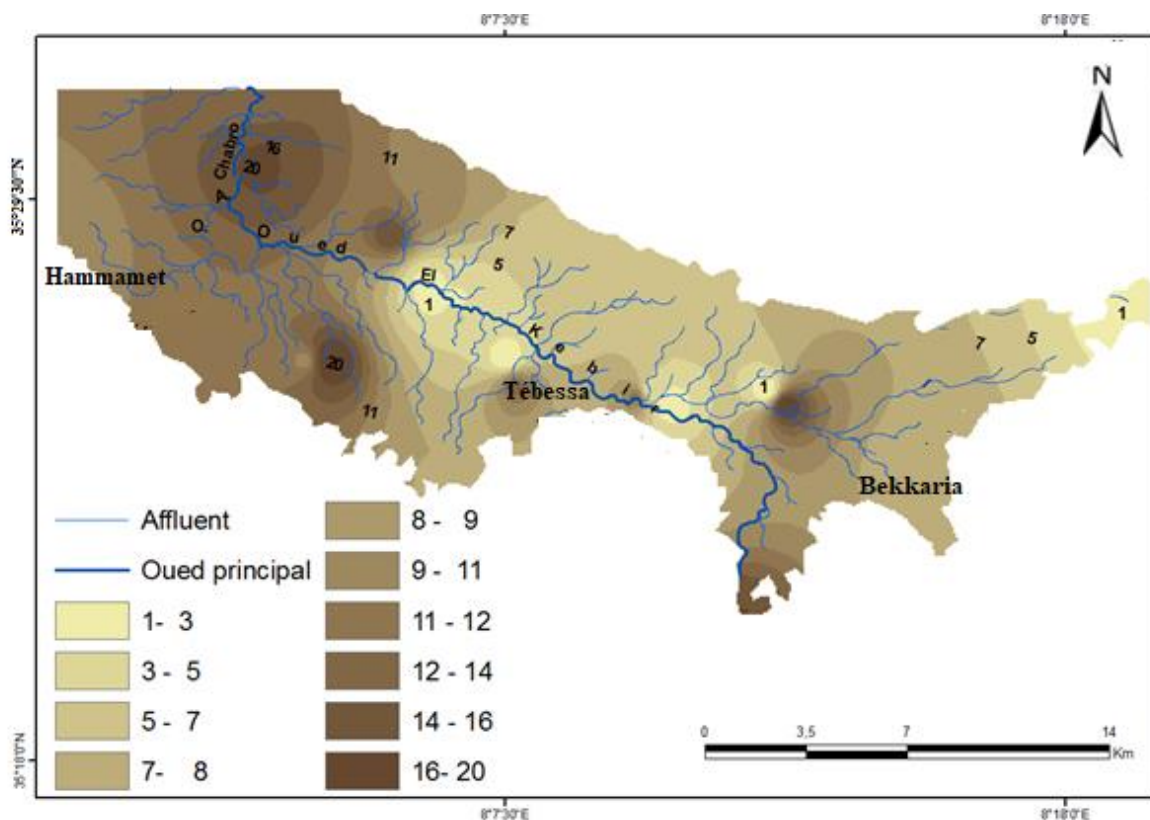


Figure 3.15: Carte d'isoteneurs en potassium (mg/l)

5.7. Magnésium

Le magnésium est un élément très répandu dans la nature, dans de nombreux minéraux et dans les calcaires (2.1% de l'écorce terrestre). Son abondance géologique, sa grande solubilité, sa large utilisation industrielle font que les teneurs dans l'eau peuvent être importantes. Le magnésium dans l'eau provient de l'attaque par l'acide carbonique des roches magnésiennes et de la mise en solution de magnésium sous forme de carbonates ($MgCO_3$) et de Bicarbonates (Mg_2HCO_3).

La carte de magnésium reflète les formations géologiques de la zone d'étude (Figure 3.11), en effet les fortes concentrations caractérisant la majorité des eaux qui sont localisées dans la région de Bekkaria, elles sont dû aux formations de calcaire de Dj. Bouramane sud -Est et de Dj. Guenifida N-W. Également le lessivage des passées dolomiques contenues dans le remplissage plio-quaternaire et aux formations gypsifères de Dj. Djebissa à l'Est de la plaine.

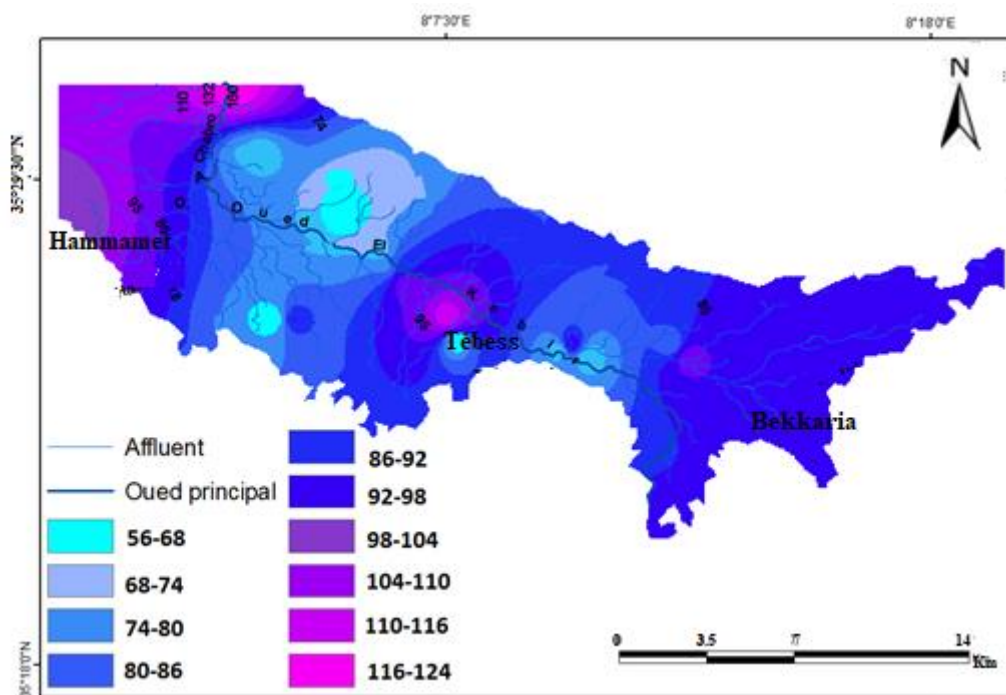


Figure 3.16 : Carte d'isoteneurs en magnésium (mg/l)

Conclusion

Une dégradation de la qualité des eaux souterraines a été remarquée au centre du terrain et parfois sur les bordures. En effet, la pollution des eaux souterraines de la plaine a plusieurs origines à savoir les rejets des eaux usées, les activités agricoles, les décharges publiques et la lithologie des couches superficielles.

Le diagramme de Piper révèle et confirme l'influence de la géologie sur la qualité des eaux de la plaine de Tébessa, Effectivement, le calcium provient des eaux des bordures, par ailleurs le magnésien résulte des argiles qui s'intercale au niveau de plusieurs cotés dans la stratification des couches qui forment l'aquifère. En outre, les sulfates et les chlorures sont dues à l'activité anthropique.

La salinisation des eaux souterraines devrait résulter des effets des interactions à long terme entre les eaux souterraines et les formations géologiques. Cependant, les cartes de répartition des éléments chimiques majeurs montrent une augmentation des teneurs de ces éléments allant des bordures de la plaine vers le centre.

CHAPITRE 4 :
VULNERABILITE A LA
POLLUTION DES EAUX
SOUTERRAINES

1.Introduction

Les eaux souterraines sont considérées comme ressource utilisée pour la consommation humaine et pour un emploi dans les usages agricoles et industriels.

Ces eaux sont fréquemment alertées par contamination par des polluants de natures différentes : biologique, chimique ou physique. La meilleure approche pour la protection d'un aquifère à l'échelle international est d'utiliser des outils préventifs à sa contagion. Différentes méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des nappes peuvent répondre à cette tâche. Néanmoins, les modèles paramétriques sont celle utilisée par un grand nombre d'auteurs pour définir cette vulnérabilité intrinsèque (Ewodo et al ,20016).

La plaine de Tébéssa est occupée essentiellement par des zones agricoles caractérisées par une utilisation importante d'engrais chimiques et de pesticides qui représentent, en plus des rejets domestiques et industriels (Figure 5.3), un risque permanent sur la qualité des eaux souterraines.

Ce chapitre vise essentiellement à cartographier la vulnérabilité intrinsèque à la pollution de la Merdja (plaine de Tébéssa). Afin d'atteindre cet objectif, des méthodes paramétriques DRASTIC, GOD et SI qui tiennent compte des caractéristiques intrinsèques de l'aquifère sont utilisées. Également, une méthode DRASTIR (DRASTIC modifiée) est appliquée d'où la substitution du paramètre conductivité C par le paramètre résistivité. Etant donné que l'élément (NO_3^-) est un cas type de la pollution d'origine agricole ou rejets domestiques ,une carte des teneurs des nitrates est nécessaire pour évaluer l'efficacité de chaque méthode.

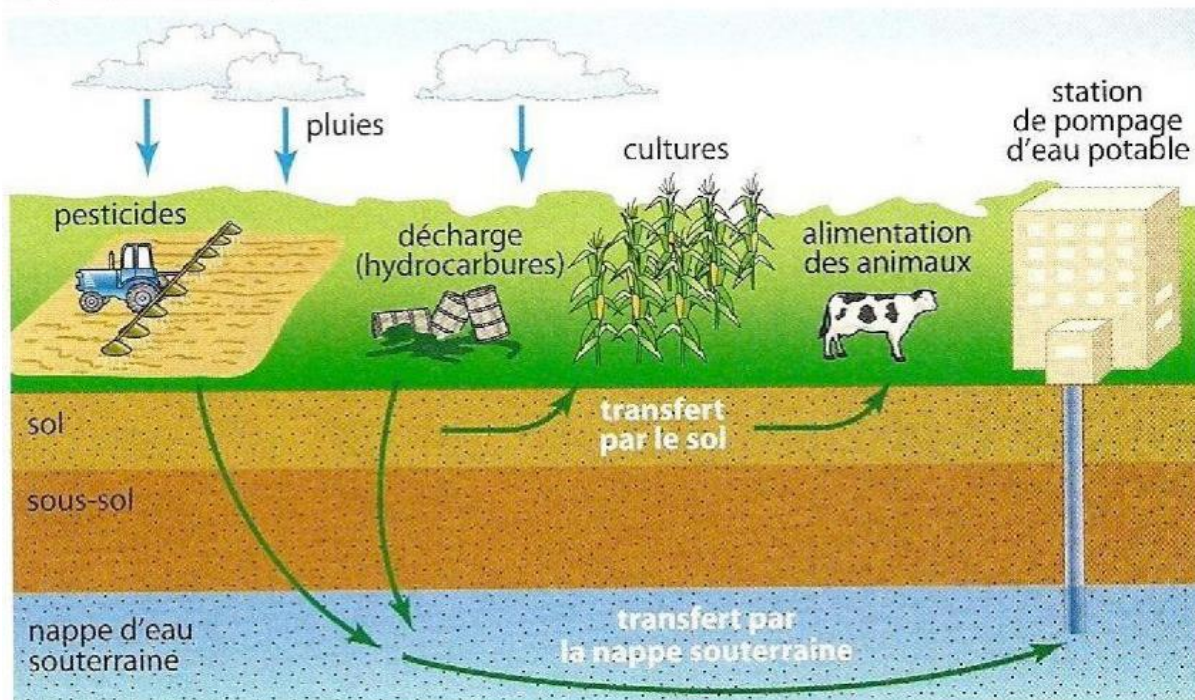


Figure 5.1 : Pollution souterraines (source : Jean Villar sciences ,2013)



Figure 5.2 : Drainage des eaux usées par Oued Chabro-Ksob

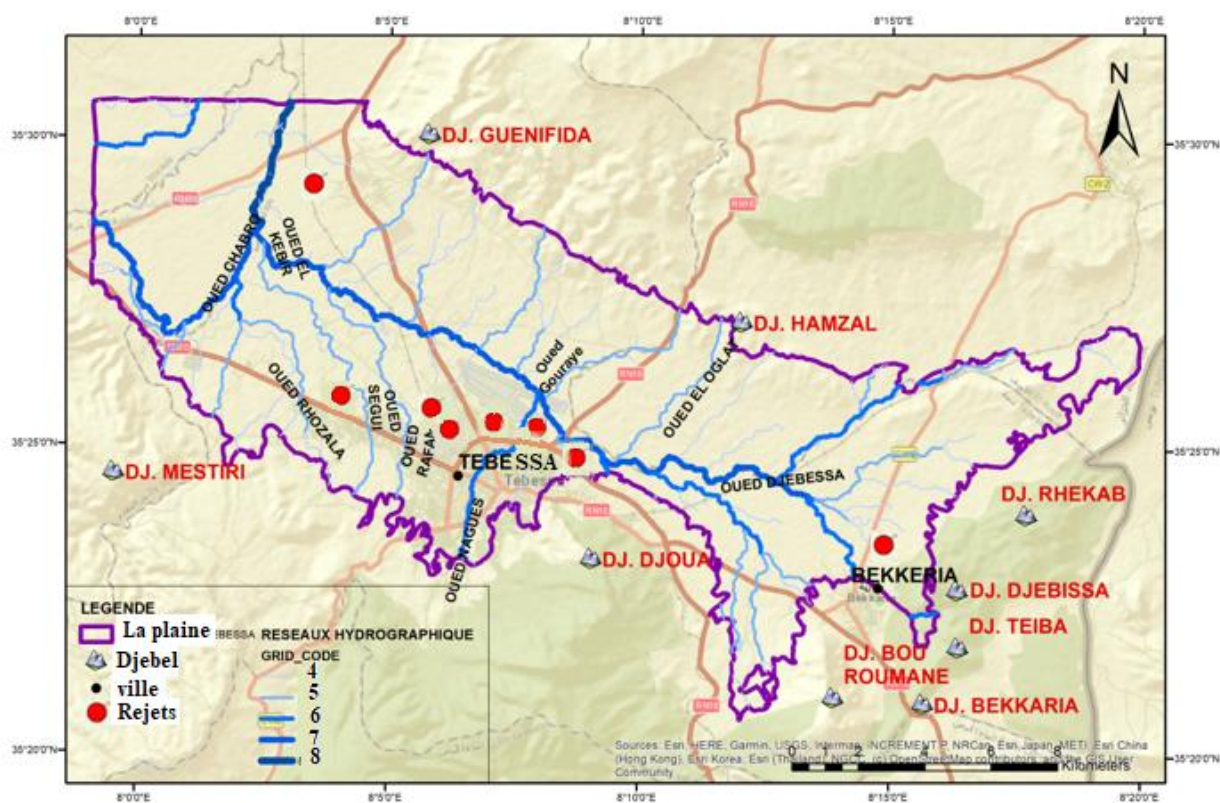


Figure 5.3 : Carte des rejets de la plaine de la Merdja

2. Les méthodes d'estimation de la vulnérabilité

De nombreuses méthodes de détermination de la vulnérabilité des eaux souterraines ont été développées dans le monde, allant des plus complexes avec des modèles prenant en compte les processus physiques, chimiques et biologiques dans la zone noyée, à des méthodes de pondération entre différents critères affectant la vulnérabilité (Gogu et Dassargues, 1998).

Elles peuvent être classées en trois grandes catégories :

- Les méthodes de cartographies à index basées sur la combinaison de cartes de divers paramètres d'une région (critères de vulnérabilités), en donnant un index numérique ou une valeur à chaque paramètre. La combinaison des cartes se fait au moyen de logiciels de traitement multicritères (SIG) ;
- Les modèles de simulation : Ils consistent à trouver une solution numérique à des équations mathématiques représentant le processus de transfert de contaminants (Schnebelen 2002). Ils donnent une image de vulnérabilité spécifique de la nappe ;
- Les méthodes statistiques : Elles sont basées sur une variable qui dépend de la concentration en contaminant ou d'une probabilité de contamination. Ces méthodes intègrent des données sur la distribution des contaminants sur la zone d'étude. Elles donnent une image de la vulnérabilité spécifique de la nappe.

Les méthodes les plus utilisées couramment sont : DRASTIC, SI, GOD, EVARISK et MINNESOTA. Ces méthodes ont fait l'objet d'une étude comparative à Québec, au Canada, par la Municipalité Régionale de Comté (MRC) dans le cadre d'une étude pour la gestion et la protection des ressources en eaux souterraines.

Il en ressort que les modèles analytiques complexes sont utilisés à petite échelle, ce qui nécessitera un nombre important de points. En revanche, pour une densité moyenne de points, on préférera utiliser une méthode à cotation numérique et enfin pour une faible densité de points, c'est la méthode cartographique qui sera utilisée pour de grandes échelles.

Enfin, pour aider au choix de l'utilisation d'une méthode par rapport à une autre les auteurs Vrba et Zaporozec (1994) ont établi un diagramme donnant l'interrelation entre l'échelle de la carte, la densité d'informations et la quantité d'informations par points.

La caractérisation de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines est un excellent outil de plus en plus développé et connu par les chercheurs en hydrogéologie.

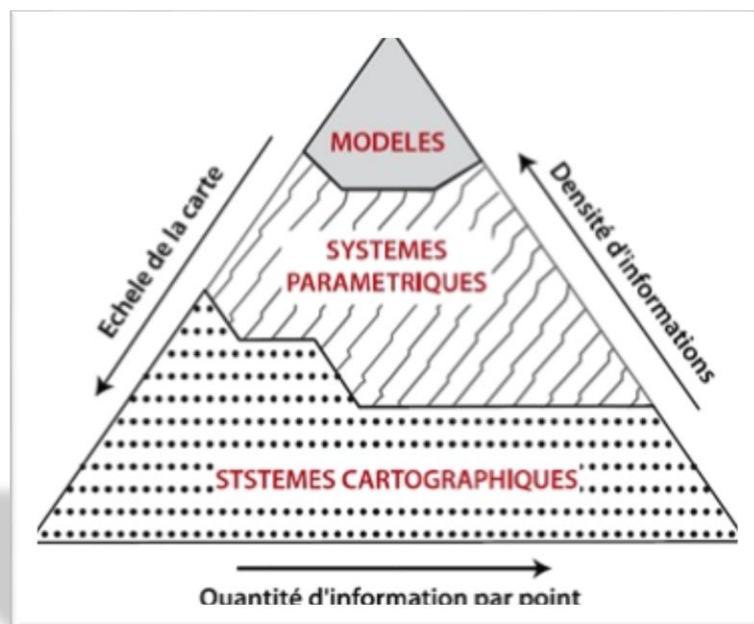


Figure 5.4: Diagramme de Vrba et Zaporozec

3. Etude de la vulnérabilité à la pollution de la plaine de la Merdja

La plaine de Tébessa représente la seule source pour toute activité ; néanmoins elle est sujette quotidiennement à la pollution à cause des caractéristiques naturelles de celle-ci et la nature des activités qui y sont centralisées.

L'aspect complexe de la distribution des eaux d'un côté et la difficulté d'en trouver un prototype efficace pour bien gérer ces ressources d'un autre côté, la sécurité et la conservation de ces ressources restent l'une des priorités des autorités locaux.

C'est pourquoi quatre méthodes seront utilisées (DRASTIC , DRASTIR , SI et GOD), elles se présentent sous forme de système de cotation numérique basées sur la considération des différents facteurs influençant le système hydrogéologique. Chaque paramètre est subdivisé en intervalle de valeurs significatives.

En dernier, une carte de la répartition des teneurs en nitrates sera utilisée pour valider les résultats trouvés par des quatre méthodes, puisque les nitrates jouent un rôle important dans la pollution de la nappe en profondeur.

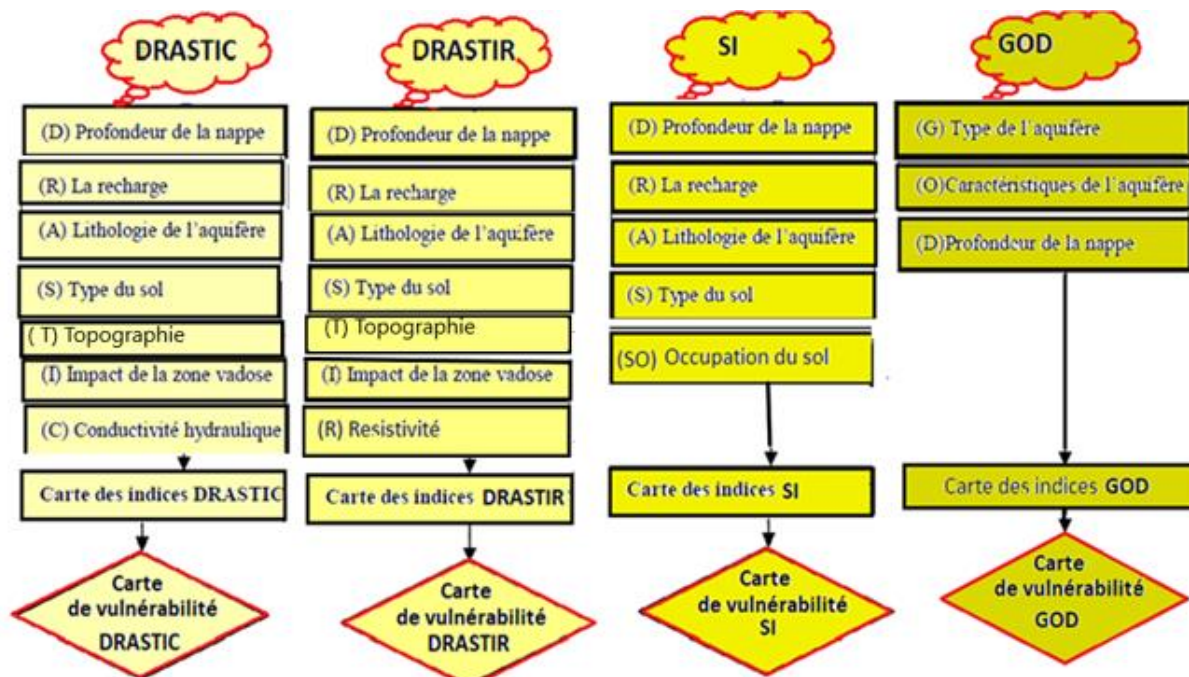


Figure 5.5 : Illustration des Paramètres des quatre méthodes utilisées (DRASTIC, DRASTIR, SI et GOD)

3.1. Application de la Méthode de DRASTIC

La méthode DRASTIC a été mise au point par Environmental Protection Agency (EPA) (Agence de Protection et de l'Environnement) aux Etats-Unis en 1987 (Aller et al. 1987). Elle permet d'évaluer la vulnérabilité verticale des eaux souterraines à la pollution. La méthode DRASTIC tire son nom de l'acronyme de ses 7 paramètres de vulnérabilité (Bézégues et al. 2002).

Tableau 14 Poids attribués pour les paramètres de DRASTIC (Aller et al ,1987)

N°	Poids	Paramètre
1	5	D= profondeur de l'eau
2	4	R = recharge nette
3	3	A = aquifère média
4	2	S = sol ⇒ type de sol
5	1	T = topographie ⇒ pente du terrain
6	5	I = impact de la zone vadose
7	3	C = conductivité hydraulique

La cote de Chacun des sept paramètres doit être évaluée. Elle peut varier entre 1 et 10 selon les conditions locales de la zone à étudier, cette cotation est définie dans le tableau 4.1 DRASTIC.

Les notations généralement accordées aux sept paramètres de la méthode DRASTIC. Pour chacun de ces sept paramètres considérés par la méthode DRASTIC, on réalise une carte thématique sur laquelle sont délimitées des zones en fonction des intervalles établies par le système de cotation DRASTIC.

Tableau 15 Notations accordées aux paramètres de la méthode de DRASTIC

D : Profondeur de la nappe (m)	Evaluation	R : Recharge (mm)	Notation
0-1.5	10	>25.5	9
1.5-4.5	9	25.5- 17.5	8
4.5-9	7	17.5-10	6
9-15	5	10-5	3
15-22.5	3	5-0	1
22.5-30	2		
> 30	1		
A : Nature de la zone saturé	Evaluation	S : Nature du sol	Notation
Calcaire Karstique	10	Mince ou absent	10
Sable et gravier	8	Sables	9
Grés massif	6	Limons sableux	6
Métamorphique altéré	4	Limons	4
Métamorphique	3	Limons silteux	3
Massive shale	1	Argiles	1
Sable et gravier fin	5		
T : Topographie (pente %)	Evaluation	I : Lithologie de la zone vadose	Notation

0-2	10	Calcaire Karstique	10
2-6	9	Sable et gravier	9
6-12	5	Sable et gravier avec silt et argile	8
12-18	3	Grés	6
> 18	1	Calcaire	6
		Silt et argile	1
C : Perméabilité (m/s)	Evaluation		
> 9,4.10⁻⁴	10		
9,4. 10⁻⁴-4,710⁻⁴	8		
4,710⁻⁴-32,9.0⁻⁵	6		
14.7-32,910⁻⁵	4		
14,7.10⁻⁵-4,710⁻⁵	2		
4,7.10⁻⁵-4,7.10⁻⁷	1		

Les cartes ainsi obtenues permettent de visualiser le degré relatif de vulnérabilité d'un secteur de la zone étudiée. Le potentiel de pollution augmente dans le même sens que l'indice. Cet indice est calculé par la formule suivante :

$$Id = (Dn \times dp) + (Rn \times Rp) + (An \times AP) + (Sn \times Sp) + (Tn \times Tp) + (In \times Ip) + (Cn \times Cp)$$
 où D,R,A,S,T,I,C, sont les paramètres cités plus haut :

n : notation accordée à chaque paramètre ;

p : facteur de pondération accordé à chaque paramètre ;

3.1.1. Description des paramètres et réalisation des cartes thématiques

Pour chacun des sept paramètres utilisés par la méthode " DRASTIC", une carte thématique est réalisée. Sur chacune de ces cartes, sont délimitées les zones caractérisées par un indice de vulnérabilité partiel du paramètre correspondant.

3.1.1. 1.Profondeur de la nappe (D)

La profondeur de la nappe est un paramètre important, qui constitue un facteur Déterminant de la vulnérabilité. Plus cette profondeur est élevée, plus le contaminant met du temps à atteindre la surface piézométrique.

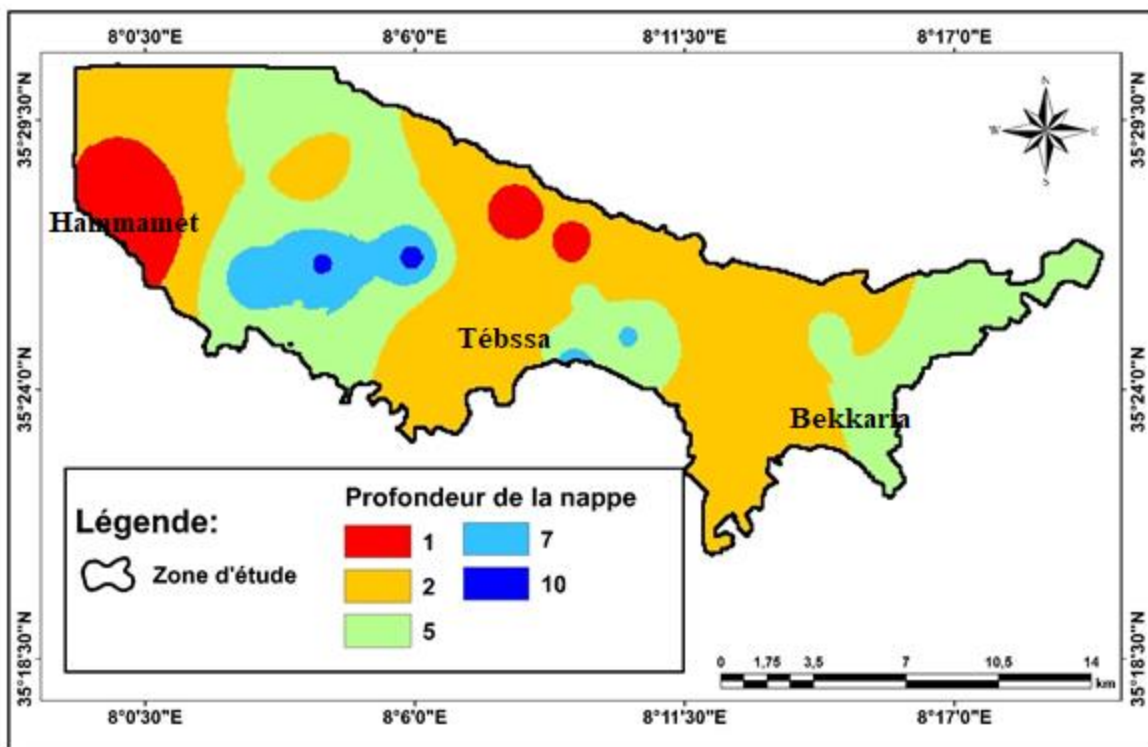


Figure 5.6: Carte du paramètre (D), profondeur de l'eau de la nappe alluviale de Tébessa

Ces indices ont permis d'établir la carte thématique du paramètre profondeur (Figure 5.6), divisée en cinq (5) classes. L'observation de ladite carte montre que les plus faibles indices sont répartis dans la zone Boulhef El Dyr à proximité des bordures de Dj. Gouray et également dans les bordures de Dj. Mestiri dans la région d'El Hammamet, leurs profondeurs ne dépassent 30m, alors que l'indice $I_c = 10$ m se situent dans les zones centrales de l'Est vers l'Ouest. En revanche des faibles profondeurs sont remarquées dans deux sites, ce qui va favoriser la pollution des eaux souterraines dans cette région.

3.1.1. 2.La recharge efficace (R)

La recharge efficace joue un rôle déterminant dans le transfert de la lame d'eau depuis la surface du sol jusqu'à l'aquifère sous-jacent. Ce paramètre est particulièrement difficile à évaluer lors des études hydrogéologiques.

Non seulement la difficulté de l'évaluation de l'infiltration avec précision mais aussi l'absence de données expérimentales sur le terrain et sa distribution in situ en fonction des caractéristiques géologiques du bassin, on a considéré que l'infiltration est répandue sur la surface du bassin de façon homogène et identique et elle estimée supérieure à 25 mm sur l'ensemble de la plaine.

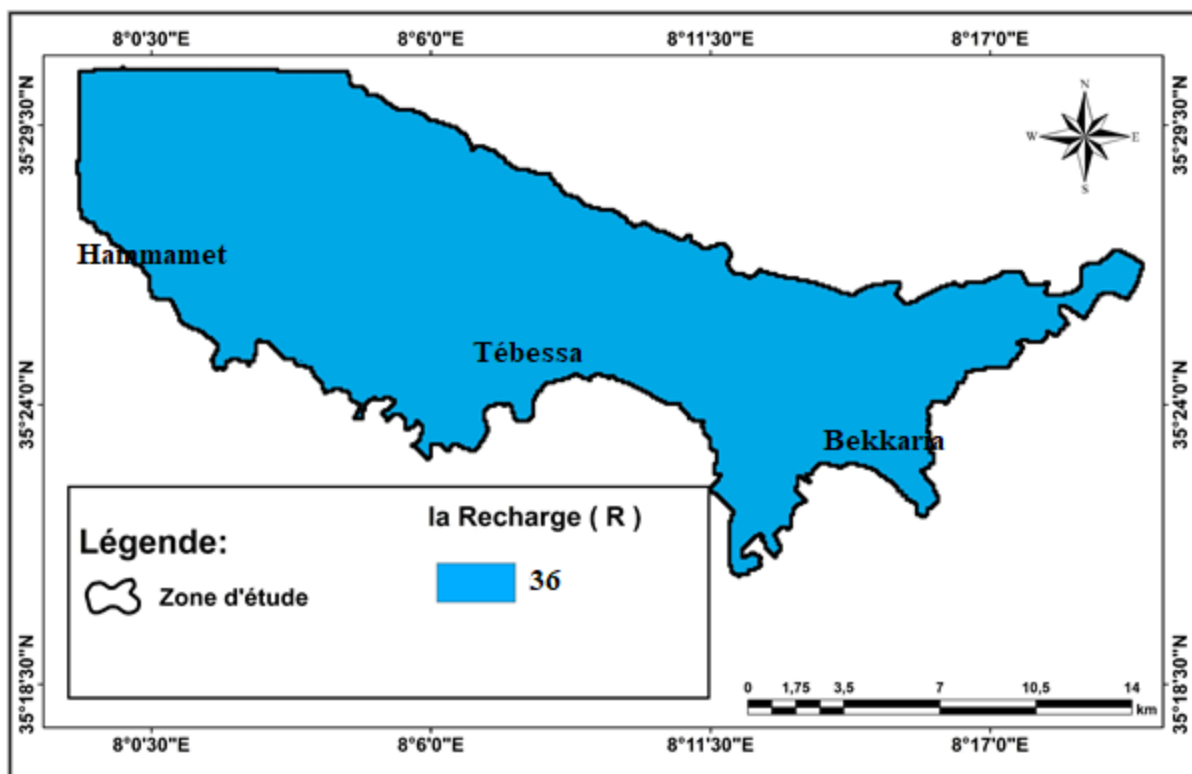


Figure 5.7 : Carte du paramètre (R), la recharge de la nappe alluviale de Tébessa

3.1.1.3. Nature du matériel aquifère (A)

La description du matériel constituant la zone saturée et non saturée, a été réalisée grâce à la notice explicative de la carte géologique couvrant la région et des coups géologiques, et lithologiques des forages captant l'aquifère. Les rapports de prospections géophysiques (CGG 1975, STROJEXPORT 1978) et les coupes géo-électriques interprétatives ont été également exploités.

Il ressort de la compilation des tous ces documents la distinction de trois (3) zones à différents indices vulnérabilité.

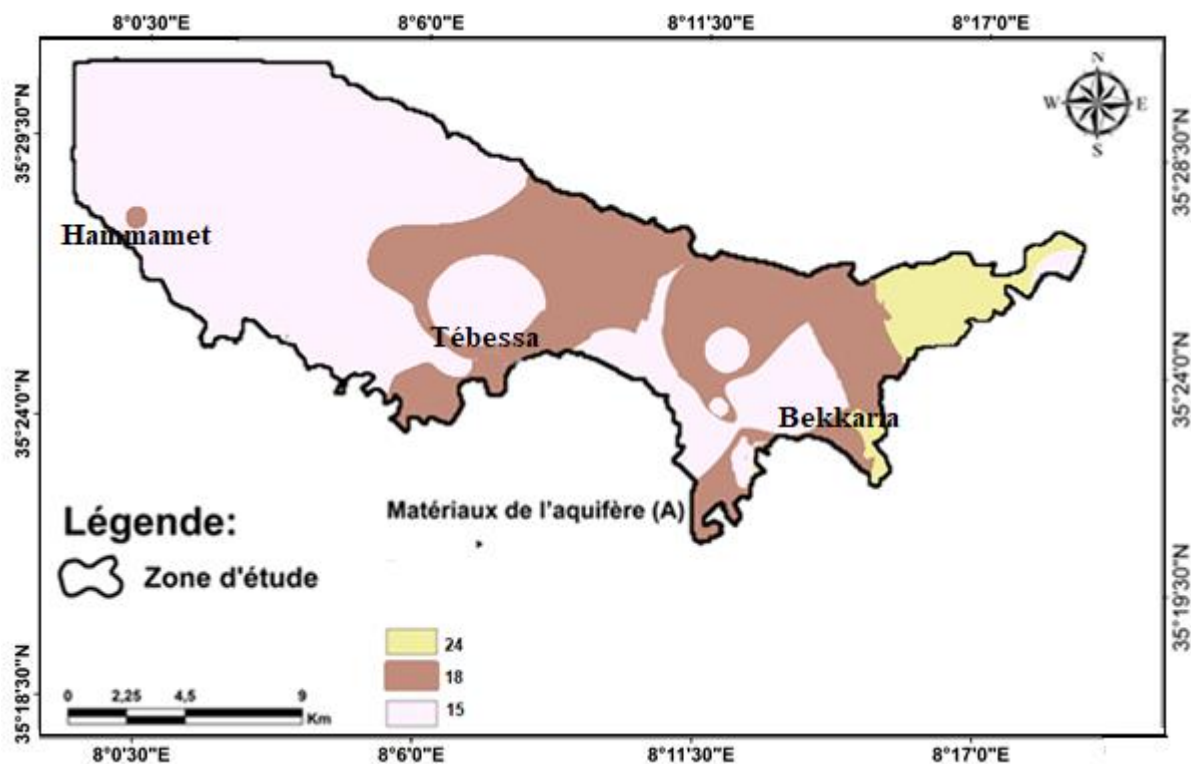


Figure 5.8 : Carte du paramètre (A), la nature du matériel la nappe alluviale de Tébessa

L'analyse de la carte relative à la nature du matériel de l'aquifère (A), a permis de dégager trois classes différentes :

- Classe I : caractérisée par la prédominance de limons argileux avec des intercalations de graviers ou de sable ;
- Classe II : caractérisée par des argiles avec des graviers de perméabilité moyenne (moins vulnérable) ;
- Classe III : caractérisée par de gros cailloutis, voire des galets de calcaire très perméables (plus vulnérable).

3.1.1.4. La nature du sol (S)

La nature de la surface du sol influe sur la pénétration des polluants vers l'aquifère. Plus le sol est riche en argile, plus l'absorption des polluants est importante, et plus la Protection des eaux souterraines est grande. Ce paramètre joue un rôle important dans la détermination des zones polluées.

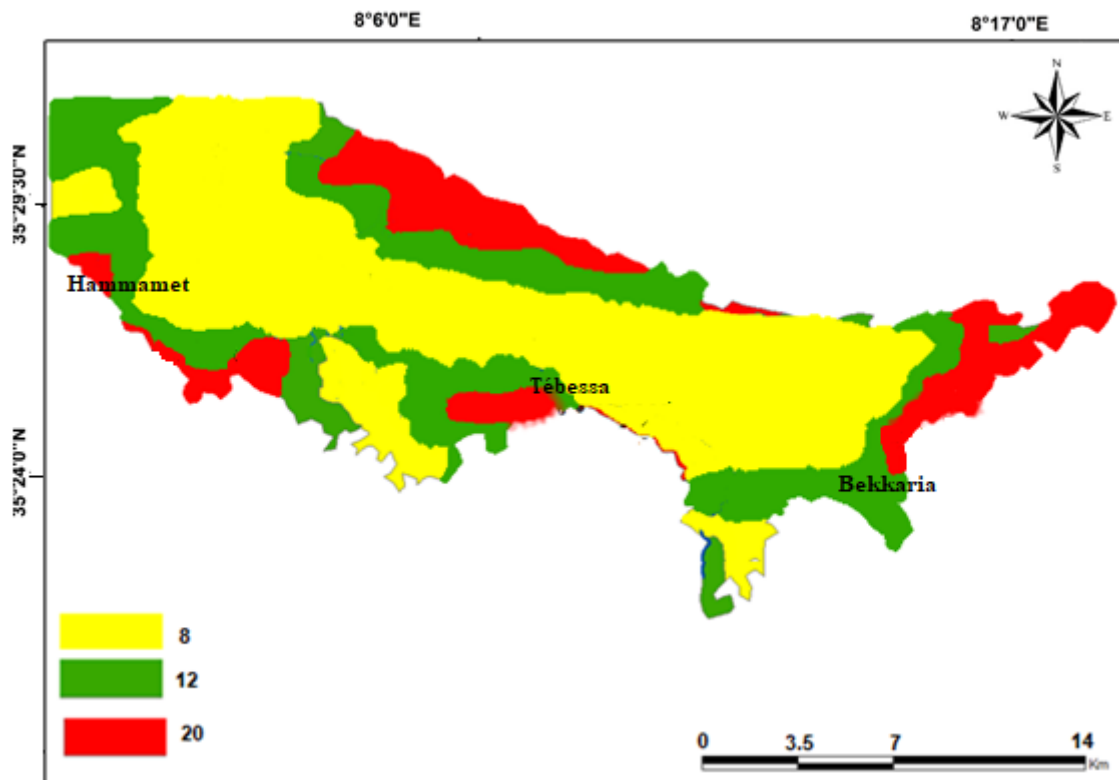


Figure 5.9 : Carte de paramètre (S), nature de sol (la nappe alluviale de Tébessa)

L'examen de la carte des indices relatifs à la nature du sol montre trois classes pédologiques :

- Classe I : une texture graveleuse qui présente un grand risque de vulnérabilité ($I_s=20$) localisée dans les bordures méridionales et septentrionales (Tébessa, Hammamet et Bekkaria) ;
- Classe II : une texture sableuse-argileuse, ceci indique un indice de vulnérabilité moins élevé que le précédent ($I_s=12$) et elle occupe bordures méridionales et septentrionales de la plaine ;
- Classe III : Cette zone a un faible indice de vulnérabilité ($I_s=8$) occupe toute la partie centrale de la plaine et le long de l'oued Chabro.

3.1.1.5 .la topographie (pente)(T)

Plus la pente des terrains est grande, plus le ruissellement des eaux est important et par conséquent, la contamination des eaux souterraines est faible. la carte relative à la pente (T) montre que plus de 65% de la surface de la zone d'étude présente une pente très faible de 0 à 2%, ce qui favorise la migration du polluant vers la nappe. Par contre, Les zones les moins vulnérables sont situées aux bordures avec une pente qui varie de 2% à 6%.

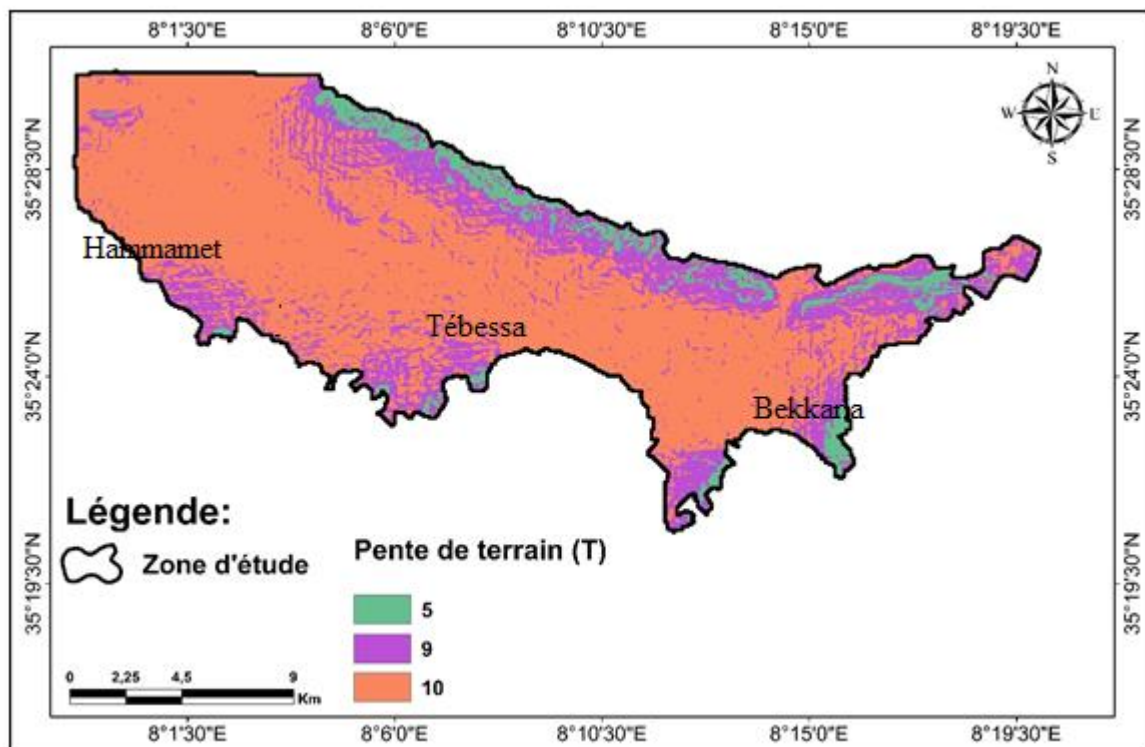


Figure 5.10 : carte du paramètre (T) topographie (la nappe alluviale de Tébessa)

3.1.1.6. Nature de la zone non saturée (vadose) (I)

Le rôle de la zone non saturée est très important dans les deux méthodes DRASTIC et DRASTIR, étant donné qu'on considère que la nature et l'épaisseur de la zone située au-dessus du niveau piézométrique contrôlent de façon notable la vulnérabilité à la pollution des réservoirs.

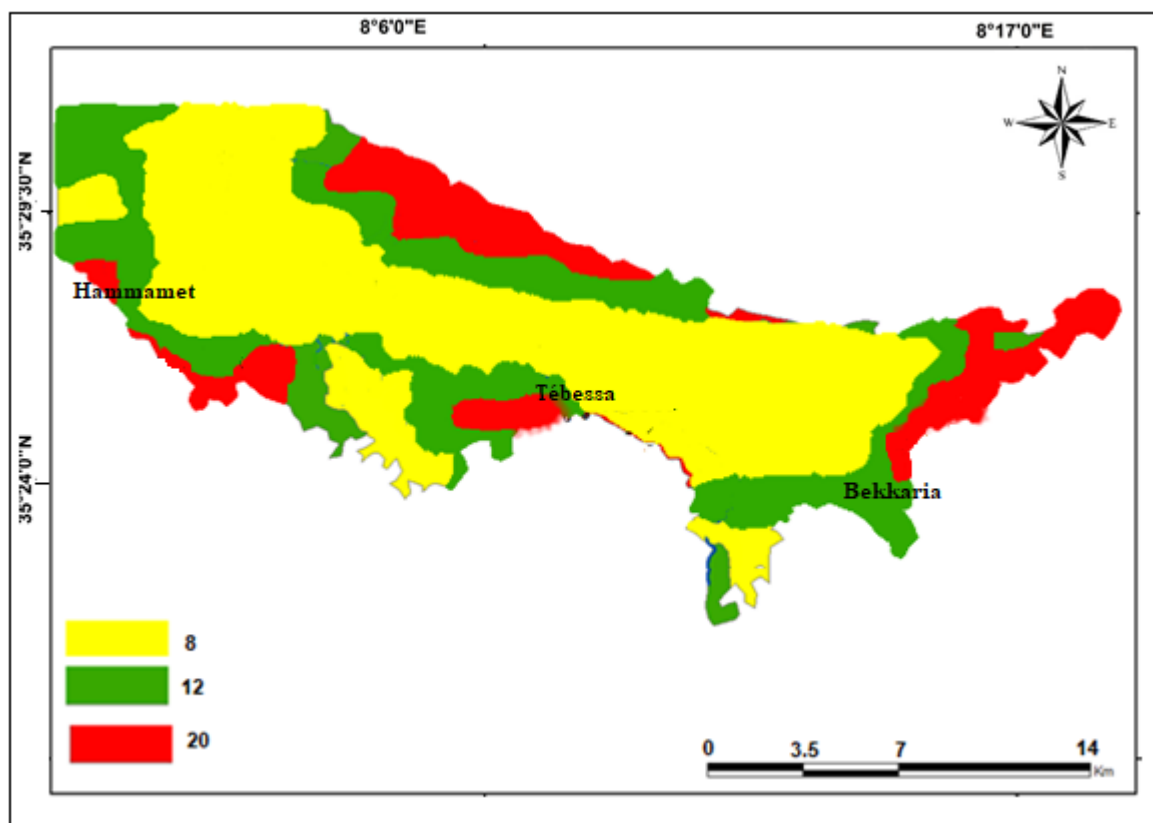


Figure 5.11 : Carte du paramètre (I) de la zone vadose (la nappe alluviale de Tébessa)

L'étude géophysique (coupes géo électriques) et les logs stratigraphiques des forages ont permis de distinguer trois zones à différent degré de vulnérabilité (Figure 5.11).

- Zone I : caractérisée par des gros cailloutis, voire même des galets de calcaires très perméables avec un indice de vulnérabilité ($I_i = 40$). Elle est présente au niveau d'Ain Chabro et El Hammamet au sud de la plaine. Boulhef Eldyr et Morsott dans la partie Nord.
- Zone II : caractérisée par des argiles avec des graviers de perméabilité moyenne (Moins vulnérables), (l'indice $I_i = 15$). Elle est localisée principalement dans la zone de Bekkaria à l'Est de la plaine et dans les bordures Sud et Nord, également dans le Nord-Ouest.
- Zone III : Caractérisée par la prédominance de limons argileux, (l'indice $I_i = 5$). Elle occupe la totalité de la partie centrale de la plaine.

3.1.1.7. Le paramètre de conductivité hydraulique (C)

La perméabilité peut être considérée comme une vitesse à travers les terrains poreux traduite par le rapport entre la transmissivité et l'épaisseur de l'aquifère. En effet, plus ce paramètre est grand, plus la propagation des polluants est rapide.

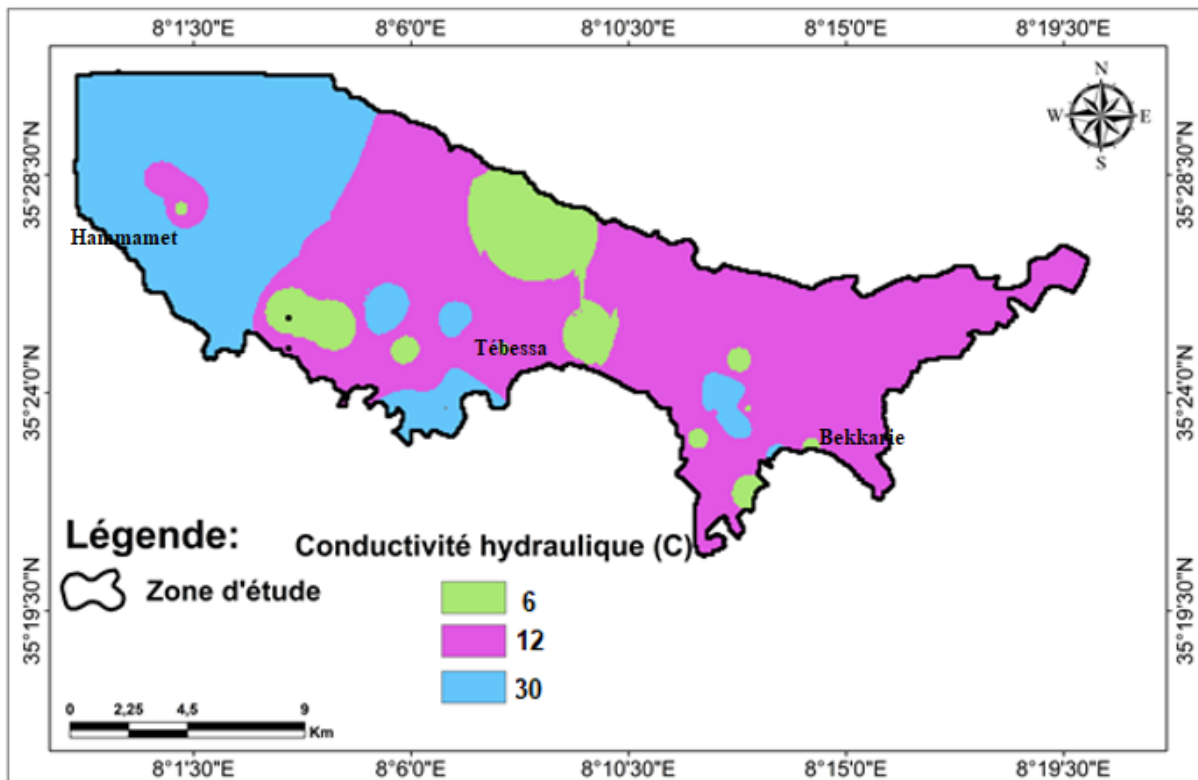


Figure 5.12: Carte conductivité hydraulique (C), (la nappe alluviale de Tébessa)

D'après la carte, on distingue trois classes de conductivité :

- Classe I : elle représente la valeur la plus faible de la conductivité avec un indice $I_c = 6$, cette classe est répartie un peu partout dans la zone d'étude.
- Classe II : elle représente des conductivités dont l'indice $I_c = 12$, elle occupe la majorité de la plaine rien que la partie Ouest ;
- Classe III : elle représente la valeur la plus forte de la conductivité avec un indice $I_c = 10$, cette classe est localisée dans l'ouest de la zone d'étude.

3.1.1.8. Carte de synthèse (vulnérabilité à la pollution)

L'application de la méthode DRASTIC au niveau de la plaine de Tébessa a permis la réalisation d'une carte de vulnérabilité, dont la quelle nous pouvons distingués trois classes de degré de vulnérabilité différentes. En effet, les zones de faible vulnérabilité Occupant 40,49% (Tableau ???) de la région d'étude est rencontrée à l'Est et au Nord Est de la plaine, ceci peut s'expliquer par une importante profondeur, la nature du sol caractérisée par une texture fine et une pente qui varie de moyenne à forte. De même, un secteur de vulnérabilité moyenne avec un pourcentage de 37,07 % de la surface totale est situé dans le centre de la plaine vers l'ouest et plus précisément dans le Nord-Ouest ou se localisent les eaux usées des rejets (Drainage des eaux usées par Oued Chabro-Ksob) et au niveau des agglomérations (Tébessa et Hammamet), cette dernière contient un grand nombre de forages destinés au développement agricole et à la direction de l'hydraulique d'où provient

70% de l'eau potable de Tébessa. En revanche, la zone de forte vulnérabilité avec un pourcentage 22,69 % est remarquée aux bordures Sud-Ouest. Effectivement, cette élévation s'explique par la nature graveleuse du sol de la zone vadose et les matériaux de l'aquifère qui sont très perméables, les rejets urbains (figure 5.3) au niveau de Hammamet et la faible profondeur (Figure 5.5). Par conséquence, les périmètres les plus vulnérables, désormais, doivent être soumis à un contrôle rigoureux pour définir les mesures de protection (Kachi, 2010).

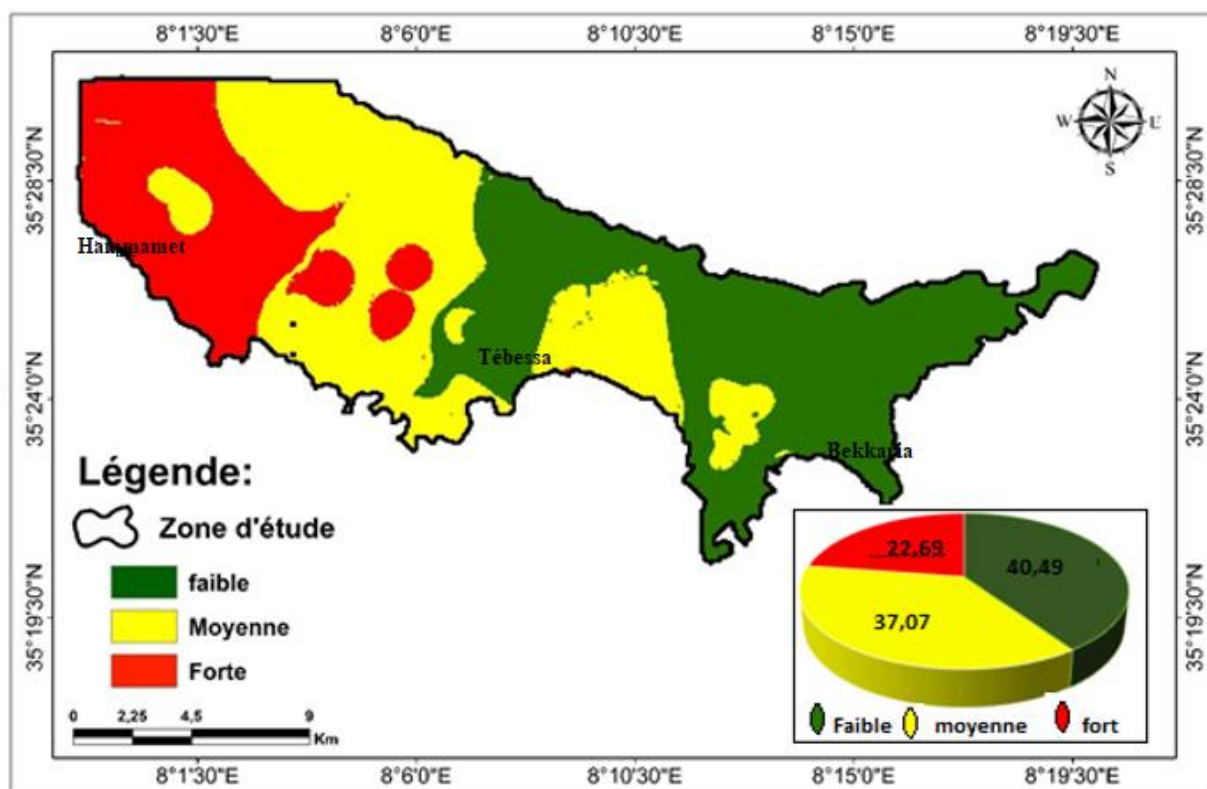


Figure 5.13: Répartition spatiale et en pourcentage, des degrés de vulnérabilité à la pollution selon la méthode DRASTIC

Tableau 16 Surface et surface en pourcentage de chaque classe par la méthode DRASTIC

Degré de vulnérabilité	Surface (Km ²)	Pourcentage (%)
Faible	94.73817177	40.48639819
Moyenne	86.75676005	37.07553848
Forte	53.09392966	22.68971353

3.2. Calcul de la vulnérabilité de la nappe alluviale de Tébessa par la méthode DRASTIR (méthode proposée)

La méthode proposée (DRASTIR) garde le même nombre de paramètres que la méthode de DRASTIC. Par ailleurs, nous proposons de remplacer la carte de la conductivité hydraulique par la carte de résistivité. Dans le but d'intervenir le facteur économique et facteur temps, nous avons fait appelle à la géophysique. En effet, différentes méthodes de prospection géophysique permettent d'appréhender la distribution spatiale des propriétés physiques du terrain grâce à la mesure et l'analyse, non destructives, elles peuvent être couplées entre elles et permettent la couverture d'une grande surface ou d'un grand volume de terrain pour des couts réduit. Les paramètres pris en considération par la méthode proposée sont les suivants :

- [D] : Depth to grouwndwater (Distance à la nappe, épaisseur de la zone non saturée)
- [R] : Recharge
- [A] : Aquifer media (nature de la zone saturée)
- [S] : soil media (nature du sol)
- [T] : Topography (topographie, pente en %)
- [I] : impact of the vadose zone (nature de la zone non saturée)
- [R] : resistivity (résistivité de l'aquifère).

Tableau 17 Poids attribués pour les paramètres de DRASTIR (DRASTIC modifiée)

N°	Poids	Paramètre
1	5	D= profondeur de l'eau
2	4	R = recharge nette
3	3	A = aquifère média
4	2	S = sol \Rightarrow type de sol
5	1	T = topographie \Rightarrow pente du terrain
6	5	I = impact de la zone vadose
7	3	R = résistivité

3.2.1. Le paramètre de résistivité (R)

La résistivité est considérée un paramètre important dans l'élaboration de la carte de vulnérabilité par la méthode DRASTIR (DRASTIC modifiée) puisque cette dernière nous renseigne sur la vitesse de propagation des polluants dans la nappe.

Tableau 18 Valeurs accordées au paramètre résistivité de la méthode de DRASTIC

R: Résistivité ($\Omega.m$)	Valeur
50>	10
50-85	8
85-100	6
100-150	4
150-180	2
>180	1

Plus ce paramètre est faible, plus le transfert des polluants est rapide. L'estimation des indices de ce paramètre a été faite selon les classes qui sont présentées dans le (tableau 5.6).

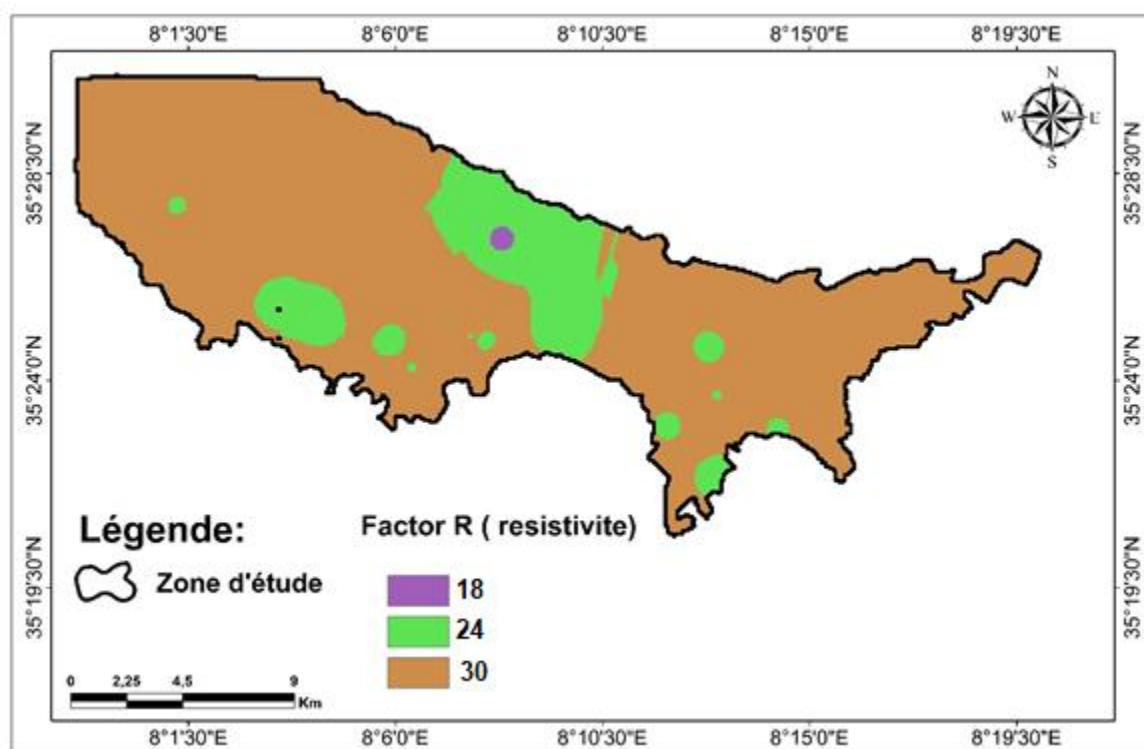


Figure 5.13 : Carte de la résistivité (R), (la nappe alluviale de Tébessa)

La carte de la résistivité révèle que les valeurs dans la majorité de la plaine dépassent 50 $\Omega.m$. Également quelques valeurs comprises entre 50 $\Omega.m$ -85 $\Omega.m$ qui sont réparties sous forme de petit espace un peu partout dans la plaine. En plus, des valeurs qui oscillent entre 85 $\Omega.m$ - 100 $\Omega.m$ sont remarquées presque au Nord.

3.2.2. Carte de synthèse de la vulnérabilité par la méthode de DRASTIC modifiée (DRASTIR)

Une seconde classification a permis de fixer les limites des intervalles des indices calculés et de faire correspondance des classes de vulnérabilités à ces indices, Ainsi, trois degrés de vulnérabilité à la pollution ont été mis en évidence : La classe faible, La classe moyenne et la classe forte.

La réalisation de la carte de vulnérabilité par la méthode DRASTIC modifiée révèle que les zones les plus vulnérables avec un pourcentage de 17,69 % du terrain d'étude se localisent dans les zones urbaines (Hammamet) et un petit espace est remarqué au niveau de Tébessa, également des zones de forte vulnérabilité Sud-Ouest ,en effet cette dernière est caractérisée par une faible profondeur , par l'existence des rejets et par une faible résistivité ,ainsi l'efficacité du nouveau paramètre est justifiée. Alors que les zones de moyenne vulnérabilité avec un pourcentage de 44,45 % de la surface totale, elle se situent dans le centre de la plaine et vers l'Ouest et un petit espace vers le Nord-Est, catégorie est prouvé par la résistivité et la profondeur moyenne et même aux rejets qui déverse dans l'oued Ksob au centre de la plaine. En outre, les zones faiblement vulnérables se localisent dans les parties Nord-Est et Nord également dans la partie sud -Est avec un pourcentage de 33.10 % de la région d'étude, cette classe est due à la nature de de la zone vadose, aux formations lithologiques et à la résistivité (85-100 Ω.m).

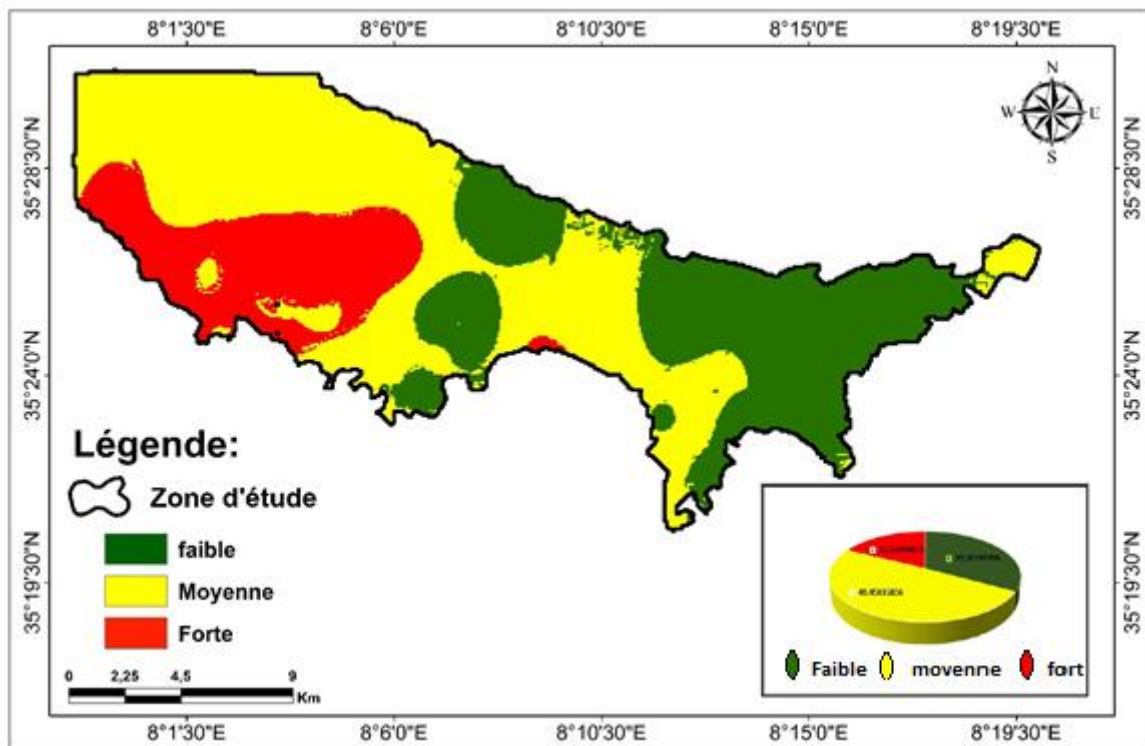


Figure 5.14: Degré de vulnérabilité à la pollution par la méthode DRASTIR

Tableau 19 Surface et surface en pourcentage de chaque classe par la méthode DRASTIR

Degré de vulnérabilité	Surface (Km ²)	Pourcentage (%)
Faible	77.45862631	33.10197706
Moyenne	115.7138386	49.45035836
Forte	41.34992643	17.67090873

3.3. Application de la méthode SI (Susceptibility (S) Index (I))

La méthode SI (Susceptibility Index ou méthode d'Indice de Susceptibilité), qui évalue la vulnérabilité verticale spécifique à la pollution agricole (essentiellement par les nitrates et également par les pesticides) (Ribeiro, 2000), a été développée au Portugal par Ribeiro.

En effet, cette dernière prend en compte cinq éléments. Ainsi, les Cotes relatives aux différentes catégories des paramètres dans la méthode DRASTIC ont été même conservées pour les paramètres maintenues (D : la profondeur de la nappe, R : la recharge efficace de l'aquifère, A : la lithologie de l'aquifère, et T : la topographie). Par ailleurs, Le dernier paramètre est l'occupation des sols (OS) traduit les activités anthropiques. Ce dernier facteur, qui n'est pas considéré dans les deux autres techniques, fait de celle-ci une méthode de vulnérabilité spécifique, principalement des nitrates (Hamza et al,2007). Les valeurs des cotes offertes aux classes des différents paramètres changent de 0 à 100, variant du moins vulnérable au plus vulnérable. Par contre, les poids donnés aux paramètres SI, ils changent de 0 à 1 selon l'importance du paramètre dans la vulnérabilité (Tableau 5.8). En dernier l'indice de vulnérabilité (ISI) est calculé en sommant les produits des cotes par les poids des paramètres concordants.

$$I_{SI} = D_p \times d_C + R_p \times R_C + A_p \times A_C + S_p \times S_C + T_p \times T_C + OS_p \times OS_C$$

Avec D, R, A, S, T, et OS les cinq paramètres de la méthode SI, p le poids du paramètre et c la cote associée.

Tableau 20 Poids attribués pour les paramètres de SI

N°	Poids	Paramètre
1	0.186	D= profondeur de l'eau
2	0.212	R = recharge nette
3	0.259	A = aquifère média
4	0.121	S = sol ⇒ type de sol
5	0.222	OS = occupation du sol

Tableau 21 Principales classes d'occupation du sol et valeurs correspondantes d'occupation

Classes d'occupation du sol	Valeur
Décharge industrielle, décharge d'ordures, mines	100
Périmètres irrigués, rizières, cultures annuelles irriguées et non irriguées	90
Carrière, chantier naval	75
Zones artificielles couvertes, zones vertes, zones Urbaines continues	70
Zones urbaines discontinues	70
Pâturages et zones agroforestières	50
Milieus aquatiques (marais, salines, etc.)	50
Forêts et zones semi-naturelles	0

3.3.1. Le paramètre d'occupation du sol (OS)

Le paramètre occupation du sol (*OS*) a été obtenu par le traitement de l'image satellite Sentinel prise en juillet 2020. Cette image a été utilisée pour établir la carte de l'occupation du sol de la zone D'étude (Figure 5.15).

Tableau 22 Notation et pondération selon l'occupation du sol

Classe	Occupation du sol	Notation
1	Zone urbaine	70
2	Foret	50
3	<i>Sol nu</i>	7
4	<i>Agriculture</i>	90

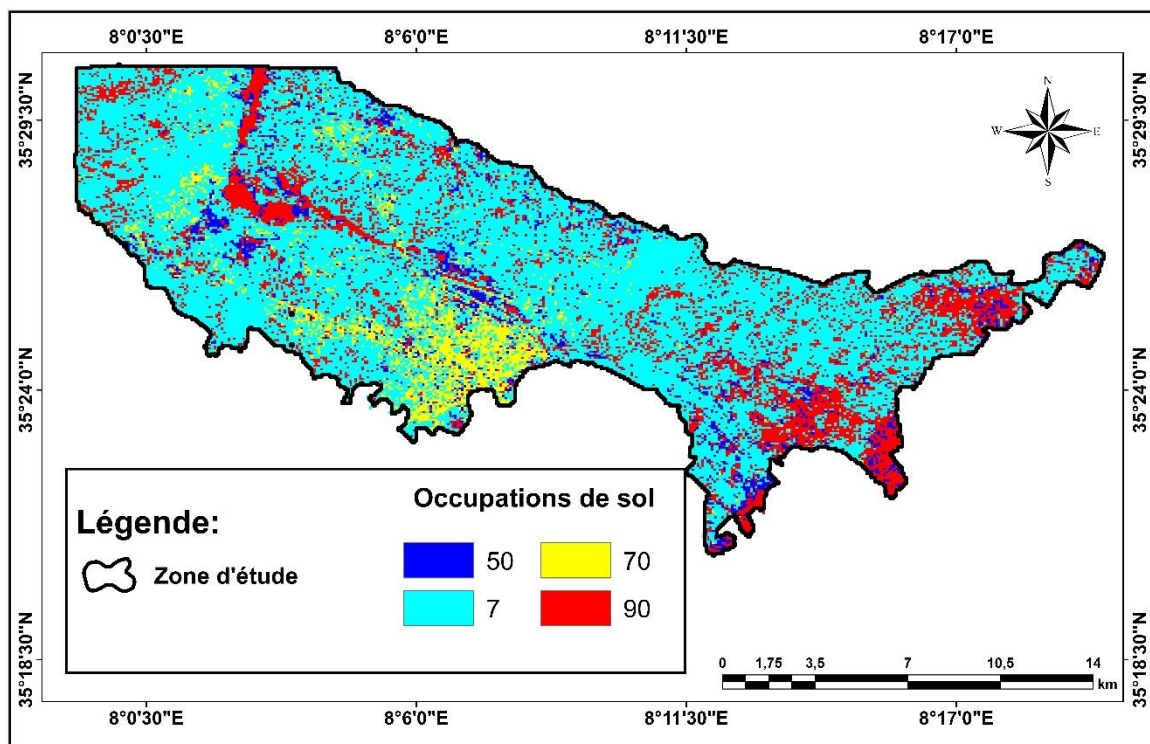


Figure 5.15: Carte de l'occupation du sol

La carte de l'occupation du sol révèle une agriculture dans l'Est avec un indice de 90, quelques agricultures le long de l'Oued EL Kebir et à l'Oust. Également un indice de 50 qui représente les forêts dans les bordures et le long de l'Oued. Des zones urbaines à l'Ouest et au sud de la plaine. Enfin, un sol nu qui occupe presque la majorité de la plaine

Tableau 23 Critère d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode SI.

Indice de vulnérabilité	Degré de vulnérabilité
Faible	< 45
Moyen	45-64
Elevé	65-84
Très élevé	85-100

3.3.2. Carte de synthèse de la vulnérabilité par la méthode SI

L'application de la méthode SI au niveau de la plaine de Tébessa a permis la réalisation d'une carte de vulnérabilité, dont la quelle nous pouvons distinguer trois classes de vulnérabilité (Figure 5.16), comme suite :

- La classe de vulnérabilité faible qui représente 26.25% de la superficie de la région d'étude. Elle correspond aux vertisols, argileux et peu perméables, située à proximité de la bordure Nord

et Est de la plaine étudiée, où les altitudes sont plus élevées (Dj. Hamzal , Dj. Djebissa et Dj. Gouray), ce qui donne une plus grande profondeur à la nappe. De plus, Les cultures maraichères, reboisements, cultures en sec et parcours que l'on pratique dans ces secteurs, ne présentent *a priori* pas de risque élevé pour les eaux souterraines.

- La classe de vulnérabilité moyenne qui correspond à la majorité de la superficie de la nappe aquifère. Cette classe de vulnérabilité représente 51.198 %, soit la moitié de la région d'étude et elle occupe une partie de la plaine qui s'étend du l'Est vers le sud (centre de la plaine). Ces valeurs sont dues essentiellement à la faible pente qui (0 à 2%), à la profondeur moyenne de la nappe et à la lithologie de l'aquifère constituée de sables avec un passage argileux caractérisée, d'où le développement d'une agriculture et d'une arboriculture irriguées. Ces pratiques s'accompagnent de l'utilisation d'éléments nitriques pour assurer la productivité.
- La classe de vulnérabilité élevée occupant 22.556 % de la zone d'étude. Cette dernière est localisée dans des secteurs urbanisés (Hammamet, Tébessa et Bekkaria), ce qui peut être expliqué par l'occupation du sol par l'urbanisation d'où l'existence des rejets domestiques (eaux usées non traitées) et même des rejets industriels, la faible profondeur de la surface piézométrique de la nappe, qui est parfois presque nulle , à une forte perméabilité.et enfin les cultures sous serre qui se sont développées pour le marché national, utilisent de fortes quantités de nitrates.

Tableau 24 Surface et surface en pourcentage de chaque classe par la méthode SI

Degré de vulnérabilité	Surface (Km ²)	Pourcentage (%)
Faible	61.4162236	26.2462494
Moyenne	119.8028742	51.19780948
Forte	52.78090222	22.55594112

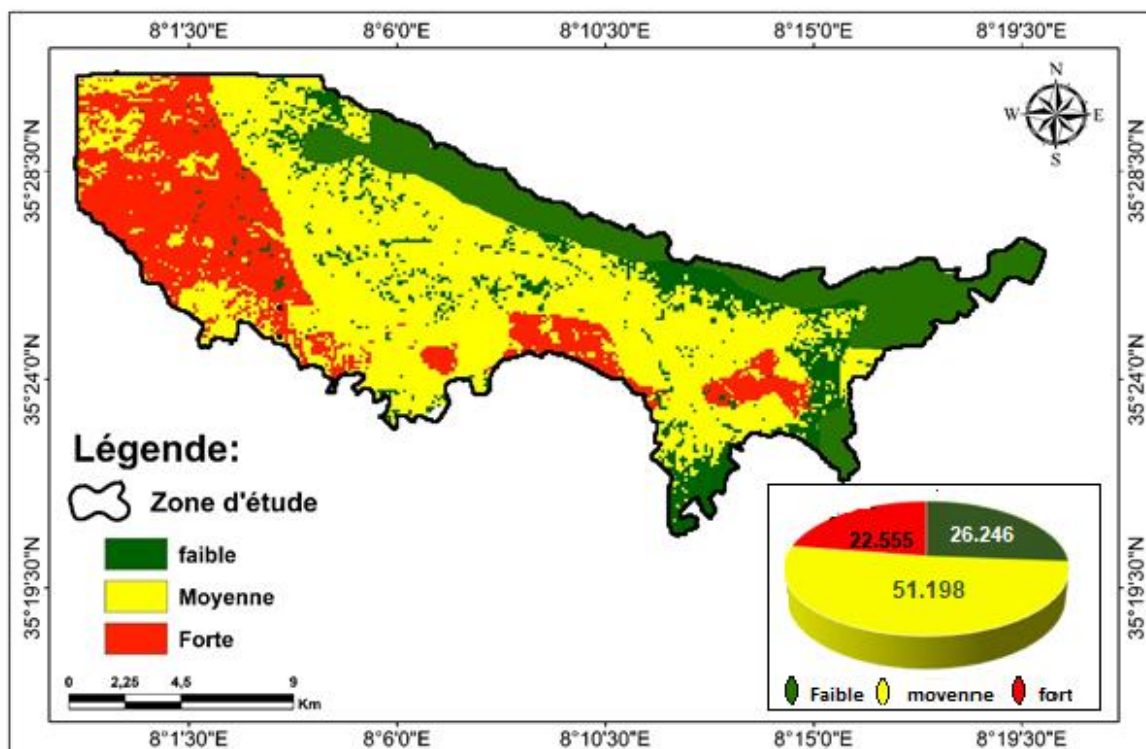


Figure 5.16: Degré de vulnérabilité à la pollution par la méthode SI

3.4. Application de la méthode GOD

La méthode GOD présente la vulnérabilité de l'aquifère face à la percolation verticale de polluants à travers la zone non saturée et ne traite pas de la migration latérale des polluants dans la zone saturée (Foster, 1987). Ainsi Cette méthode basée sur trois paramètres, le premier réside dans l'identification de type d'aquifère en fonction de son degré de confinement (Ci), le deuxième correspond à la profondeur de la nappe (Cp), et le troisième est défini par la lithologie de l'aquifère (Ca) (Foster, 1987). L'indice de vulnérabilité (IGOD) est obtenu par la multiplication des indicis de chacun de ces trois paramètres.

$$IG = Ca \cdot Cl \cdot Cd$$

Avec :

Ca : valeur type d'aquifère ; Cl : lithologie de l'aquifère ; Cd : profondeur de la nappe.

L'indice GOD (IG) a pour valeur minimum « 0 » et valeur maximum « 1 ». La vulnérabilité augmente avec l'indice. Après le calcul de l'indice, on fait correspondre des classes de vulnérabilité aux différentes plages d'indices obtenues répartis en trois classes de vulnérabilité allant du faible à fort.

3.4.1. Carte des profondeurs de la nappe de la plaine de Tébessa

L'analyse de la carte des types de nappe (Figure 5.17) permet de mettre en exergue le centre de l'aquifère qui est une nappe libre, ce qui favorise la pollution des eaux souterraines.

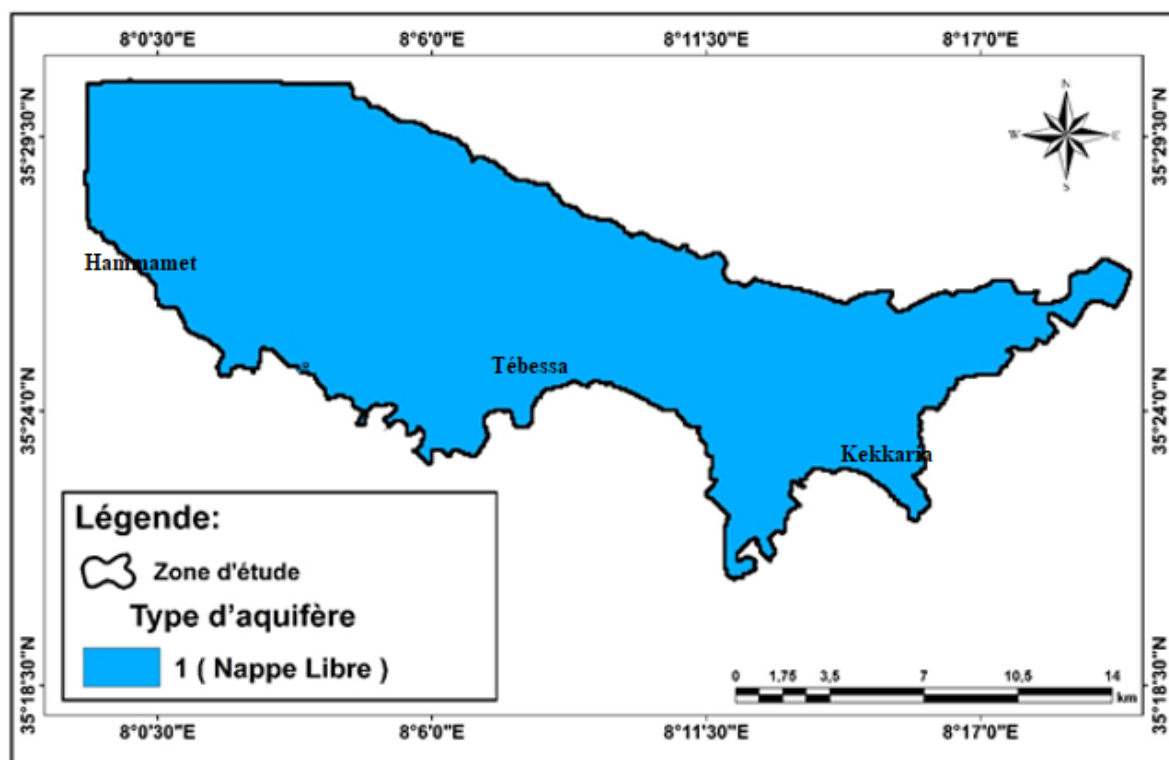


Figure 5.17 : Carte du paramètre (G) type de la nappe

3.4.2. Carte Type de lithologie

C'est un paramètre très important dans la méthode GOD. La zone non saturée comprend l'ensemble des niveaux du sous-sol et du sol situés au-dessus de la nappe. Cette zone est aussi caractérisée par un fort degré d'hétérogénéité. Pour l'application de la méthode GOD, la zone non saturée correspond à la portion souterraine du terrain comprise entre le sol et le niveau de la nappe d'eau souterraine.

Tableau 25 Cotes attribuées au paramètre « impact de la zone vadose »

Lithologie de l'aquitard ou de l'aquiperme	Cote
Limon alluvial ; lœss ; shale ; calcaire fin	0,5
Sable éolien ; siltite ; tuf ; roches ignées ou Métamorphiques fracturées	0,6
Sable et gravier ; grès ; tuf	0,7
Gravier (colluvion)	0,8
Calcaire	0,9
Calcaire fracturé ou karstique	1

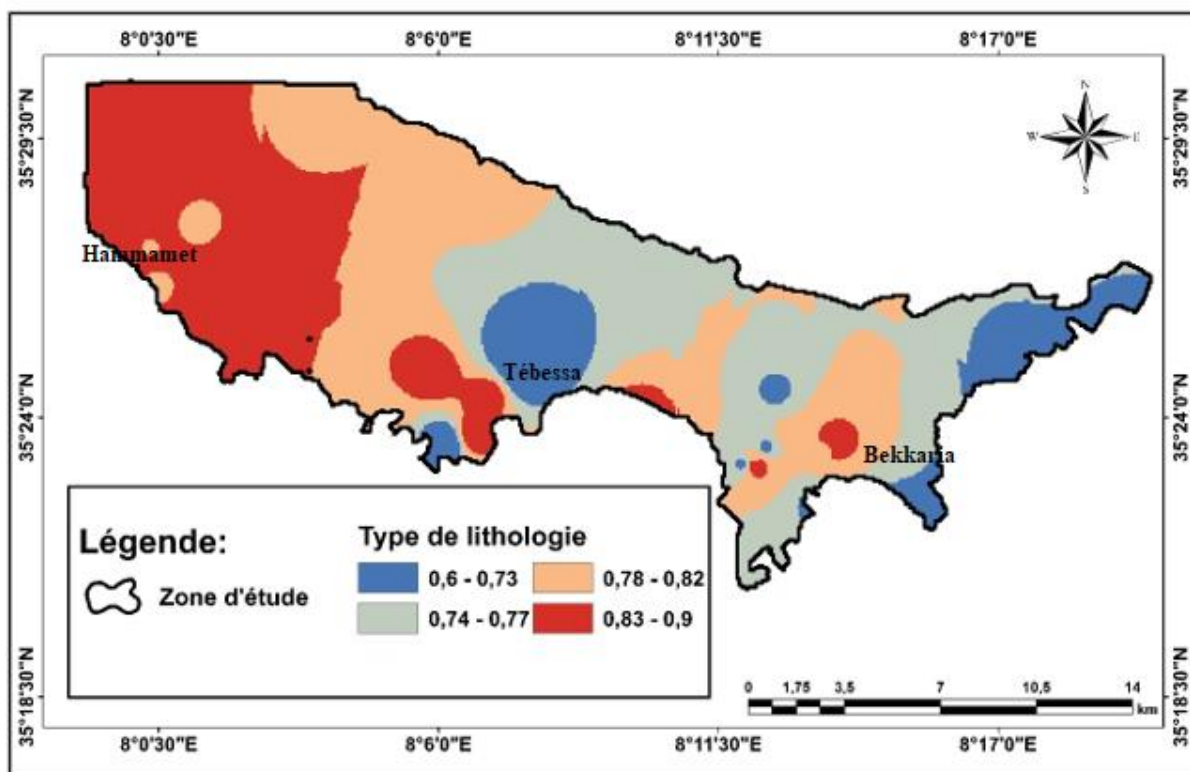


Figure 5.18 : Carte du paramètre (O) nature de la zone non saturée

3.4.2. Carte des profondeurs de la nappe de la plaine de Tébessa

La profondeur de l'eau est représentée par la distance séparant le niveau du sol et le niveau piézométrique de la nappe. Cette dernière est un paramètre considérable de la méthode GOD, puisqu'il représente l'épaisseur que va parcourir un polluant avant d'arriver à l'aquifère. La plupart du temps il y a de fortes chances que le polluant s'affaiblisse au fur et à mesure que la profondeur de la nappe accroît et c'est pourquoi plus le niveau d'eau est profond plus la durée de traversée du polluant est importante.

La carte réalisée indique qu'une partie de la zone la plus profonde se localise au centre de la plaine, et au niveau de ville de Tébessa. Les parties les moins profondes sont juxtaposées au Sud et au centre, où on retrouve les profondeurs intermédiaires, tandis que les faibles profondeurs recouvrent la partie Nord-Est et Nord-Ouest la plaine. Cette répartition nous a permis de déterminer quatre indices allant de 1 à 0,5 (Figure 5.19).

Tableau 26 Cotes attribuées au paramètre Profondeur de l'eau en (zone captive et libre).

>100 m	50-100 m	20-50 m	10-20 m	5-10 m	2-5 m	<2 m
0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1

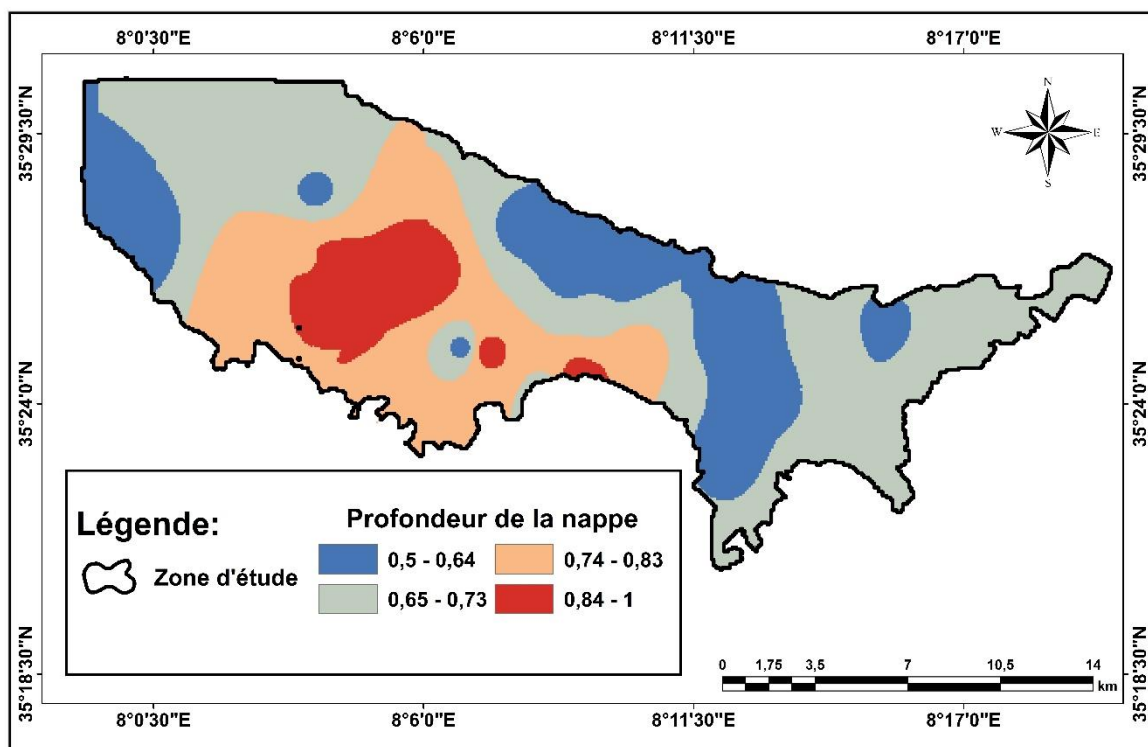


Figure 5.19: Carte du paramètre (D), profondeur de la nappe

3.4.3. Carte du type d'aquifère de la plaine de Tébessa

Dans le cas de la plaine de Tébessa la nappe est libre. Il va de soi qu'une nappe libre dépourvue d'un horizon imperméable entre le toit et la surface du sol, est plus vulnérable à la pollution de surface qu'une nappe d'eau captive qui est protégée par des horizons imperméables car la présence d'une couche imperméable peut rendre la nappe captive et limite le transfert des polluants (Bouakkaz,2019).

Tableau 27 Cotes attribuées au paramètre type d'aquifère

Aquitard	Captive	Semi captive	Sub-surface	Semi libre	libre
0	0.1	0.2	0.3	0.5	1

3.4.4. Carte de synthèse de la vulnérabilité par la méthode GOD

L'application de la méthode GOD au niveau de la plaine de Tébessa a permis l'élaboration d'une carte de vulnérabilité, dont la quelle nous remarquons trois classes de degré de vulnérabilité différentes :

Tableau 28 Surface et surface en pourcentage de chaque classe par la méthode GOD

Degré de vulnérabilité	Surface (Km ²)	Pourcentage (%)
Faible	102.6035	43.84766
Moyenne	83.45697	51.19780948
Forte	48.09398	22.55594112

L'application de la méthode GOD au niveau de la plaine de Tébessa a permis la réalisation d'une carte de vulnérabilité, dont la quelle nous observons trois classes de vulnérabilité (Figure 5.120), comme suite :

- La classe de faible vulnérabilité qui représente 43,85 % de la superficie de la région d'étude. Elle correspond aux vertisols, argileux et peu perméables, située à au Nord-Est et au Nord de la plaine, où les altitudes sont plus élevées (Dj. Hamzal ,Dj. Djebissa et Dj. Bouramane), ce qui donne une plus grande profondeur à la nappe .De plus, Les cultures maraichères, reboisements, cultures en sec et parcours que l'on pratique dans ces secteurs, ne présentent *a priori* pas de risque élevé pour les eaux souterraines.
- La classe de vulnérabilité moyenne représente 51.198 %, de la zone cartographiée. Ces valeurs sont dues essentiellement à la faible pente qui est très faible (0 à 2%), à la moyenne profondeur de la surface piézométrique, ce qui a permis le développement d'une agriculture et d'une arboriculture irriguées, Ces pratiques s'accompagnent de l'utilisation d'éléments nitriques pour assurer la productivité.
- La classe de vulnérabilité élevée occupant 22.556de la totalité de la surface étudiée. Cette dernière est localisée dans des secteurs urbanisés (Hammamet et Tébessa), cette classe est due essentiellement aux rejets domestiques et industriels, à la faible profondeur de la surface piézométrique de la nappe qui est parfois nulle, aux types de lithologie et au type de nappe (libre). De même, les cultures sous serre qui se sont développées pour le marché national, utilisent de fortes quantités de nitrates.

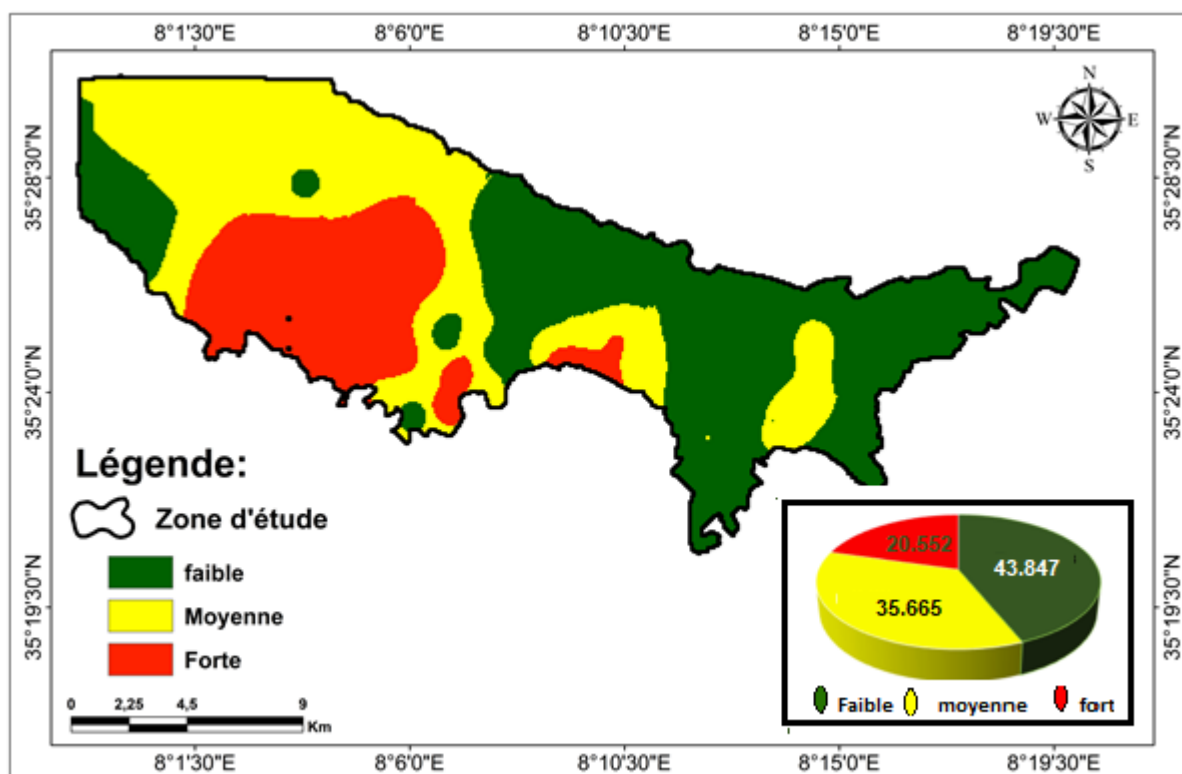


Figure 5.20: Degré de vulnérabilité à la pollution par la méthode GOD

3.5. Les Nitrates

Toutes les formes d'azote (azote organique, ammoniacque, nitrites, etc.) sont susceptibles d'être à l'origine des nitrates dans l'eau par un processus d'oxydation biologique (Rodier, Bazin et al. 1996). Les concentrations élevées de nitrates dans les eaux souterraines sont généralement un indicateur de contamination de la nappe à cause de l'utilisation inadéquate d'engrais, de structures d'hygiène défectueuses ou l'évacuation directe des eaux usées.

Toutefois, pour des valeurs supérieures, la présence de nitrate dans une eau peut être assimilée à une pollution diffuse dont l'origine est généralement anthropique.

L'eau dans le sol lessive et draine les nitrates vers la nappe d'eau ou la propagation s'effectue latéralement. Les plus fortes teneurs sont localisées dans la première tranche d'eau de la nappe. Leur atténuation progressive se fait vers la grande profondeur par effet de dilution. Il se produira alors dans la nappe le phénomène de « Stratification du chimisme » de l'eau.

Les nitrates restent le principal polluant des eaux souterraines dans la plaine de Tébessa (Zireg et al, 2018) Les concentrations les plus élevées se trouvent au centre de la plaine et au niveau du centre urbain de Tébessa. Également dans la Merdja des valeurs considérables ont été enregistrées parce que dans cette région les eaux souterraines sont proches de la surface du sol, ce qui les met en contact avec les rejets d'une part, d'autre part l'élevage industriel (élevage intensif des volailles, des ovins, et de bovins) .De même les plus fortes valeurs de concentration en nitrates sont réparties de part et d'autre et tout le long d'oued El Kebir qui draine tous les rejets des eaux urbaines ,avec des foyers de pollution localisés , par exemple

quelques puits qui avoisinent le rejet de Oued Nagues sont contaminés ce qui est prouvé par des teneurs en nitrates qui ont touchée 120mg/l.

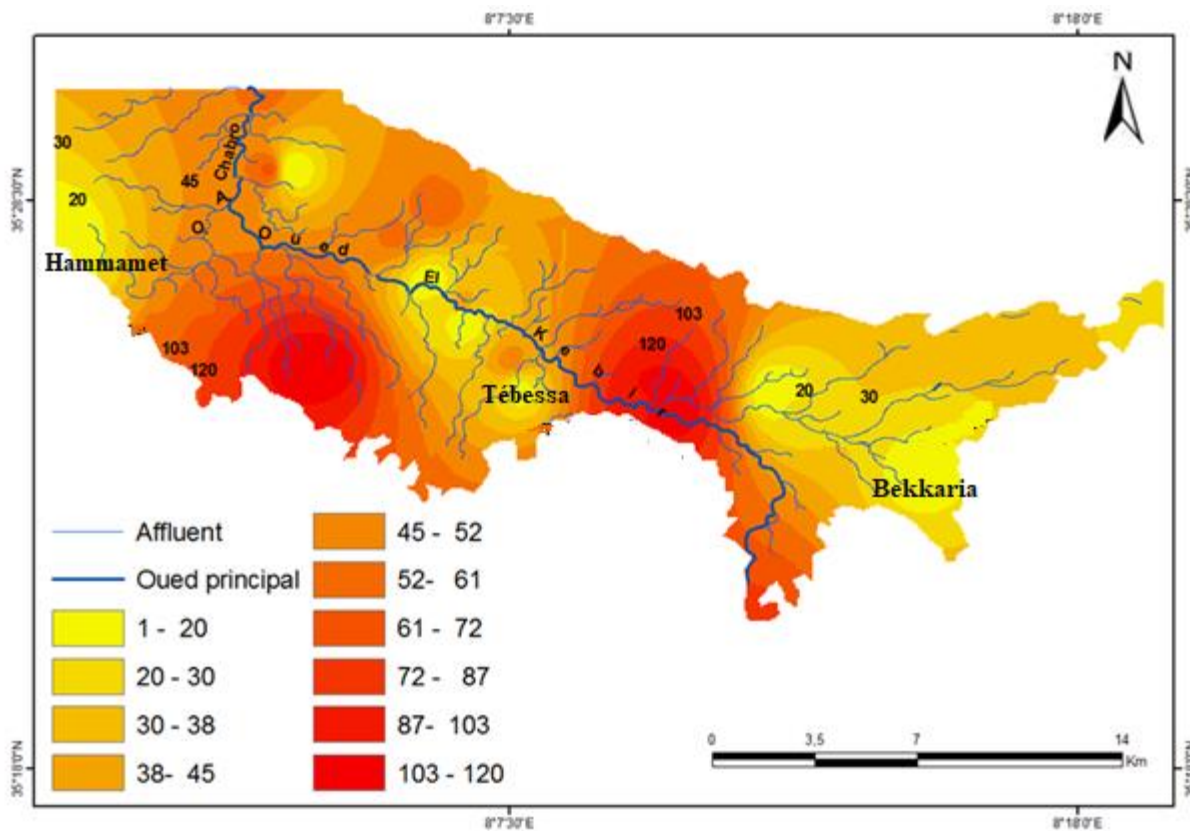


Figure 5.21: Carte d'isoteneurs en nitrates (mg/l)

3.5. Validité des cartes de vulnérabilité

3.5.1. Validité des cartes de vulnérabilité par la répartition spatiale du taux des nitrates

En général, l'élaboration d'une carte de vulnérabilité est testée et validée par des mesures sur le terrain et l'analyse des données chimiques des eaux souterraines (Ake et al, 2010) .

Effectivement, plusieurs auteurs ; (Isabelet al. (1990) ; Champagne et Chapus (1993), et Jourda et al. (2006) ; Dibi B. et al. (2013) ; Latifi S. et Chaab S. (2017); Hamza et al.(2007) ; Ewodo M. et al. (2016) ont vérifié la validité des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité à la pollution en se basant sur des données chimiques des eaux souterraines et plus exactement la répartition spatiale du taux de nitrates dans les puits de la région d'étude.

Les quatre méthodes de vulnérabilité ont été testées par la répartition des taux des nitrates.

(Figure (5.21)). En conséquence, cette comparaison a validé et affirmé les résultats trouvés par les quatre cartes de vulnérabilité de la région d'étude, ainsi les cartes élaborées reflètent la réalité du terrain. En premier lieu, la zone à risque de vulnérabilité élevé est validée par la carte des nitrates avec une valeur de 120 mg/l, plus spécialement dans la région de Hammamet et Tébessa, bien que ces résultats ont été confirmé par les quatre méthodes mais la méthode SI adonné un meilleur résultat. En second lieu, des valeurs comprises entre 120 et 50mg/l, elles expliquent la vulnérabilité moyenne, qui occupent le centre de la plaine, ce qui a été certifiée par les quatre méthodes, notamment la méthode SI. En dernier, les teneurs qui ne dépassent pas

50mg/l sont localisées dans la partie Nord-Est, elles traduisent la classe de vulnérabilité faible d'où la confirmation de ces résultats par les quatre méthodes sans exception.

En somme, la validation par la carte des nitrates a montré que la méthode SI a fourni de meilleurs résultats et est donc mieux adaptée pour l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de cette région. Par conséquence, la méthode SI paraît mieux évaluer la vulnérabilité à la pollution aux nitrates. En effet, plusieurs études ont abordé le sujet et ont abouti à des résultats similaires. En effet, les études de Hamza et al. (2007), AKE et al. (2010), Batchi et al. (2017) et Pape B. D., al. (2019) et Amrani S. et al (2019) ont prouvé que la vulnérabilité par les nitrates est mieux exprimée par la méthode de vulnérabilité spécifique SI. Ce taux de coïncidence élevé relatif à la méthode SI peut être expliqué par le fait que cette dernière est spécifique de la pollution agricole et qu'elle a été conçue en prenant en compte les propriétés chimiques des nitrates, ainsi que les relations qui existent entre ce polluant et les divers composants déjà considérés dans la vulnérabilité intrinsèque (Hamza et al,2007). En revanche, la méthode DRASTIR a donné un résultat plus significatif que celui trouvé par la méthode DRASTIC. Par contre, l'existence d'autre zone de forte vulnérabilité qui n'apparaissent pas dans la carte des nitrates cela peut être expliqué par l'origine de la pollution qui est dû aux formations géologiques comme dans le cas des bordures de la plaine.

3.5.2. Validité des cartes de vulnérabilité par la corrélation entre les surfaces de Chaque classe

Le deuxième moyen pour valider les résultats issus des trois méthodes est la corrélation entre les surfaces de chaque classe. D'après les résultats mentionnés dans les deux figures (5.22 et 5.23),

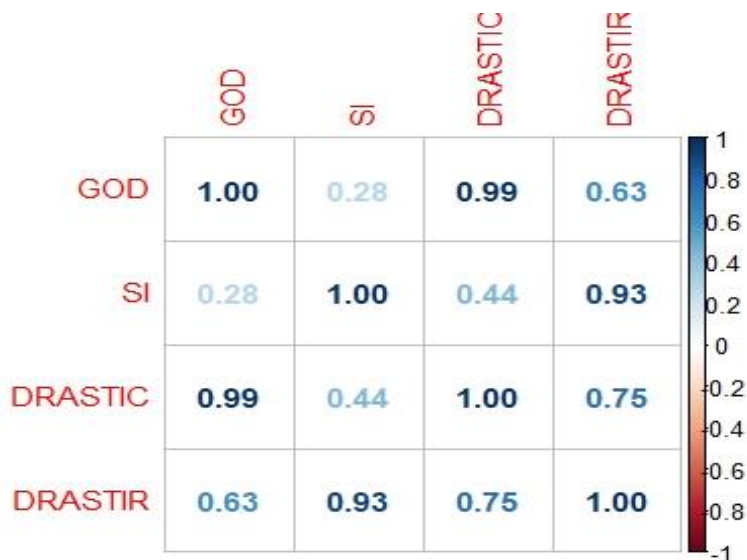


Figure 5. 22 : Résultat de la corrélation entre les différentes méthodes de vulnérabilité

En premier lieu, la forte corrélation entre DRASTIC et GOD (0.99), une deuxième forte corrélation entre DRASTIR et SI (0.93), GOD et DRASTIR (0.63) et également une forte corrélation entre DRASTIC et DRASTIR (0.75). En second lieu, les faibles corrélations, GOD

et SI (0.28), DRASTIC et SI (0.44). Autant dire que ces corrélations ont confirmé l'efficacité de la méthode DRASTIR (DRASTIC modifiée), puisque cette dernière est bien corrélée avec les autres méthodes

, particulièrement la corrélation entre DRASTIC et DRASTIR qui a marqué une correspondance particulièrement bonne, ainsi la méthode proposée dans laquelle la substitution de la conductivité par la résistivité reflète mieux la réalité de la vulnérabilité des eaux souterraines dans la plaine de la Merdja. Par contre, la méthode SI ne donne pas un résultat satisfaisant vue sa corrélation avec les autres méthodes (GOD et DRASTIC).

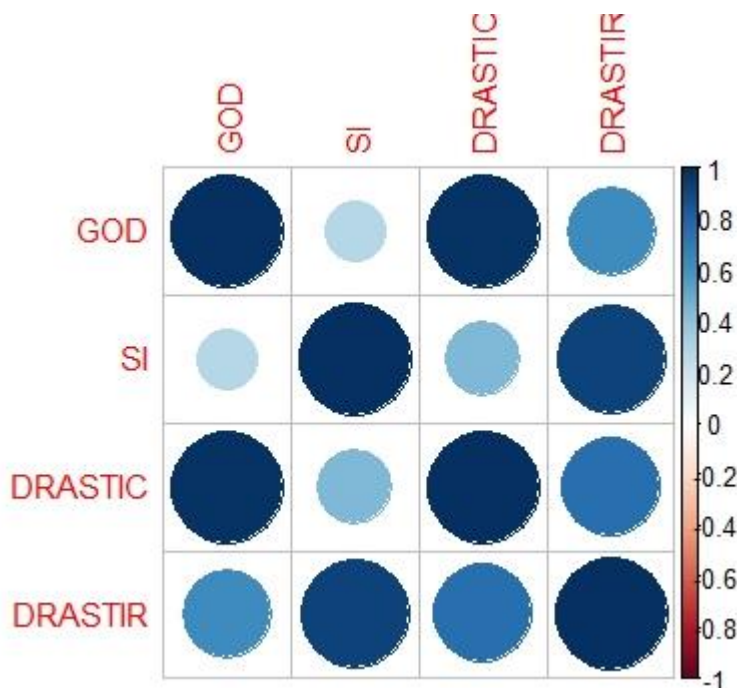


Figure 5.23 : Application de la méthode de corrélation de Spearman entre les différentes méthodes

3.5.3. Etablissement de la carte synthèse des cartes de vulnérabilités par différentes méthodes

Il est nécessaire de dresser une carte synthèse des quatre méthodes de vulnérabilité afin de la comparer à chaque carte de vulnérabilité pour voir la plus efficace d'entre elles, dans le cas de la plaine de la Merdja. Effectivement, la comparaison des différentes cartes de vulnérabilité avec la carte synthèse a permis de prouver que la carte la plus valide quant à l'évaluation de la vulnérabilité de la plaine de la Merdja est celle donnée par la méthode de vulnérabilité spécifique SI. Ce taux de coïncidence élevé relatif à la méthode SI peut être expliqué par le fait que cette dernière est spécifique de la pollution agricole et qu'elle a été conçue en prenant en compte les propriétés chimiques des nitrates, ainsi que les relations qui existent entre ce polluant et les divers composants déjà considérés dans la vulnérabilité intrinsèque (Hamza et al., 2006), les nitrates sont par conséquent la principale cause de pollution de la plaine de Tébessa. En revanche, la méthode DRASTIR, a donné un résultat acceptable par rapport à DRASTIC, ce qui affirme son efficacité dans la zone étudiée, ceci est dû aux valeurs de

résistivité qui sont uniformément réparties sur la plaine, alors que les valeurs de conductivité sont mal réparties sur la plaine.

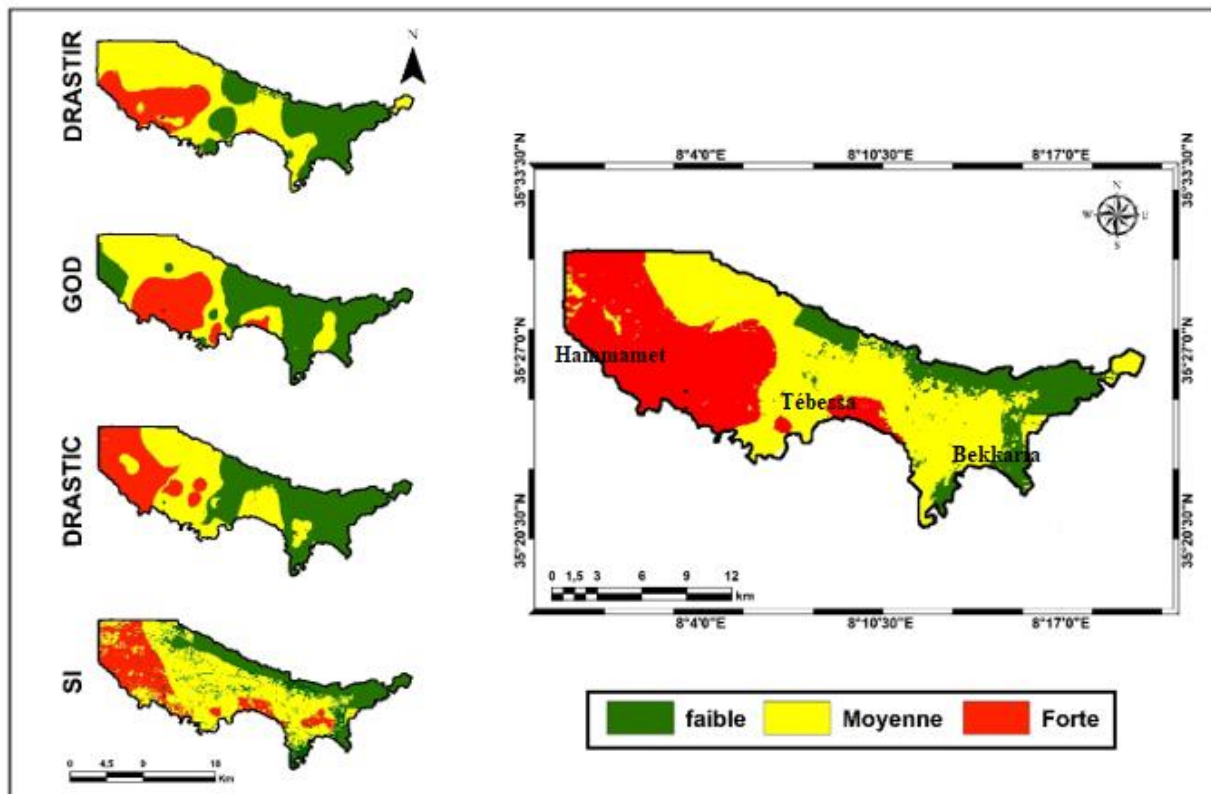


Figure 5.24 : Carte synthèse de la vulnérabilité des eaux souterraines de la plaine de la Merdja

Conclusion

La demande en eaux qui ne cesse d'accroître avec un manque et une détérioration de la qualité de plus en plus remarquée, le besoin de méthodes de cartographie de la vulnérabilité est nécessaire. En raison du grand nombre de méthodes utilisées, il est essentiel de reconnaître parmi elles les plus fiables et efficace. Bien que, la validation des résultats par la carte des nitrates et même la corrélation entre les surfaces des différentes classes de vulnérabilité ont donné des résultats variés pour les différentes méthodes appliquées (DRASTIC, DRASTIR, GOD et SI), mais la méthode SI confirme, avec une certaine marge d'erreur, la répartition objective de la vulnérabilité à la pollution de la plaine étudiée. En outre, la méthode DRASTIR (DRASTIC modifié) a donné un meilleur résultat que la méthode DRASTIC, ce qui est vérifiée par le résultat de la corrélation entre les différentes méthodes appliquées dans ce travail. De plus, la comparaison de la carte synthèse de la vulnérabilité avec les quatre cartes de vulnérabilité a confirmé l'efficacité de la méthode SI dans la plaine de la Merdja. Par conséquent, la méthode proposée (DRASTIR) a prouvé sa crédibilité puisqu'elle est très bien corrélée à la méthode SI (0.93). La cartographie de cette étude peut être utilisée comme un outil d'aide à la décision pour la gestion et la protection de la qualité des ressources en eau dans la plaine de la Merdja.

PARTIE II

CHAPITRE 1 :
CARACTERISTIQUES
MORPHOMETRIQUES DES
SOUS BASSINS

1. Introduction :

Ce chapitre vise à déterminer les principales caractéristiques morphologiques, hydrographiques et physiques de la région de Tébessa qui influent sur la variation du régime hydrologique. Cependant, une division du bassin versant de Tébessa en cinq sous-bassins est nécessaire pour mieux étudier et limiter la zone inondable. Ainsi, l'ensemble des principales caractéristiques morphométriques qui jouent un rôle important dans le comportement hydrologique des cours d'eau par conséquent dans la genèse des inondations, a une forte influence sur la répartition spatio-temporelle des précipitations et des écoulements au sein de la région d'étude.

2. Caractéristiques morphométriques des bassins Versants :

2.1. Le découpage des sous bassins versants de Tébessa

Pour mettre en évidence l'effet du réseau hydrographique du bassin sur les agglomérations, nous avons procédé à un découpage en sous bassins qui permet de définir les affluents qui ont une influence directe sur les zones inondées, aussi bien que ceux qui peuvent influer indirectement ou être un obstacle aux solutions que nous envisagerons de projeter dans les étapes qui suivent. En effet, la division donne (05) sous-bassins.

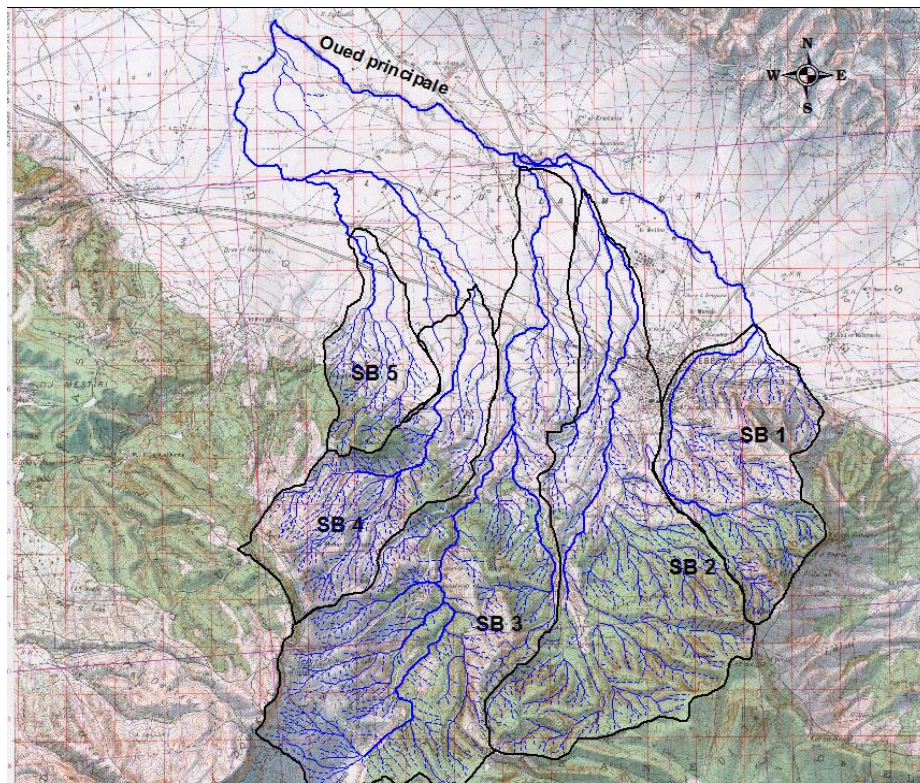


Figure1.1 : Le schémas du découpage les sous bassins versants de Tébessa (source Carte topographique de Tébessa modifiée)

Tableau 29 Le découpage du bassin versant en cinq (5) sous bassins.

Les sous bassins versants	Nomination d'oued
SB 1	Oued Zaarour
SB 2	Oued Nages
SB 3	Oued Refana
SB 4	Oued Es-sagui
SB 5	Oued Rezala

2. Caractéristiques morphométriques des bassins Versants

2.2. Morphométrie

Les différents paramètres morphométriques du bassin, notamment la forme, l'altitude caractéristique, la pente et le relief, interviennent et souvent d'une façon combinée dans les modalités de l'écoulement, donc il convient de les préciser dès le début dans toute étude.

2.2.1. La surface

La surface topographique est le paramètre le plus important, il permet de contrôler l'intensité de plusieurs phénomènes hydrologique (apport ; volume de précipitation ou infiltration), elle est déterminée par le logiciel ARC GIS.

2.2.2. Le périmètre

Le périmètre correspond à la longueur de la limite extérieure du bassin. Chaque sous bassin réagit d'une façon propre aux précipitations qu'il reçoit. Ces caractéristiques hydrologiques sont fonction d'une part du climat qu'il subit et d'autre part de son propre milieu physique.

Tableau 30 La superficie des sous bassins versants.

Sous Bassins	La superficie des sous bassins versants (km ²)
SB 1	13.95
SB 2	29.58
SB 3	36.39
SB 4	13.87
SB 5	6.59

Tableau 31 Le Périmètre des sous bassins versants.

Sous Bassins	Périmètre des Sous Bassins (km)
SB 1	16
SB 2	31
SB 3	35.71
SB 4	19.63
SB 5	12.65

Tableau 32 Longueur des talwegs principaux.

Sous Bassins	Longueur des talwegs principaux (km)
SB 1	06.00
SB 2	11.50
SB 3	17.62
SB 4	08.63
SB 5	05.11

Tableau 33 Altitudes minimale et maximale des sous bassins.

Sous Bassins	Altitudes minimale(m)	Altitudes maximales(m)
SB 1	820	1450
SB 2	805	1550
SB 3	795	1631
SB 4	830	1505
SB 5	790	1100

2.2.3. Indice de compacité

L'indice de compacité « *Gravelus* » traduit la forme du bassin versant, il indique un allongement ou le ramassage du bassin versant s'il est proche du 1 aura une forme ramassée, ce qui implique un temps de concentration court, et plus il est loin de 1, plus le bassin aura une forme allongée.

$$K_c = P \cdot 0,28 / \sqrt{A}$$

D' où :

P : périmètre du bassin versant en km

A : surface du bassin versant en km².

2.2.4. Le rectangle équivalent

Une transformation purement géométrique en un rectangle de dimensions (L, l) ayant la même surface que celle du sous bassin. Mis au point par ROCHE permet de comparer les sous bassins entre eux du point de vue de l'influence de leurs caractéristiques sur l'écoulement. Les courbes de niveau sont des droites parallèles aux petites cotes du rectangle et l'exutoire est l'un de ces petites cotes. Le rectangle équivalent est caractérisé par la longueur « L » et la largeur « l » définit respectivement par les formules suivantes :

- La longueur du rectangle équivalent

$$L = \frac{K_c \sqrt{S}}{1,12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_c} \right)^2} \right]$$

- La largeur du rectangle équivalent :

$$l = \frac{k_c \sqrt{S}}{1,12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{k_c} \right)^2} \right] \quad \text{ou : } l = \frac{P}{2} - L$$

Tableau 34 Les paramètres morpho-métriques des sous bassins.

Sous Bassins	S(Km2)	P (Km)	Kc	L (Km)	l (Km)
SB 1	13.95	16	1.19	4.93	2.62
SB 2	29.58	31	1.59	10.33	2.24
SB 3	36.39	35.71	1.66	15.51	1.71
SB 4	13.87	19.63	1.48	8.10	2.35
SB 5	6.59	12.65	1.37	4.94	1.33

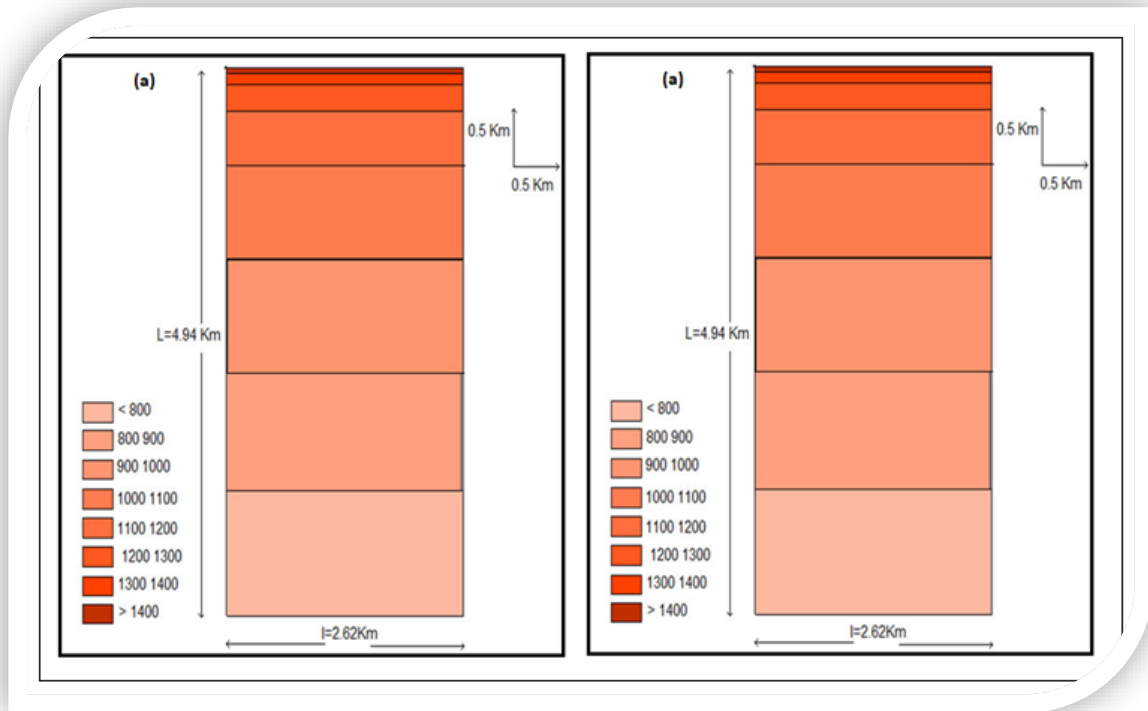


Figure 1.2 : Les rectangles équivalents des Oueds Zaarour (a) et Oued Nagues (b)

2.3. Le relief

Il joue un rôle dans la détermination de l'aptitude au ruissellement, à l'infiltration et à l'évaporation du bassin versant. Le relief est également déterminé au moyen d'indices et de plusieurs caractéristiques.

2.3.1. Répartition des surfaces et courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique fournit une vue synthétique de la pente du bassin, donc du relief. Cette courbe représente la répartition de la surface du sous bassin en fonction de son altitude. Elle porte en abscisse la surface (ou le pourcentage de surface) du sous bassin qui se trouve au-dessus (ou au-dessous) de l'altitude représentée en ordonnée. Elle exprime ainsi la superficie du sous bassin ou le pourcentage de superficie, au-delà d'une certaine altitude. Les courbes hypsométriques demeurent un outil pratique pour comparer plusieurs sous bassins entre eux ou entre les diverses sections d'un seul sous bassin. Elles peuvent en outre servir à la détermination de la pluie moyenne sur un bassin versant et donnent des indications sur le comportement hydrologique et hydraulique du bassin et de son système de drainage.

a) Les résultats des surfaces partielles des sous bassin par tranche d'altitudes.

Tableau 35 Répartition en pourcentage de la surface élémentaire du SB1.

Tranche d'altitude	ΔH (m)	H_i (m)	Superficie partielle (Km ²)	Superficie partielle (%)	$H_i \times S_i$	Altitude (m)	Superficie cumulée (%)
						820	0
820-900	80	860	3.24	23.22	2786.4	900	23.22
900-1000	100	950	2.90	20.78	2755	1000	44
1000-1100	100	1050	2.84	20.35	2982	1100	64.35
1100-1200	100	1150	2.42	17.34	2783	1200	81.51
1200-1300	100	1250	1.41	10.10	1762.5	1300	91.49
1300-1400	100	1350	0.94	6.73	1269	1400	98.52
1400-1450	50	1425	0.2	1.43	285	1500	100

Avec :

Δh_i : Altitude moyenne entre 2 courbes de niveaux consécutives en(m)

S_i : surface partielle comprise entre 2 courbes de niveaux consécutives en (km²)

b) Courbe hypsométrique :

Elle nous donne le taux de surface correspondant aux différentes altitudes, a pour but la détermination de la hauteur moyenne et l'indice de pente globale.

D'après l'analyse de la courbe hypsométrique du sous bassin versant de l'oued Zaarour (figure I.3), la classe d'altitude dominante est celle de 979 à 1479 m. Les zones d'altitudes très élevées (supérieur à 1100m) comme : Djebel Djouda, Djebel Bouramane et Djebel Djebissa couvrent une faible surface. La courbe hypsométrique présente une pente forte vers les hautes altitudes, par contre vers moins de 800 m une pente presque constante ce qui indique la présence d'une plaine.

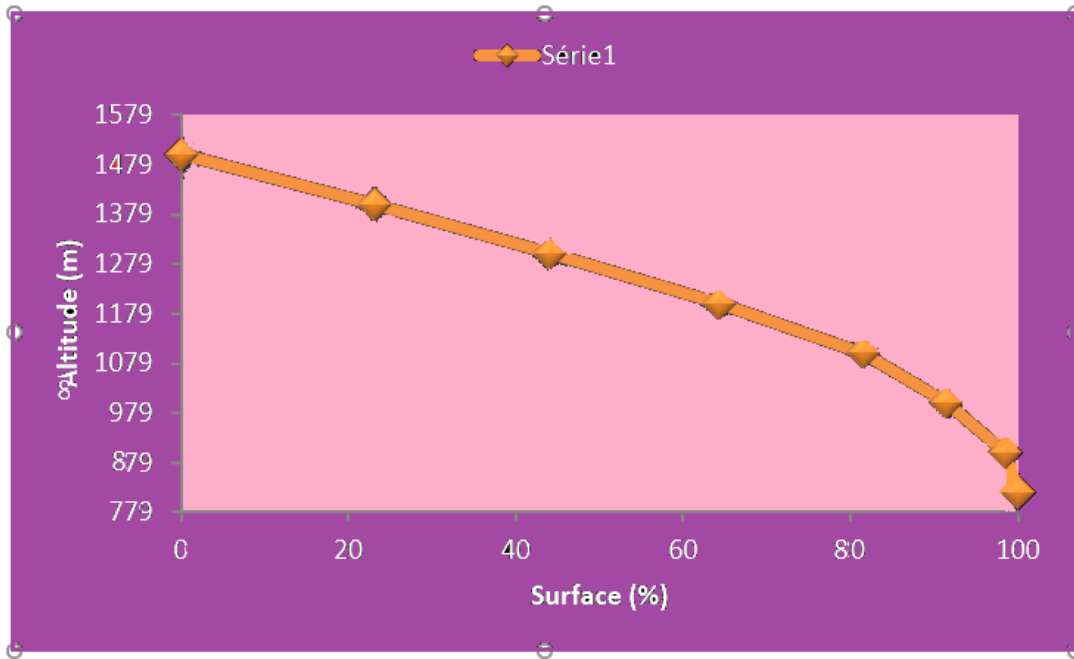


Figure 1. 3 : la courbe hypsométrique d'oued Zaarour

2.3.2. Caractéristiques des altitudes

Altitudes caractéristiques des sous bassins élémentaires de Tébessa :

- altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin tandis que l'altitude minimale est le point le plus bas, généralement à l'exutoire ;
- L'altitude médiane ou H50% est déterminée sur la courbe hypsométrique ;
- L'altitude moyenne H_{moy} est calculée par la formule suivante :

$$H_{\text{moy}} = \frac{\sum S_i \bar{H}_i}{S}$$

Où :

\bar{H}_i : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau successives (m)

S_i : Surface partielle comprise entre deux courbes de niveau successives (Km²)

S : Surface totale du bassin versant (Km²)

Tableau 36 Caractéristiques des altitudes.

Altitudes caractéristiques en (m).							
Sous Bassins	H max	H min	D=Hmax - Hmin	Hmoy	H50%	H5%	H95%
SB 1	820	1450	630	1048.24	1265	1440	960
SB 2	805	1550	745	1101.79	1210	1535	875
SB 3	795	1631	836	1125.63	1095	1450	830
SB 4	830	1505	675	1047.75	1054	1375	860
SB 5	790	1100	310	883.17	980	1045	825

2.3.3. Les indice de pente

Les indices de pente se déterminent à partir de la connaissance de la répartition hypsométrique sur le bassin. On a admis qu'il en était ainsi à condition que l'on ait au moins 4 courbes de niveaux traversant le bassin, c'est-à-dire que la dénivelée « *D* » soit au moins égale à 3 fois l'équidistance « *d* » des courbes de niveaux dessinées sur la carte.

2.3.3.1. L'indice de pente de roche

L'indice de pente de roche tient compte de la répartition hypsométrique, est la somme de la racine carrée des pentes moyennes, de chacun des éléments pondérés par la surface intéressée. Cet indice montre l'influence du facteur de pente sur le régime hydrologique du bassin versant. Il est défini comme suit :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{i=1}^n \sqrt{S_i d_i}$$

L : longueur du rectangle équivalent.

S_i : Surface partielle (%) comprise entre 2 courbes de niveau consécutives *H_i* et *H_{i-1}* (m).

d_i : La distance entre deux courbes de niveau voisines *H_i* et *H_{i-1}* (m).

2.3.3.2. Indice de pente globale *I_g*

Il est défini comme étant le rapport entre l'altitude comprise entre 5% et 95% de la surface de bassin et a longueur du rectangle équivalent. On prend deux points *S1*, est *S2* sur l'axe de l'abscisse telle que 95% de la surface du sous bassin soit comprise entre ces deux valeurs et que 5% de la surface totale du sous bassin soit inférieure à *S1* et 5% soit supérieure à *S2*.

Il est donné par la formule suivante :

$$I_g = \frac{D}{L} \quad D = H_5 - H_{95}$$

Donc : $I_g = \frac{D}{L} = \frac{H_5 - H_{95}}{L}$

Avec :

D : Dénivelée entre H5% et H95% (m) ;

L : longueur du rectangle équivalent (Km) ;

H5% et H95% : sont respectivement Les altitudes correspondantes à S5% et S95%

Cet indice, très facile à calculer, Il sert de base à une des classifications O.R.S.TO.M. Pour déduire la nature du relief mais pour permettre une comparaison plus poussée du bassin au point de vue relief nous allons calculer la dénivelée spécifique.

Tableau 37 classifications O.R.S.T.O.M.

CLASSE	DESCRIPTION	Indice de pente globale
R₁	Relief très faible	$I_g < 0.002$
R₂	Relief faible	$0.002 < I_g < 0.005$
R₃	Relief assez faible	$0.005 < I_g < 0.01$
R₄	Relief modéré	$0.01 < I_g < 0.02$
R₅	Relief assez fort	$0.02 < I_g < 0.05$
R₆	Relief fort	$0.05 < I_g < 0.1$
R₇	Relief très fort	$0.1 < I_g$

2.3.3.3. La dénivelée spécifique Ds

Elle permet d'utiliser la classification de l'O.R.S.T.O.M. (office de la recherche scientifique et technique d'outre-mer) qui permet de définir les différents types de relief des bassins versants quelques soient leurs superficies,

La dénivelée spécifique est définie comme suit :

$$Ds = I_g \sqrt{s}$$

Tableau 38 classifications O.R.S.T.O.M.

CLASSE	DESCRIPTION	DENIVELEE
R ₁	Relief très faible	Ds<10m
R ₂	Relief faible	10m <Ds<25m
R ₃	Relief assez faible	25m<Ds<50m
R ₄	Relief modéré	50m<Ds<100m
R ₅	Relief assez fort	100m<Ds<250m
R ₆	Relief fort	250m<Ds<500m
R ₇	Relief très fort	Ds>500m

Tableau 39 Les résultats des sous bassins sont pris dans le tableau :

Sous Bassins	S(Km ²)	Ip	Ig	Ds (m)	Classe de relief
SB 1	13.95	6.47	9.74	235.06	Relief assez fort
SB 2	29.58	4.67	6.39	162.34	modéré
SB 3	36.39	4.55	3.52	96.58	modéré
SB 4	13.87	6.65	5.96	147.44	Relief assez fort
SB 5	6.59	6.41	4.45	73.31	Relief assez fort

D'après la carte des pentes des deux bassins, on distingue quatre classes :

Classe 1 : Les pentes comprises entre 0% et 3 %, présente une partie moyennement grande. Elle occupe 26.76% de la surface du sous bassin de Tébéssa

Classe 2 : C'est la classe des pentes 3% et 12%, elle représente la plus grande partie 32.72% de la surface des deux bassins.

Classe 3 : Les pentes comprises entre 12% et 25%, elles occupent 24.76% de la surface globale et concernent les zones où l'absence du couvert végétal favorise l'accélération de ruissellement.

Classe 4 : C'est la classe de fortes pentes supérieures à 25%, elles occupent 15.77% par rapport à la surface totale, on les trouve surtout dans les sommets (Doukane Anual)

Donc 60.50% de la superficie total a une pente modérée ce que montre la carte des pentes.

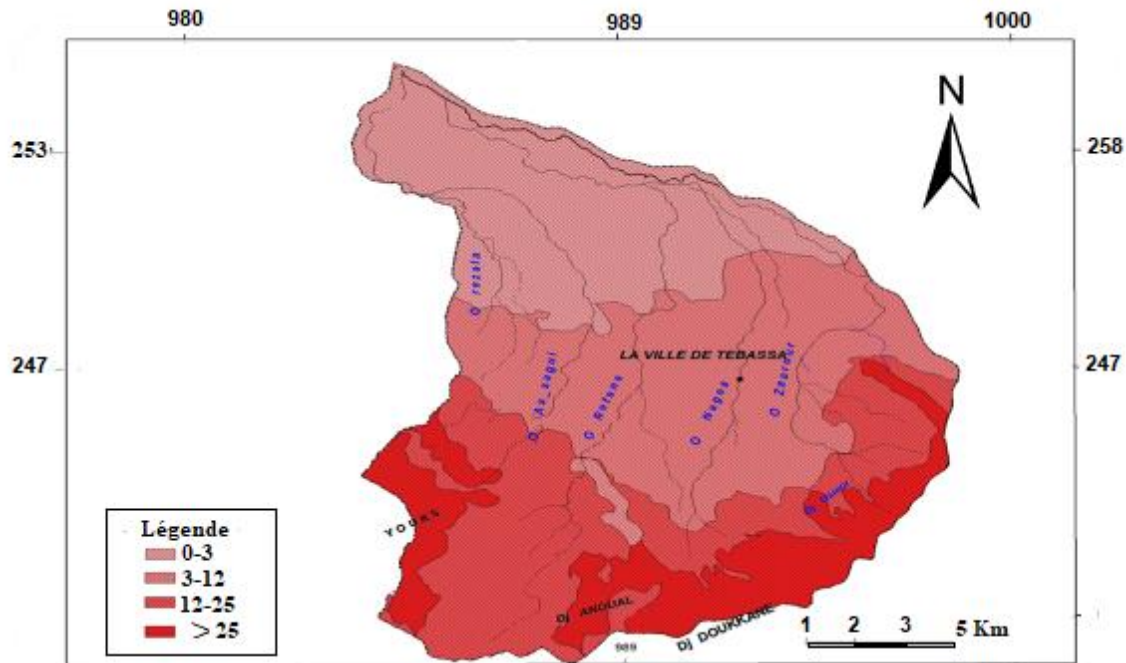


Figure 1.4: la carte des pentes de la zone d'étude

2.4. Caractéristiques hydrographiques du bassin versant

Le réseau hydrographique est l'ensemble des cours d'eau et les affluents permanents ou temporaires, par lesquelles s'écoulent toutes les eaux de ruissellement et convergent vers un seul point de vidange du bassin versant.

Les paramètres qui caractérisent le chevelu hydrographique sont la densité de drainage, le coefficient de torrentialité, le temps de concentration et la vitesse d'écoulement, leurs déterminations nécessitent d'abord une classification des talwegs par ordre, c'est pour ça qu'on a procédé à la classification de Shum selon la règle suivante :

- Le principe est de donner l'ordre $x+1$ à tout tronçon de l'oued formé par la réunion de deux cours d'eau d'ordre x ;
- La longueur totale des cours d'un ordre donné en faisant la somme des longueurs (m, km) de différents tronçons de cet ordre.

$$\bar{L}_x = \frac{L_x}{N_x}$$

La détermination de la longueur du cours d'eau principal se mesure à partir de l'exutoire en remontant le cours d'eau jusqu'à la ligne de partage des eaux en choisissant à chaque confluent de tronçon d'ordre le plus élevé, le cours d'eau principal commence normalement à l'altitude maximale du bassin.

2.4.2. La pente moyenne du cours d'eau principale

Elle exprime le rapport entre la dénivelée et longueur comprise 2 points suffisamment éloignés sur le cours d'eau principale.

$$I_c = \frac{\Delta H}{L}$$

Avec

ΔH : Dénivelée entre deux points (maximale et minimale);

L : Longueur du talweg principal (km).

Les résultats sont représentés dans le tableau suivant :

Les pentes moyennes des cours d'eau principaux.

Tableau 41 pente moyenne du cours d'eau principale

Sous Bassins	SB1	SB2	SB3	SB4	SB5
Pmoy (m/m)	0.105	0.065	0.047	0.078	0.061

2.4.3. Coefficient de torrentialité « C_t »

Le coefficient de torrentialité est le produit de la densité de drainage par la fréquence des talwegs élémentaires. La formule est comme suit :

$$C_t = \Delta_d . F$$

Où :

F : fréquence des talwegs élémentaires $F=N/S$

N : nombre de talwegs d'ordre 1

S : surface du bassin versant.

Tableau 42 Coefficient de torrentialité et la fréquence des sous bassins :

Sous Bassins	SB1	SB2	SB3	SB4	SB5
F1	7.96	6.46	6.46	7.35	6.38
Ct	42.41	26.67	29.06	43.83	34.99

2.4.4. Le temps de concentration

C'est le temps que met une particule d'eau provenant de la partie du bassin la plus éloignée par parvenir à l'exutoire, il existe plusieurs formules. Dans le contexte algérien et pour les grands bassins versants, il peut être notamment calculé à l'aide de formules le plus souvent empiriques.

- **Formule de GIANDOTTI**

$$T_c = \frac{4\sqrt{S} + 1,5L}{0,8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}}$$

S : Surface du bassin versant en [Km²].

L : longueur du talweg principal en [Km].

H_{moy}, H_{min} : respectivement la hauteur moyenne et minimale du B.V en [m]

- **Formule de CALIFORNIA**

$$T_c = \left[\frac{0,87.L^3}{H_{max} - H_{min}} \right]^{0,386}$$

L : longueur du talweg principal en [Km];

H_{max}, H_{min} : respectivement la hauteur maximale et minimale du B.V en [m] ;

- **Formule de Témez**

$$T_c = 0,3 \left[\frac{L}{(I_r)^{1/4}} \right]^{0,76}$$

T_c : temps de concentration en heures.

L : Longueur de talwegs principale. (Km)

I_r : La pente moyenne de talwegs principale. (m/m)

Les résultats des différentes méthodes sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau 43 Le temps de concentration des sous bassins

Sous Bassins	SB1	SB2	SB3	SB4	SB5
GIANDOTTI (h)	1.69	2.53	3.09	1.89	1.80
CALIFORNIA (h)	0.63	1.25	1.96	0.93	0.68
TEMEZ (h)	1.80	3.23	4.75	2.51	1.76

Nous adoptons les résultats obtenus par la formule de Giandotti puisqu' elle tient compte pratiquement de tous les paramètres du bassin versant.

II.2.4.5. Vitesse moyenne de ruissellement

Elle est donnée par la formule suivante :

$$V_r = \frac{L_p}{T_c} \quad [\text{Km/h}]$$

Où :

L_p : Longueur du talweg principal en Km.

T_c : Temps de concentration en h.

Tableau 44 la vitesse moyenne de ruissellement :

Sous Bassins	SB1	SB2	SB3	SB4	SB5
VR (Km/h)	0.105	0.065	0.047	0.078	0.061

Conclusion

Les caractéristiques morpho métriques des cinq sous bassins ont été évoquées dans ce chapitre. En effet, La forme allongée de ces derniers est traduite par les valeurs de l'indice de compacité qui sont supérieures à 1. De même, la dénivelée spécifique permet de classer les bassins dans les classes R5 (Relief assez fort) et R4 (Relief modéré). Toutefois, la carte des pentes révèle que 60.50% de la superficie total a une pente modérée. La méthode Giandotti a donné des valeurs de temps de concentration allant de 1,03h à 3,09h. En outre, il y a une variation entre 0,047 km/h et 0,105 km/h pour les valeurs de la vitesse de ruissellement.

La résultante de ces caractéristiques physiques et morphométriques qui constituent les facteurs non variables qui se combineront avec les facteurs variables des bassins (pluviométrie) aura des effets sur les écoulements annuels, les crues et automatiquement les inondations.

Chapitre 2 : Etude Hydrométrique

1. Introduction

Une étude basée sur le traitement statistique des données pluviométriques et hydrométriques, mettra en évidence les aspects fondamentaux de l'écoulement et l'évaluation des débits de crues afin d'évaluer les paramètres utilisés à la conception des ouvrages de protection. En outre, un calcul des crues pour des périodes de retour (crue décennale, centennale, millénaire, etc.) sera présenté, puisque plus la période de retour est grande, plus les débits et l'intensité sont importants.

2. Analyse des données pluviométriques

L'estimation de la pluie moyenne est faite à partir de station pluviométrique de Tébessa (120301).

Tableau 45 Coordonnées du poste pluviométrique de Tébessa

Nom de la Station	Code	Coordonnées			Nombre d'années observées
		X	Y	Z	
TEBESSA	12 03 01	991.9	247.2	890.0	42

2.1. Pluie moyenne annuelle

La précipitation moyenne annuelle représentative de l'ensemble des bassins versants en étude est déterminée à partir des observations enregistrées au niveau de la station pluviométrique de Tébessa. Avec une altitude proche du site des bassins versants d'étude.

2.2. Pluies maximales journalières

L'étude des précipitations maximales se basera sur les maximums mensuels des précipitations observée en 24 heures sur les différents postes pluviométriques des bassins versants. Les séries d'observations des maximums mensuels et journaliers des précipitations sont la base de calcul des pluies fréquentielles.

Les pluies maximales journalières de rares fréquences sont génératrices des crues exceptionnelles contre lesquelles il faut prémunir les ouvrages.

Tableau 46 Caractéristiques de la série avec N=42ans.

N°	code	station	Pluies moyennes maximale journaliers (mm)	Coefficient de variation « Cv »	Ecart type « 6 »	Nbre d'année
01	120301	TEBESSA	42.38	0.42	17.82	42

L'exposant climatique pour notre région ($b = 0.28$) est donné par l'A.N.R.H de Constantine.

La fréquence de la crue qui sera utilisée pour le dimensionnement de l'évacuateur de crue ou canal de protection contre les inondations des zones d'étude est la centennale.

Procédé d'ajustement

- Classer la série des précipitations par ordre croissant.
- Calcul de la fréquence expérimentale.
- Calcul des caractéristiques empiriques de la série de donnée.
- Ajuster graphiquement la loi choisie.

2.3. Choix de la loi d'ajustement :

Il existe plusieurs méthodes d'ajustement des séries pluviométrique, l'efficacité d'une méthode d'estimation dépend de la loi de probabilité, de la taille de l'échantillon et de certaines caractéristiques de l'échantillon. Toutefois, de nombreuses études, autant empiriques que théoriques, ont été menées afin de déterminer dans quelles circonstances une méthode d'estimation la plus efficace pour une loi donnée. L'ajustement de la série des pluies maximales journalières a été ajusté à deux lois d'ajustement statistiques :

1) - La loi de **GUMBEL**.

2) - La loi de **GALTON (log-normale)**.

L'application de ces lois nécessite les valeurs de la pluviométrie maximale journalière

Et celle de coefficient de variation.

2.3.1. Ajustement de la série pluviométrique à la loi de GUMBEL

L'ajustement des pluies maximales journalières à la loi de Gumbel nous permet d'évaluer les pluies maximales journalières pour n'importe quelle période de retour.

L'équation de la droite de Gumbel :

$$\bar{P}_{\max j} = \frac{1}{\alpha} Y + X_0$$

Y : Variable réduite de Gumbel.

$$Y = - [\ln(-\ln(F(x)))]$$

$$\text{Où : } F(x) = \frac{ni - 0,5}{N}$$

ni : Ordre de classement.

N : Taille de l'échantillon.

α , x_0 : Sont déterminées par la méthode des moindres carrées

x_0 : Paramètre de position (ordonnée à l'origine) ;

α : Paramètre d'échelle différent de zéro et positif appelé aussi « grade x » ; et la loi normale ;

$\frac{1}{\alpha}$: Pente de la droite de régression ;

x : Variable étudiée ; la précipitation maximale journalière « $P_{\max,j}$ » ; Cette variable x , exprimée en fonction de la variable réduite y , est l'équation de la droite de Gumbel sur papier à probabilité Gumbel.

$$P_{\max j P\%} = \left(\frac{1}{\alpha}\right) Y + X_0$$

Avant de procéder à l'ajustement il faut suivre les étapes suivantes :

- Classer les valeurs des précipitations par ordre croissant avec attribution d'un rang 1, 2,3...n ;
- Calculer pour chaque valeur de précipitation la fréquence expérimentale par la formule de **HAZEN**.
- Estimation des paramètres par la méthode des moments est particulièrement Simple avec : $1/\alpha = 0.78 S$, $x_0 = \bar{x} - 0.577/\alpha$

$$1/\alpha = 0.78 * 17.38 = 13.55 \quad , \quad \alpha = 1/13.55 = 0.073 \quad x_0 = \bar{x} - \frac{0.577}{0.073}$$

$$X_0 = 42.38 = 34.48$$

Donc la droite de Gumbel devient :

$$P_{\max, j (P\%)} = 13.55y + 34.48$$

$$y = -\ln(-\ln F(99\%)) = 4.401$$

$$P_{\max, i (1\%)} = 13.55 (4.60) + 34.48 = 96.11 \text{mm.}$$

Alors : $P_{\max, j}(1\%) = 96.11 \text{ mm}$

Les résultats de calcul :

Valeur minimale = 17.5

Valeur maximale = 94

La moyenne : $x = 42.38 \text{ mm}$

L'écart type : $S = 17.38 \text{ mm}$

Donc : $P_{\max, j1\%} = 96.11 \text{ m}$

Tableau 47 Calcul de PJ max selon les fréquences

Fréquence (%)	0.999	0.990	0.980	0.950	0.900	0.800	0.50
Variable de Gambel	6.90	4.60	3.90	3.00	2.25	1.5	0.367
Période de retour (ans)	1000	100	50	20	10	5	2
P_{\max} (mm)	123	96	72	68	53.92	45.73	39.23

2.3.2. Ajustement de la série pluviométrique par la loi Log Normal ou loi de Galton

Une variable aléatoire X a une distribution log normale lorsqu' $Y = \ln X$ est Normale. La loi de Galton résulte de la loi normale mais rendue dissymétrique par un changement de variables. Sa fonction de répartition est donnée par :

La loi de « Galton » est représentée par la formule suivante :

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{1}{2}u^2} dU \quad (\text{Fréquence au non dépassement})$$

$$U = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \quad (\text{variable réduite de GAUSS})$$

La variable réduite U est de la forme :

L'équation de la droite de **GALTON** est donnée par la relation suivante :

$$\log x_{P\%} = \overline{\log x} + \sigma \log u (P\%)$$

Avec :

$\overline{\log x}$: La moyenne de la série $\log x_i$

σ_{\log} : Ecart type de la série $\log x_i$

u : variable réduite de Gauss

$$\overline{\log x} = \frac{\sum_{i=1}^{42} \log x}{N}$$

$$\overline{\log x} = 1.590$$

$$\sigma_{\log} = 0.181$$

Pour une période de retour 100ans :

$$\log x_{P\%} = \overline{\log x} + \sigma_{\log} u(P\%) = 1.590 + 0.181 * 2,327 = 102.56 \text{ mm}$$

$$X_{P\%} = 102.56 \text{ mm}$$

Tableau 48 Calcul de PJ max selon les fréquences

Fréquence (%)	0.999	0.990	0.980	0.950	0.900	0.800	0.50
Période de retour (ans)	1000	100	50	20	10	5	2
$P_{\max j}$ (mm)	129.3	102.56	89.33	77.34	66.32	55.21	38.9

- **Résultat d'ajustement**

Tableau 49 Résultat d'ajustement

Période de retour	Fréquence au non dépassement	Pluie journalière Maximale fréquentielle (mm)
(an)	(%)	Tebessa
2	0.50	38.9
5	0.8	55.21
10	0.90	66.33
20	0.95	77.34
50	0.98	89.33
100	0.99	102.55

23.3. Pluie de courte durée et leurs intensités à différentes Fréquences

Les précipitations exceptionnelles (P_{ct}) de durée (t) inférieure à 24h (de courte durée) sont reliées à la précipitation journalière fréquentielle $P_{max,j}$ selon la relation de MONTANARI

- **Loi de Montanari :**

Une façon commode de présenter une relation est de l'exprimer par une équation : cela permet, à partir d'un petit nombre de paramètres, d'extraire avec précision la valeur désirée, d'autant plus que chacun dispose aujourd'hui d'outils informatiques.

$$P_{ct} = P_{j_{max}} \left(\frac{t}{24} \right)^b$$

Avec :

P_{ct} : La pluie de courte durée de fréquence égale à celle de $P_{max,j}$ en (mm).

$P_{max,j}$: La pluie maximale journalière pour différentes fréquences ;

t : la durée en heures ;

b : L'exposant climatique ($b=0.28$ donné par l'ANRH), est calculé par la formule :

$$b = 1 + \frac{\ln I_2 - \ln I_1}{\ln T_2 - \ln T_1}$$

I_1 : intensité à 30 minute = 25 mm (d'après GRICO)

I_2 : intensité en 24 heures = $\frac{\overline{P_j}}{24}$

$T_1 = 0.5 \text{ h}$, $T_2 = 24 \text{ h}$

Tableau 50 Les valeurs de b

Station	b calculé	b de BODY
Tébessa	0.293	0.28

Tableau 51 Pluie de courte durée et leurs intensités à différentes fréquences

Fréquence	0.990	0.980	0.950	0.900	0.800	0.50
Période de Retour	100	50	20	10	5	2
t(h)						
1	42.12	36.69	31.76	27.24	22.68	15.98
2	51.15	44.55	38.57	33.07	27.53	19.40
3	57.29	49.90	43.21	37.05	30.84	21.73
4	62.10	54.09	46.83	40.16	33.43	23.55
5	66.10	57.58	49.85	42.75	35.59	25.07
6	69.57	60.59	52.46	44.98	37.45	26.39
7	72.64	63.27	54.77	46.97	39.10	27.55
8	75.40	65.68	56.86	48.76	40.59	28.60
9	77.93	67.88	58.77	50.39	41.95	29.56
10	80.26	69.91	60.53	51.90	43.21	30.44
11	82.43	71.80	62.16	53.31	44.38	31.27
12	84.47	73.57	63.70	54.62	45.47	32.04
13	86.38	75.24	65.14	55.86	46.50	32.76
14	88.19	76.82	66.51	57.03	47.48	33.45
15	89.91	78.31	67.80	58.14	48.40	34.10
16	91.55	79.74	69.04	59.20	49.28	34.73
17	93.12	81.11	70.22	60.22	50.13	35.32
18	94.62	82.42	71.35	61.19	50.94	35.89
19	96.07	83.67	72.44	62.12	51.71	36.44
20	97.46	84.88	73.49	63.02	52.46	36.96
21	98.80	86.05	74.50	63.89	53.18	37.47
22	100.09	87.18	75.48	64.72	53.88	37.96
23	101.35	88.27	76.42	65.53	54.56	38.44
24	102.56	89.33	77.34	66.32	55.21	38.90

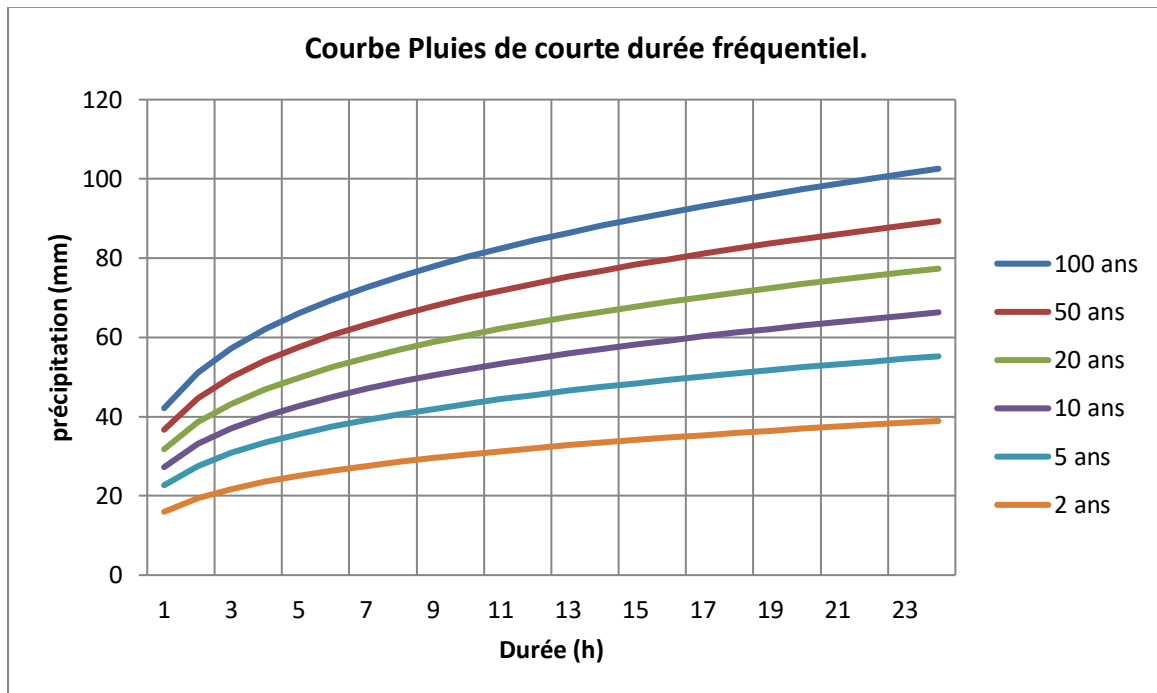


Figure 2.1 : les courbes pluies de courte durée fréquentielle

3.3.4. Intensités maximales à différentes Fréquences

L'analyse de cette intensité moyenne maximale est très importante dans le dimensionnement des réseaux d'égout. Des systèmes de drainage et des aménagements anti-érosifs. L'égalité d'intensité, les pluies qui occasionnent le débit maximum en un point du réseau d'écoulement est celle dont la durée de précipitation est au moins égale au temps de concentration des eaux.

La détermination des intensités maximales pour différentes périodes de retour se fait par le biais de la formule :

$$I_t = \frac{Ptc(mm)}{t(h)}$$

Avec :

I_t : Intensité maximale (mm/h)

Tableau 52 Pluie de courte durée et leurs intensités à différentes fréquences

Fréquence	0.990	0.980	0.950	0.900	0.800	0.50
Période de Retour t (h)	100	50	20	10	5	2
1	42.12	36.69	31.76	27.24	22.68	15.98
2	25.58	22.28	19.29	16.54	13.77	9.70
3	19.10	16.63	14.40	12.35	10.28	7.24
4	15.53	13.52	11.71	10.04	8.36	5.89
5	13.22	11.52	9.97	8.55	7.12	5.01
6	11.60	10.10	8.74	7.50	6.24	4.40
7	10.38	9.04	7.82	6.71	5.59	3.94
8	9.43	8.21	7.11	6.10	5.07	3.58
9	8.66	7.54	6.53	5.60	4.66	3.28
10	8.03	6.99	6.05	5.19	4.32	3.04
11	7.49	6.53	5.65	4.85	4.03	2.84
12	7.04	6.13	5.31	4.55	3.79	2.67
13	6.64	5.79	5.01	4.30	3.58	2.52
14	6.30	5.49	4.75	4.07	3.39	2.39
15	5.99	5.22	4.52	3.88	3.23	2.27
16	5.72	4.98	4.32	3.70	3.08	2.17
17	5.48	4.77	4.13	3.54	2.95	2.08
18	5.26	4.58	3.96	3.40	2.83	1.99
19	5.06	4.40	3.81	3.27	2.72	1.92
20	4.87	4.24	3.67	3.15	2.62	1.85
21	4.70	4.10	3.55	3.04	2.53	1.78
22	4.55	3.96	3.43	2.94	2.45	1.73
23	4.41	3.84	3.32	2.85	2.37	1.67
24	4.27	3.72	3.22	2.76	2.30	1.62

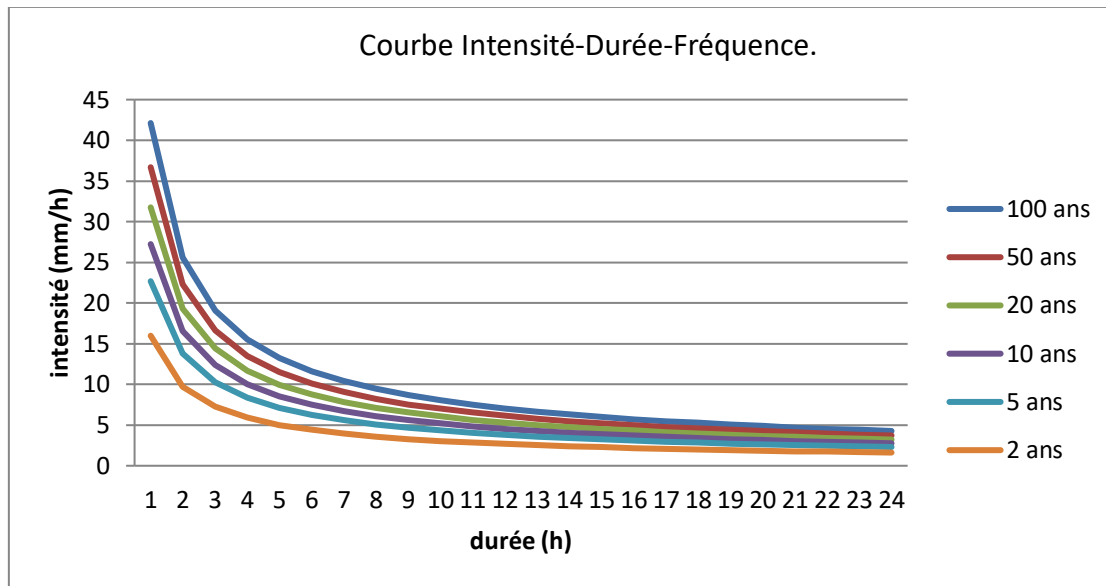


Figure 2.2: la courbe intensité-durée-fréquentiel.

4. Evaluation des apports liquides :

Il existe en Algérie de nombreuses formules empiriques d'estimation des apports, Dans le cas de notre étude, nous ne disposons pas de série hydrographique relatant l'écoulement dans les affluents des grands bassins versants comportant les sous bassins versants. Par conséquent, le calcul de l'apport sera élaboré par le biais de formules empiriques qui sont d'un usage courant dans les études hydrologiques et qui donnent des résultats fiables.

4.1. Apport moyen annuel : A_0

a) Formule de A.N.R.H :

$$A_{\text{moy}} = 0,915 \cdot P_{\text{moy}}^{2,684} \cdot S^{0,842}$$

P_{moy} : Pluie moyenne annuelle [mm].

S : Superficie du bassin [Km^2].

b) Formule de SAMIE :

$$Le = \bar{P}^2 (293 - 2.2\sqrt{S}) \quad \text{Ou} \quad A_0 = Le \cdot S$$

P_{moy} : Pluie moyenne annuelle en [mm].

S : Surface du bassin en [km^2].

Le : Lame d'eau écoulée en [mm].

c) Formule de TURC :

Cette formule établie à partir des observations faites sur 254 bassins versants situés sous tous les climats du globe, donne le déficit d'écoulement D.

$$D = \frac{\bar{P}}{\sqrt{0.9 + \left(\frac{P^2}{L^2}\right)}}$$

Avec :

P : Module interannuel en mm

D : déficit d'écoulement en mm

$$L = 300 + 25 T + 0,05 T^3 = 720.03 \text{ mm}$$

T : la température moyenne interannuelle adoptée est $T = 16,3^\circ \text{C}$.

$$Le = P - D$$

$$Le = 365.84 - 339.34 = 26.5 \text{ mm}$$

Tableau 53 Evaluation des apports liquides des sous bassins

Sous Bassins	SB1	SB2	SB3	SB4	SB5
Apport moy interannuel A_0	m^3	m^3	m^3	m^3	m^3
Formule d'A.N.R.H	$6.38 \cdot 10^7$	$12.01 \cdot 10^7$	$14.31 \cdot 10^7$	$6.35 \cdot 10^7$	$3.39 \cdot 10^7$
Formule de TURC	0.37	0.78	0.96	0.36	0.17
Formule de SAMIE	0.53	1.11	1.36	0.57	0.25

D'après les différentes valeurs des apports annuels calculées par les différentes formules, on choisit la formule la plus appliquée en Algérie (la formule A.N.R.H).

4.2. Coefficient de variation

Le coefficient de variation de la série des apports relatifs au bassin versant de Tébessa est calculé par la formule de Kritskly-Mankel

$$Cv = \frac{A'}{S^{0.06} M_0^{0.27}}$$

Avec :

A' : coefficient géographique (égal à 0.83 pour une région inconnue)

M₀ : Module spécifique (l/s. Km²)

Les résultats sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau 54 coefficient de variation des sous bassins

Sous Bassins	SB1	SB2	SB3	SB4	SB5
Cv	1.070	1.054	1.049	1.070	1.086

5. Etude des crues

Les crues étant les événements correspondant à la circulation des débits exceptionnels dans les bassins versants, elles sont influencées par de nombreuses variables parmi lesquelles l'intensité, la durée et la distribution de la pluie dans le bassin, sa topographie etc.

Les crues dépendent essentiellement de l'abondance et de l'intensité de la pluie, de plus, le rôle physique du bassin versant n'est pas négligeable.

De ce fait, l'évolution de la crue obéit principalement à la puissance et l'intensité de l'averse, sa vitesse est largement influencée par le couvert végétal, la lithologie, les paramètres morphométriques du bassin (indice de compacité, densité de drainage, rapport des confluences et des longueurs, etc. ...), par la pente des thalwegs, la forme du lit, la largeur de la vallée. De plus, les diverses branches du chevelu hydrographique interviennent bien qu'à un degré moindre dans l'évolution ou la perturbation d'une crue. Dans la plupart des cas, ce sont les averses généralement qui provoquent les grandes crues.

5.1. Application sur les bassins versants

Partant des données morphologiques et pluviométriques existantes, une évaluation des débits de pointes des crues sera faite à partir des formules empiriques :

Mallet – Gauthier, Giandotti, Turazza, et Sokolovsky. Ces relations sont celles qui traitent au mieux les petits bassins.

5.1.1. Formule de Mallet – Gauthier

Dans leur étude sur les problèmes de l'eau en Algérie, ils ont établi une formule exprimant le débit maximum en crue en fonction des précipitations, de la surface du bassin versant et d'un coefficient K caractéristiques géographique et climatique du bassin versant.

$$Q_{maxp\%} = 2 \cdot K \cdot \log(1 + 20\bar{H}) \frac{S}{\sqrt{L}} \sqrt{1 + 4\log T - \log S}$$

Q_{max.p%} : débit maximum de la crue.

K : coefficient dépendent des caractéristiques du bassin comprise entre 1-3

On prend : **K**=1,5.

H̄ : Pluviométrie moyenne annuelle en m, **H̄**= 0,36584 m.

S : Surface du bassin en Km².

L : Longueur du talweg principal en Km.

T : Période de retour en année.

5.1.2. Formule de Turazza

Cette formule utilise La pluie de courte durée de fréquence égale a celle de P_{max,j} déterminées sur un intervalle de référence égal au temps de concentration du bassin versant.

$$Q_{maxp\%} = \frac{C \cdot S \cdot P_{tc}}{3.6 T_c}$$

$$P_{tc} = P_{jmaxF\%} \left(\frac{T_c}{24} \right)$$

Avec : **S** : Surface du sous bassin.

P_{tc} : La pluie de courte durée de fréquence égale a celle de P_{max,j} en (mm).

P_{max,j} : La pluie maximale journalière pour différentes fréquences.

T_c : temps de concentration (h).

C : coefficient de ruissellement de la crue considérée pour une probabilité P%.

Tableau 55 Valeur de coefficient de ruissellement C Fréquence Période de Retour

Fréquence	1	2	5	10
Période de retour	100	50	20	10
C. R	0.80	0.75	0.70	0.65

Tableau 56 Valeur de temp de concentration Tc

Sous Bassins	SB1	SB2	SB3	SB4	SB5
Temp de concentration (h)	1.69	2.53	3.09	1.89	1.80

Tableau 57 Pluies de courte durée pour le sous bassin SB1.

Fréquence (%)	0.9	0.95	0.98	0.99
Période de Retour (an)	10	20	50	100
Pj max (mm)	66.33	77.34	89.33	102.55
Le temps de Concentration Tc(h)	1.69	1.69	1.69	1.69
P _t (mm)	31.55	36.79	42.50	48.78

Tableau 58 Pluies de courte durée pour le sous bassin SB2

Fréquence(%)	0.9	0.95	0.98	0.99
Période de Retour (an)	10	20	50	100
PJ max (mm)	66.33	77.34	89.33	102.55
Le temps de Concentration Tc(h)	2.53	2.53	2.53	2.53
Pt (mm)	35.33	41.19	47.58	54.62

Tableau 59 Pluies de courte durée pour le sous bassin SB3

Fréquence(%)	0.9	0.95	0.98	0.99
Période de Retour (an)	10	20	50	100
PJ max (mm)	66.33	77.34	89.33	102.55
Le temps de Concentration Tc(h)	3.09	3.09	3.09	3.09
Pct (mm)	37.36	43.56	50.32	57.77

Tableau 60 Pluies de courte durée pour le sous bassin SB4

Fréquence(%)	0.9	0.95	0.98	0.99
Période de Retour (an)	10	20	50	100
PJ max (mm)	66.33	77.34	89.33	102.55
Le temps de Concentration Tc(h)	1.89	1.89	1.89	1.89
Pct (mm)	32.56	37.96	43.85	50.34

Tableau 61 Pluies de courte durée pour le sous bassin SB5

Fréquence(%)	0.9	0.95	0.98	0.99
Période de Retour (an)	10	20	50	100
PJ max (mm)	66.33	77.34	89.33	102.55
Le temps de Concentration Tc(h)	1.80	1.80	1.80	1.80
Pct (mm)	32.12	37.45	43.25	49.65

5.1.3. Formule de Giandotti

Le débit maximum probable est donné par la formule suivante :

$$Q_{maxp\%} = \frac{S \cdot C \cdot \sqrt{H_{moy} - H_{min}}}{4\sqrt{S} + 1.5L} \times P_{tc}$$

Avec :

C : coefficient topographique varie de 66 à 166 et on prend $C = 166$.

S : Surface du sous bassin en Km^2 .

L : Longueur du talweg principal en Km.

h_{moy} : Altitude moyenne en m.

h_{min} : Altitude minimale en m.

P_{tc} : pluie fréquentielle de courte durée, correspondant au temps de concentration.

5.1.4. Formule de Sokolovski

Le débit maximum probable est donné par la formule suivante :

$$Q_{maxp\%} = 0.28 \times \frac{P_{tc\%} \cdot C \cdot S \cdot f}{T_m = T_c}$$

S : Surface du bassin versant en Km^2

C : coefficient de ruissellement pour la crue probable

f : Coefficient de forme de la crue ;

t_c : Temps de concentration du sous bassin en h ;

P_{tc%} : précipitation en mm, de probabilité p% correspondant à un temps t_c ;

0.28 : coefficient de changement d'unité ;

Le coefficient de forme de la crue peut être calculé par la formule

$$F = \frac{12}{4 + 3\gamma}$$

Pour des petits bassins non boisés, sol peu perméable, on a : $\gamma = 2 \div 2.5$

Pour bassin boisé, sol perméable on a : $\gamma = 3 \div 4$

Puisque les sous bassins ont une surface inférieure à 50 Km² on prend : $\gamma = 2$

Alors : **F= 1.2**

Les débits de crues des sous bassins par les différentes formules dans les tableaux suivants :

Tableau 62 Débits de crues au sous bassin n°1.

Période de retour	Formule de Mallet Gauthier	Formule de Turazza	Formule de Giandotti	Formule de Sokolovski
an	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
10	30.86	47.02	46.10	56.88
20	35.35	59.05	53.76	71.43
50	40.53	73.09	62.10	88.41
100	44.05	89.48	71.28	99.23

Tableau 63 Débits de crues au sous bassin n°2.

Période de retour	Formule de Mallet Gauthier	Formule de Turazza	Formule de Giandotti	Formule de Sokolovski
an	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
10	45.22	74.58	76.62	90.20
20	52.37	93.64	89.33	113.26
50	60.54	115.89	103.18	140.18
100	66.05	141.91	118.45	171.65

Tableau 64 Débits de crues au sous bassin N°3

Période de retour	Formule de Mallet Gauthier	Formule de Turazza	Formule de Giandotti	Formule de Sokolovski
an	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
10	44.36	79.44	81.16	96.69
20	51.55	99.75	94.63	120.65
50	59.74	123.46	109.31	149.33
100	65.25	151.19	125.5	159.35

Tableau 65 Débits de crues au sous bassin N°4

Période de retour	Formule de Mallet Gauthier	Formule de Turazza	Formule de Giandotti	Formule de Sokolovski
an	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
10	25.59	43.14	39.73	52.18
20	29.31	54.17	46.32	65.52
50	33.61	67.04	53.50	70.20
100	36.52	82.09	61.41	99.30

Tableau 66 Débits de crues au sous bassin N°5

Période de retour	Formule de Mallet Gauthier	Formule de Turazza	Formule de Giandotti	Formule de Sokolovski
an	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
10	16.45	21.23	19.01	25.68
20	18.67	26.66	22.50	32.24
50	21.25	32.99	25.46	39.90
100	23.01	40.39	30.06	48.86

Nous adoptons les débits maximaux des crues données par la formule de Sokolovsky, par raison de sécurité et étant donné que la méthode adoptée est la plus utilisée en l'Algérie pour le tracé de l'hydrogramme de crue.

5.2. Hydrogrammes des crues

L'hydrogramme de crue représente la variation des débits d'un cours d'eau en fonction du temps, il permet de déterminer les caractéristiques de la crue, forme, volume, temps de montée et temps de descente, la forme de l'hydrogramme de crue est déterminée selon la méthode de Sokolovsky.

L'hydrogramme de crue sera établi selon la méthode de Sokolovsky. Cette méthode assimile l'hydrogramme de crue à deux équations paraboliques l'une pour la montée de la crue et l'autre pour la décrue.

- Pour la montée de la crue :

$$Q_m = Q_{\max} \left(\frac{t}{t_m} \right)^x$$

- . Pour la décrue :

$$Q_d = Q_{\max} \left[\frac{(t_d - t)}{t_d} \right]^y$$

Avec :

t_m : temps de montée de la crue.

t_a : temps de la décrue.

m ,n : puissance des équations m = 2, n = 3.

t_m = t_c et **t_a = γ . t_c**

γ : est évalué en fonction de la taille du cours d'eau de la perméabilité et du taux de boisement du bassin versant.

Tableau 67 Les différentes valeurs de

Description du cours d'eau	γ
Petit cours d'eau et vallons dans les bassins versants faiblement perméables	2 à 2,5
Petit cours d'eau et vallons dans les bassins versants boisés ou perméables	3 à 4
Moyen cours d'eau avec terrasses de lit majeures normales.	
Grand et moyen cours d'eau avec terrasses de débordements étendues	4 à 7

On prend $\gamma=2$

Les débits de crues des différentes périodes de retour de chaque sous bassin sont donnés aux tableaux suivants ainsi que les Hydrogrammes correspondants.

Tableau 68 Hydrogrammes des crues de différentes périodes de retour sous bassin N°1.

T(h)	$(t/t_c)^2$	Q (10%)	Q (5%)	Q (2%)	Q (1%)
0.2	0.01400511	0.79661076	1.00038514	1.23819194	1.38972725
0.4	0.05602045	3.18644305	4.00154056	4.95276776	5.558909
0.6	0.12604601	7.16949687	9.00346627	11.1437275	12.5075453
0.8	0.22408179	12.7457722	16.0061622	19.811071	22.235636
1	0.3501278	19.9152691	25.0096285	30.9547985	34.7431813
1.2	0.50418403	28.6779875	36.0138651	44.5749098	50.030181
1.4	0.68625048	39.0339274	49.0188719	60.6714051	68.0966353
1.6	0.89632716	50.9830888	64.024649	79.2442842	88.942544
1.69	1	56.88	71.43	88.41	99.23
td-t	$(td-t/td)^3$	Q (10%)	Q (5%)	Q (2%)	Q (1%)
3.38	1	56.88	71.43	88.41	99.23
2.98	0.68532834	38.981476	48.9530033	60.5898785	68.0051312
2.58	0.44474289	25.2969758	31.7679849	39.3197192	44.1318373
2.18	0.2682992	15.2608586	19.164612	23.7203324	26.6233298
1.78	0.14605281	8.30748362	10.432552	12.9125286	14.49282
1.38	0.06805925	3.87121013	4.86147222	6.01711828	6.75351937
0.98	0.02437407	1.38639733	1.74104011	2.15491189	2.41863937
0.58	0.00505282	0.28740444	0.36092298	0.44671987	0.50139139
0.18	0.00015103	0.00859067	0.01078818	0.01335269	0.01498685
0	0	0	0	0	0

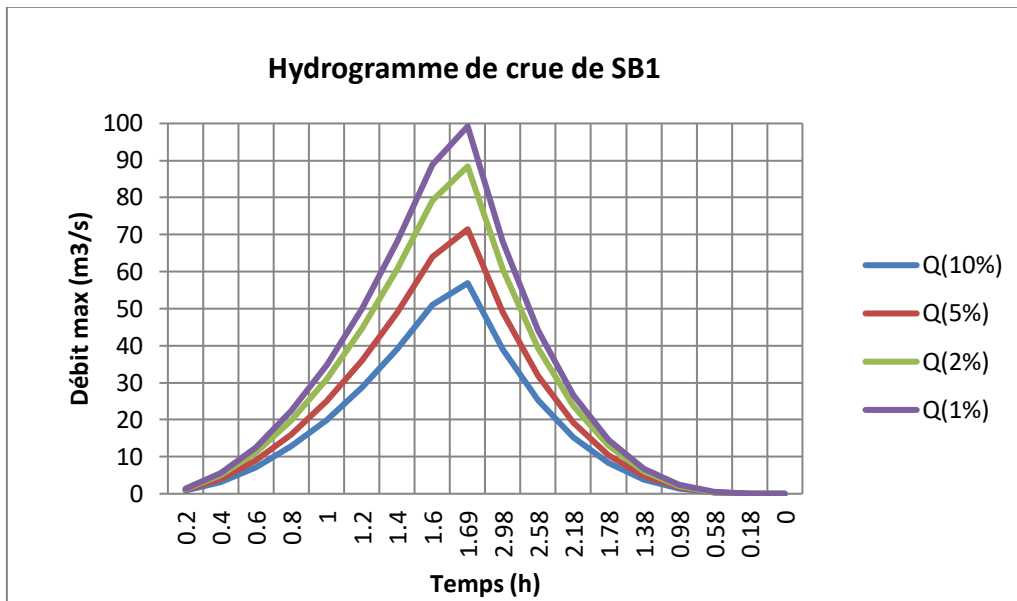


Figure 2.3 : l'hydrogramme de crue de SB1.

6. Apport solide

Les apports solides sont constitués d'une part de matériaux grossières charriés sur le fond du lit de l'oued et d'autre part d'éléments fins transportés en suspension.

Les apports solides dépendent de l'étendue du relief du bassin versant, de la nature géologique des sols et de leur résistance à l'érosion, liés-t-elles même à la couverture végétale, au régime des pluies et de la température.

6.1. Evaluation des apports solides

On tentera de définir l'importance du transport solide par les formules suivantes :

- Formule de TIXERONT

Cette formule a été calée sur la base des corrélations entre l'apport moyen annuel (A) et la perméabilité (α) établis à partir de données d'observation sur des oueds Algériens et tunisiens.

$$Q_s = \alpha \cdot L_0^{-0.15} \cdot S$$

$$L_e = \frac{A_0}{S} \quad \text{Où : } A_0 : \text{Apport moyen [Mm}^3\text{]}$$

$$S : \text{Surface du B.V [Km}^2\text{]}$$

Q_s : l'apport solide moyen annuel (en suspension)

\bar{A} : Apport moyen annuel exprime en mm dans cette relation

α : Paramètre caractérisant la perméabilité du bassin versant. Il varie de 3.5 à 3200 ; il est d'autant plus important que la perméabilité est faible.

α : Caractéristique de perméabilité.

Tableau 69 Caractéristique de perméabilité

Variation de perméabilité	α
Elevée	8.5
Moyenne	75
Faible à moyenne	350
Faible	1400
Imperméable	3200

Pour notre étude, on prend $\alpha = 350$ pour l'ensemble des bassins versants.

Tableau 70 l'apport solide des sous bassins

Sous Bassins	SB1	SB2	SB3	SB4	SB5
Q_s [t/ an]	72337.81	168654.40	213008.06	71872.14	31080.17

Formule de GAVRILLOVIC

La méthode de GAVRILLOVIC a été utilisée pour la détermination d'un coefficient d'érodibilité des sols et des paramètres de la production du débit solide dans le Nord de l'Algerie

$$ES = T \cdot \bar{P} \cdot \pi \sqrt{Z^3}$$

T_a : taux d'abrasion [t/Km²/an]

$$T = \sqrt{\frac{t^\circ}{10}} + 1 \quad : \text{Coefficient de température } T = 2.24 \text{ }^\circ\text{C}$$

\bar{P} : Pluie moyenne annuelle $\bar{P} = 365.84$ mm

t° : Température moyenne interannuelle en degré Celsius

Z : coefficient d'érosion relatif du bassin versant (érosion moyenne à élevée égal à 0.3)

Taux de rétention des sédiments produits par le bassin.

$$R_m = \frac{\sqrt{P \cdot H_{moy}}}{0.2(L + 10)}$$

P : périmètre du bassin versant (km).

L : longueur du cours d'eau principal (km).

H_{moy} : altitude moyenne du bassin versant (km).

Le taux d'érosion est calculé par la formule suivante :

$$Ta = ES \cdot Rm$$

Es : production moyenne annuelle des matériaux érodés par 1 km² de bassin versant.

Apport solide moyen annuel

$$Qs = Ta \cdot S \quad Qs = ES \cdot Rm \cdot S$$

Qs : apport solide moyen annuel

S : superficie du bassin versant (km²)

Tableau 71 Apport solide moyen annuel des sous bassins selon la formule de Gavrilovic

Sous Bassins	T	ES	Rm	Taux d'abrasion(t/km/an)	Qs. (t/an)
SB 1	2.24	422.81	1.28	541.11	7548.49
SB 2	2.24	422.81	1.36	574.65	16998.29
SB 3	2.24	422.81	1.15	485.27	17659.01
SB 4	2.24	422.81	1.22	514.63	7137.86
SB 5	2.24	422.81	1.11	467.65	3081.79

Formule de FOURNIER :

La formule de fournier donne l'érosion spécifique E_s en tonne/km² .an :

$$E_s = \frac{1}{36} \left(\frac{P_m^2}{P_A} \right)^{2,65} \left(\frac{H^2}{S} \right)^{0,16}$$

Avec :

T_a : Taux d'abrasion [t/Km²/an]

P_m : 40.89 mm valeur moyenne des précipitations du mois

Le plus pluvieux.

$P_a = 365.84$ mm pluie moyenne du bassin versant.

$H = 45\%$ ($H_{max} - H_{min}$) (m)

S : Superficie du bassin versant [Km²]

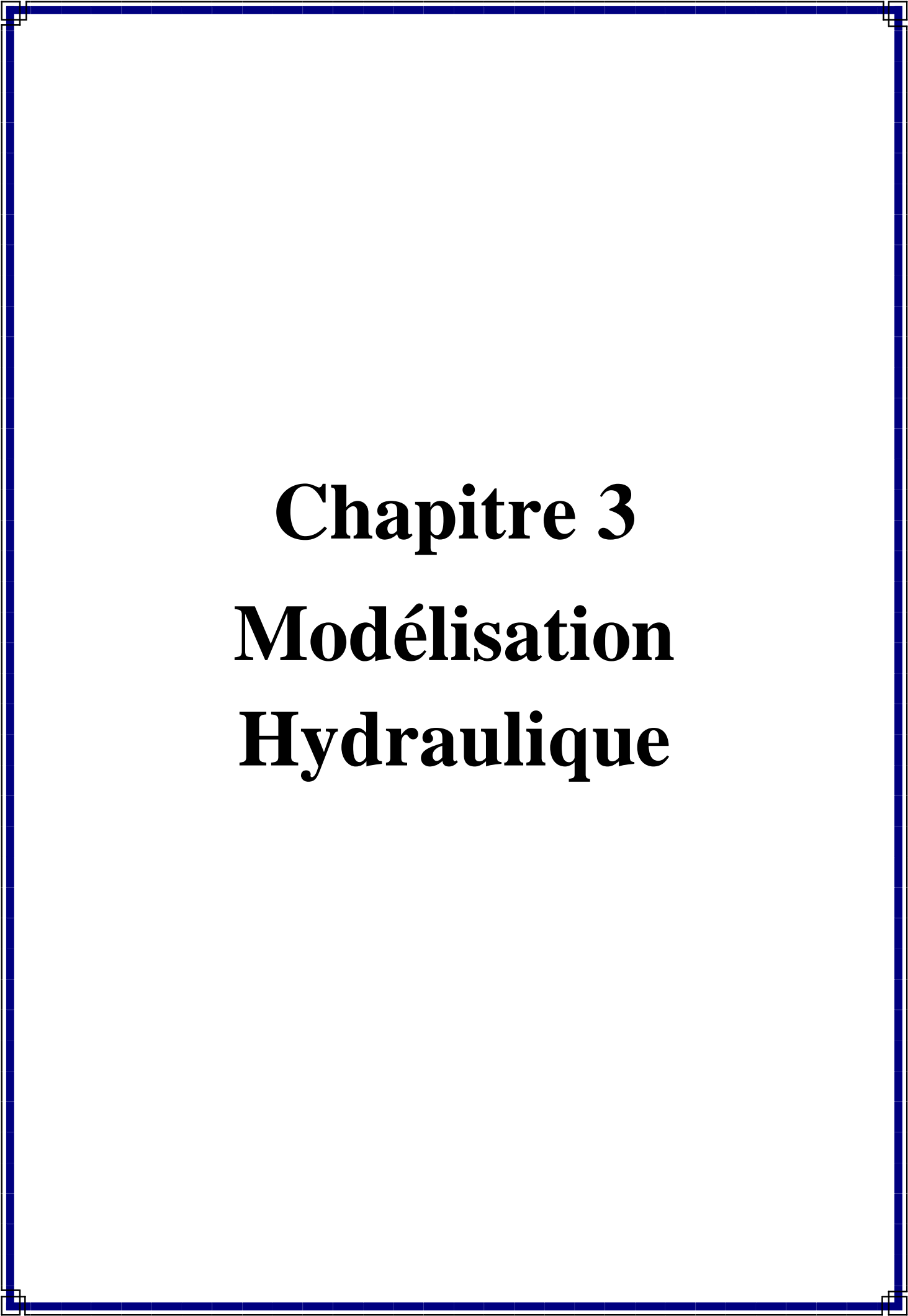
Tableau 72 Apport solide moyen annuel des sou bassins selon la formule

Sous Bassins	H min	H max	45% (Hmax – Hmin)	S (km ²)	Qs [t/Km ² /an]
SB 1	820	1450	283.5	13.95	6.05
SB 2	805	1550	335.25	29.58	5.66
SB 3	795	1631	376.2	36.39	5.68
SB 4	830	1505	303.75	13.87	6.19
SB 5	790	1100	139.5	6.59	5.44

Les résultats obtenus en appliquant l'équation de FOURNIER est de valeur très basse, ce qui les fait inacceptable.

Conclusion

Dans ce chapitre, un traitement statistique a été réalisé afin de bien évaluer ou étudier les données pluviométriques de la station de Tébessa, cette dernière étant la seule station existante dans la zone d'étude. De plus, une étude hydrométrique a été réalisée, étant donné l'absence de station hydrométrique dans les cinq sous-bassins versants de Tébessa, des formules empiriques ont été utilisées pour la prédétermination des débits maximaux de crue. Une évaluation plus ou moins variée a permis de fixer les valeurs des crues qui traversent la ville de Tébessa, ce qui nous permettra de dimensionner et de calculer les travaux de protection de cette ville contre les risques d'inondations. Ainsi, les hydrogrammes de crues établis nous permettent de voir l'évolution des crues dans le temps. Enfin, un calcul des débits solides est nécessaire pour pouvoir estimer une crue, cela a été fait par plusieurs méthodes empiriques en raison du manque de station hydrométriques.



Chapitre 3

Modélisation

Hydraulique

1.Introduction

L'augmentation des dommages est rarement liée à l'aménagement global de la ville, par contre une part importante des dégâts peut être attribué directement à la modification de l'occupation du sol dans les zones inondables des plaines et des vallées (Kreis, 2004). La ville de Tébessa a connu des inondations qualifiées de catastrophiques qui ont généré des pertes très importantes et des conséquences désastreuses. Bien que des aménagements ont été établies afin d'assurer la protection de la ville de Tébessa contre les inondations, mais incontestablement des répercussions sur les conditions d'écoulement et les risques qui pourraient en découler.

Afin d'établir une carte des risques d'inondations, nous avons procédé à l'adaptation d'une base de données SIG qui va nous permettre d'exécuter une analyse spatiale de l'étendue du risque d'inondation en y intégrant un programme de modélisation hydraulique à différentes fréquences HEC-RAS.

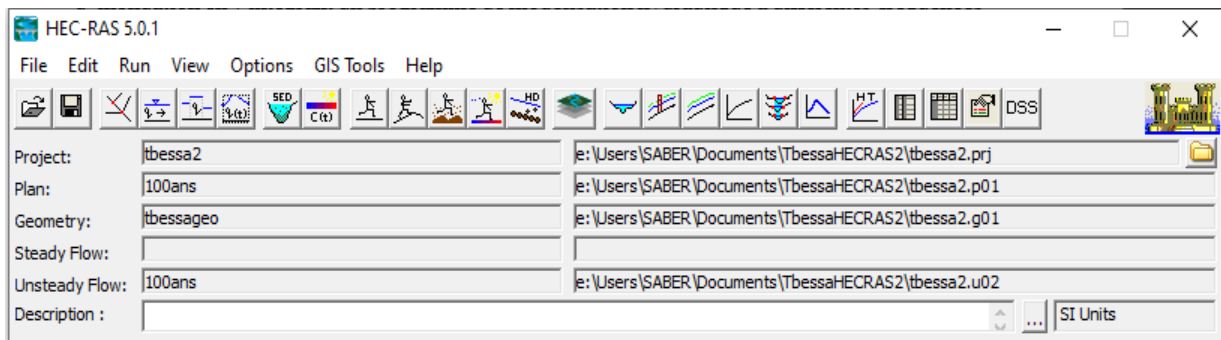


Figure 3.1 : La fenêtre principale du logiciel HEC-RAS

2.Délimitation de la zone d'étude

D'après le PDAU de la commune de Tébessa réalisée par le bureau d'étude urba Batna (Bureau d'étude et réalisation en urbanisme Batna) la zone d'étude comprend le périmètre urbain de la ville de Tébessa, qui comprend le secteur urbanisé et l'extension de la ville à court, moyen et futur terme.

3.1.1. DEM Modèle numérique d'élévation d'une résolution de 12.5 m

Cette carte a été obtenue à partir de ASF (Alaska Satellite Facility) et satellite ALOS PAISAR (2006-2011). Cette dernière révèle que l'altitude la région d'étude varie entre 827m et 1150 m. L'altitude la plus faible existe dans la partie Nord de la ville (l'Aéroport de Tébessa) et même dans l'ouest et l'est, par contre dans la partie sud une forte altitude qui peut atteindre 1150 m. Cette variation des altitudes montre que la zone est menacée par les risques d'inondation.

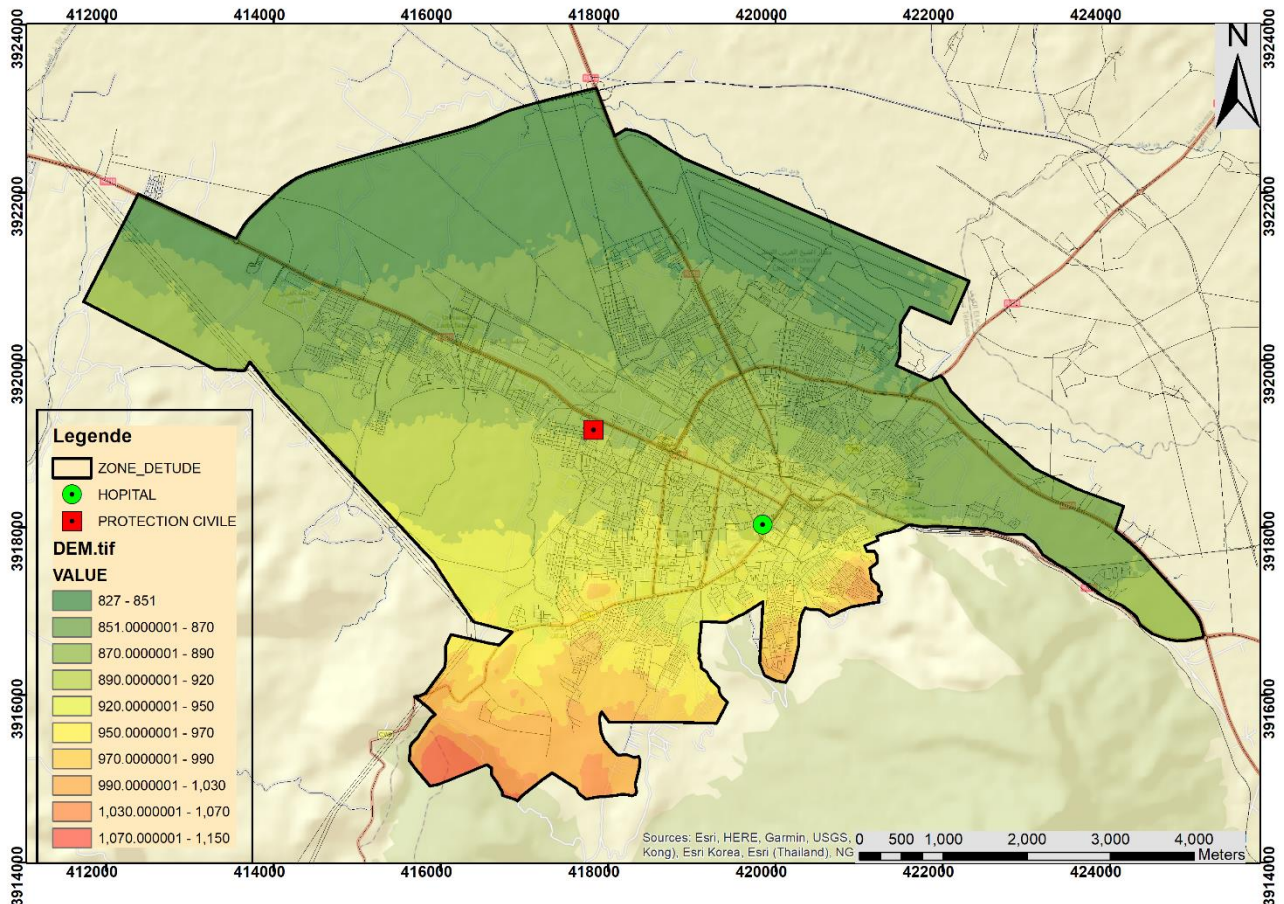


Figure 3.2 : Carte DEM (digital élévation model)

3.1.2. DTS Distance de la rivière (distance euclidienne)

La carte est réalisée prend en considération rien que les oueds principaux. En effet, pour chaque pixel, la distance la plus proche des axes des Oueds sera calculée. Cette méthode permet d'évaluer la densité du réseau hydrographique. Les valeurs des DTS varient entre 0 et 2041. Les zones les plus éloignées des axes des oueds c'est des régions qui ne sont pas soumises aux inondations, par contre les zones des lits des Oueds sont toujours exposées aux inondations lors du débordement de l'oued.

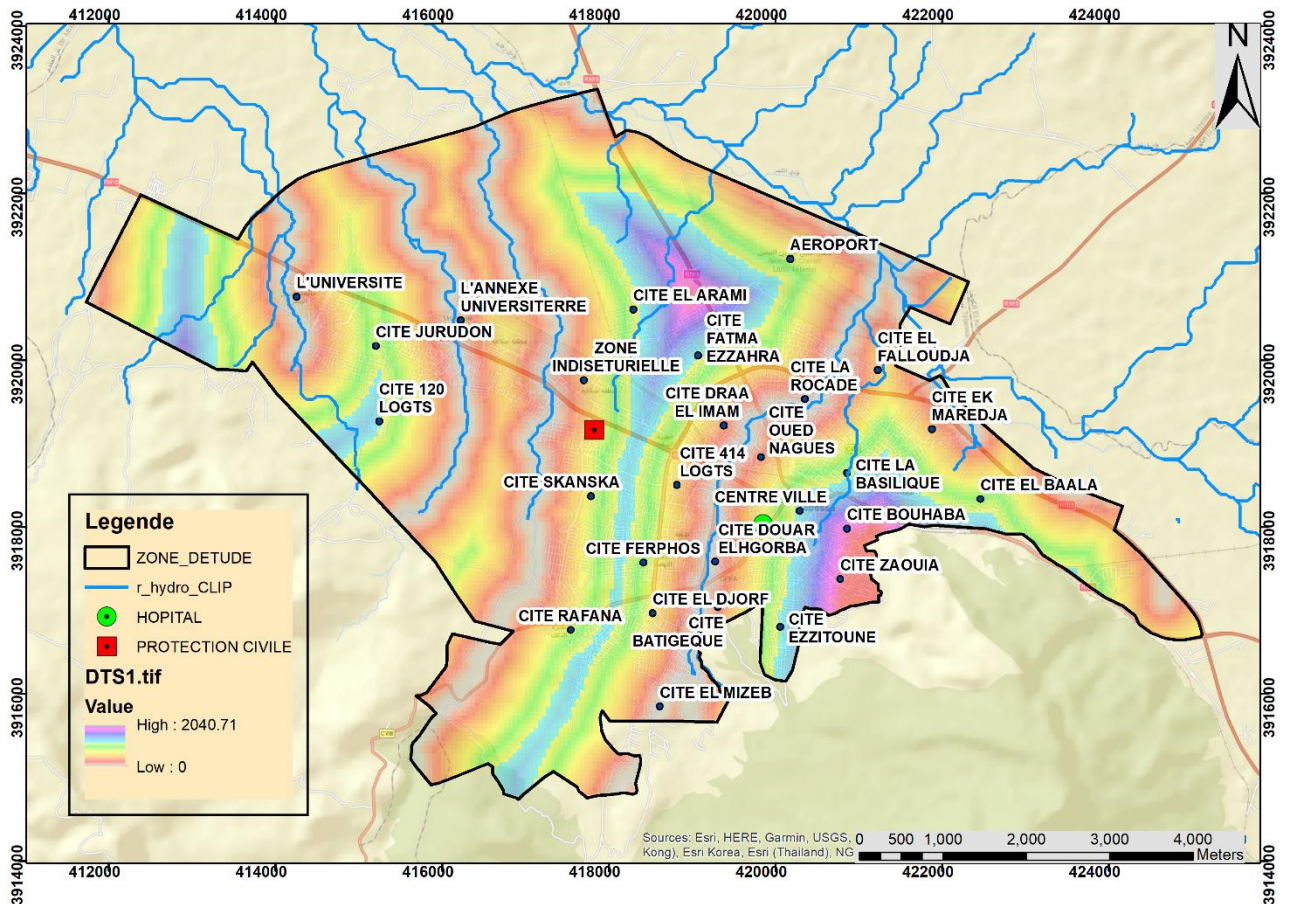


Figure 3.4 : Cartes DTS Distance de la rivière (distance euclidienne)

3.1.4. Carte des pentes

La carte des classes de pente (figure 3.5), montre que les pentes les plus abruptes, très fortes à fortes, se concentrent dans les parties sud de la ville (zone montagneuse). Également, de très faibles pentes se trouvent dans la partie Nord de la ville. En revanche, Les pentes modérées ainsi que les pentes faibles se localisent dans le centre de la ville. Ainsi, la pente va jouer un rôle prépondérant dans la genèse des inondations dans la ville de Tébéssa.

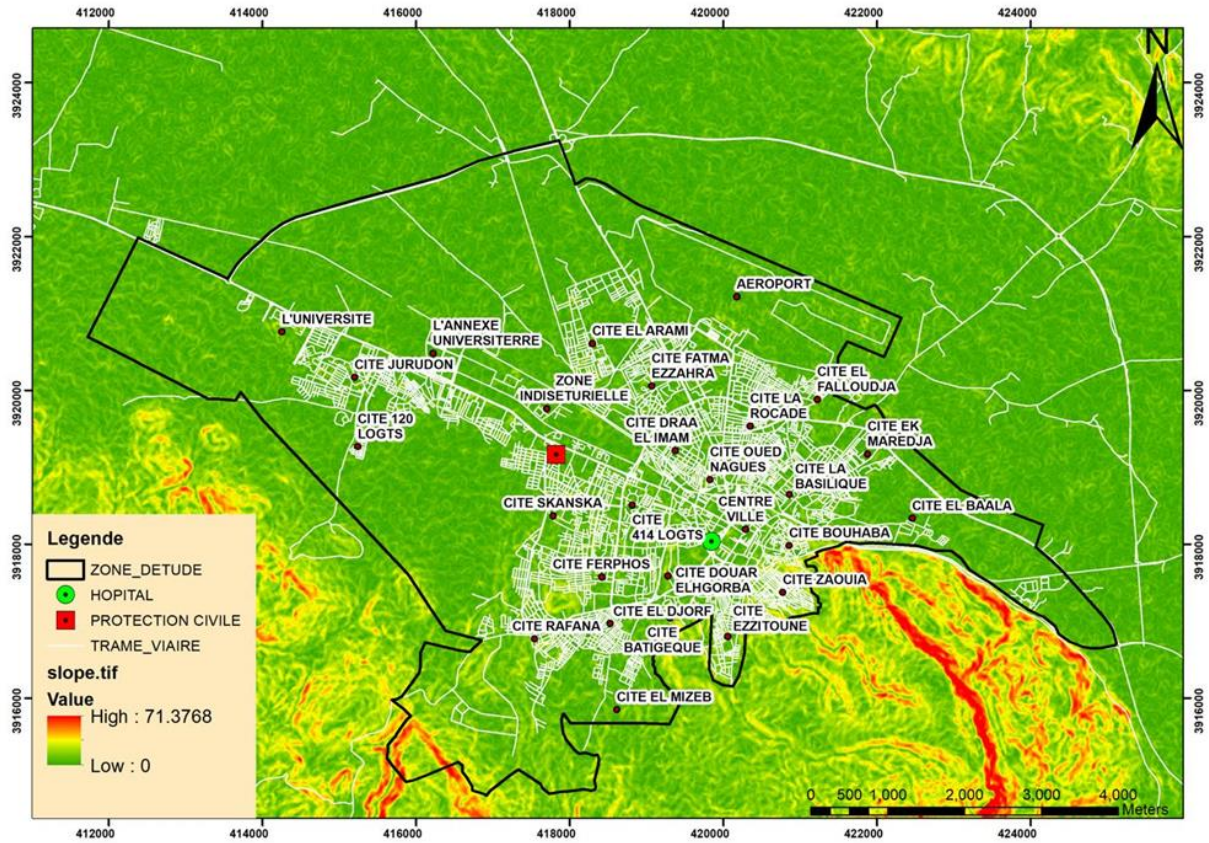


Figure 3.5 : Carte des pentes (degrés)

3.1.5. Carte TWI (Topography wetness Index)

Pour obtenir la carte TWI, il faut suivre plusieurs étapes et utiliser les formules ci-dessous :

TWI : Topographic wetness index

SPI: Stream Power Index

α : Accumulation d'écoulement (Flow accumulation)

$$SPI = \alpha * \tan\beta$$

$$\beta = \text{Pente en radian}$$

TWI et SPI sont calculés sur ARCGIS en utilisant ces deux formules par l'outil (Map algebra).

$$TWI = \ln \frac{(\alpha + 1) * \text{cellsize}}{\tan(\beta * \pi / 180) + 0.001}$$

$$SPI = (\alpha * \text{cellsize}) * \tan(\beta * \pi / 180)$$

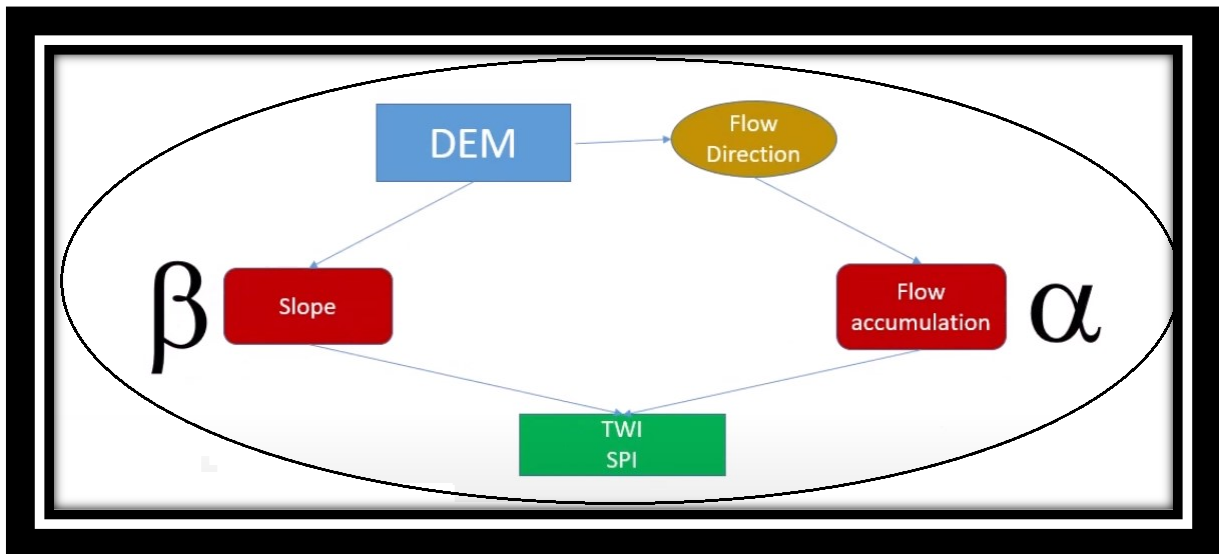


Figure 3.6 : Schémas pour dresser les deux cartes TWI et SPI

- La direction des flux (Flow direction)

Le principe d'arc Hydro est d'établir vers quelle cellule s'écoule l'eau, à partir de la cellule centrale. Pour cela il calcule la pente entre la cellule centrale et les 8 cellules environnantes. Il considère que l'eau s'écoule vers la cellule qui a la pente la plus forte (Atilio, 2015).

Il y a huit directions en sortie valides relatives aux huit cellules adjacentes dans lesquelles le flux peut circuler. Cette méthode, généralement appelée "modèle de flux à huit directions (D8)", repose sur l'approche de Jensen et Domingue (1988). ESRI

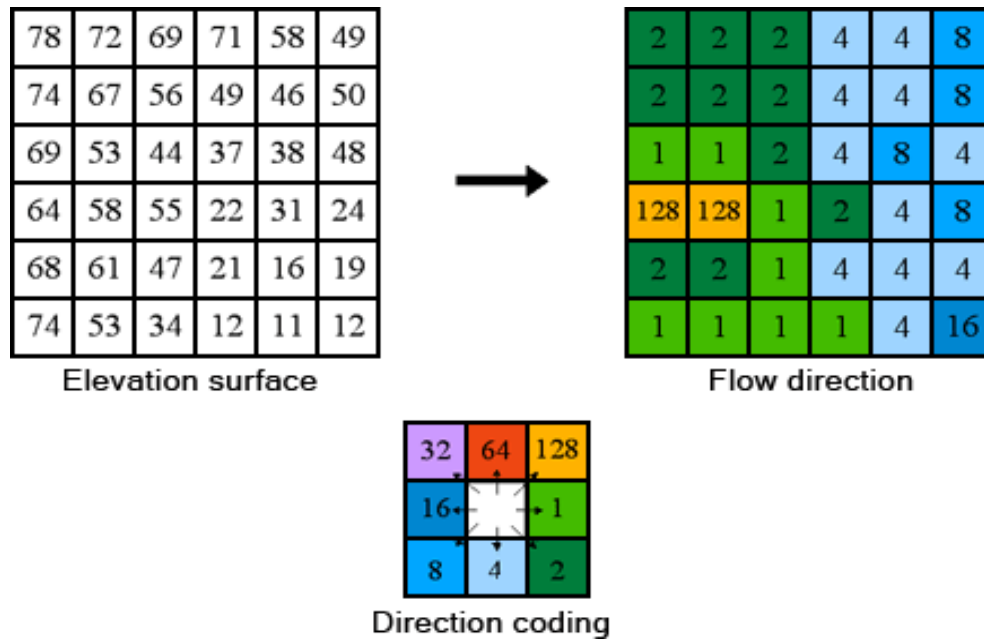


Figure 3.7: Le principe du codage (direction des flux) (ESRI)

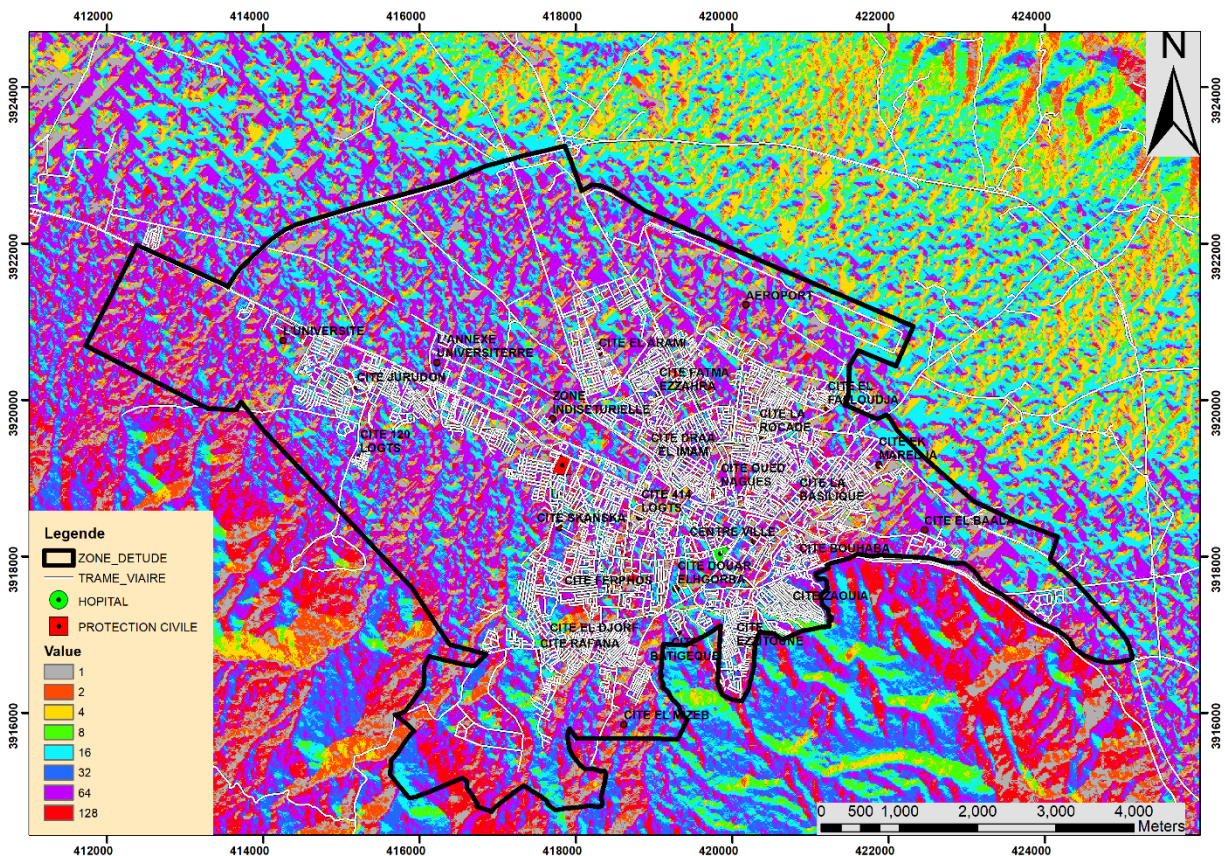


Figure 3.8 : Carte de la direction des flux (flow direction)

- Carte d'accumulation d'écoulement (FLOW ACCUMULATION)

Cette fonction calcule le nombre cumulé des cellules en amont pour chaque cellule dans la grille d'accumulation des flux. La grille en entrée pour cette fonction est celle de La direction d'écoulement.

Pour exécuter cette fonction on utilise TERRAIN PREPROCESSING et FLOW ACCUMULATION.

Quand aucune cellule ne s'écoule vers la cellule considérée, la valeur est de 0, et quand plusieurs cellules s'écoulent vers la cellule considérée, la valeur est égale à la somme de valeurs d'écoulement de ces cellules (Atilio, 2015).

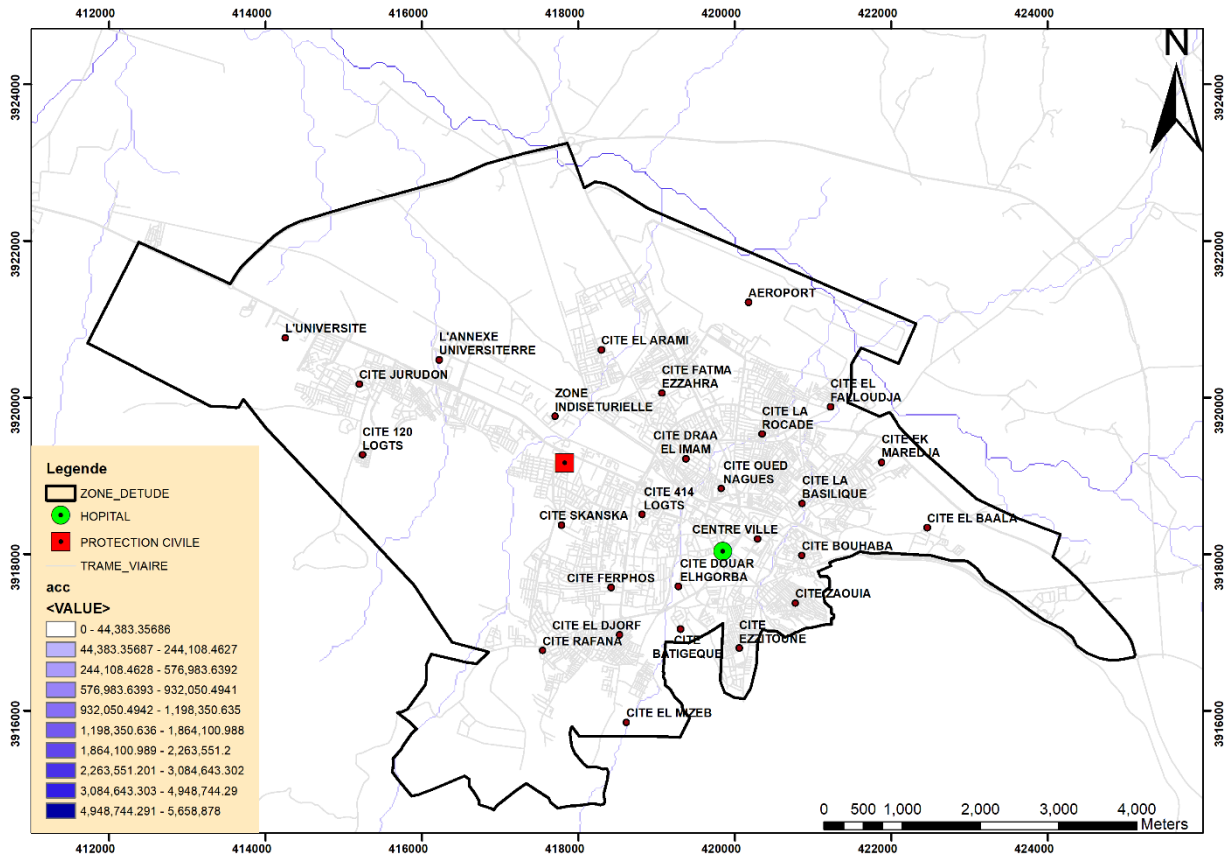


Figure 3.9 : Flow accumulation

L'indice d'humidité topographique (TWI) est un modèle utile pour estimer où l'eau s'accumulera dans une zone avec des différences d'altitude. C'est une fonction de la pente et de la zone de contribution en amont : $TWI = 0 \text{ à } a = \text{zone de contribution en amont (m}^2\text{)}$.

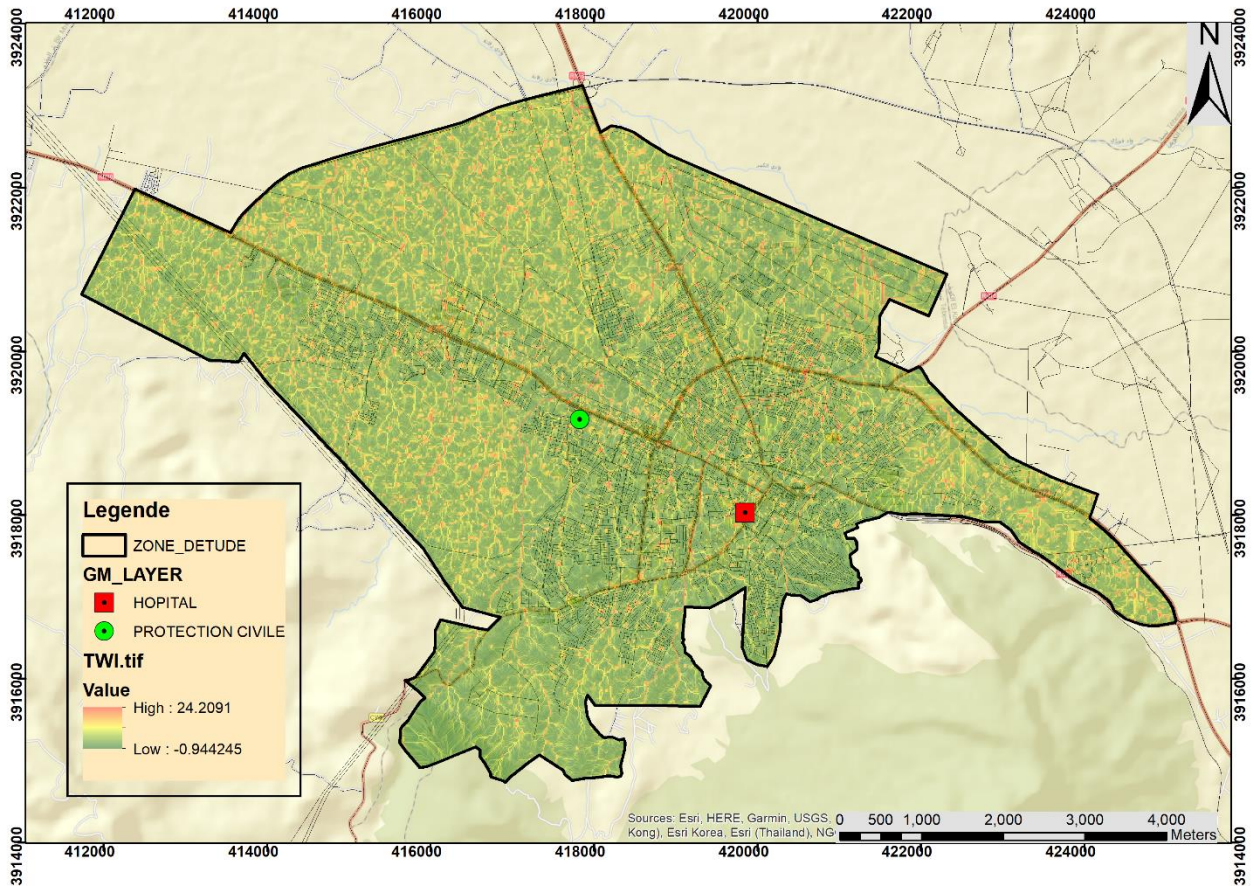


Figure 3.10 : Carte de TWI

3.1.6. Elaboration de la carte finale d'Alés d'inondation

2.Evaluation de l'aléa aux inondations

Les dommages aux biens surviennent lorsque l'occupation du sol en zone inondable n'est pas adaptée aux submersions (Kreis, 2004). Le but de ce chapitre est de dresser une carte d'aléa aux inondations qui sont causés par le débordement des cours d'eau qui traversent la ville de Tébéssa.

L'approche utilisée nécessite une analyse fine basée sur une modélisation dans le cadre d'une base de données SIG sous ARC Gis et ses extensions et un logiciel de modélisation hydraulique HEC-RAS. La modélisation mathématique est un outil essentiel pour la connaissance des phénomènes naturels en élaborant un lien entre les variables d'entrée et de sortie par des relations mathématiques (Henine,2004). La présente étude est basée sur les données des débits max en m^3/s pour chaque cours d'eau et pour différentes périodes de retours.

2.1. La modélisation hydraulique sous HEC RAS

Nous avons utilisé la version HEC RAS 5.0.1, un logiciel conçu par (Hydrologic Engineering Centre de L'U.S. Army Corps of Engineers) et développé par le centre de l'ingénierie hydrologique de l'armée américaine (US Army Corps of Engineers, 2010). C'est un outil de modélisation hydraulique des écoulements graduellement variés et à surface libre sous le modèle 2D du Saint-Venant (Hervouet, 2003) et servant également à calculer la ligne d'eau. Il résout l'équation de l'énergie unidimensionnelle, les pertes étant évaluées par la formule de frottement au fond de Manning-Strickler et par des formules de contraction/expansion de l'écoulement (Yahiaoui, 2012).

Un autre outil principal utilisé est le SIG à travers le logiciel ARC Gis 10.0 de gestion de l'information dans l'espace géographique de l'institut ESRI.

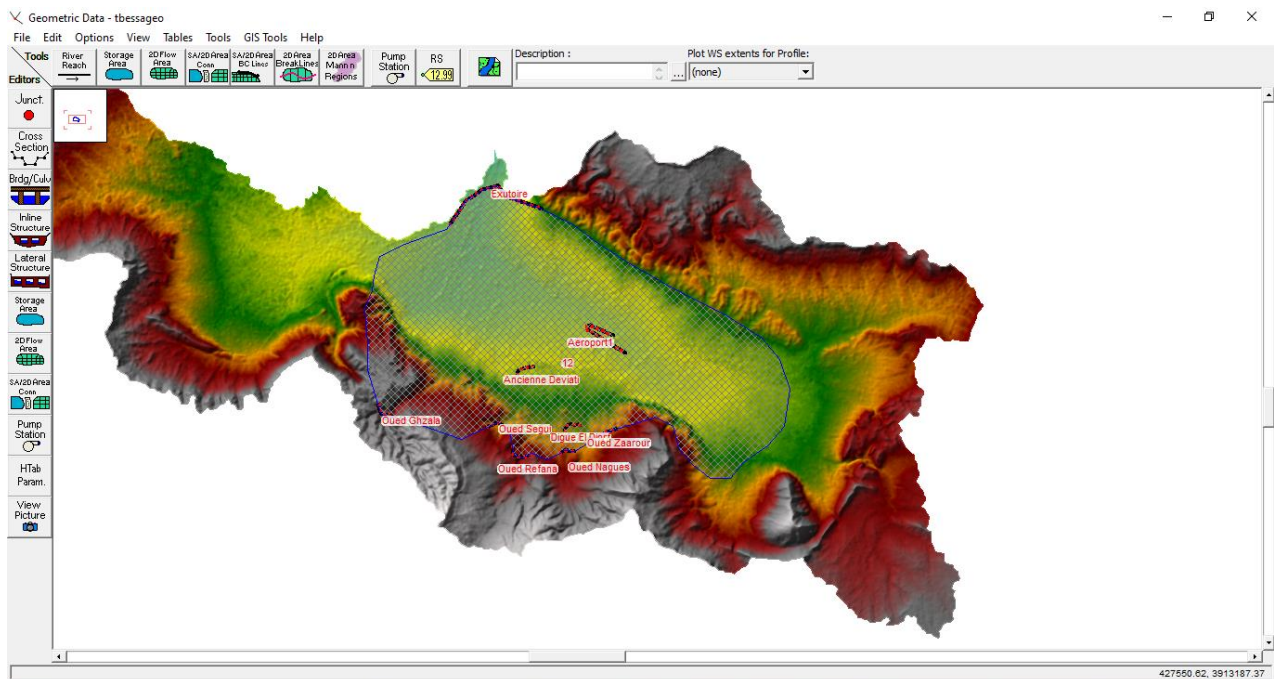
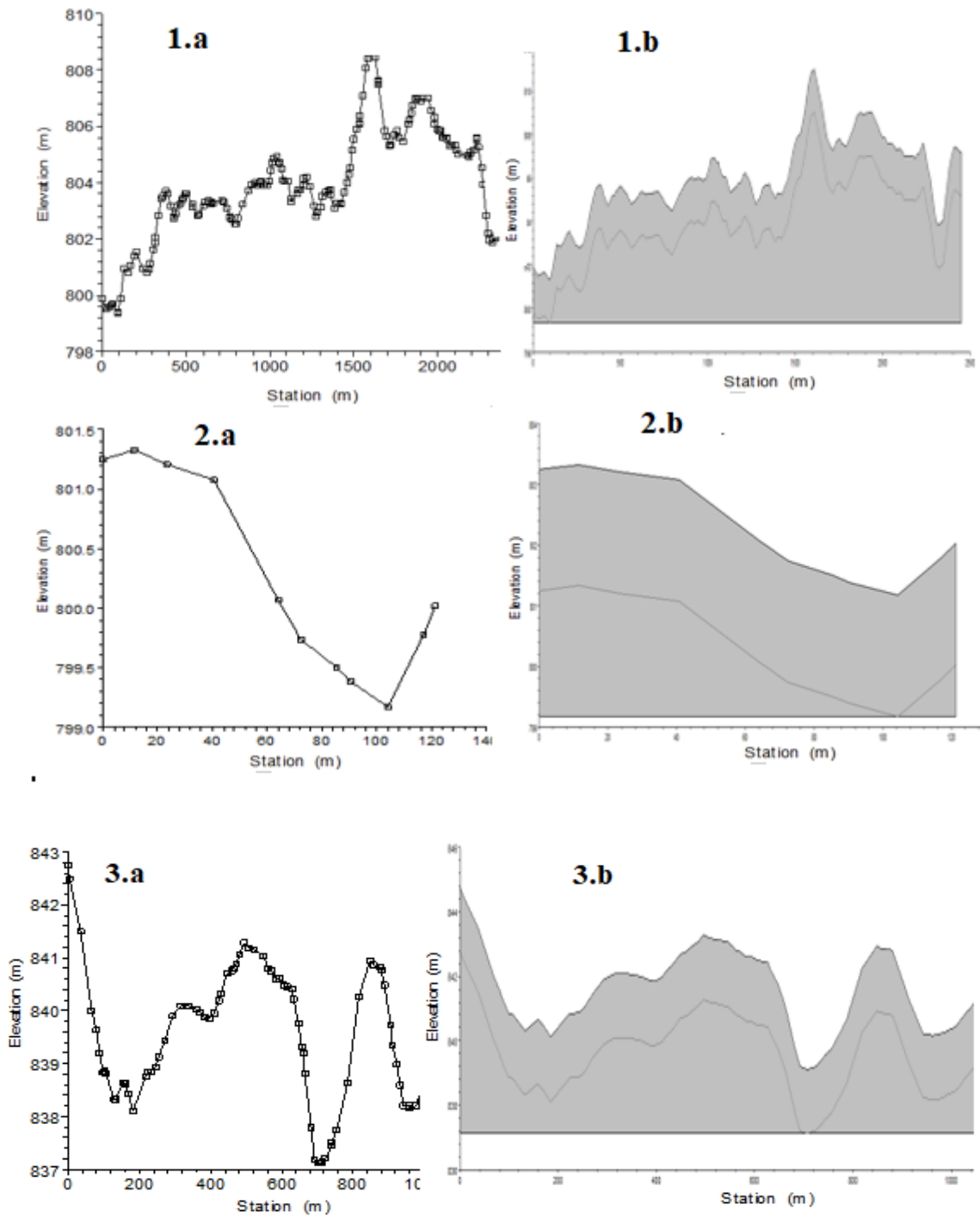


Figure 3.11 : Les entités modélisées sous HEC RAS.

A noter que les Dignes situées sur les cours d'eau ont été modélisées et sont présentées dans la figure 3.3.



Figures 3.12 : les digues 1,2 et 3 , a) le profil de terrain naturel, b) digue modélisée

L'intégration du logiciel HEC-RAS (Système d'analyse hydrologique Ingénierie rivière Centers) et SIG (Système d'Information Géographique) pour obtenir scientifiquement des informations a été spécifié comme efficace dans la simulation, dans l'identification et dans l'analyse des crues dans un environnement géospatial (Sam et al, 2002).

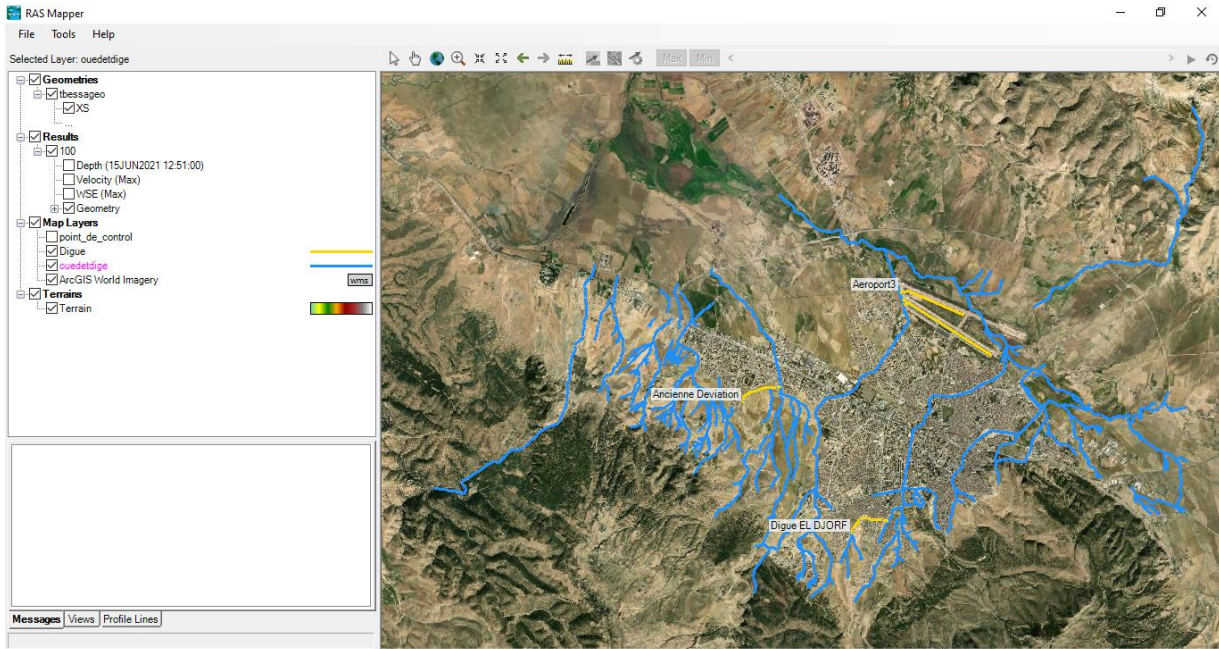


Figure 3.13 : La fenêtre RAS Mapper du logiciel HEC RAS.

Tableau 73 les Paramètres de cinq Oueds qui traversent la ville de Tébessa

Paramètres	Seggui	Ghozala	Refana	Nagues	Zaarour
Longueur (m)	7100	7350	12640.8	14654	12966
H max (m)	930	1151.4	1012.93	987.28	963.01
H min (m)	785.44	787.77	781	782	782

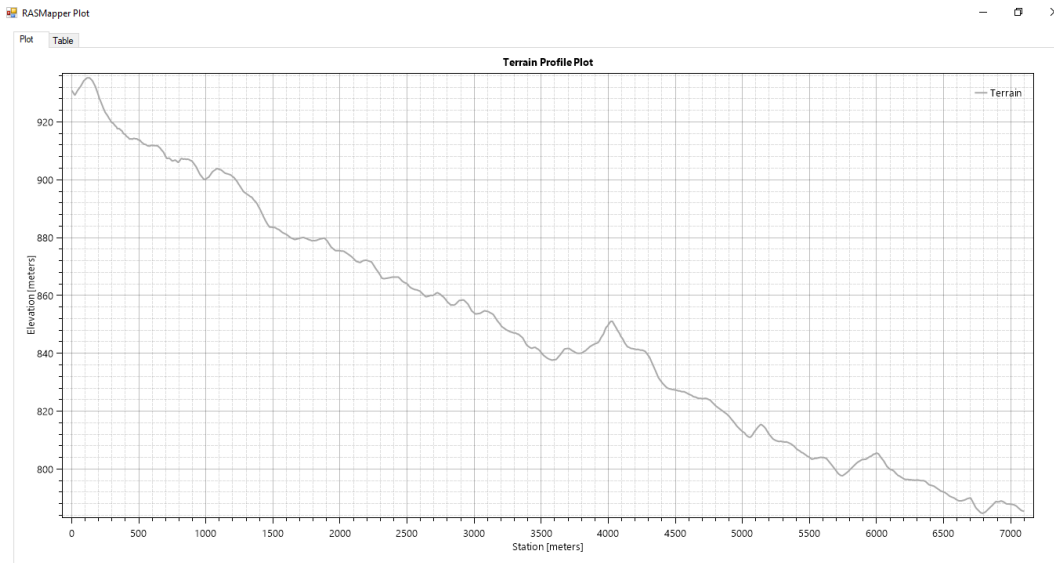


Figure 3.14 : Le profil transversal d'Oued Seggui

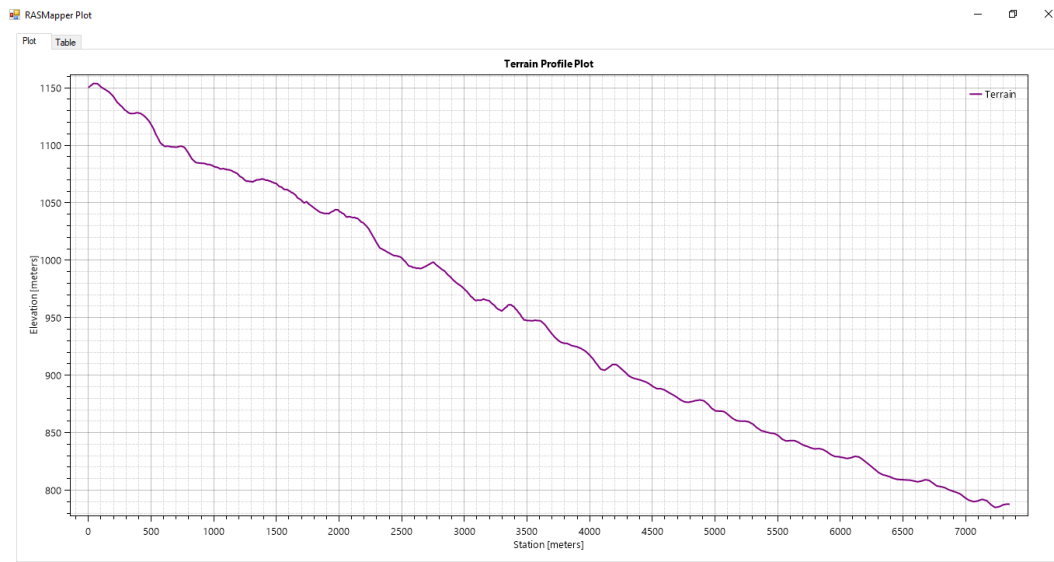


Figure 3.15: Le profil transversal d'Oued Ghozala

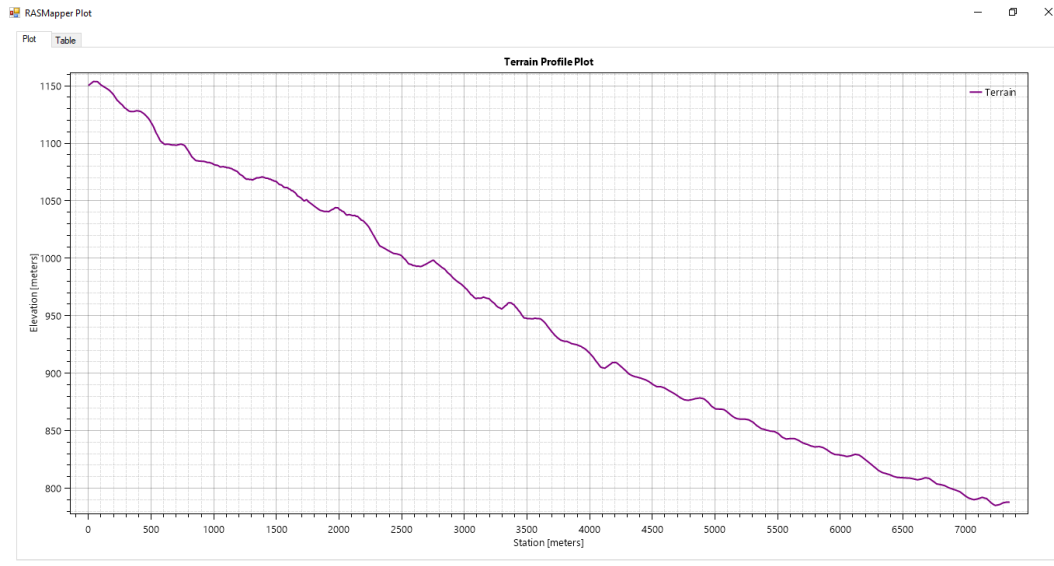


Figure 3.16 : Le profil transversal d'Oued Ghozala.

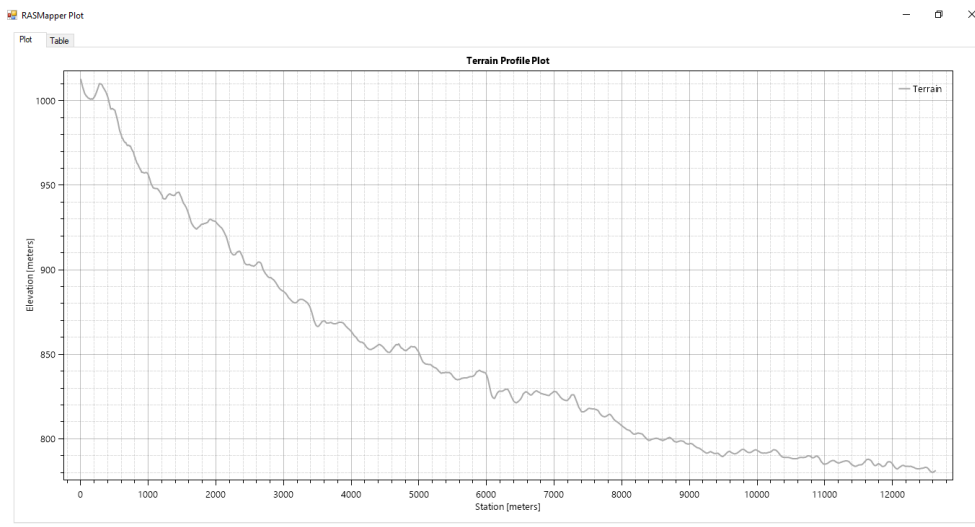


Figure 3.17: Le profil transversal d'Oued Refana

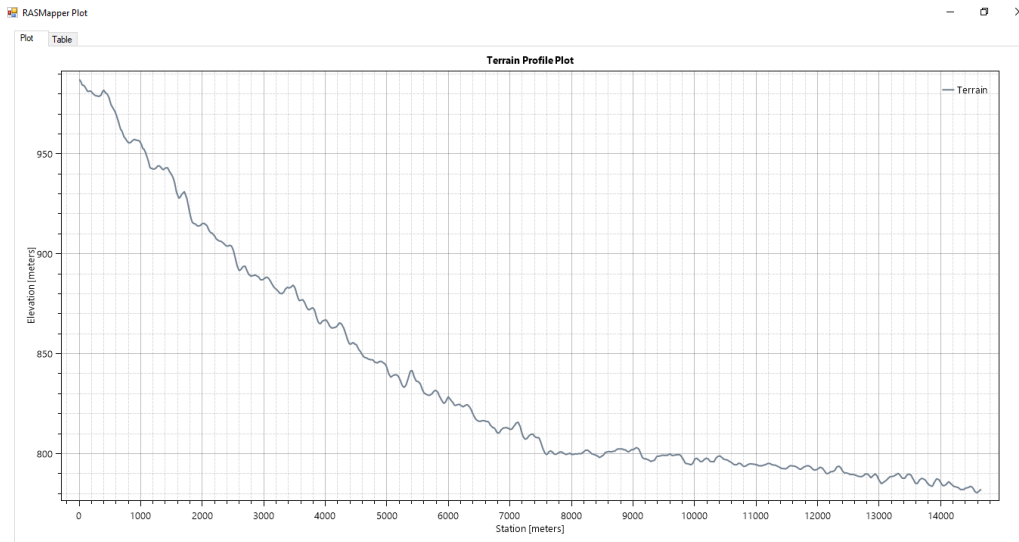


Figure 3.18 : Le profil transversal d'Oued Nagues.

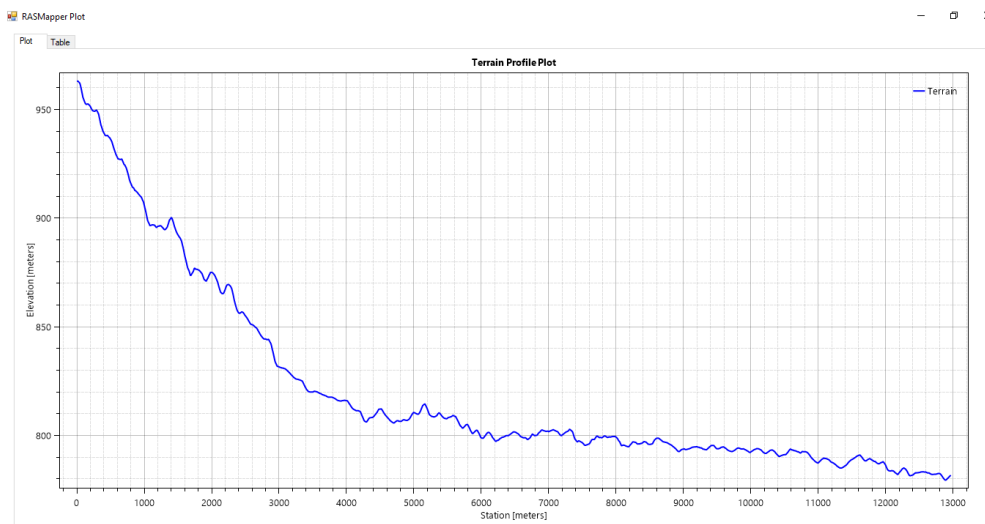


Figure 3.19: Le profil transversal d'Oued Zaarour.

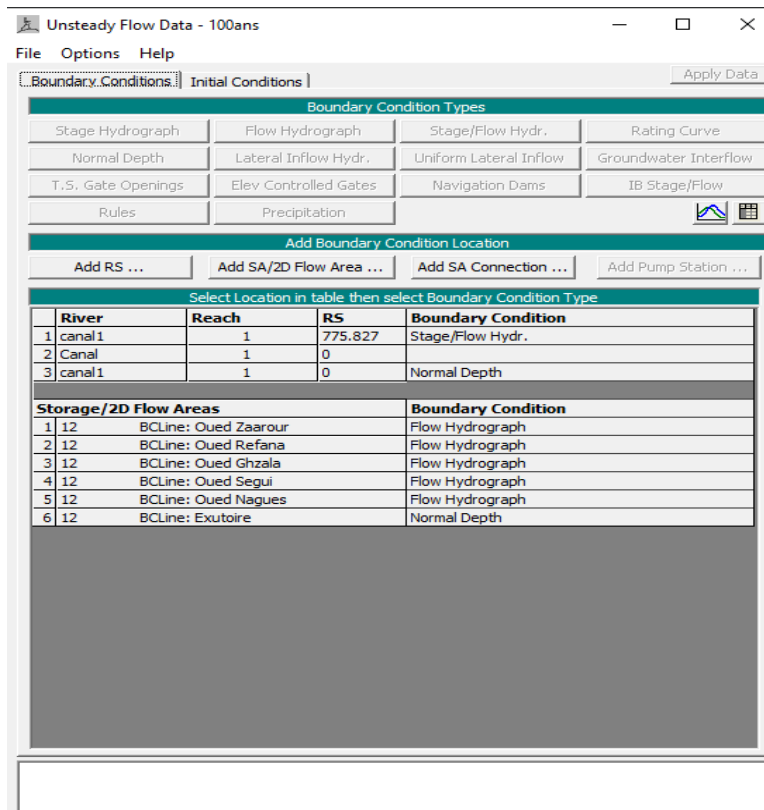


Figure 3.20 : Conditions aux limites pour chaque canal.

Dans notre cas, nous avons utilisé le modèle 2D, ou l'intégration des débits pour différentes périodes de retour. Ceci est fait par la création de plusieurs plans, le rôle d'un plan dans HEC RAS est de lier les données de débit avec les données de terrain, ainsi chaque période de retour a été intégrée par un hydrogramme de crue correspondante.

Intégration des débits pour chaque Oued et pour différentes périodes de retour. La définition des conditions aux limites est aussi nécessaire selon le régime d'écoulement. Dans notre cas nous avons introduit les conditions aux limites sous forme d'une pente normale en aval ou la pente ici égale à la pente de cour d'eau principal.

Storage/2D Flow Areas		Boundary Condition
1	12 BCLine: Oued Zaarour	Flow Hydrograph
2	12 BCLine: Oued Refana	Flow Hydrograph
3	12 BCLine: Oued Ghzala	Flow Hydrograph
4	12 BCLine: Oued Segui	Flow Hydrograph
5	12 BCLine: Oued Nagues	Flow Hydrograph
6	12 BCLine: Exutoire	Normal Depth

Normal Depth Downstream Boundary

SA: 12 BCLine: Exutoire

Friction Slope:

Figure 3.21 : Conditions aux limites pour chaque canal

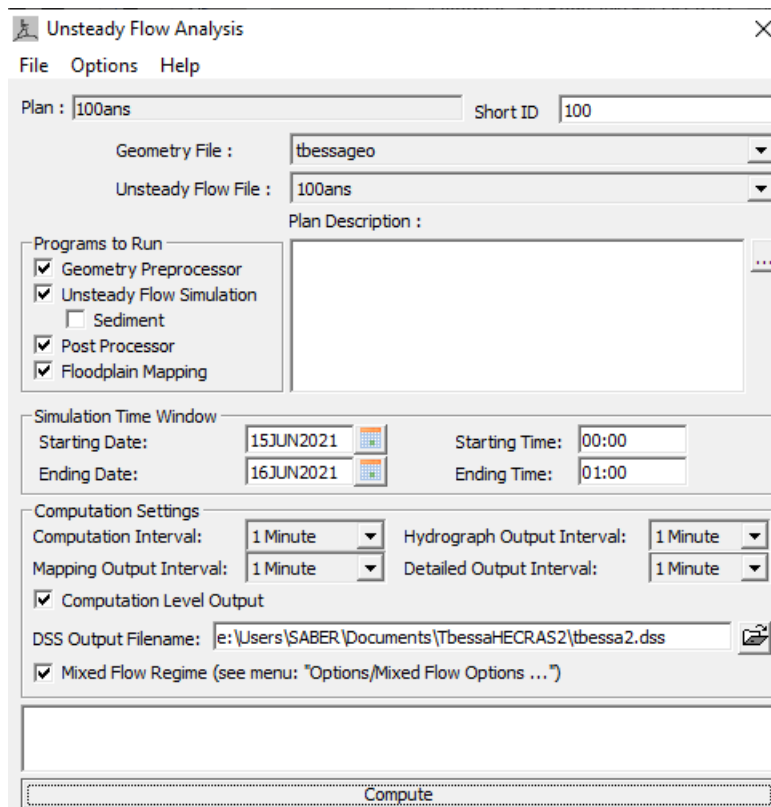


Figure 3.22 : Paramètre de plan de la simulation

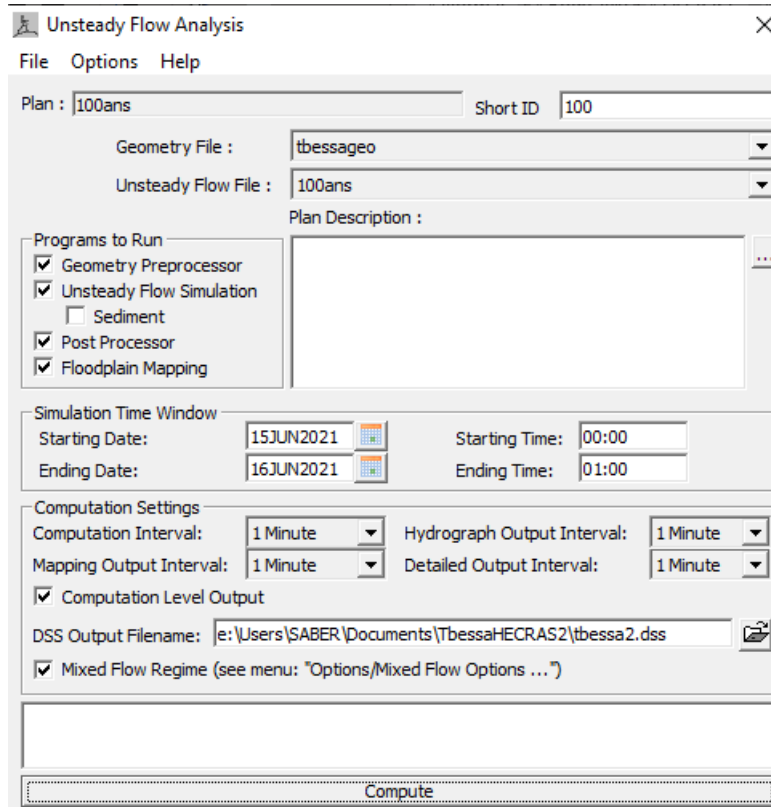


Figure 3.23 : Paramètre de plan de la simulation

Storage/2D Flow Areas			Boundary Condition
1	12	BCLine: Oued Zaarour	Flow Hydrograph
2	12	BCLine: Oued Refana	Flow Hydrograph
3	12	BCLine: Oued Ghzala	Flow Hydrograph
4	12	BCLine: Oued Segui	Flow Hydrograph
5	12	BCLine: Oued Nagues	Flow Hydrograph
6	12	BCLine: Exutoire	Normal Depth

Normal Depth Downstream Boundary

SA: 12 BCLine: Exutoire

Friction Slope:

Figure 3.24 : Conditions aux limites pour chaque canal.

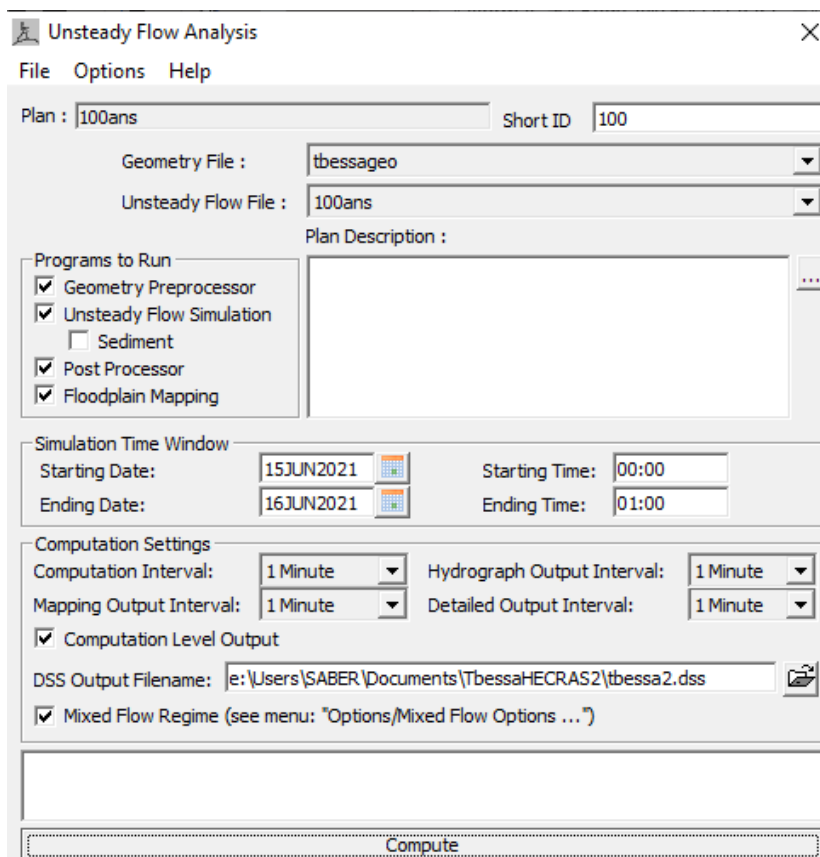


Figure 3.25 : Paramètre de plan de la simulation

Pour un régime d'écoulement fluvial (SUBCRITICAL) une condition en aval est suffisante. Pour un régime d'écoulement torrentiel (SUPCRITICAL) une condition en amont est suffisante et pour un régime d'écoulement mixte les deux conditions sont nécessaires. Après la définition des données des hydrogrammes de crue et les conditions aux limites, nous avons choisi la nature d'écoulement et nous avons passé à la simulation hydraulique.

2.3. Présentation des résultats

La fenêtre « Ras mapper » nous permet de visualiser l'extension des zones inondables au niveau de la zone d'étude ainsi que, la vitesse d'écoulement, la profondeur d'eau et l'élévation d'eau dans chaque cellule durant la période de crue. Ainsi, 30 points ont été sélectionnés pour afficher les résultats de simulation, les points sont présentés dans la figure 3.18.

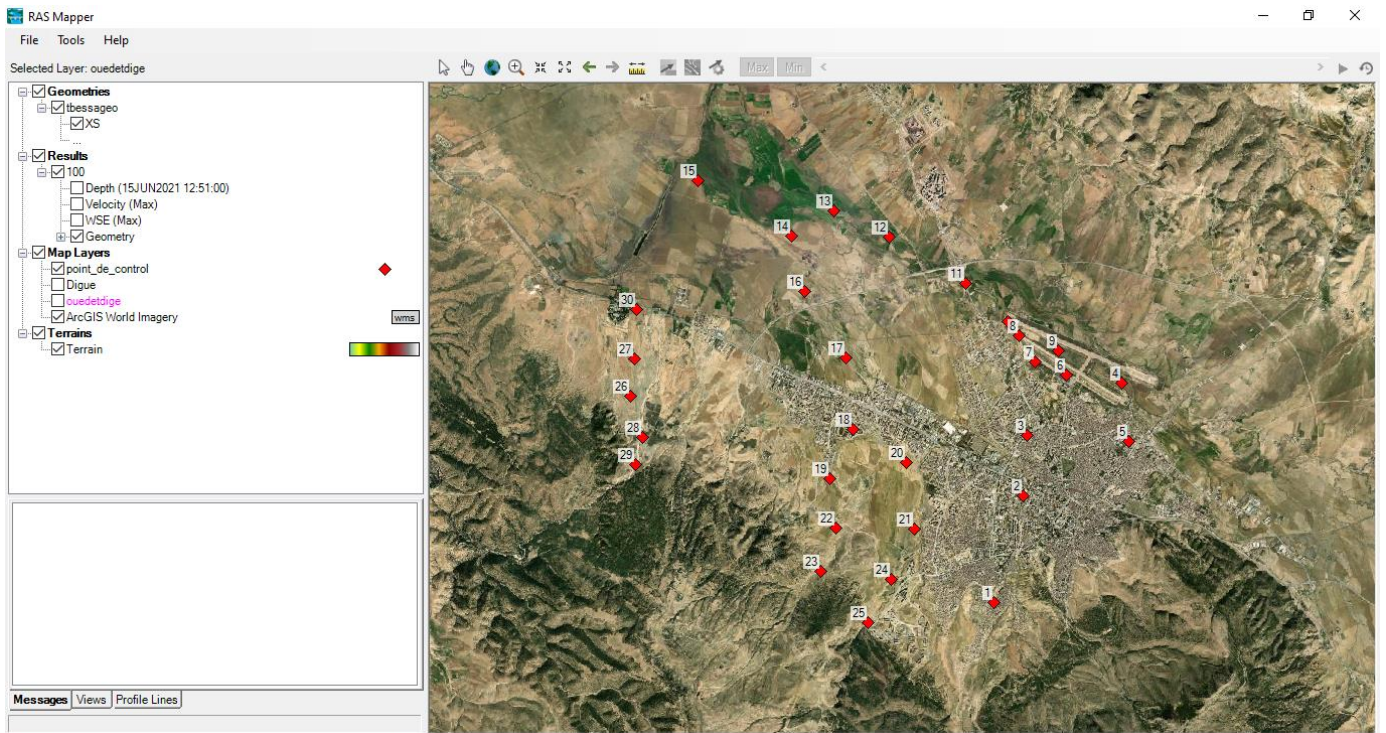


Figure 3.26 : Les point de contrôles utiliser dans la Présentation des résultats de simulation

Tableau 74 Résultats de simulation

Résultats de simulation Point	X	Y	Récurrence			
			100 ans		50 ans	
			H (m)	V (m/s)	H (m)	V (m/s)
1	418625.6557	3916262.898	10.92	54.28	8.56	34.52
2	419233.0739	3918467.238	9.89	26.15	8.31	17.25
3	419306.5519	3919706.567	6.64	23.88	5.27	13.00
4	421261.0666	3920798.94	2.7	0.44	1.99	0.01
5	421408.0226	3919589.002	4.06	8.1	2.86	6.78
6	420109.9113	3920960.592	1.92	1.4	1.75	3.85
7	419473.102	3921230.011	4.08	1.36	2.66	1.78
8	419140.0017	3921773.748	4.34	2.1	2.014	1.95
9	419948.2597	3921460.242	1.35	0.79	3.80	1.56
10	418919.5677	3922062.762	3.51	1.93	3.14	1.63
11	418037.8318	3922836.73	2.87	1.06	2.3	0.97
12	416460.5041	3923801.741	3.83	1.43	3.41	1.34
13	415324.0444	3924335.681	1.69	0.86	1.42	0.67

14	414447.207	3923831.132	5.62	1.96	5.47	1.88
15	412517.1849	3924962.693	0.91	2.08	0.53	1.04
16	414721.5248	3922670.18	2.1	7.13	1.71	4.77
17	415573.8696	3921313.286	4.87	1.7	4.55	1.64
18	415711.0285	3919829.031	1.7	1.46	0.94	1.33
19	415230.9723	3918829.73	4.53	2.55	3.34	6.98
20	416818.097	3919148.134	7.30	10.47	6.36	8.75
21	416979.7486	3917781.444	5.84	38.01	4.45	32.72
22	415358.3341	3917810.835	7.35	50.72	6.50	40.95
23	415054.6251	3916909.505	9.5	55.70	7.11	45.59
24	416499.6924	3916752.752	8.16	70.87	7.67	62.18
25	416034.3317	3915846.523	12.60	114.39	12.15	97.82
26	411142.064	3920533.262	6.1	1.92	5.07	1.39
27	411225.8842	3921287.643	6.9	2.1	6.00	1.49
28	411380.5676	3919662.91	4.54	31.15	2.04	21.14
29	411226.5892	3919106.219	11.00	50.69	8.00	45.79

Ce qui montre clairement que les digues ne sont pas aptes à contenir des débits de fréquences rares et cela revient essentiellement à leurs dimensions et peut être à leurs emplacement, ce qui met la ville de Tébessa sous l'effet d'un risque résiduel permanent.

Tableau 75 Résultat de simulation par les deux scénarios

Simulation de crue	Surface touchée en km ²
Cinquantennale	17.92
Centennale	20.15

La simulation montre que la surface inondable s'agrandit en fonction de la récurrence, celle-ci passe de cinquantennale jusqu'à la crue centennale en arrivant à une étendue de 20.15 km² et avec une hauteur d'eau de 12.60 m. Par ailleurs, la cartographie permet d'exécuter une comparaison des résultats du modèle hydraulique avec la topographie du site, soutenant ainsi une visualisation optimale des contours des zones inondables et les enjeux socio-économiques impliqués. (Bachir et al ,2012). Ainsi, ce modèle peut intervenir pour mettre en œuvre **des** actions de protection répondant aux processus de la dynamique fluviale.

La carte de l'aléa cinquantennale montre quatre classes d'aléas qui varie de très fort à très faible. Chaque fois le site est plus proche de l'axe de l'oued cela veut dire que l'aléa est fort, également qu'on s'éloigne de l'axe de l'oued ce qui implique que l'aléa est faible

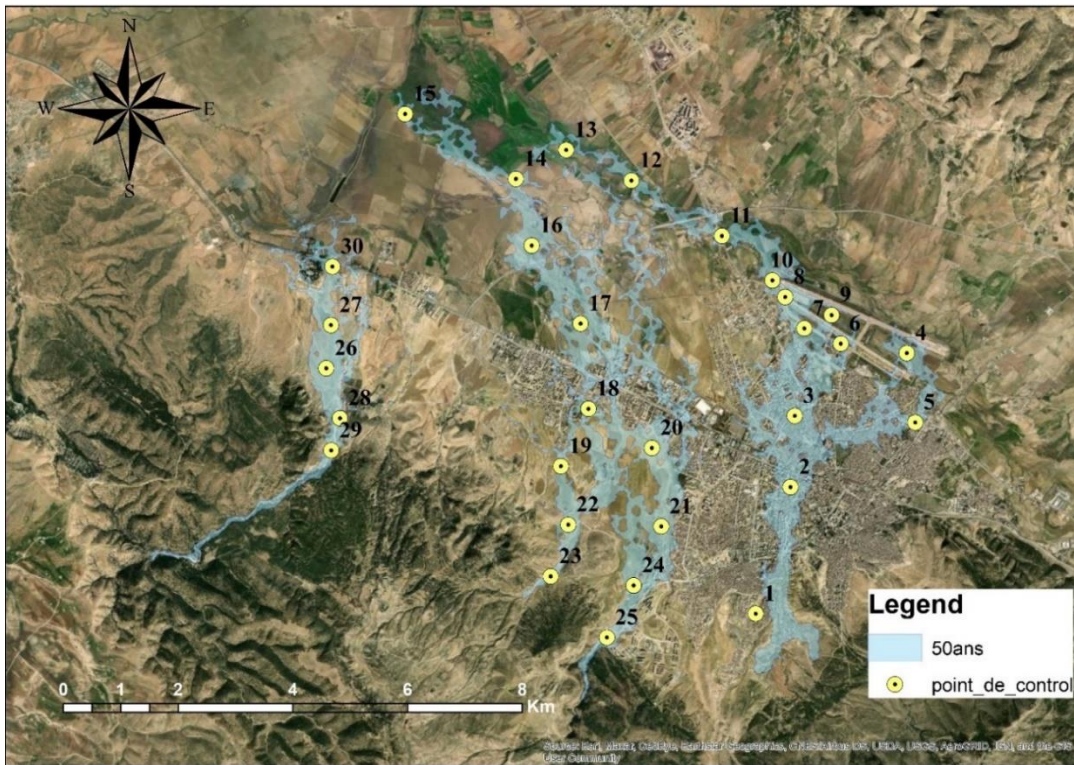


Figure 3.27 : La simulation de la crue 50 ans

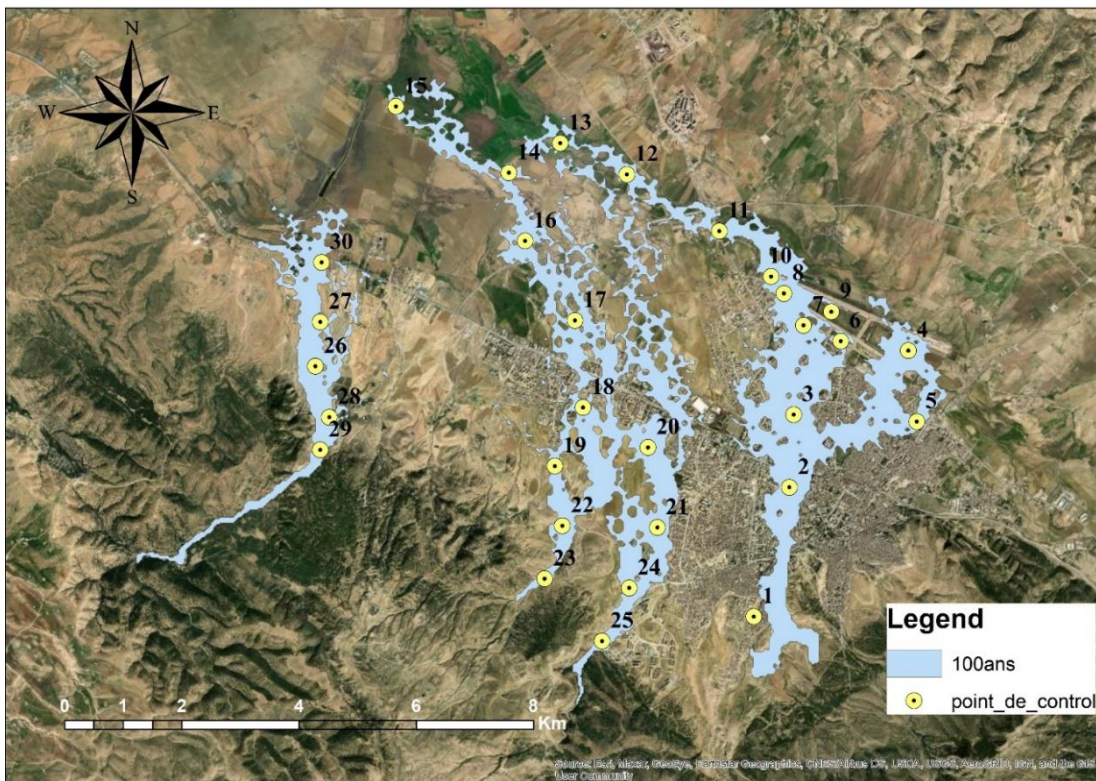
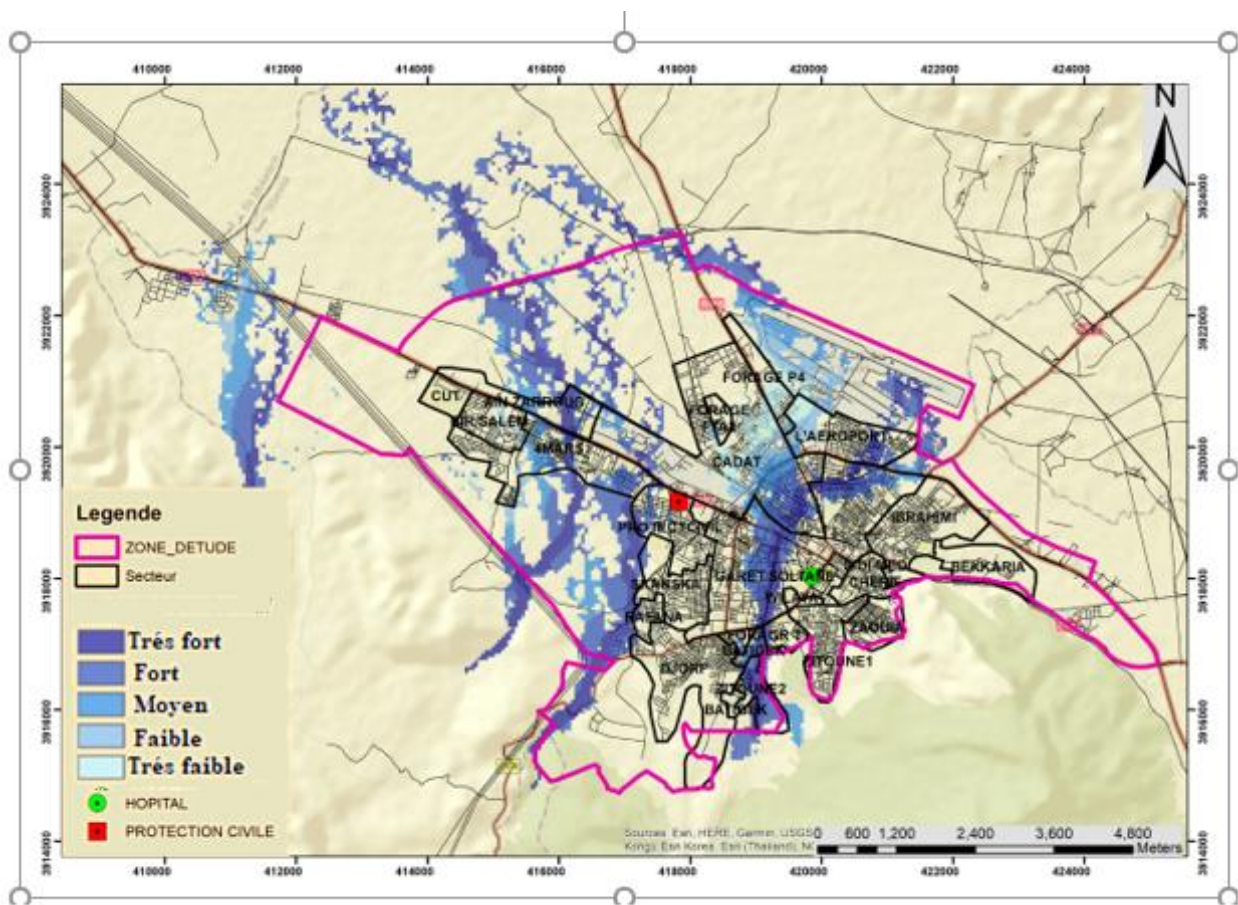


Figure 3.28: La simulation de la crue 100 ans

La simulation hydraulique montre que les surfaces inondables s'élargissent suivant la récurrence du phénomène en arrivant à une hauteur de 12.6 m et avec une vitesse de 114.39 m/s pour une crue centennale et occupant une surface de 17,9 Km² pour la récurrence cinquantennale et une surface de 20,15 Km² pour la récurrence centennale, d'où les données jouent un rôle essentiel dans le choix et l'efficacité de la méthode appliquée.

D'après, les résultats de cette analyse, les décideurs de cette ville peuvent disposer de données adéquates, comme l'étendue de la crue et le niveau de submersion, nécessaires à l'estimation du niveau du risque.



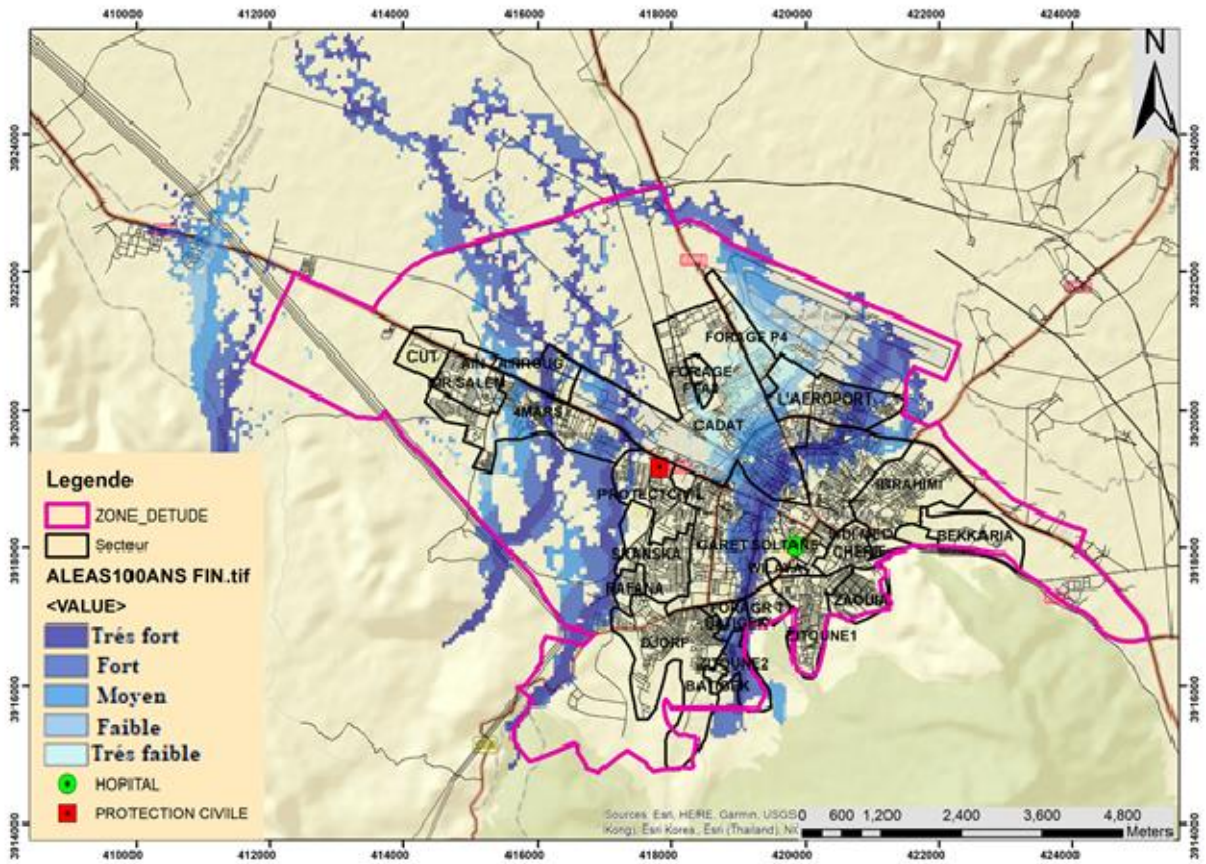


Figure 3.30: Carte d'aléa hydrologique pour le débit centennal

Conclusion

L'utilisation de SIG couplé à un logiciel de modélisation tel que HEC RAS, qui sont des moyens efficaces dans la spatialisation de la crue et le calcul de la hauteur de submersion, afin de réaliser une méthode contre la dynamique fluviale et les dommages qui peuvent en résulter.

Les résultats de la simulation hydraulique prouvent que les étendues susceptibles d'être inondées augmentent en fonction de la récurrence en arrivant à superficie de 20.15km² et avec une hauteur d'eau de 12,6 m et avec une vitesse de 14.39 m/s pour une crue centennale.

Un développement urbain inadapté joue inévitablement un rôle aggravant, qui augmente la brutalité et le coût des dégâts en cas de crue rare.

La modélisation hydraulique a joué un rôle important dans le diagnostic du risque, dont la cause principale est la crue des cours d'eau, selon plusieurs études menées par plusieurs chercheurs à travers le monde. En revanche, une meilleure utilisation des données socio-économiques contribuera à mieux affaiblir et minimiser les dégâts de ce risque.

CHAPITRE 4 : ANALYSE DE LA VULNERABILITE ET LE RISQUE ASSOCIE

1.Introduction

Dans la ville de Tébessa, le phénomène des inondations est fréquent et destructeur, entraînant des pertes humaines et matérielles importantes et de dommages économiques considérables.

L'établissement de la carte de vulnérabilité dans La ville de Tébessa se fonde sur une combinaison de données. L'utilisation de L'analyse multicritère (AHP) permet de résoudre des problèmes de décision complexes où plusieurs critères sont pris en considération dans le choix d'une ou de multiples solutions (Salomon et al, 2001). Afin de déterminer le niveau de vulnérabilité aux inondations, les paramètres participants dans l'évaluation de la vulnérabilité d'après la disponibilité des données sont classés suivant leur importance : la densité de la population, le tissu urbain et le réseau routier.

L'objectif de ce chapitre est l'identification et la cartographie des zones inondables de la ville de Tébessa à l'aide d'un système d'information géographique (SIG). Ainsi, La reconnaissance des zones susceptibles d'être inondées dans la zone d'étude, peut servir de base à l'élaboration d'un plan d'aménagement anti-inondation adapté aux conditions du milieu. Afin de réaliser cette dernière, au niveau de la ville de Tébessa, un croisement de plusieurs cartes thématiques sera nécessaire.

2.Occupation du sol de la région d'étude

Vue le rôle important que joue l'occupation du sol dans la genèse des inondations l'établissement des cartes pour trois dates différentes est nécessaire, ensuite une carte du changement total et en dernier une carte de l'évolution d'urbanisme, ces dernières ne sont pas prises en considération dans l'élaboration des cartes de vulnérabilité.

2.1. Le changement de l'occupation du sol et ses impacts environnementaux

Afin d'établir les cartes d'occupation du sol, nous avons utilisé la méthode de classification multispectrale supervisée et l'utilisation des nouvelles techniques, telles que la télédétection, le SIG. Ainsi, les images satellitaires du capteur Thematic Mapper (TM) du satellite Landsat 5, acquises le 12/6/2000 et le 08/06/2010, de même celle de Landsat 08 acquise le 03/06/2020 du satellite Landsat 8, avec une résolution spatiale de 30 mètres. Ces dernières sont supervisées sous le logiciel ENVI 5.3. Par conséquent, les classes identifiées représentent l'espace vert (forêts et terres agricole, eau, sol nu et tissu urbain), les résultats trouvés sont validés par le coefficient kappa.

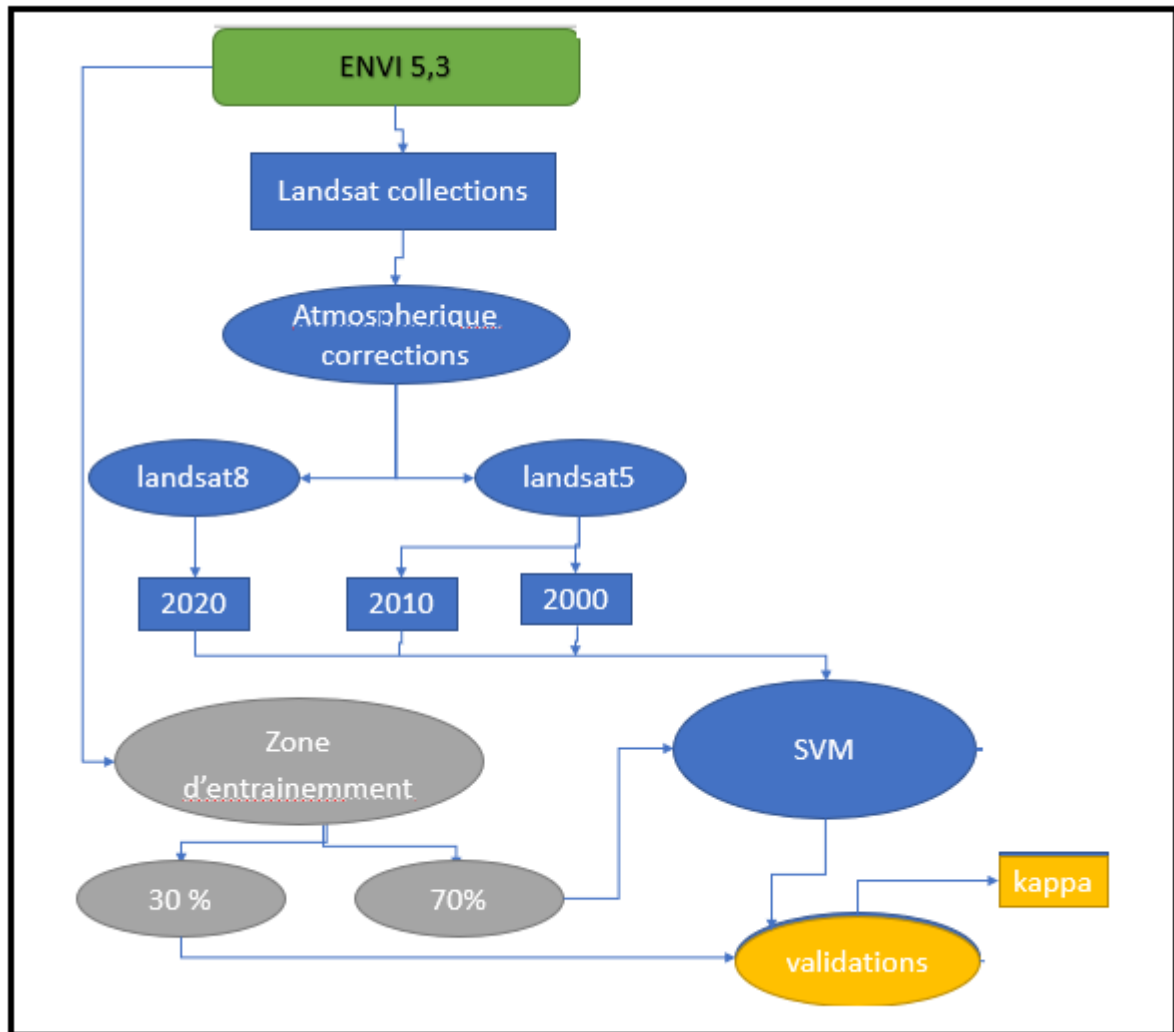


Figure4.1 : Diagramme du processus de traitement des images satellitaires pour dresser une carte d'occupation du sol

Pour valider les résultats, un coefficient kappa sera calculé. Ce coefficient permet d'évaluer de manière générale l'accord entre la classification et la réalité de terrain. Ce dernier se calcule par la formule (Banko, 1998).

Avec

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^l x_{ii} - \sum_{i=1}^l (x_{i+} * x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^l (x_{i+} * x_{+i})},$$

N : Nombre de ligne et colonne dans la matrice de confusion

x_{ii} : Observation dans la ligne i et la colonne i

x_{i+} : Total marginal de la ligne i

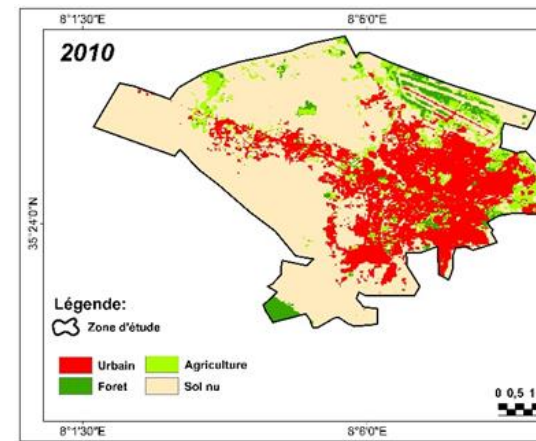
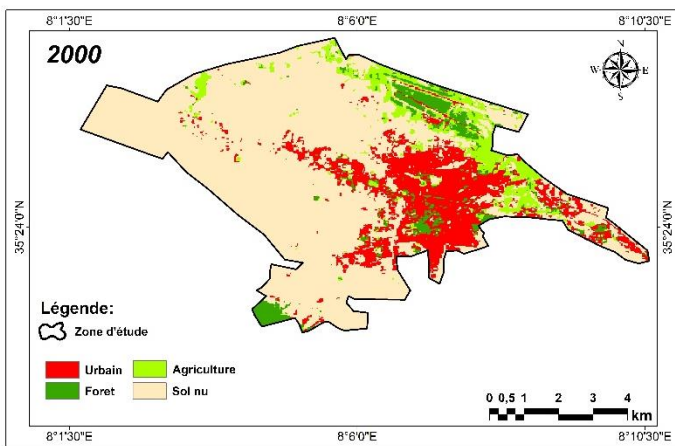
x_{+i} : Total marginal de la colonne i

Landis et Koch (1977) ont établi une échelle qualitative de classification en fonction des valeurs du coefficient Kappa (Tableau 4.2).

Tableau 76 Echelle qualitative caractérisant une précision de classification

K	Précision de la classification
< 0,00	Faible
0,00 - 0,20	Légère
0,21 - 0,40	Acceptable
0,41 - 0,60	Modérée
0,61 - 0,80	Bonne
0,81 - 1,00	Très bonne

Période	2000	2010	2020
Kappa	0.969	0.971	0.97144



5Figure4.2 : Carte d'occupation des sols (2000)

I.3: Carte d'occupation des sols

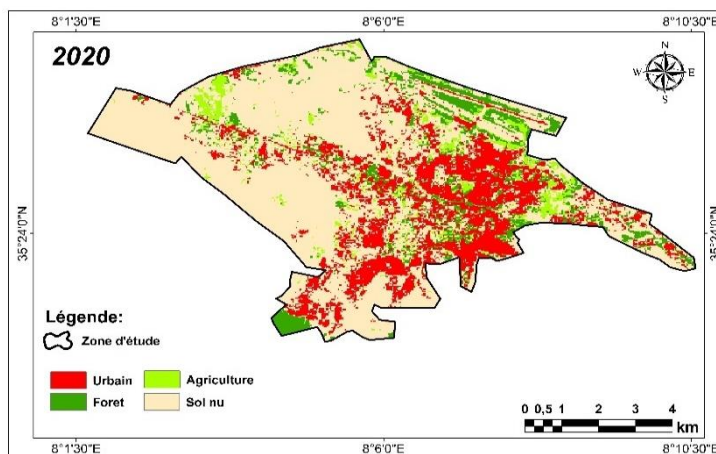


Figure 4.4 : Carte d'occupation des sols (2020)

2.2. Le changement total de l'occupation du sol

Après de l'établissement des différents types de liaisons entre les trois dates, nous avons calculé les taux de changement entre les surfaces des classes d'occupation du sol entre les dates 2000,2010 et 2020. Les valeurs positives représentent une progression de la surface de la classe pendant la période analysée et les valeurs négatives indiquent la perte de surface d'une classe entre les deux dates. Les résultats sont mentionnés dans le tableau 4.3.

Tableau 77 Pertes et gains de l'occupation du sol

Classe	Pertes	Gains
Urbain	-331	557
Foret	-117	330
Sol nu	-778	460
Agriculture	-304	183

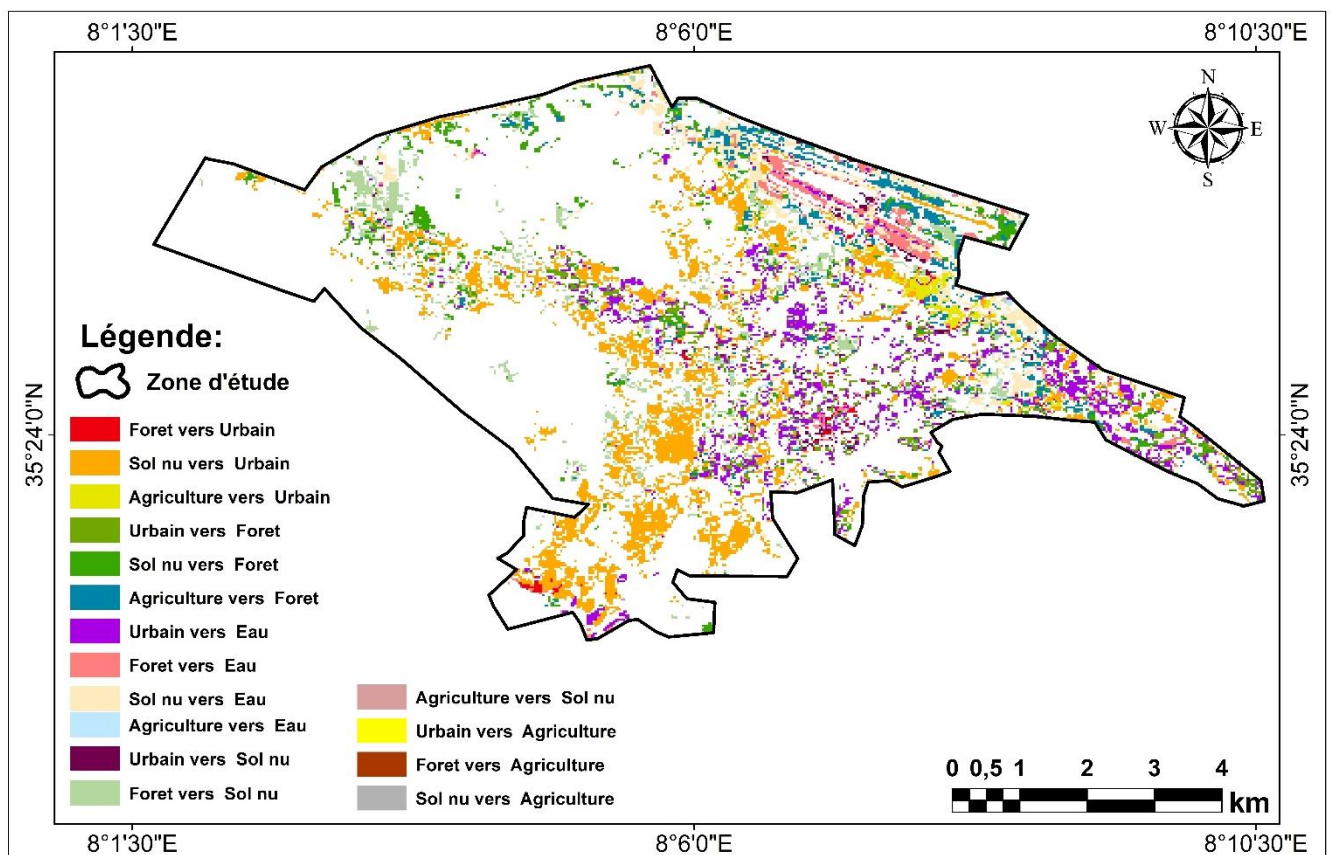


Figure 4.4 : Carte du changement total de l'occupation du sol

2.3. Evolution de l'urbanisme

Afin de mieux voir l'évolution de l'urbanisme une carte d'évolution d'urbanisme est dressée. Cependant, la carte révèle l'évolution entre les deux années 2000 et 2010 est plus importante qu'entre la décennie 2010 -2020, ainsi la progression de la forêt semble être arrêtée alors que l'urbanisation poursuit sa croissance vers les terres agricoles (prés, prairies et cultures) au profit d'un accroissement des terres urbanisées. Par conséquent, cette évolution demeure un problème sérieux tant du point de vue environnemental, social ou économique, sans oublier le rôle important que peut jouer cette dernière dans l'augmentation de l'ampleur des inondations.

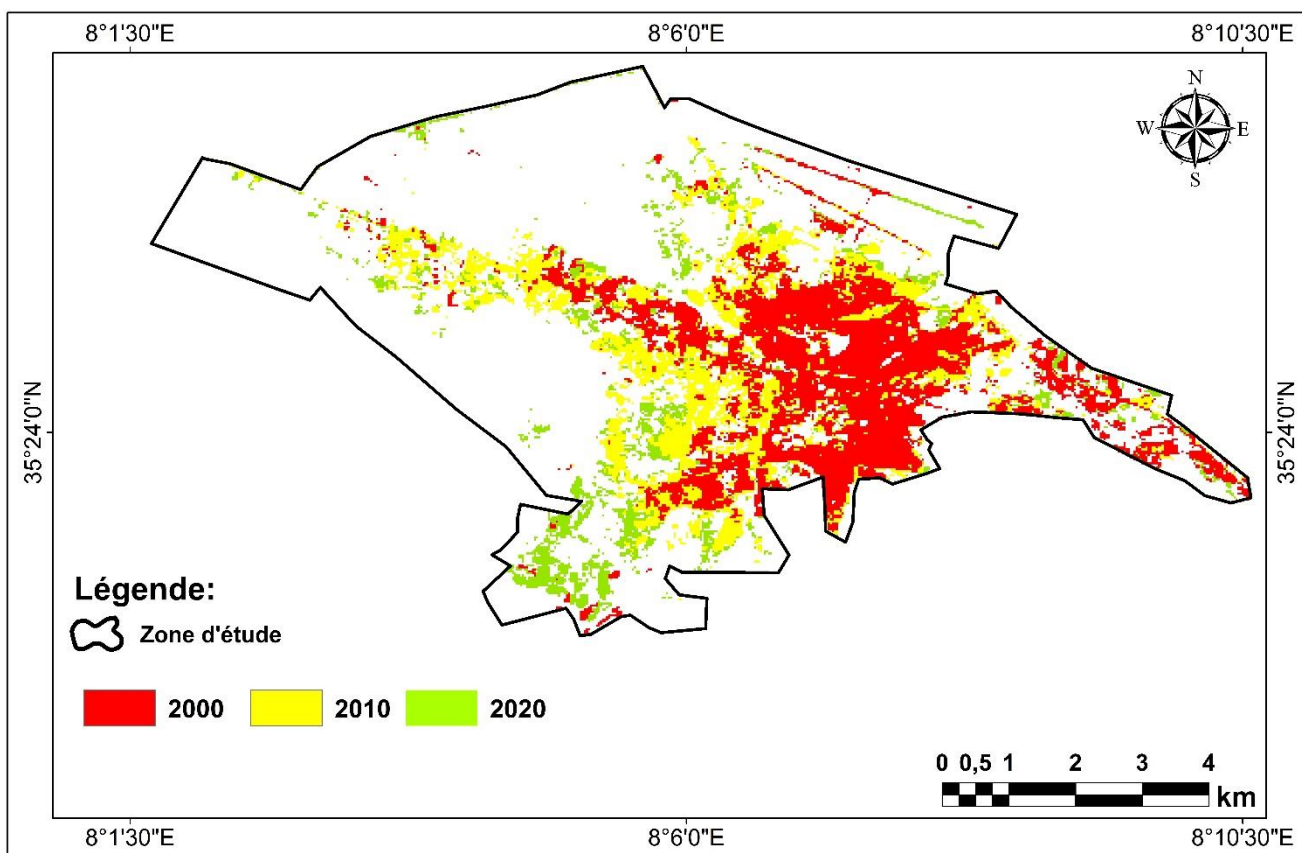


Figure 4.5: Carte de l'évolution du développement urbain

3. Les facteurs intervenant dans l'estimation de la vulnérabilité

3.1. Densité de la population par interpolation

D'après l'étude de L'ADE (l'étude du diagnostic du réseau d'AEP établie par le groupement des bureaux d'études (DONGM YEONG et PROGRESS Sarl), la ville de Tébéssa compte 44747 Logements contient 238396 Habitants. Le bureau d'étude a établi un diagnostic de système d'alimentation en eau potable et un état de lieu du tissu urbain de la ville avec une enquête ménage et traduit ses données dans une base de données géographique.

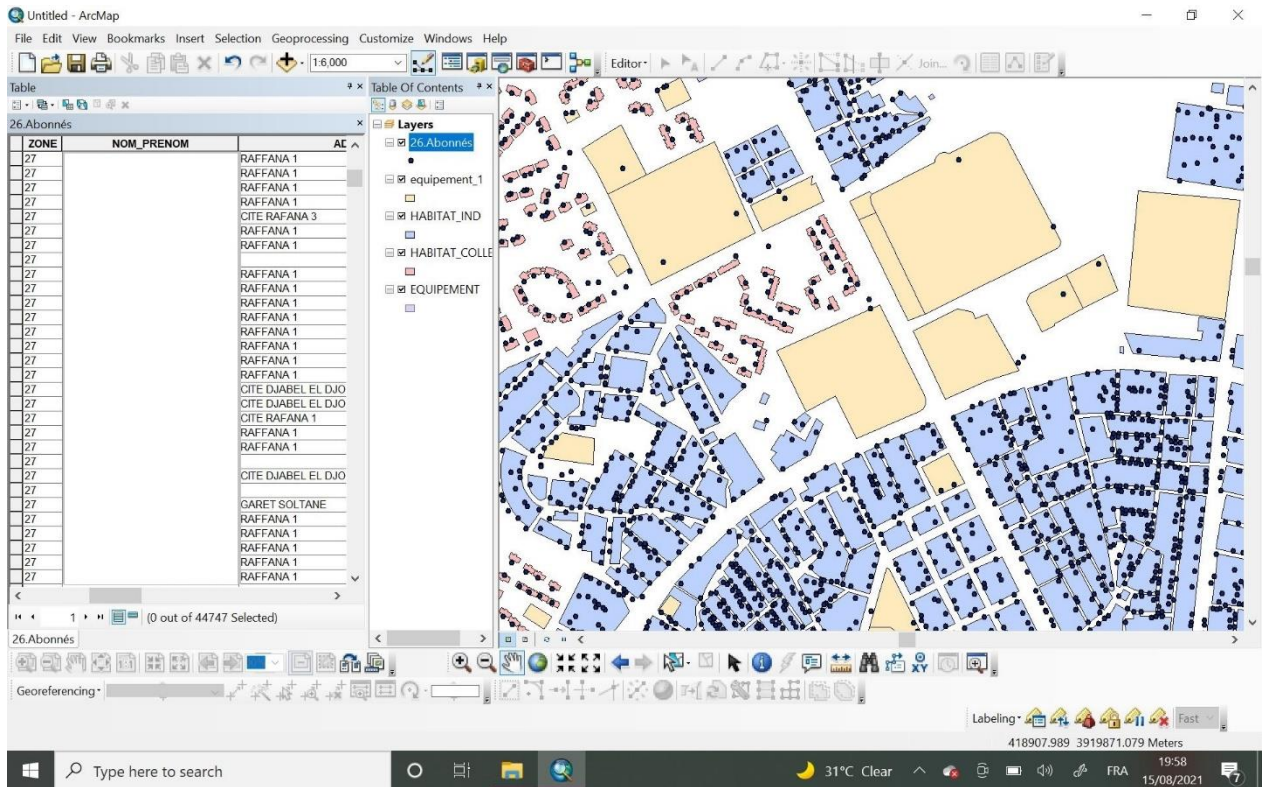
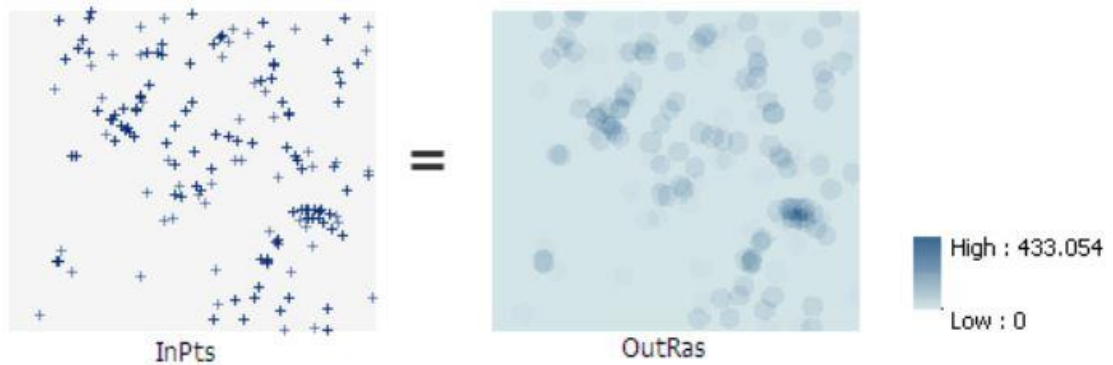


Figure 4.6 : Le shapefile des données des clients de l’ADE (Algérienne des eaux) (2020)

A noter que l’ADE est La seule entreprise responsable de l’exploitation des eaux potable dans la ville de Tébéssa. Le fichier SHP contient 44747 points (Figure 3.14), chaque point représente un logement habité même les logements de fonction sont inclus dans les équipements. L’exploitation de ces séries d’informations nous a permis de dresser une carte de densité des logements par la méthode point densité (sous Arc Gis)(c’est un outil d’analyse spatiale qui permet de calculer une zone de magnitude par unité à partir des entités ponctuelles qui se situent dans un voisinage autour de chaque cellule , seuls les point compris dans le voisinage sont pris en compte lors du calcul de la densité .Si aucun point ne se situe dans le voisinage d’une cellule particulière ,cette cellule se voit attribuer NoDATA .



$$OutRas = PointDensity(InPts, None, 30)$$

Figure 4.7 : Schémas explicatif de la méthode point Density (analyse spatiale)

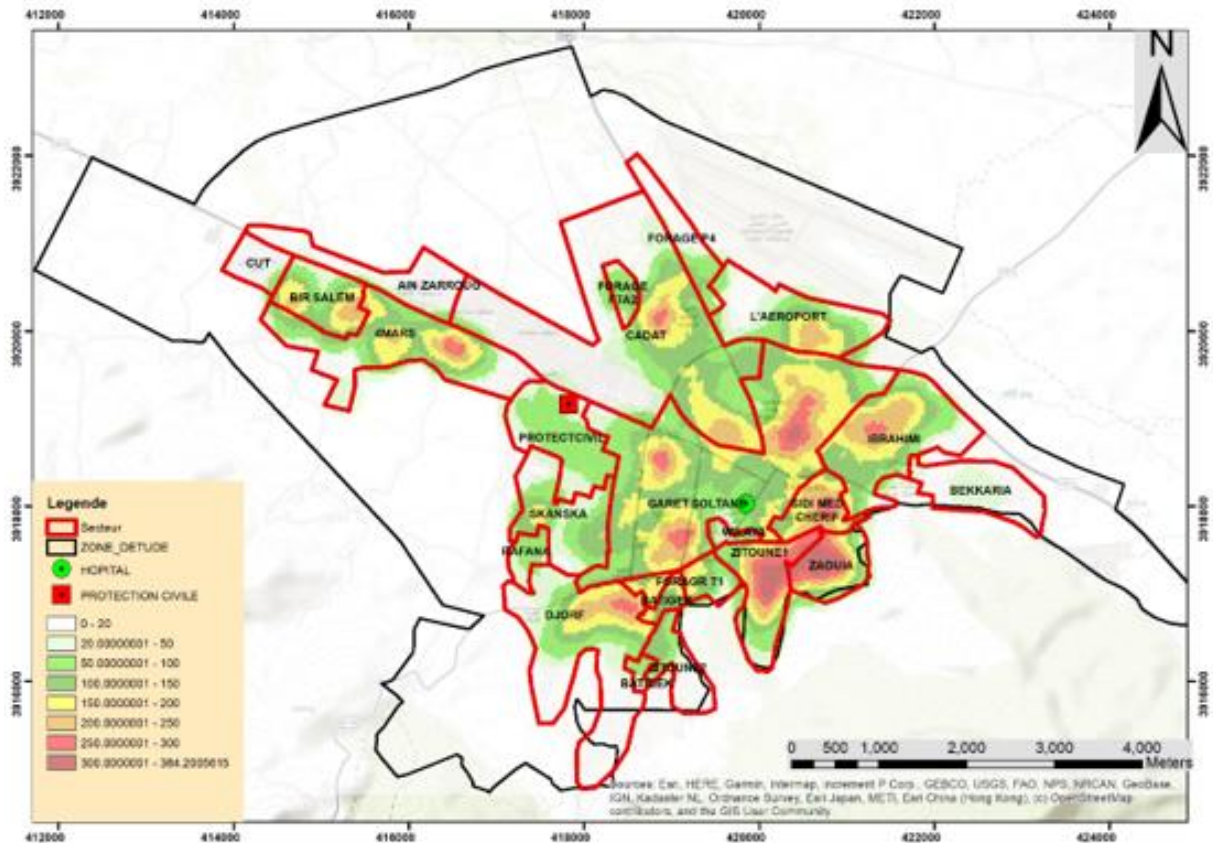


Figure 4.9: Carte de densité de la population

Cette carte montre qu'il y a des quartiers d'habitats individuels très denses qui dépassent 300 habitants par Hectare (ADE), dans un logement d'habitat individuel peut contenir de 2, 3 et 4 Ménages. La majorité des habitats individuels dépassent (R+1), d'où chaque ménage occupe un étage.

3.2. Tissu urbain

La ville de Tébesa représente une variété de forme urbaine et occupation de l'espace où l'articulation spatiale des différents facteurs influents sur le degré de la vulnérabilité.

La classification du tissu urbain tient en compte la fonction des ouvrages et sa fréquentation. Afin, de classer les ouvrages selon leur importance, nous nous sommes inspirés de la RPA (version 2003 »), selon les groupes suivants :

Groupe 1 : Ouvrages d'importance vitale - Ouvrages vitaux qui doivent demeurer opérationnels après une inondation majeure pour les besoins de la survie de la région, de la sécurité publique et de la défense nationale, soit :

- Bâtiments abritant les centres de décisions stratégiques ;

- Bâtiments abritant le personnel et le matériel de secours et (ou) de défense nationale ayant un caractère opérationnel tels que casernes de pompiers, de police ou militaires, parcs d'engins et de véhicules d'intervention d'urgence et de secours ;
- Bâtiments des établissements publics de santé tels que les hôpitaux et centres dotés de services des urgences, de chirurgie et d'obstétrique ;
- Bâtiments des établissements publics de communications tels que les centres de télécommunications, de diffusion et de réception de l'information (radio et télévision), des relais hertziens, des tours de contrôle des aéroports et contrôle de la circulation aérienne ;
- Bâtiments de production et de stockage d'eau potable d'importance vitale ;
- Ouvrages publics à caractère culturel, ou historique d'importance nationale ;
- Bâtiments des centres de production ou de distribution d'énergie, d'importance nationale ;
- Les équipements qui peuvent accueillir les sinistrés en (les abris) cas de catastrophes naturelles (inondations) , tel que les établissements scolaires (écoles ,CEM ,lycée, stade).

Groupe 2 : Ouvrages de grande importance - Ouvrages abritant fréquemment de grands rassemblements de personnes :

- Bâtiments recevant du public et pouvant accueillir simultanément plus de 300 personnes tels que grande mosquée, bâtiments à usage de bureaux, bâtiments industriels et commerciaux, scolaires, universitaires, constructions sportives et culturelles, pénitenciers, grands hôtels ;
 - Bâtiments d'habitation collective ou à usage de bureaux ;
 - quartier d'habitation individuelle ou la densité dépasse 50 log par hectares ;
- Ouvrages publics d'intérêt national ou ayant une importance socio-culturelle et économique certaine ;
- Bâtiments de bibliothèque ou d'archives d'importance régionale, musée, etc. • Bâtiments des établissements sanitaires autres que ceux du groupe 1 (centre de santé de proximité, salle de soins, clinique privé).

Groupe 3 : Ouvrages courants ou d'importance moyenne - Ouvrages non classés dans les autres groupes 1, 2 ou 4 tels que :

- Bâtiments d'habitation individuelle ou à usage de bureaux ;
- Parkings de stationnement publics ;

Groupe 4 : Ouvrages de faible importance :

- Bâtiments industriels ou agricoles abritant des biens de faibles valeurs ;
- Bâtiments à risque limité pour les personnes ;

- Constructions provisoires ;
- Cimetière.

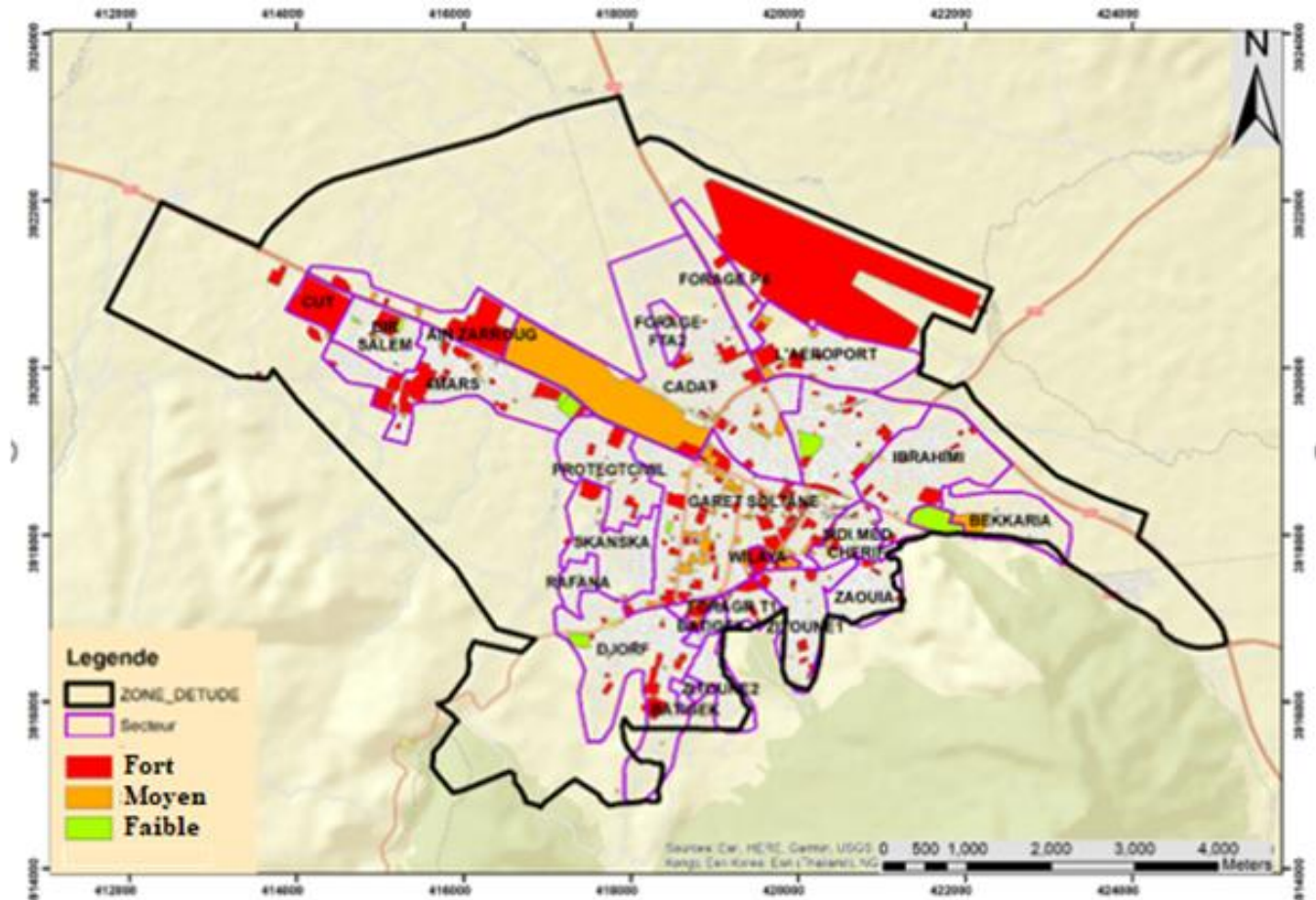


Figure 4.10 : Carte de vulnérabilité des équipements

3.3. Trame viaire

Le réseau routier est l'un des facteurs de la vulnérabilité compte tenu de son importance en termes d'accessibilité et de transport. Différents services et équipements sont associés au réseau routier, notamment ceux qui interviennent dans la gestion pendant et après la crise (Zones sources).

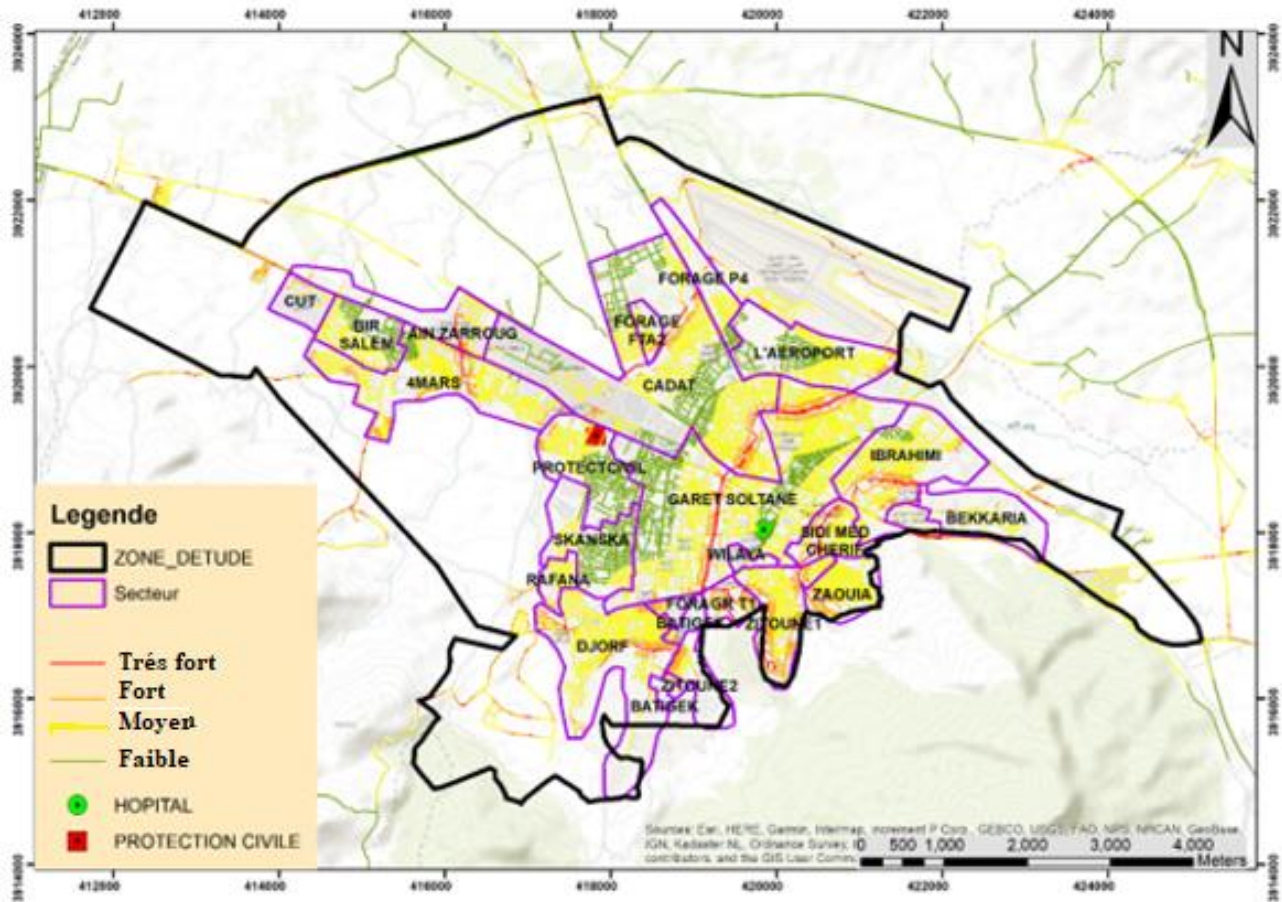


Figure 4.11: Carte vulnérabilité de la trame viaire.

3.4. Carte de vulnérabilité finale

L'évaluation de la vulnérabilité repose sur le recensement des enjeux socio-économiques et leur transcription sur la carte. En effet, l'établissement de la carte de vulnérabilité, plusieurs paramètres ont été pris en considération tels que la trame viaire, la population, la densité de logement et les équipements, selon leur influence, on a attribué pour chaque paramètre son propre poids comme le montre le tableau (4.4).

Comme la méthode AHP (analyse multicritère hiérarchique) est une méthode adaptée aux problèmes de décision multicritères c'est-à-dire comportant plusieurs solutions satisfaisant un ensemble de critères. L'approche de la méthode consiste à simplifier le problème en le décomposant en un système hiérarchique. Par conséquent l'utilisation de la méthode AHP s'avère nécessaire pour mieux voir l'influence de chaque paramètre (critères Socio-économiques).

Tableau 78 Les indices de la vulnérabilité

Population		Equipement		Trame viaire		Densité de logement	
Classe	Indice (hab/ha)	Classe	Indice (par classement)	classe	Indice DTS (m)	Classe	Indice (log/ha)
1	384-250	1	Groupe1	1	≤ 25	1	72-50
2	250-150	2	Groupe2	2	25-500	2	50-30
3	150-50	3	Groupe3	3	500-1000	3	30-10
4	50-0	4	Groupe4	4	1000-1500	4	10-0

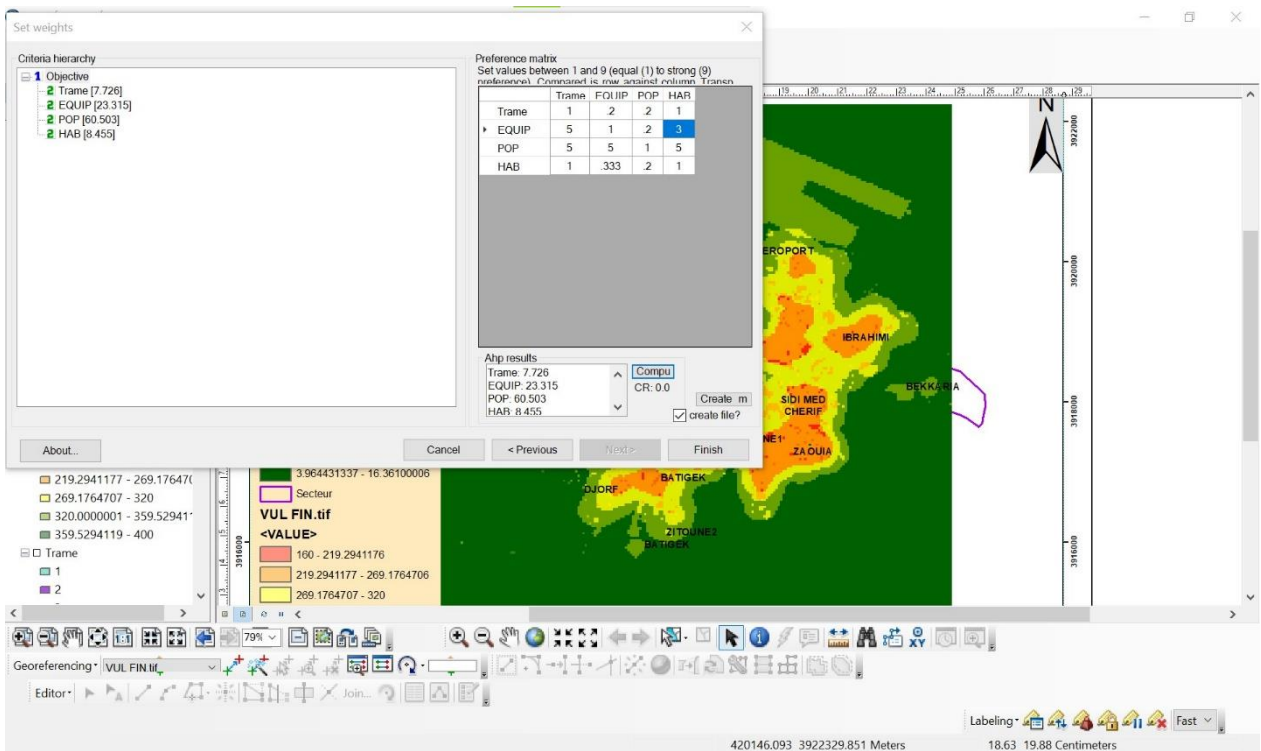


Figure 4.11 : L'extension AHP

Le calcul de la vulnérabilité est fait selon la formule suivante :

La vulnérabilité = 0.6053 Densité de population + 0.23315 équipement + 0.8455 densité de logement + 0.0772 trame viaire

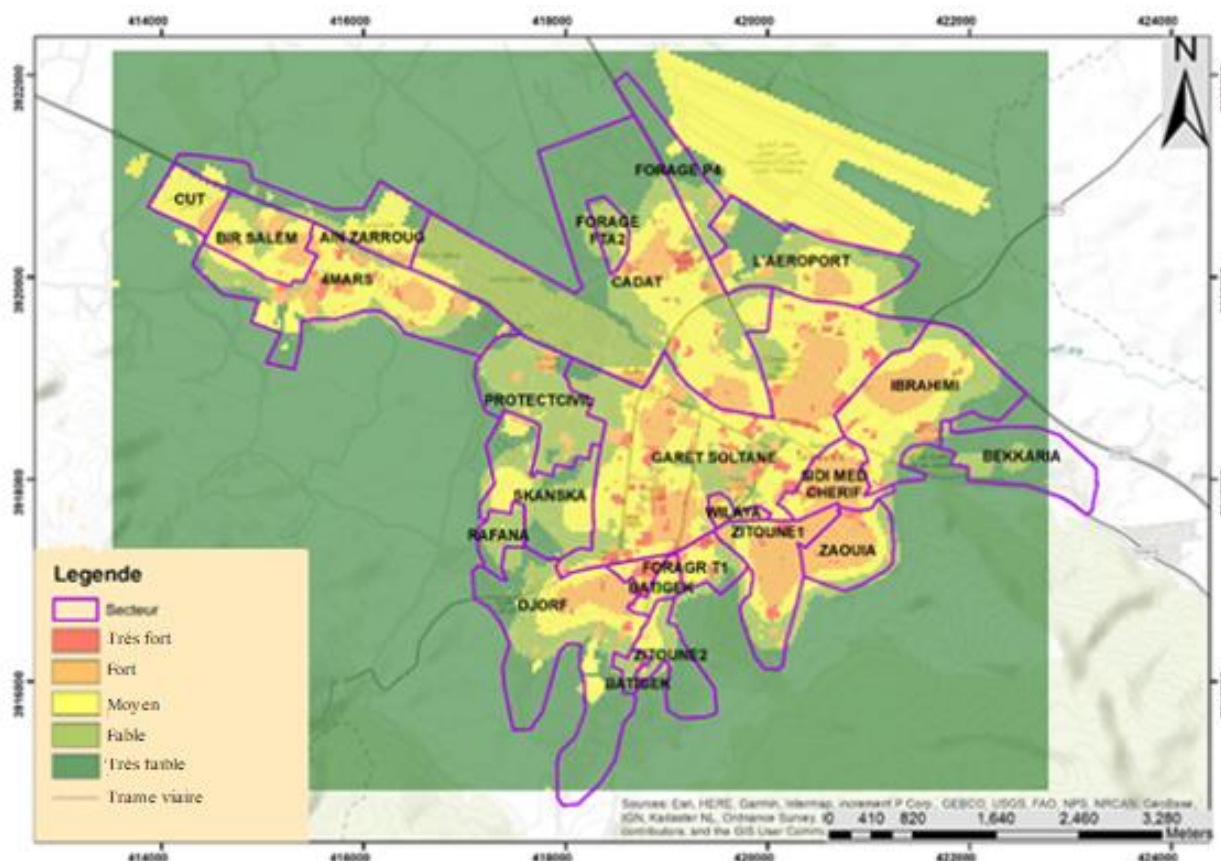


Figure 4.12 : Carte de vulnérabilité globale

Tableau 79 La matrice de la détermination des niveaux de la vulnérabilité

Enjeux	Trame viaire	Equipement	Population	Habitat
Trame viaire	1	0.2	0.2	1
Equipement	5	1	0.2	3
Population	5	5	1	5
Habitat	1	0.333	0.2	1

Les zones qui s’inscrivent dans la vulnérabilité extrême doivent faire l’objet d’une attention particulière pour atténuer les dégâts en cas de survenance d’un aléa important.

4. Etablissement de la carte du risque d’inondation

Le Systèmes d’information Géographique (SIG) joue un rôle incontournable dans la cartographie du risque inondation. Afin d’établir cette dernière, l’utilisation du SIG s’avère nécessaire pour regrouper la carte d’aléa et carte de la vulnérabilité pour faire extraire la carte des risques d’inondation. Ainsi, un traitement sous ArcGis a été réalisé sous la forme graphique par le biais des formules d’algèbre spatiale telles que : Raster Calculator (Map Algebra)

d'ArcGis selon la formule : $\text{Risque d'inondation} = \text{Aléa} \times \text{Vulnérabilité}$.

Figure 4.13 : Outil de calcul de la carte du risque d'inondation finale (Map Algebra)

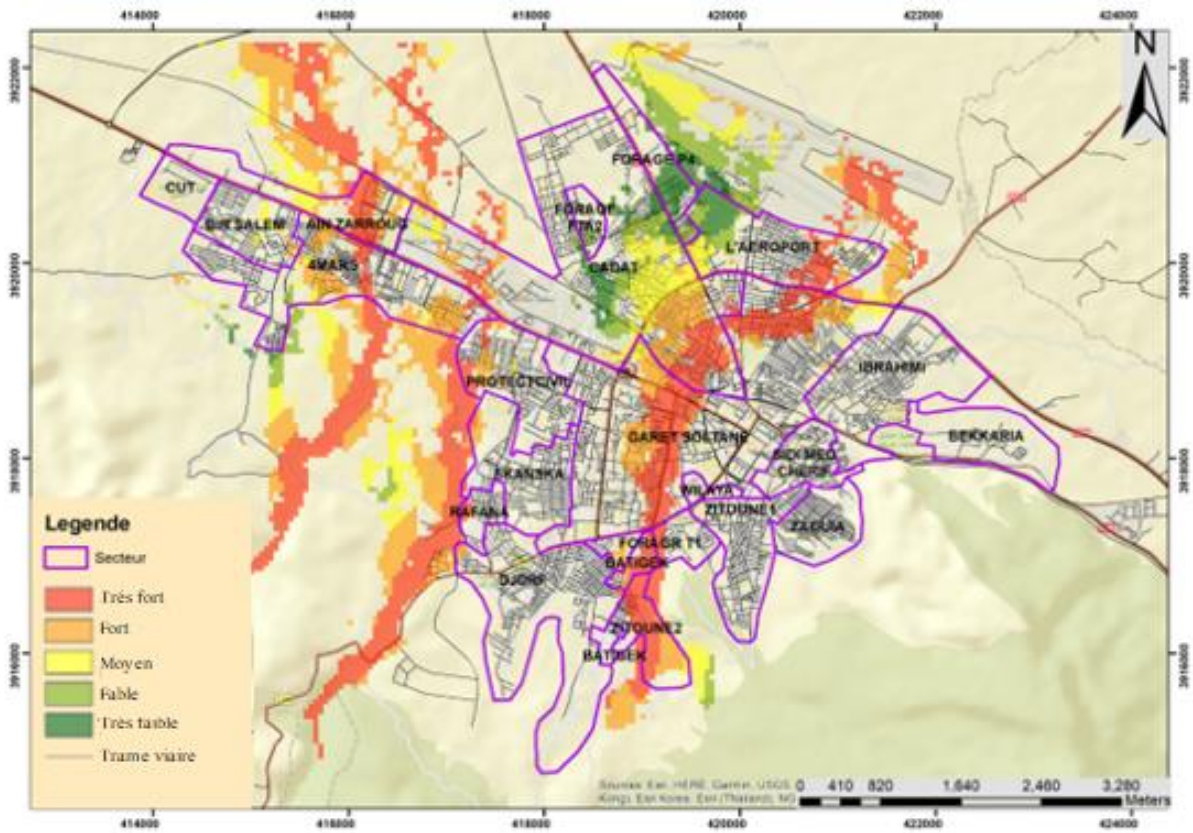


Figure 4.14 : Carte des risques d'inondation de la ville de Tébessa (Cinquantennale)

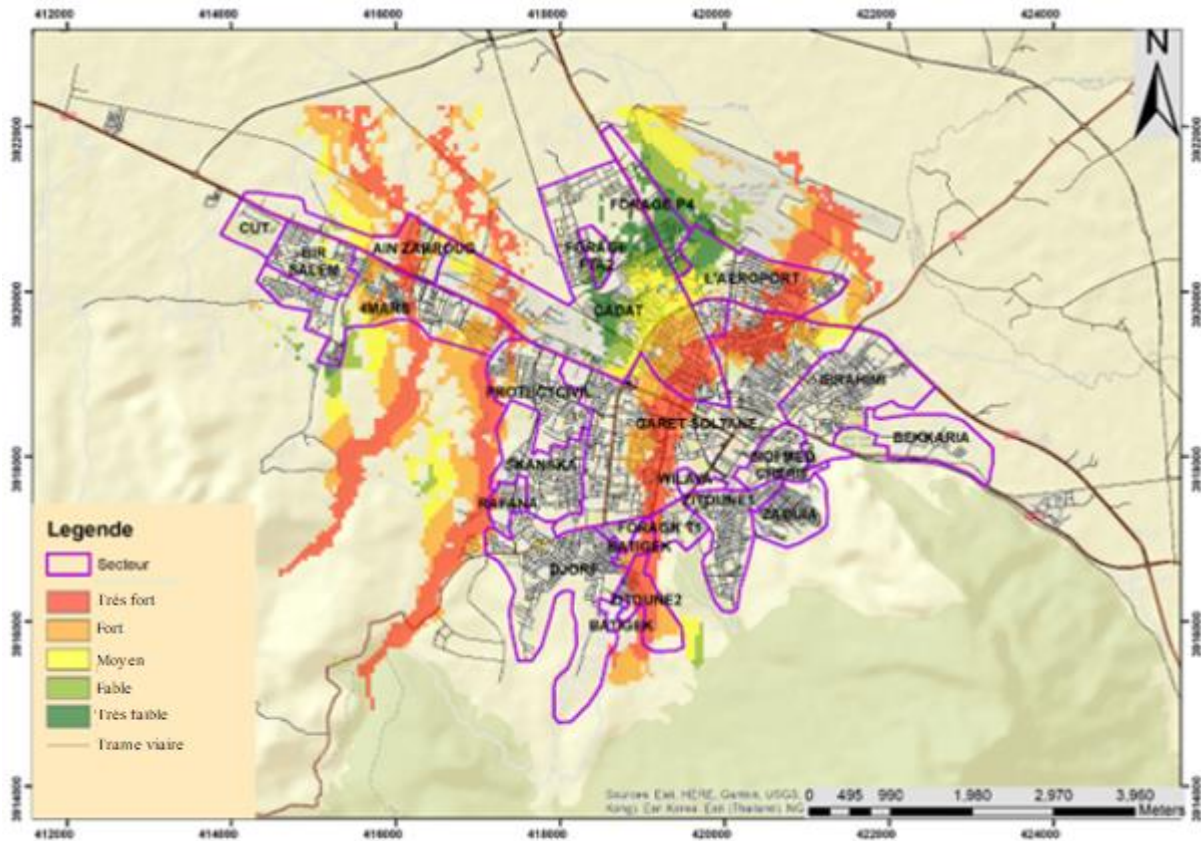


Figure4.15 : Carte des risques d'inondation de la ville de Tébessa (Centennale)

La carte des risques d'inondation de la ville de Tébessa révèle des organismes très importants seront affectés par les inondations tels que :

- Vu les erreurs de conception des routes et le mauvais traitement des cours d'eau, l'inondation suit la forme des routes, cela va être un obstacle devant les intervenants (pompiers, secourusetc.) ;
- Les pompiers ne peuvent pas bouger librement pour accomplir leur tâche ;
- Empêcher le déplacement des équipes de santé pour soigner ou secourir les blessés, en cas d'inondation catastrophique.

Tableau 80 Les équipements touchés par les inondations

Equipements touchés	Nombre	Surface (m2)
Bureau de poste (communication)	4	6826.465
Organismes D'enseignement Université +Lycée +CEM Primaire	45	84 501.9082
Espace vert	6	29 057.69986
Sécurité publique	3	20 072.709
Service banque	2	1154.47
Sport	21	107036.6326875
Tourisme	3	6 462.7231837444
Transport station	5	1 223 727.9771

5. Proposition des espaces libres, accessibles et sécurisés

Une fois la carte définitive des risques d'inondation établie, des espaces libres, accessibles et sécurisés sont nécessaires, afin de proposer quelques solutions pour bien gérer la crise et minimiser les dégâts de cette catastrophe naturelle, comme suite :

- proposition d'une unité de la protection civile, qui va renforcer l'unité principale afin de se déplacer facilement pendant la crise ;
- proposition des zones d'abris (espace libre , accessible et sécurisé) pour les sinistrés (écoles, Salle oms, stade, jardins publiques) ;
- localisation de tout les équipements qui interviennent lors de la crise tels que : les hôpitaux , cliniques y compris le secteurs privé , équipements de sûreté ;
- proposition de renforcement de la protection de la ville contre les inondations ;
 - ✚ remplacement de la galerie endommagée, nettoyage permanent des digues et des galeries et enfin leur préparation aux inondations périodiques (septembre et août).
 - ✚ renforcement de la trame verte par des espèces de haute absorption.

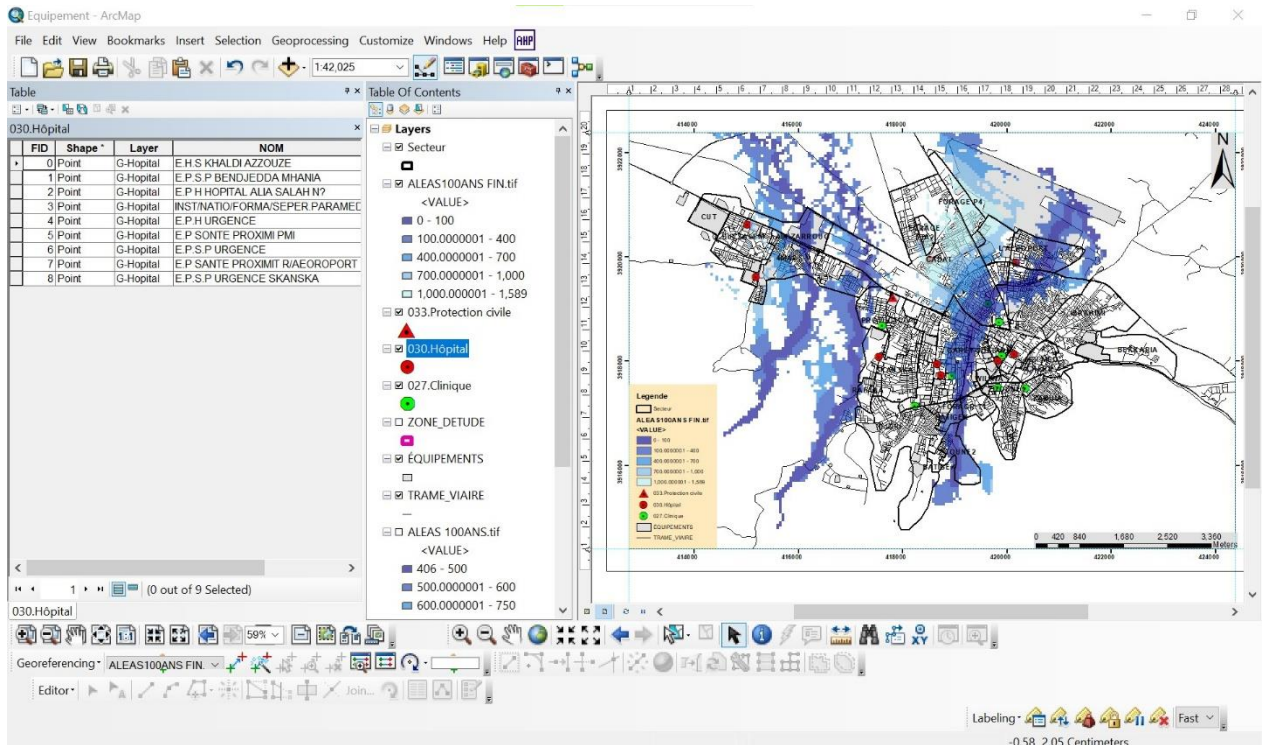


Figure 4.16 : Localisation des hôpitaux

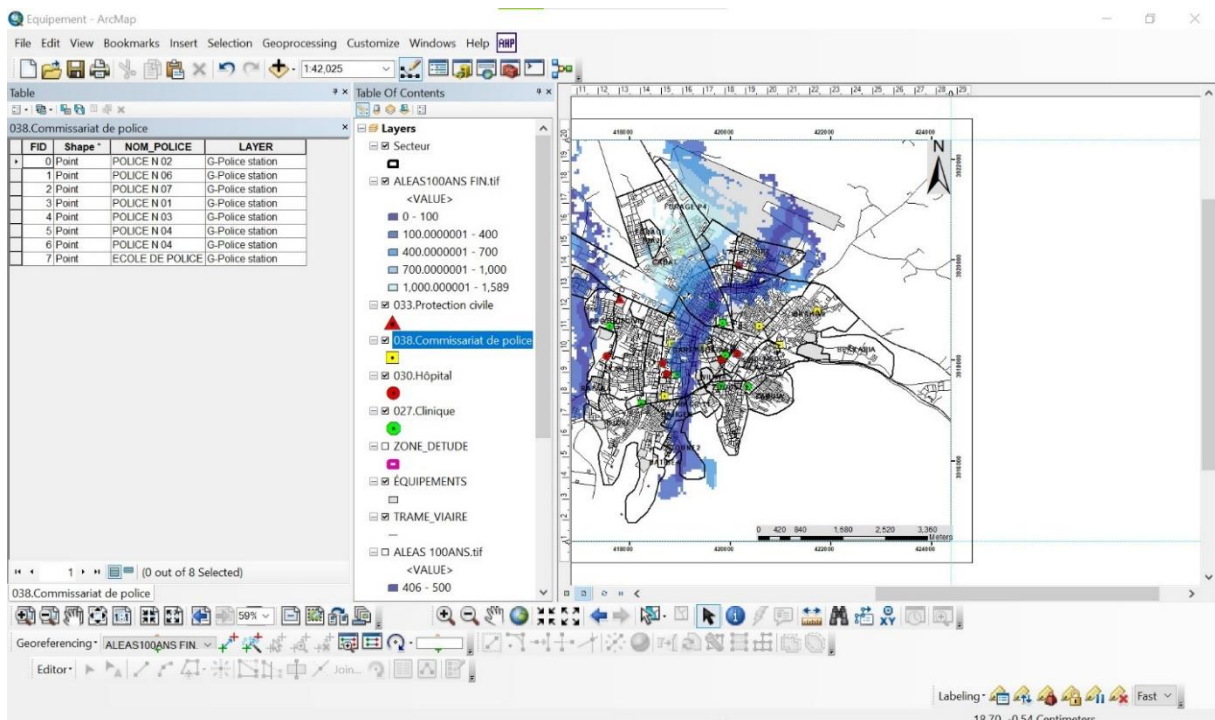


Figure 4.17: Localisation des équipements de sûreté

Conclusion

La ville de Tébessa est l'une des villes qui a été affectée par des inondations récurrentes et parfois désastreuse au cours de ces dernières années, Elle est située dans le sous bassin d'Oued-Ksob qui est alimentée par plusieurs oueds qui s'insèrent dans le tissu urbain, cette situation a favorisé les inondations dans cette ville. Par conséquence, des dégâts considérables aux constructions et aux infrastructures avec un déplacement des populations des sites sinistrés. L'utilisation du logiciel HEC RAS, dans le but d'établir les cartes d'aléas hydrologiques (cinquantennale et centennale). Ensuite, des enjeux socioéconomiques importants sont pris en considérations dans l'établissement d'une carte de vulnérabilité aux inondations de la ville de Tébessa par l'utilisation de la méthode multicritère (AHP), à l'égard des collectivités locales qui contribuent à cibler leurs stratégies préventives et le recours à l'analyse multicritère sous un SIG, peut être un outil adéquat pour la spatialisation de cette vulnérabilité. Plusieurs sites de la ville sont localisés dans un niveau de vulnérabilité fort à cause de la forte densité de population, de l'importance et/ou à la sensibilité de certains équipements. En dernier, une carte finale du risque d'inondation a été dressé, Par logiciel ARC Gis par utilisation de l'outil Map Algebra (Raster Calculator). Pour compléter la présente étude, la proposition des espaces libres, accessibles, et sécurisés est nécessaire afin de réduire les dégâts causés par cette catastrophe naturelle. Ainsi, la carte des risques d'inondation obtenue, est donc un moyen essentiel pour les programmeurs dans la définition des plans d'occupation des sols, la construction et la protection des ouvrages mais aussi une éventuelle prévision, système d'alerte qui peuvent minimiser la grandeur des dommages produits par une inondation.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Au terme de cette étude, l'ensemble des résultats obtenus permettent de mettre le point sur les faits suivants :

L'étude géologique a permis d'identifier plusieurs formations de natures différentes :

- Les calcaire Maestrichtiens et Turonien limitent la plaine au Nord et au sud ;
- Les formations du plio-Quaternaire qui constituent un remplissage alluvionnaire hétérogène la présence de limons récent au sein de ces formations, rend la nappe alluviale en charge au centre de la plaine ;
- De gros cailloutis, voire des galets calcaires localisés aux bordures favorisant l'infiltration des eaux pluviales ;

La prospection électrique a mis en évidence un premier niveau constitué de formation alluvionnaires du plio-Quaternaire, ayant une résistivité variant de 10 -100 Ω m le niveau identifié repose sur un niveau conducteur, constitué de Marno-Montiennes dont la résistivité varie de 2-5 Ω m.

L'étude climatique a confirmé que le climat de la région d'étude est semi-aride avec un hiver froid et un été sec et chaud. La température moyenne annuelle qui y règne est de l'ordre de 15.7°C. La pluviosité moyenne annuelle est estimée à 365.84mm, L'évapotranspiration réelle, estimée par le bilan Thornthwaite, est de l'ordre de 340.387mm/ an, représentant 94 % des précipitations. La région a connu une longue période de sécheresse durant laquelle le déficit agricole a pu atteindre une somme annuelle de 541,37 mm. Le coefficient de ruissellement de 21.01mm, et l'infiltration de 4.45 mm représentent des valeurs très faibles par rapport aux précipitations entrantes qui jouent un rôle très intéressant à l'alimentation des oueds et des nappes existant dans la zone d'étude.

L'étude de la qualité des eaux souterraine de la Merdja a montré que les polluants qui se propagent dans la nappe, ont plusieurs origines à savoir :

- les rejets des eaux usées : elles sont très chargées en polluants. Ces derniers, en plus de leur action sur les milieux aquatique, ils dégagent des odeurs nauséabondes.
Dans certaine condition hydrodynamique les eaux souterraines se trouvent en contact avec les eaux de surface de l'Oued El Kebir, surtout au niveau de la Merdja où la surface piézométrique est proche de la surface topographique, ce qui provoque la contamination de la nappe par les polluants émanant des rejets qui ne sont pas bien aménagés (manque de canaux) facilitent ainsi l'infiltration des polluants directement dans la nappe.
- les activités agricoles : l'utilisation massive et arbitraire des engrais chimiques en agriculture donne lieu à des pollutions accidentelles par suite de l'entraînement des constituants des engrais tels que les nitrates (120mg/l), les chlorures, les phosphates et le potassium.
- la lithologie : il s'agit d'une pollution naturelle qui se produit par le lessivage des couches, surtout celles qui sont gypsifères, donnant des concentrations élevées en chlorures, sulfates, calcium et sodium. Le Trias de Djebel Djebissa et Djebel Belkefif est à l'origine de cette pollution. L'évaporation qui active durant la période des basses

eaux contribue efficacement à l'augmentation des taux de chlorures, sulfates, calcium et sodium. Elle s'accroît à la Merdja où le niveau piézométrique est proche du sol.

Les tendances de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la plaine de la Merdja ont été approuvées par des cartes de vulnérabilité qui ont été établies dans le cadre d'une approche de gestion de la ressource. Effectivement, de nombreux auteurs ont adopté plusieurs méthodes d'évaluation et de cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines. Pour notre part, nous avons retenu quatre méthodes qui nous ont paru être les plus convenables pour la zone d'étude (DRASTIC, GOD, SI et DRASTIC modifiée). A l'instar des méthodes utilisées, la méthode DRASTIR (DRASTIC modifiée) a été utilisée après une substitution de l'un des paramètres de la méthode DRASTIC qui est la conductivité par la résistivité. Cette dernière a donné presque le même résultat que la méthode DRASTIC. Malgré que la carte de répartition spatiale du taux des nitrates est l'un des outils de validation que quelques auteurs utilisent, mais elle ne permet pas de faire une idée assez précise sur toutes les zones vulnérables, cela peut être justifié par l'intervention d'autres facteurs dans la pollution du périmètre étudié, telles que les formations lithologiques ou il s'agit d'une pollution naturelle qui se produit par le lessivage des couches surtout celles qui sont gypsifères donnant des concentrations élevées en chlorures et sulfates. Le trias de Djebel Djebissa et djebel Belkif est à l'origine de cette pollution. L'évaporation qui active énormément l'augmentation du taux des chlorures, sulfates, calcium et sodium. En outre, une deuxième méthode pour tester la validité des résultats trouvés est la corrélation entre les surfaces de chaque classe trouvée par les différentes méthodes utilisées. Ainsi, il ressort de la comparaison avec la carte des nitrates et la corrélation entre les superficies des classes de vulnérabilité que l'approche SI semble refléter mieux la réalité des eaux souterraines et pourrait être adéquate pour le traçage de la vulnérabilité dans la plaine d'El Merdja par rapport aux autres approches. Par contre, la méthode DRASTIR (DRASTIC modifiée) a donné un meilleur résultat que la méthode DRASTIC, vue la corrélation existante entre cette méthode et la méthode SI (0.93).

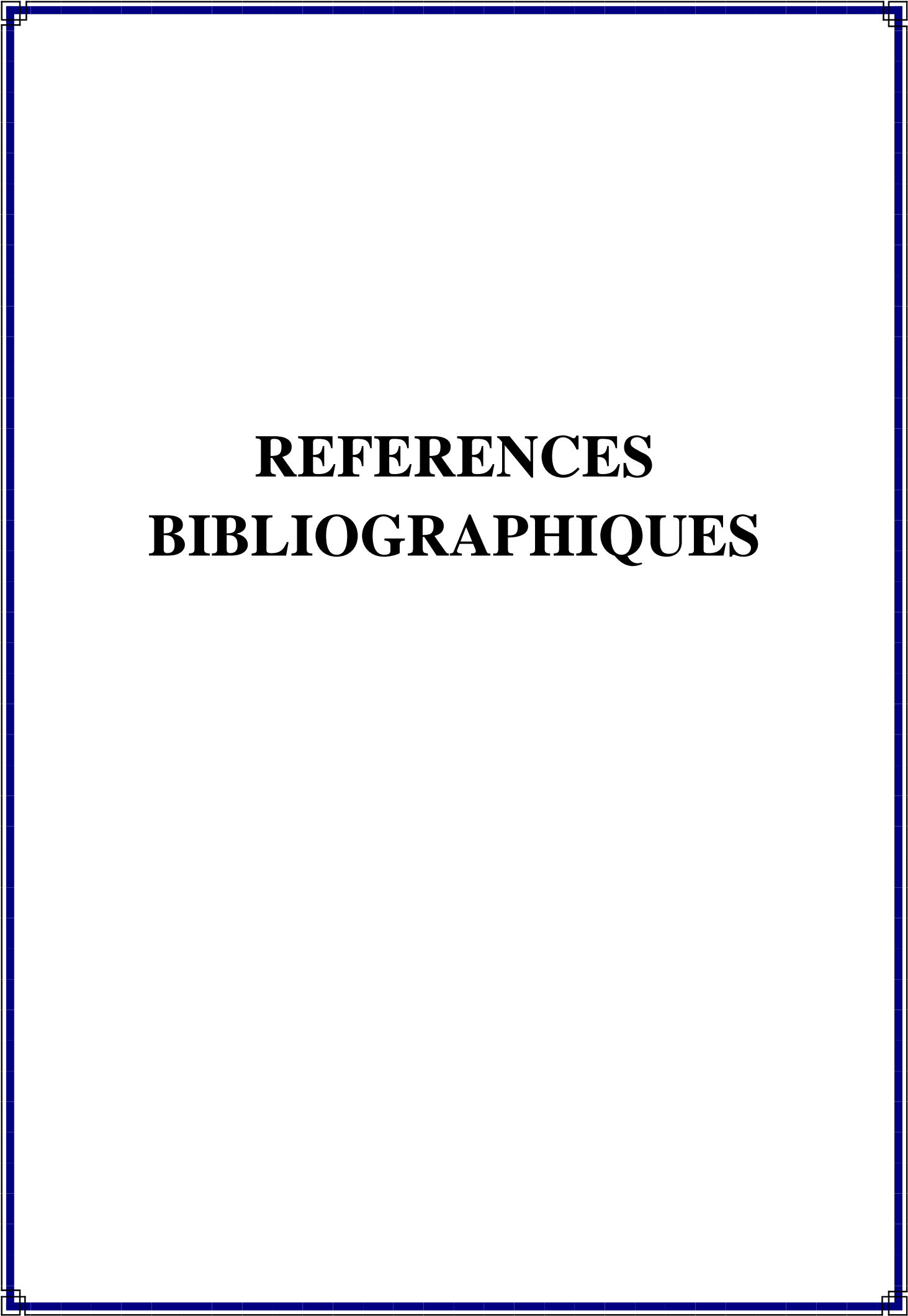
En somme, ces résultats vont enrichir la base de données sur la qualité des eaux souterraines dans la plaine, et aider les décideurs à mieux se prononcer sur la gestion de ces eaux en vue d'un meilleur développement durable de la région.

Dans la deuxième partie, nous avons évoqué les paramètres qui rendent la plaine vulnérable au risque d'inondation, dans le but de dresser une carte des risques d'inondation.

En premier lieu, une étude des caractéristiques morphométriques des sous bassins qui contiennent les cinq oueds qui traversent la ville, ainsi la résultante de ces derniers facteurs non variables qui se combineront avec les facteurs variables (pluviométrie) aura des effets sur les écoulements annuels, les crues et automatiquement les inondations. En second lieu, Une évaluation plus ou moins variée a permis de fixer les valeurs des crues qui traversent la ville de Tébessa, ce qui nous permettra de dimensionner et de calculer les travaux de protection de cette ville contre les risques d'inondations. Par ailleurs, les hydrogrammes de crues établis nous ont permis de voir l'évolution des crues dans le temps. Enfin, un calcul des débits solides était indispensable pour pouvoir estimer les crues, cela a été fait par plusieurs méthodes empiriques en raison du manque de station hydrométriques. A cet effet, L'analyse des risques d'inondation de la ville de Tébessa a été réalisée avec logiciel hydraulique HEC-RAS couplée au logiciel Arc Gis. L'approche méthodologique adoptée présente l'avantage d'exploiter des données multi-sources qui ont permis de définir des descripteurs d'aléas et de vulnérabilité. En premier lieu, l'utilisation du

logiciel HEC RAS afin de dresser les cartes d'aléas hydrologiques par intégration des débits de crues cinquantennales et centennales. En deuxième lieu l'établissement d'une carte de vulnérabilité qui a pris en considérations plusieurs critères socioéconomiques (densité de population, densité de logements, équipements, trame viaire) par la méthode multicritère AHP. En dernier, l'élaboration de la carte des risques d'inondation finale de la ville de Tébessa sous ARC GIS par le biais de l'outil Raster Calculator, pour les deux récurrences centennales et cinquantennale. En fin, une proposition des espaces libres, accessibles et sécurisés afin de bien gérer la crise et minimiser les dégâts causés par cette catastrophe naturelle.

En conclusion, cette présente étude affirme et prouve les résultats d'études antécédentes selon lesquelles la menace de contamination des ressources en eau souterraine est devenue un acte qui doit être considéré par les différents organismes, comme une menace sérieuse. Par ailleurs, les deux cartes des risques d'inondation à 100 ans et à 50 ans ont été élaborées pour servir d'outil d'aide à la décision pour une meilleure gestion des risques d'inondation dans la ville de Tébessa. Il serait de même intéressant d'évaluer par modélisation par réseaux neuronaux artificiels et L'utilisation dans les méthodes neuronales des contaminants agricoles précédemment étudiés et d'autres variables chimiques caractérisant la géologie locale, afin de mieux localiser les principales causes de la pollution existante dans les eaux souterraines de la région étudiée. En outre, une étude détaillée des risques d'inondation sera nécessaire par l'utilisation des méthodes plus précises comme l'application des réseaux de neurones sur un suivi temporel régulier et en prenant en considération plusieurs paramètres qui peuvent jouer un rôle important dans la genèse des inondations. En outre, la réalisation d'un plan de gestion des risques par l'intelligence artificielle d'où l'utilisation des images drones et des images satellitaires pour mieux évaluer le risque d'inondation au temps réel.



REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdeslam I. , Djabri L., Fehdi C., Bouhsina S. (2019).**Le rapport Sr/Ca, un bon indicateur de l'origine de la salinité des eaux : Cas des nappes d'el Ma labiod, Tébéssa et Al Aouinet (sous bassin de l'oued Mellègue- Est Algérien). Larhyss Journal n°38, Juin, pp. 117-130.
- Achleb A. E., Mania J. (2001).** Processus de salinisation des eaux souterraines dans le bassin sahel -Doukkala (Maroc occidental). First international conference on saltwater intrusion and coastal Aquifers Monitoring ,Modeling, and Management Essaouira ,Morocco.
- Ake G.E., Kouadio H.B. , Dongo K. , Dibi, Kouame B. F.K. et J. Biemi J.(2010).** Application des méthodes DRASTIC et SI pour l'étude de la vulnérabilité à la pollution par les nitrates (NO₃ -) de la nappe de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). Int. J. Biol. Chem. Sci., 4, 1676-1692.
- Allechy F. B. et al.(2016).** Cartographie De La Vulnérabilité À La Pollution Des Aquifères Du Socle Précambrien : Cas De La Région D'Oumé (Centre-Ouest De La Côte D'ivoire).
- RIBEIRO L. (2000).** Desenvolvimento de um índice para avaliar a susceptibilidade de dos aquíferos à contaminação. Note interne, ERSHA-CVRM, Lisbonne, Portugal, 8 p.
- Aoudjehane M. Bouzenoune A. Rouvier H. et Thibiéroz J. (1992).** Halocinèse et dispositifs d'extrusions du Trias dans l'Atlas saharien oriental (NE algérien). Géol. Médit., Marseille, XIX, 273-287.
- Atilio F.2015.** Blog SIG & Territoire_ Le blog SIG pour al gestion territoriale.
- Bachir A., Rhinane H., Mouchrif A., (2012)** Apport des systèmes d'information géographique (SIG) à la simulation de crues, cas de l'Oued Bouskoura à Casablanca. Travaux de l'institut scientifique, Rabat, série géologie et géographie physique, 2012, n°23, pp 25-31.
- Banko, Gebhard. 1998.** A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data and of Methods Including Remote Sensing Data in Forest Inventory. Interim report, Laxenburg, Austria: International Institute for Applied Systems Analysis.
- BatchI M., J. AL Karkouri, Fenjiro I. et ELMaaqili M. (2017).** Étude comparative de deux modèles (DRASTIC et SI) pour l'évaluation de la sensibilité de la nappe phréatique de Mnasra (Maroc nord-occidental) à la pollution d'origine agricole. *Physio-Géo*, 11, 42-64.
- Blés J. L. (1969).** Contribution à l'étude des déformations cassantes de la feuille de Morsott (SE Constantinois – Algérie). Les microfracturations et leurs relations avec les failles et les plis. Publications du Service Géologique de l'Algérie, (Série N° 11), Bulletin N° 39, pp. 7-17.
- BLES J.L. et FLEURY J.J., (1970) -- Carte géologique au 1/50 000 de Morsott, avec notice explicative. Alger, Service géologique de l'Algérie.**
- Bouzenoune. A. (1993).** Minéralisation périadiapirique de l'Aptien .calcaire: escarbonates de fer du gisement hématitique de l'Ouenza (Algérie orientale). Thèse doctorat ,Université Paris6,France .
- Bouakk K. S. , Dehni A., Meguenni B., and Kessar C.(2019)**,GIS Application for roundwater Vulnerability Assessment: Study Case of Hammam-Bou-hadjar Area-NW of Algeria. In Proceedings of the 5th International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management (, Science and Technology Publications, pp. 207-211.
- Camille G et Aleksandra B., (2007)** Evaluation multicritère de la vulnérabilité des territoires aux risques de transport routier de matières dangereuses. Rencontre Internationales Géomantique et territoire.

- Chaabane, K. (2015).** Le Cénomaniens-Turonien du Nord de Tébessa (Nord-Est Algérie). Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba: 153 pp.
- Champagne L. et R.P. Chapuis (1993).** Évaluation de la vulnérabilité à la pollution des formations aquifères de la MRC de Montcalm selon la méthode DRASTIC. *Sci.Tech. Eau*, 26, 76 -169.
- Chaïb, N., and Boudjéma S.(2011) .** Évaluation de la qualité physico-chimique des eaux de l'oued Kébir-Est et de ses principaux affluents (Nord-Est algérien). *Science et changements planétaires/Sécheresse* 22, no. 3 (2011): 171-177.
- Chelih. F (2019).** Caractérisation de formations carbonatées de la région d'El Hammamet NE Algérien : approche hydrogéochimique, isotopique et géostratigraphique. Thèse de Doctorat, Université de Tébessa.115 p.
- Chi X., Maosong L., Cheng Z., Shuqing A., Wen Y., Jing M.C., (2007).** « The spatiotemporal dynamics of rapid urban growth in the Nanjing metropolitan region of China », *Landscape Ecology*, n° 22, p.925-937.
- Chibane, B. (2010).** Etude hydrogéologique en milieu semi-aride a aride : Exemple de la région de Djelfa. Doctorat, Des sciences et de la Technologie (Haouri Boumediene).
- Chikhi-Aouimeur F. (1980).** Les Rudistes de l'Aptien supérieur de djebel Ouenza (algérie NE). Paléontologie, Contexte stratigraphique et paléogéographie. Thèse 3ème cycle, USTHB, Alger, 114 p.
- Debieche T. (2002).**Évolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle, Application à la basse plaine de la Seybouse - Nord-Est Algérien [Thèse de doctorat]. Doubs : University of Franche .
- Derradji, F., H. Bousnoubra, et al. (2007).** "Impact de la pollution organique sur la qualité des eaux superficielles dans le Nord-Est algérien." *SECHERESSE* 18(1).
- Dibi B. et al (2013).** Évaluation de la vulnérabilité à la pollution des aquifères des formations altérites à partir des méthodes DRASTIC et SYNTACS : cas de la ville de M'bahiakro, centre de la Côte d'Ivoire. *Int. J. Innov. Appl. Stud.*, 2, 464-476.
- Ding H., Wang R.C., Wu J.-P., Zhou B., Shi Z., Ding L.-X., (2007),** «Quantifying Land Use Change in Zhejiang Coastal Region », *China Using Multi-Temporal Landsat TM/ETM+ Images. PEDOSPHERE*, n°17(6), p. 712-720.
- Dubourdiou G. (1956).** Etude géologique de la région de l'Ouenza (confins algérotunisiens). Thèse des Sciences, Paris, Publications du Service de la Carte Géologique de l'Algérie, Bulletin N° 10, Vol. 1, 659 p.
- Dubourdiou G. Durozoy G. (1950).** Observations tectoniques dans les environs de Tébessa et Ouenza (Algérie). *Bull. SGF, Paris.* Pp 257-266.
- Durozoy G. (1956).** Carte géologique au 1/50 000 de Tébessa feuille 206.
- Ewodo M et al. (2016).** Apport des méthodes paramétriques DRASTIC, GOD et SI à l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque dans les aquifères du bassin versant de l'Abiergué, (région de Yaoundé) *REV. CAMES*.2016, VOL.04 NUM.02. 2016 * ISSN 2424-7235.
- Foster, S.,(1987).** Fundamental Concept in Aquifer Vulnerability, Pollution Risk and Protection Strategy," In: W. Van Dui- jvenbooden and H. G. Van.
- Hamza M.H.et al (2007).** Validité de l'application des méthodes de vulnérabilité DRASTIC, SINTACS et SI à l'étude de la pollution par les nitrates dans la nappe phréatique de Metline-Ras Jebel-Raf Raf (Nord-Est Tunisien). *Geoscience*, 339, 493-505.
- Henine, H. « *Interfaçage entre un modèle hydrologique / modèle hydrodynamique au sein d'un système d'information intégré sous web incluent les SIG. Magister* ». ENP. Alger, 2004.

- Hervouet J., (2003)** hydrodynamique des écoulements a surface libre, modélisation numérique avec la méthode des éléments finis, éditions presses de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, pp 312.
- Isabel D., Gelinat P. et AUBRE F. (1990).** Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines au Québec. *Rev. Sci. Tech. Eau*, 23 (3), 255-258.
- Ghrieb L. (2015).** Impacts des formations triasiques sur les eaux d'une plaine en zone semi-aride : Cas de la plaine Bekkaria -Tébessa (Extrême Est Algérien). Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie.135p.
- Gherzouli Lazhar et al ,(2017):** La protection de la ville de Tébessa contre les crues: une nécessité pour son développement urbain durable.
- Giraud, F., p. Lachassagne, et al. (2000).** Etude hydrologique et hydrogéologique du marais de Rochefort. *BRGM/RP 50247-Fr.* France: 121.
- Gouaidia L. (2000).** *Approche hydrochimique d'une nappe en zone semi-aride. Cas de la nappe alluviale de Tébessa*, Mém. Magister, 91 p, Annaba.
- Gouaidia L. (2008).** influence de la lithologie et des conditions Climatiques sur la variation des paramètres Physico –chimiques des eaux d'une nappe en Zone semi-aride, cas de la nappe de Meskinia. Nord-Est Algérien. Thèse de doctorat es science. Université Badji Mokhtar- Annaba.131P.
- Guillermo A., Mendoza et Phil M., (2000)** Application de l'analyse multicritère à l'évaluation des critères et indicateurs. Manuels de critères et indicateurs pour la gestion durable des forêts. Publié par : Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad) Département des forêts TA 10 – C.
- James, B., (2008).** La prévention des catastrophes : le rôle de l'UNESCO. Organisation des Nations Unies pour l'Éducation, la Science et la culture, Paris. 49 pages
- Jourda J.P., Saley M.B. , Djagoua E.V. Kouamé , K.J. , Biémi J. et Razack M. (2006).** Utilisation des données ETM+ de Landsat et d'un SIG pour l'évaluation du potentiel en eau souterraine dans le milieu fissuré précambrien de la région de Korhogo (nord de la Côte d'Ivoire) : approche par analyse multicritère et test de validation. *Téledétection*,5, 339-357.
- Jourda J. P. et al (2007).** Evaluation du degré de protection des eaux souterraines : vulnérabilité à la pollution de la nappe de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire) par la méthode DRASTIC.
- Kachi S. (2007).** *Vulnérabilité de la nappe alluviale de Tébessa-Morsott face aux polluants*. Thèse de doctorat, Univ. Badji Mokhtar, Algérie, 163 p.
- Kassahun, Yared, and Tesfu Kebedee. (2012), Application of Principal Component Analysis in Surface Water Quality Monitoring. Principal Component Analysis - Engineering Applications.
- Kreis N., (2004)** Modélisation des crues des rivières de moyenne montagne pour la gestion intégrée du risque d'inondation application a la vallée de la Thur (Haut-Rhin). Thèse de doctorat à l'Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg.
- Kowalski W.M. Hamimed M. et Pharisat A. (2002).** Les étapes d'effondrement des grabens dans les confins Algéro-tunisiens. *Bull. Serv. Géol. Algérie.*, (13), 2, 131-152.
- Kruskal, J. B. (1964).** Multidimensional Scaling by Optimizing Goodness of Fit to a Nonmetric Hypothesis. *Psychometrika* 29, N° 1

- LANDIS, J. T. & KOCH, G. G. 1977.** The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, 33, 159-174.
- Laouar S. Laouar R. Boyce A.J. Zerbazi A. et Arrouche Y. (2004).** Rapports isotopiques du soufre de l'oxygène et du carbone dans le massif de Boujaber, NE algérien : Origine des minéralisation) pb-Zn-Ba et Source des fluides. *Bulletin du service Géologique de l'Algérie*. Vol.15, n°1, p.3-25.
- Latifi, & S. Chaab, (2017).** Evaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines, selon les méthodes DRASTIC et GOD, dans la plaine alluviale de Guelma, Nord-Est Algérien". *Rev. Sci. Technol.*, Synthèse 34: pp. 48 -62.
- Lamarre, D. 2008.** Climat et risques, changements d'approches. Lavoisier.
- Ledoux, B.(2006) : « La gestion du risque inondation », Edition Tec et Doc.
- Mahapatra, S. S., Mrutyunjaya S., Patel R. K. , Biranchi N. P. (2012).** Prediction of Water Quality Using Principal Component Analysis. *Water Quality, Exposure and Health* 4, no. 2: 93–104.
- Manolova A. (2011).** Catégorisation par mesures de dissimilitude et caractérisation d'images en multi échelle. PhD diss.
- Marion T. (2012).** Cartographie du risque d'inondation en milieu Urbain adaptée à la gestion de crise Analyse préliminaire. Thèse de Doctorat. Institut national de la recherche scientifique Centre Eau Terre Environnement. Québec. p103.
- Masek J.G., Lindsay F.E., Goward S.N., (2000).** « Dynamics of urban growth in the ashington DC metropolitan area, 1973–1996, from Landsat observations », *International Journal of Remote Sensing*, vol. 21, n° 18, p. 3473-3486.
- Mishra, A. (2010).** Assessment of Water Quality Using Principal Component Analysis: A Case Study of the River Ganges." *Journal of Water Chemistry and Technology* 32, no. 4: 227–234. doi: 10.3103/s1063455x10040077.
- BATCHI M., Al KARKOURI J., FENJIRO I. et El MAAQILI M.(2017),** Étude comparative de deux modèles (DRASTIC et SI) pour l'évaluation de la sensibilité de la nappe phréatique de Mnasra (Maroc nord-occidental) à la pollution d'origine agricole , *Physio-Géo*, Volume 11 , 43-64.
- Othmanine A. (1987).** Les minéralisations en fluorine, barytine, Pb, Zn et fer sidéritique autour du fossé de Tebessa-Morsott (Algérie). Relation entre paléogéographie aptienne, diapirisme, structure et métallogénie. Thèse de 3ème Cycle, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, France, 221 p.
- 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 fig., 1994.
- Pulvirenti, L., Chini, M., Pierdicca, N., Guerriero, L., Ferrazzoli, P.(2011).** Flood monitoring using multi-temporal COSMO-SkyMed data: Image segmentation and signature interpretation. *Remote Sensing of Environment*, 115: 990-1002.
- Ribeiro L. (2000).** Desenvolvimento de um índice para avaliar a susceptibilidade de dos aquíferos à contaminação. Note interne, ERSHA-CVRM, Lisbonne, Portugal, 8 p.
- Rodier J. (1978).** *L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer ; chimie, physico-chimie, bactériologie, biologie*, Dunod Tech, Paris, 1135 p.
- Rouvier H. Perthuisot V. et Mansouri A. (1985).** Pb-Zn Deposits and salt-bearing diapirs in Southern Europe and North Africa. *Economic Geology*, 80, pp. 666-687.

- Salomon V. A. P et Montevechi J. A. B., (2001)** A compilation of comparisons on the analytic hierarchy process and others multiple criteria decision making methods: some cases developed in Brazil». Proceedings of the 6th ISAHP, Berne, Switzerland, pp 413-420.
- Sam U., Shamsi., (2002)** GIS applications in floodplain management, IN: 22ND annual ESRI international user conference, JULY 8–12, SAN DIEGO, CA: ESRI.
- Seghir K. (2008).** Vulnérabilité à la pollution, protection des ressources en eaux et gestion active du sous-système aquifère de Tébessa Hammamet (Est Algérien). Université badji mokhtar-annaba. 151 p.
- Strojexport. 1978.** Prospection géophysique par la méthode électrique dans la plaine de Tébessa, Prague. Opération N° 5.391.1.129.00.01.
- Thibiéroz J. et Madre M. (1976).** Le gisement de sidérite du Dj. Ouenza (Algérie) est contrôlé par un golf de mer aptienne. Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle de l'Afrique du nord. 67 :3-4.
- Thomas F. (1975).** Annaba et sa région. Editions Masson et Cie ;642 P.
- Vila J.M. 1980.** La chaîne Alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro-Tunisiens. Thèse de Doctorat d'état, Université pierre et Marie Curie, Paris VI, France, 665 P.
- Waegeningh, Eds.,** Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutions. Committee on Hydrogeological Research, Hague, 69-86.
- Yerel, Suheyla, and Huseyin Ankara. (2010).** Assessment of Water Quality Parameters by Using the Multidimensional Scaling Analysis. E-Journal of Chemistry 7, no. 4 , 1274–1277.
- Zereg S. (2010).** Impact des retours d'eau d'irrigation sur la ressource en eau souterraine des régions semi arides, exemple des plaines de Tébessa, Chéria et El Ma El Abiod, Est Algérien. Université Colonel Hadj Lakhdar – Batna. 140 P.
- Zhang, Jin. (2007).** Visualization for information retrieval. Springer Science & Business Media, Vol. 23.

ANNEXES

Annexe Chapitre I

2ème partie

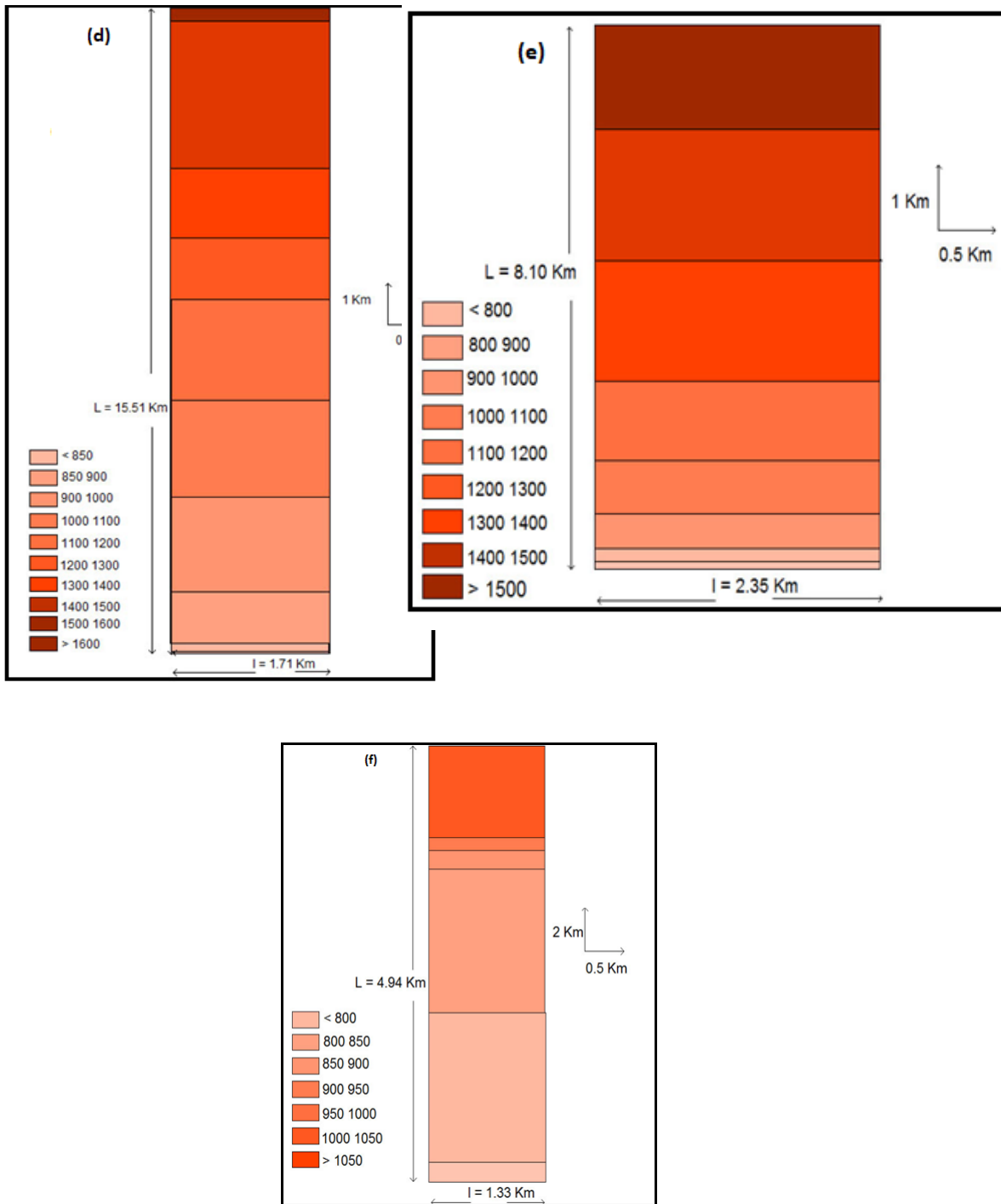


Figure 1 : Les rectangles équivalents des Oueds Rafana (d) , Oued Segui (b) et Oued Rezala (f) .

Tableau 1 : Répartition en pourcentage de la surface élémentaire du SB2

Tranche d'altitude	ΔH (m)	H_i (m)	Superficie partielle (Km2)	Superficie partielle (%)	$H_i \times S_i$	Altitude (m)	Superficie cumulée (%)
				0		1550	0
805-850	15	827	3.60	12.17	2977.2	1500	12.17
850-900	50	875	2.83	9.56	2476.25	1400	21.73
900-1000	100	950	5.65	19.10	5367.5	1300	40.83
1000-1100	100	1050	3.45	11.66	362250	1200	52.49
1100-1200	100	1150	3.81	12.88	4381.5	1100	65.37
1200-1300	100	1250	3.51	11.86	4387.5	900	77.23
1300-1400	100	1350	3.98	13.45	5373	800	90.68
1400-1500	100	1450	2.51	8.48	3639.5	850	99.16
1500-1550	25	1525	0.24	0.81	366	805	100

Tableau 2 : Répartition en pourcentage de la surface élémentaire du SB3

Tranche d'altitude	ΔH (m)	H_i (m)	Superficie partielle (Km2)	Superficie partielle (%)	$H_i \times S_i$	Altitude	Superficie cumulée (%)
						1631	0
795-800	5	797.5	0.18	0.51	179.46	1600	0.04
800-900	100	850	8.28	22.76	7038	1500	2.02
900-1000	100	950	3.83	10.52	3638.5	1400	9.81
1000-1100	100	1050	3.86	10.60	4053	1300	25.43
1100-1200	100	1150	5.66	15.55	6509	1200	40.07
1200-1300	100	1250	5.33	14.64	6662.5	1100	55.63
1300-1400	100	1350	5.69	15.62	7681.5	1000	66.22
1400-1500	100	1450	2.83	7.78	4103.5	900	76.74
1500-1600	100	1550	0.72	1.99	1116	800	99.49
1600-1631	31	1615	0.01	0.04	16.15	795	100

Tableau 3 : Répartition en pourcentage de la surface élémentaire du SB4

Tranche d'altitude	ΔH (m)	H_i (m)	Superficie partielle (Km2)	Superficie partielle (%)	$H_i \times S_i$	Altitude	Superficie cumulée (%)
						1505	0
830-900	70	815	2.71	19.57	2289.95	1500	0.47
900-1000	100	950	3.27	23.58	3106.5	1400	3.21
1000-1100	100	1050	3.18	22.94	3339	1300	10.24
1100-1200	100	1150	2.01	14.49	2311.5	1200	19.23
1200-1300	100	1250	1.27	9.19	1587.5	1100	33.92
1300-1400	100	1350	0.98	7.04	1323	1000	56.86
1400-1500	100	1450	0.38	2.74	551	900	80.43
1500-1505	15	1503	0.07	0.47	105.21	830	100

Tableau 4 : Répartition en pourcentage de la surface élémentaire du SB5.

Tranche d'altitude	ΔH (m)	H_i (m)	Superficie partielle (Km2)	Superficie partielle (%)	$H_i \times S_i$	Altitude (m)	Superficie cumulée (%)
						1100	0
790-800	10	795	0.24	3.65	190.8	1050	3.65
800-850	50	835	2.18	33.23	1820.3	1000	36.88
850-900	50	875	2.16	32.92	1890	950	69.8
900-950	50	925	0.92	14.02	851	900	83.82
950-1000	50	975	0.51	7.77	497.25	850	91.59
1000-1050	70	1025	0.41	6.25	420.25	800	97.84
1050-1100	50	1075	0.14	2.13	150.5	790	100

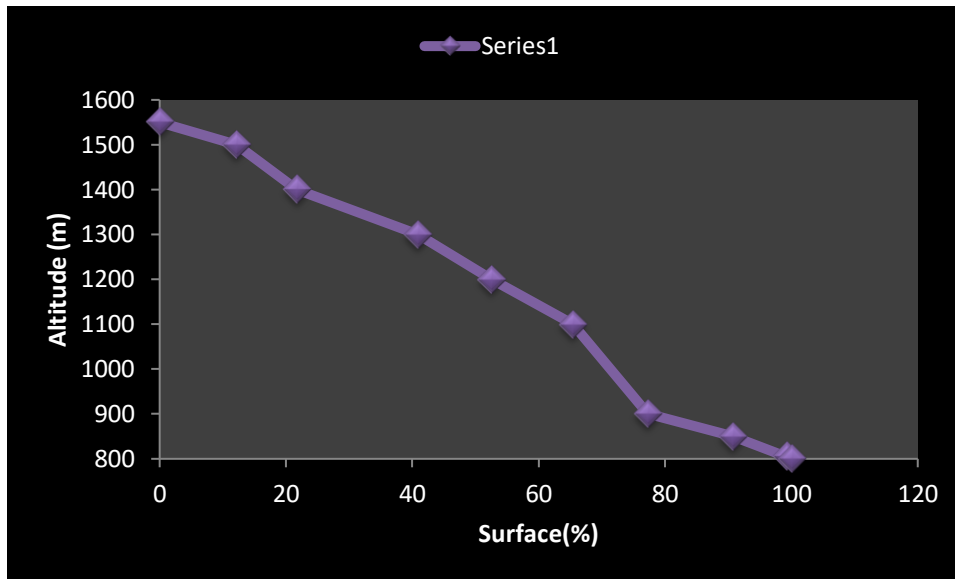


Figure 2 : la courbe hypsométrique d'oued Nages.

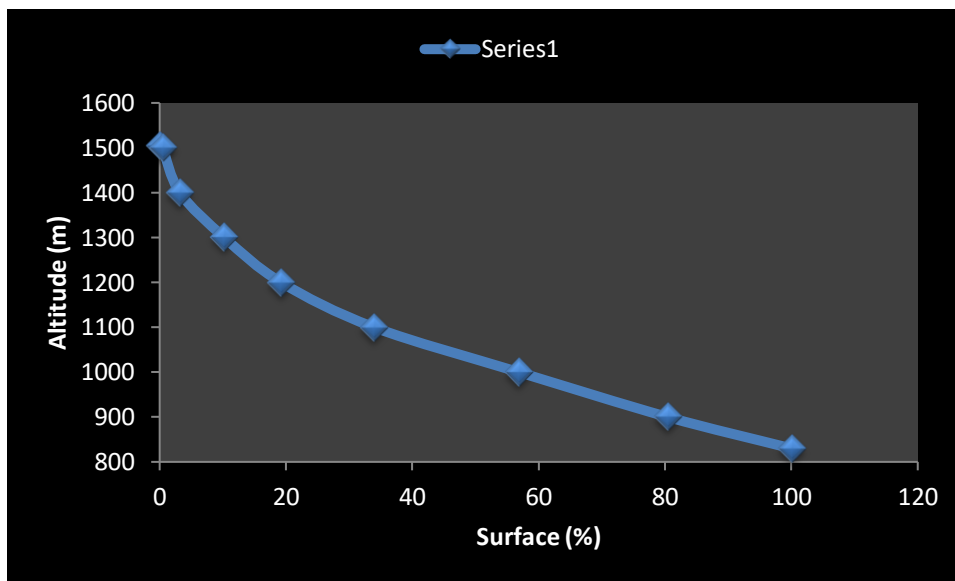


Figure 3 : La courbe hypsométrique d'oued Refana.

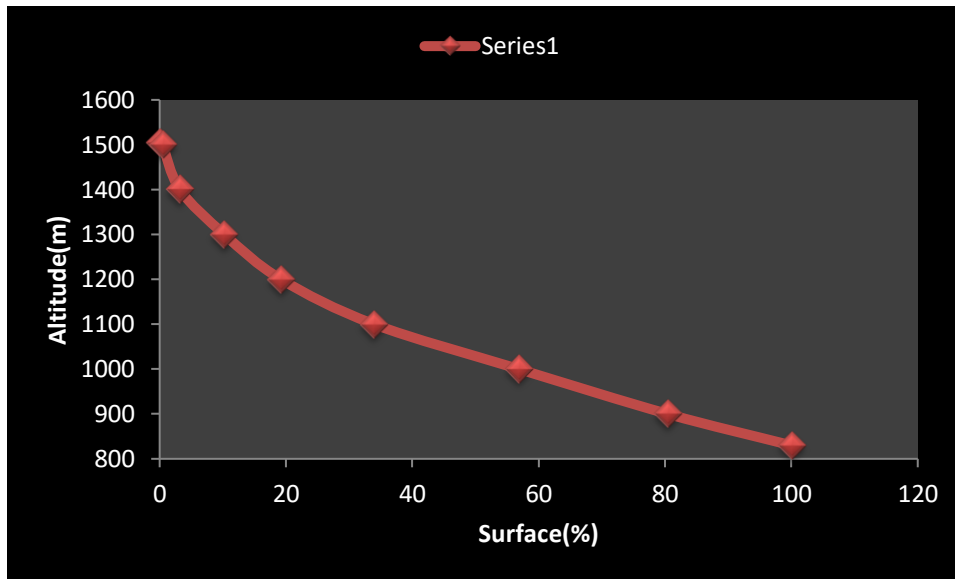


Figure 4 : la courbe hypsométrique d'oued Segui.

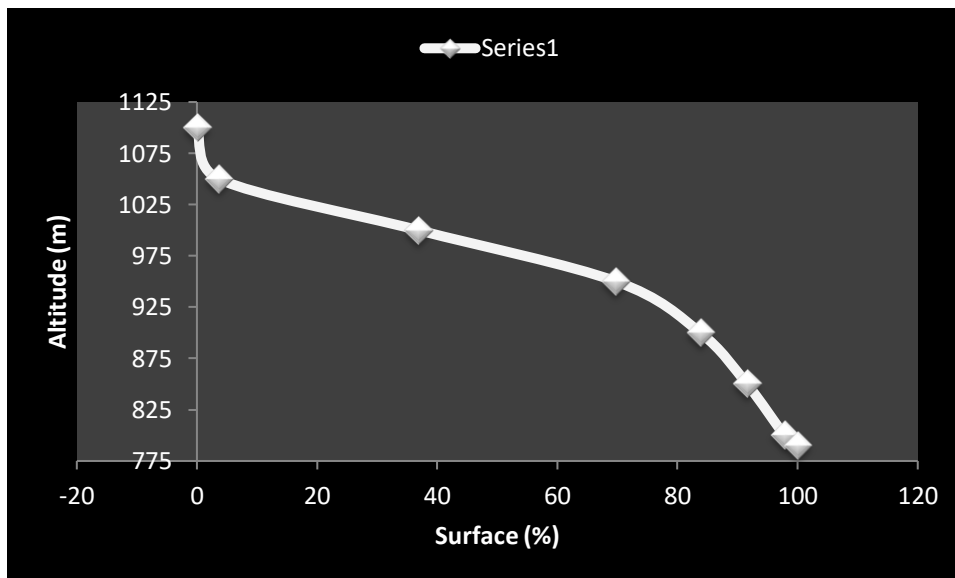


Figure 5 : la courbe hypsométrique d'oued Rezala.

Annexe

Chapitre II partie II

Tableau 1 : Ajustement à la loi de Gumbel (Station de Tebessa)

Ordre de classement	Valeur de départ	Valeur classée	Fréquence expérimentale	Variable réduite	Valeur théorique
1	48.7	17.5	0.012	-1.483	
2	30.3	19.8	0.037	-1.196	
3	94	21.5	0.061	-1.029	
4	50.2	21.8	0.085	-0.900	
5	53.4	22	0.110	-0.793	
6	35.3	22.4	0.134	-0.698	
7	73.1	25.3	0.159	-0.611	
8	43.5	27	0.183	-0.530	
9	27	27	0.207	-0.453	
10	29.1	29	0.232	-0.380	
11	32.2	29.1	0.256	-0.309	
12	46.8	30	0.280	-0.240	
13	22	30.3	0.305	-0.172	
14	58	31.8	0.329	-0.105	
15	21.5	32.2	0.354	-0.039	
16	30	33.2	0.378	0.028	
17	22.4	33.2	0.402	0.094	
18	67.3	34	0.427	0.161	
19	59.2	34.5	0.451	0.228	
20	43.8	35.3	0.476	0.297	
21	25.3	36	0.500	0.367	
22	21.8	43.5	0.524	0.438	
23	27	43.8	0.549	0.511	
24	53	45.3	0.573	0.586	
25	19.8	46.8	0.598	0.664	
26	31.8	48.7	0.622	0.745	
27	33.2	49.2			
28	45.3	50.2			
29	17.5	53			

30	29	53.4	0.646	0.829	
31	34	57	0.671	0.918	
32	74.1	58	0.695	1.012	
34	33.2	58	0.720	1.111	
35	49.2	59.2	0.744	1.218	
36	36	63	0.768	1.333	
37	24	64.9	0.817	1.599	
38	63	67.3	0.841	1.757	
39	34.5	73.1	0.866	1.938	
40	64.9	74.1	0.890	2.152	
41	57	94	0.915	2.417	
			0.939	2.766	
			0.963	3.290	
			0.988	4.401	

Tableau 2: Ajustement à la loi de Galton (Station de Tebessa)

Ordre de classement	Valeur de départ	Valeur classée	Fréquence expérimentale	Variable réduite	Valeur théorique
1	48.7	17.5	0.012	-2.252	
2	30.3	19.8	0.037	-1.787	
3	94	21.5	0.061	-1.547	
4	50.2	21.8	0.085	-1.377	
5	53.4	22	0.110	-1.221	
6	35.3	22.4	0.134	-1.112	
7	73.1	25.3	0.159	-1.002	
8	43.5	27	0.183	-0.901	
9	27	27	0.207	-0.821	
10	29.1	29	0.232	-0.737	
11	32.2	29.1	0.256	-0.651	
12	46.8	30	0.280	-0.580	
13	22	30.3	0.305	-0.510	
14	58	31.8	0.329	-0.449	
15	21.5	32.2	0.354	-0.375	
16	30	33.2	0.378	-0.312	
17	22.4	33.2	0.402	-0.258	
18	67.3	34	0.427	-0.185	
19	59.2	34.5	0.451	-0.120	
20	43.8	35.3	0.476	-0.060	
21	25.3	36	0.500	0.000	
22	21.8	43.5	0.524	0.060	
23	27	43.8	0.549	0.120	
24	53	45.3	0.573	0.185	
25	19.8	46.8	0.598	0.258	
26	31.8	48.7			
27	33.2	49.2			
28	45.3	50.2			

29	17.5	53	0.622	0.312	
30	29	53.4	0.646	0.375	
31	34	57	0.671	0.449	
32	74.1	58	0.695	0.510	
34	33.2	58	0.720	0.580	
35	49.2	59.2	0.744	0.651	
36	36	63	0.768	0.737	
37	24	64.9	0.817	0.821	
38	63	67.3	0.841	0.901	
39	34.5	73.1	0.866	1.002	
40	64.9	74.1	0.890	1.112	
41	57	94	0.915	1.377	
			0.939	1.547	
			0.963	1.787	
			0.988	2.252	

Tableau 3: Pluie de courte durée et leurs intensités à différentes fréquences.

	0.990	0.980	0.950	0.900	0.800	0.50
	100	50	20	10	5	2
1	42.12	36.69	31.76	27.24	22.68	15.98
2	25.58	22.28	19.29	16.54	13.77	9.70
3	19.10	16.63	14.40	12.35	10.28	7.24
4	15.53	13.52	11.71	10.04	8.36	5.89
5	13.22	11.52	9.97	8.55	7.12	5.01
6	11.60	10.10	8.74	7.50	6.24	4.40
7	10.38	9.04	7.82	6.71	5.59	3.94
8	9.43	8.21	7.11	6.10	5.07	3.58
9	8.66	7.54	6.53	5.60	4.66	3.28
10	8.03	6.99	6.05	5.19	4.32	3.04
11	7.49	6.53	5.65	4.85	4.03	2.84
12	7.04	6.13	5.31	4.55	3.79	2.67
13	6.64	5.79	5.01	4.30	3.58	2.52
14	6.30	5.49	4.75	4.07	3.39	2.39
15	5.99	5.22	4.52	3.88	3.23	2.27
16	5.72	4.98	4.32	3.70	3.08	2.17
17	5.48	4.77	4.13	3.54	2.95	2.08
18	5.26	4.58	3.96	3.40	2.83	1.99
19	5.06	4.40	3.81	3.27	2.72	1.92
20	4.87	4.24	3.67	3.15	2.62	1.85
21	4.70	4.10	3.55	3.04	2.53	1.78
22	4.55	3.96	3.43	2.94	2.45	1.73
23	4.41	3.84	3.32	2.85	2.37	1.67
24	4.27	3.72	3.22	2.76	2.30	1.62

Tableau 4 : Pluies de courte durée pour le sous bassin SB2

Fréquence(%)	0.9	0.95	0.98	0.99
Période de retour (an)	10	20	50	100
Pjmax (mm)	66.33	77.34	89.33	102.55
Le temps de concentration Tc(h)	2.53	2.53	2.53	2.53
P _{tc} (mm)	35.33	41.19	47.58	54.62

Tableau 5 : Pluies de courte durée pour le sous bassin SB3

Fréquence(%)	0.9	0.95	0.98	0.99
Période de retour (an)	10	20	50	100
Pjmax (mm)	66.33	77.34	89.33	102.55
Le temps de concentration Tc(h)	3.09	3.09	3.09	3.09
Pct (mm)	37.36	43.56	50.32	57.77

Tableau 6 : Pluies de courte durée pour le sous bassin SB4

Fréquence(%)	0.9	0.95	0.98	0.99
Période de retour (an)	10	20	50	100
Pjmax (mm)	66.33	77.34	89.33	102.55
Le temps de concentration Tc(h)	1.89	1.89	1.89	1.89
Pct (mm)	32.56	37.96	43.85	50.34

Tableau 7 : Pluies de courte durée pour le sous bassin SB5

Fréquence(%)	0.9	0.95	0.98	0.99
Période de retour (an)	10	20	50	100
Pjmax (mm)	66.33	77.34	89.33	102.55
Le temps de concentration Tc(h)	1.80	1.80	1.80	1.80
Pct (mm)	32.12	37.45	43.25	49.65

Tableau 8 : Débits de crues au sous bassin n°2.

Période de retour	Formule de Mallet Gauthier	Formule de Turazza	Formule de Giandotti	Formule de Sokolovski
an	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
10	45.22	74.58	76.62	90.20
20	52.37	93.64	89.33	113.26
50	60.54	115.89	103.18	140.18
100	66.05	141.91	118.45	171.65

Tableau 9 : Débits de crues au sous bassin n°3.

Période de retour	Formule de Mallet Gauthier	Formule de Turazza	Formule de Giandotti	Formule de Sokolovski
an	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
10	44.36	79.44	81.16	96.69
20	51.55	99.75	94.63	120.65
50	59.74	123.46	109.31	149.33
100	65.25	151.19	125.5	159.35

Tableau 10 : Débits de crues au sous bassin n°4.

Période de retour	Formule de Mallet Gauthier	Formule de Turazza	Formule de Giandotti	Formule de Sokolovski
an	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
10	25.59	43.14	39.73	52.18
20	29.31	54.17	46.32	65.52
50	33.61	67.04	53.50	70.20
100	36.52	82.09	61.41	99.30

Tableau 11 : Débits de crues au sous bassin n°5.

Période de retour	Formule de Mallet Gauthier	Formule de Turazza	Formule de Giandotti	Formule de Sokolovski
an	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)
10	16.45	21.23	19.01	25.68
20	18.67	26.66	22.50	32.24
50	21.25	32.99	25.46	39.90
100	23.01	40.39	30.06	48.86

Tableau 12 : Hydrogrammes des crues de différentes périodes de retour sous bassin N°2.

T(h)	(t/tc)²	Q (10%)	Q (5%)	Q (2%)	Q (1%)
0.5	0.03905701	3.522942086	4.42359668	5.47501133	6.70413536
1	0.15622803	14.09176835	17.6943867	21.9000453	26.8165414
1.5	0.35151307	31.70647878	39.8123701	49.2751019	60.3372182
2	0.62491212	56.36707338	70.7775469	87.6001812	107.266166
2.5	0.97642519	88.07355216	110.589917	136.875283	167.603384
2.53	1	90.2	113.26	140.18	171.65
td-t	(td-t/td)³	Q (10%)	Q (5%)	Q (2%)	Q (1%)
4.56	0.731885221	66.0160469	82.8933201	102.59567	125.628098
4.06	0.516566871	46.5943318	58.5063638	72.412344	88.6687034
3.56	0.348255868	31.4126793	39.4434597	48.8185076	59.7781198
3.06	0.221163131	19.9489144	25.0489362	31.0026477	37.9626514
2.56	0.129499576	11.6808617	14.6671219	18.1532505	22.2286022
2.53	0.125	11.275	14.1575	17.5225	21.45625
2.06	0.067476121	6.08634615	7.6423455	9.45880269	11.5822762
1.56	0.029303685	2.64319243	3.31893542	4.10779063	5.02997761
1.06	0.009193186	0.82922537	1.04122024	1.28870081	1.57801037
0.56	0.001355541	0.12226976	0.15352853	0.19001968	0.23267854
0.06	1.66726E-06	0.00015039	0.00018883	0.00023372	0.00028618
0	0	0	0	0	0

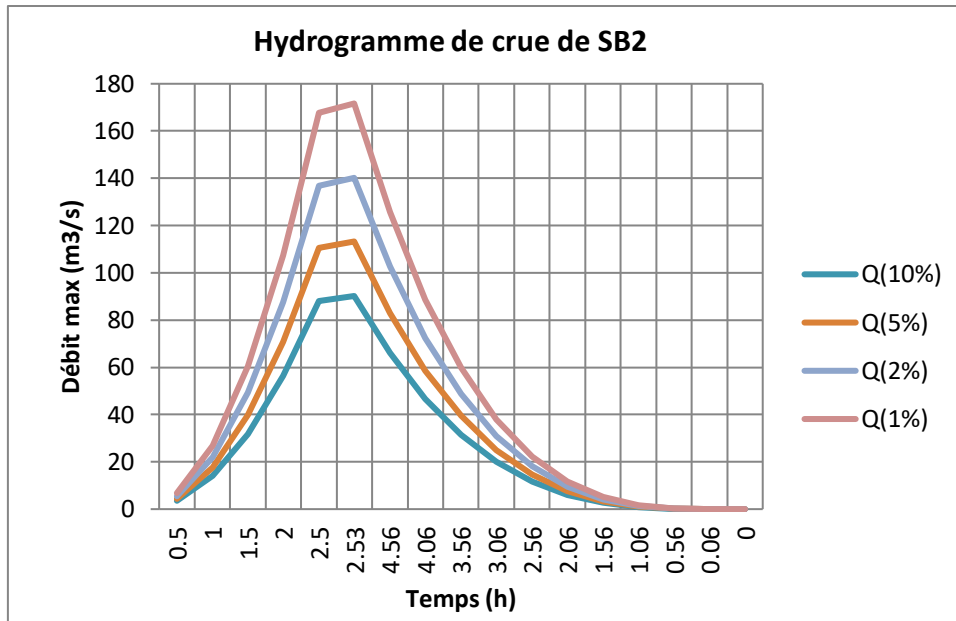


Figure 1 : l'hydrogramme de crue de SB2.

Tableau1 13 : Hydrogrammes des crues de différentes périodes de retour sous bassin n°2.

T(h)	(t/tc)²	Q (10%)	Q (5%)	Q (2%)	Q (1%)
0.5	0.02669913	2.58153915	3.22125037	3.9869815	4.25397283
1	0.10679653	10.3261566	12.8850015	15.947926	17.0158913
1.5	0.2402922	23.2338524	28.9912534	35.8828335	38.2857555
2	0.42718612	41.3046264	51.540006	63.791704	68.0635653
2.5	0.66747832	64.5384788	80.5312593	99.6745376	106.349321
3	0.96116878	92.9354095	115.965013	143.531334	153.143022
3.06	1	96.69	120.65	149.33	159.33
td-t	(td-t/td)³	Q (10%)	Q (5%)	Q (2%)	Q (1%)
5.68	0.776389372	75.0690884	93.6713778	115.938225	123.702119
5.18	0.588875999	56.9384203	71.0478893	87.9368529	93.8256129
4.68	0.434282305	41.990756	52.3961601	64.8513766	69.1941996
4.18	0.309430714	29.9188558	37.3328157	46.2072886	49.3015957
3.68	0.211143653	20.4154798	25.4744817	31.5300817	33.6415182
3.18	0.136243545	13.1733883	16.4377837	20.3452485	21.707684
2.68	0.081552815	7.88534169	9.83934714	12.1782819	12.99381
2.18	0.043893888	4.24410007	5.29579764	6.55467436	6.99361325
1.68	0.02008919	1.94242375	2.42376074	2.9999187	3.2008106
0.68	0.001332175	0.12880801	0.16072693	0.19893371	0.21225546
0.18	2.47088E-05	0.0023891	0.00298112	0.00368977	0.00393686
0	0	0	0	0	0

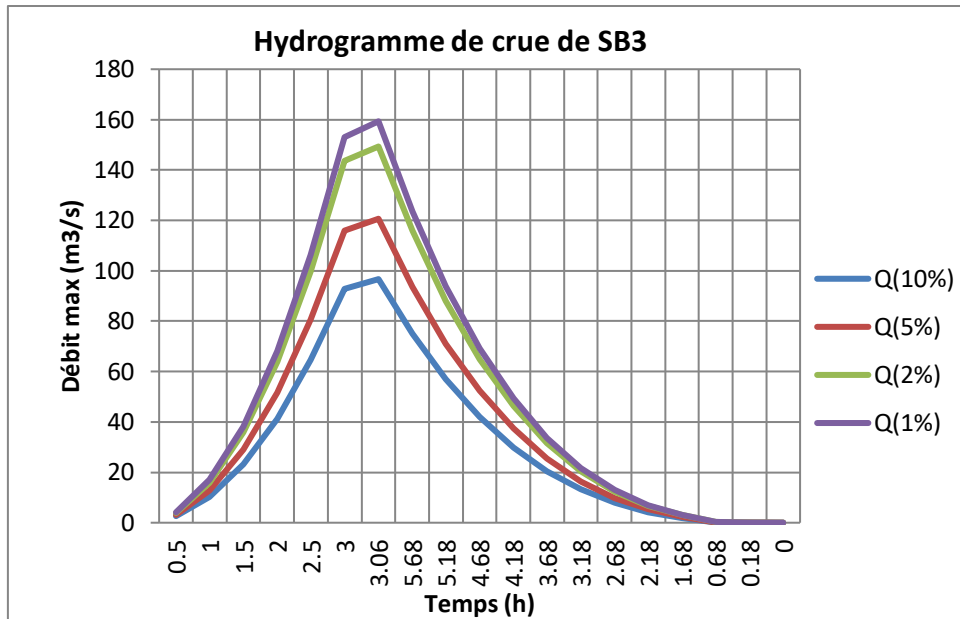


Figure 2 : l'hydrogramme de crue de SB3.

Tableau 14 : Hydrogrammes des crues de différentes périodes de retour sous bassin n°4.

T(h)	$(t/t_c)^2$	Q (10%)	Q (5%)	Q (2%)	Q (1%)
0.5	0.06998684	3.65191344	4.58553792	4.91307634	6.94969346
1	0.27994737	14.6076538	18.3421517	19.6523054	27.7987738
1.5	0.62988158	32.867221	41.2698413	44.2176871	62.5472411
1.89	1	52.18	65.52	70.2	99.3
td-t	$(td-t/t_d)^3$	Q (10%)	Q (5%)	Q (2%)	Q (1%)
3.28	0.65335036	34.0918215	42.8075153	45.8651949	64.8776903
2.87	0.40786158	21.2822171	26.7230906	28.6318828	40.5006547
2.37	0.22967416	11.9843978	15.0482512	16.1231263	22.8066444
1.98	0.13392531	6.98822292	8.77478662	9.4015571	13.2987838
1.37	0.04436381	2.31490344	2.90671663	3.11433925	4.40532603
0.87	0.01136122	0.59282831	0.74438695	0.79755745	1.12816887
0.37	0.00087392	0.04560121	0.05725932	0.06134927	0.08678038
0	0	0	0	0	0

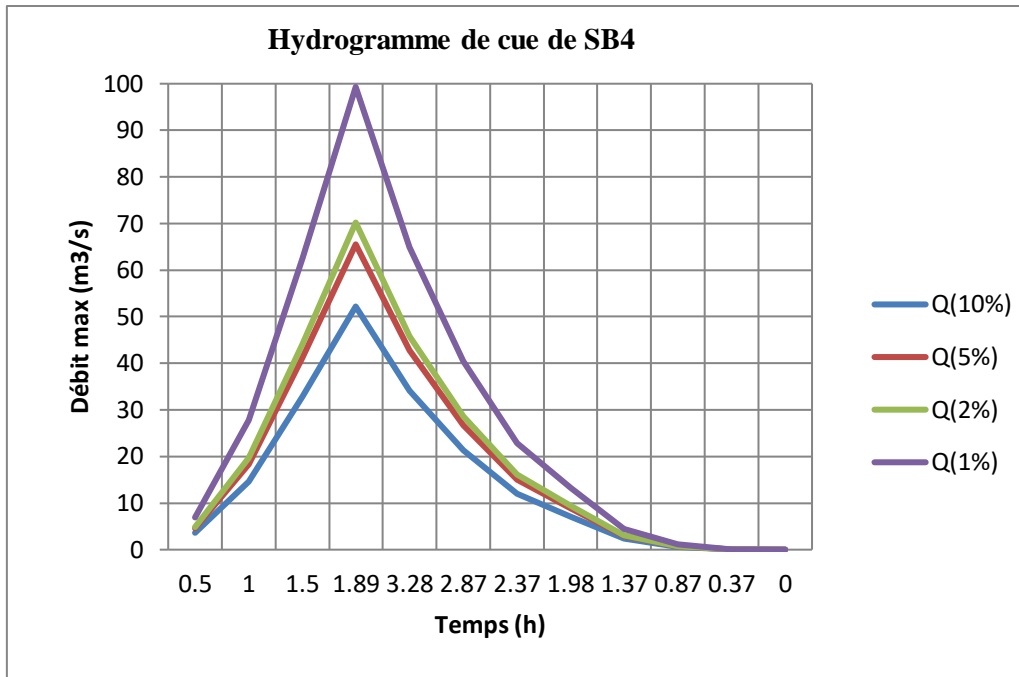


Figure 3 : l'hydrogramme de crue de SB4.

Tableau 16 : Hydrogrammes des crues de différentes périodes de retour

sous bassin n°5.

T(h)	$(t/Tc)^2$	Q (10%)	Q (5%)	Q (2%)	Q (1%)
0.5	0.07716049	1.98148148	2.48765432	3.0787037	3.77006173
1	0.30864198	7.92592593	9.95061728	12.3148148	15.0802469
1.5	0.69444444	17.83333333	22.3888889	27.70833333	33.9305556
1.8	1	25.68	32.24	39.9	48.86
td-t	$(td-t/td)^3$	Q (10%)	Q (5%)	Q (2%)	Q (1%)
3.1	0.6385245	16.3973097	20.5860305	25.4771283	31.198308
2.6	0.3767147	9.67403292	12.1452812	15.0309156	18.4062791
2.1	0.1984954	5.09736111	6.39949074	7.91996528	9.6984838
1.8	0.1250000	3.21	4.03	4.9875	6.1075
1.44	1.3310000	1.94242375	2.42376074	2.9999187	3.2008106
1.2	0.2160000	0.12880801	0.16072693	0.19893371	0.21225546
1.02	0.0010000	0.0023891	0.00298112	0.00368977	0.00393686
0	0	0	0	0	0

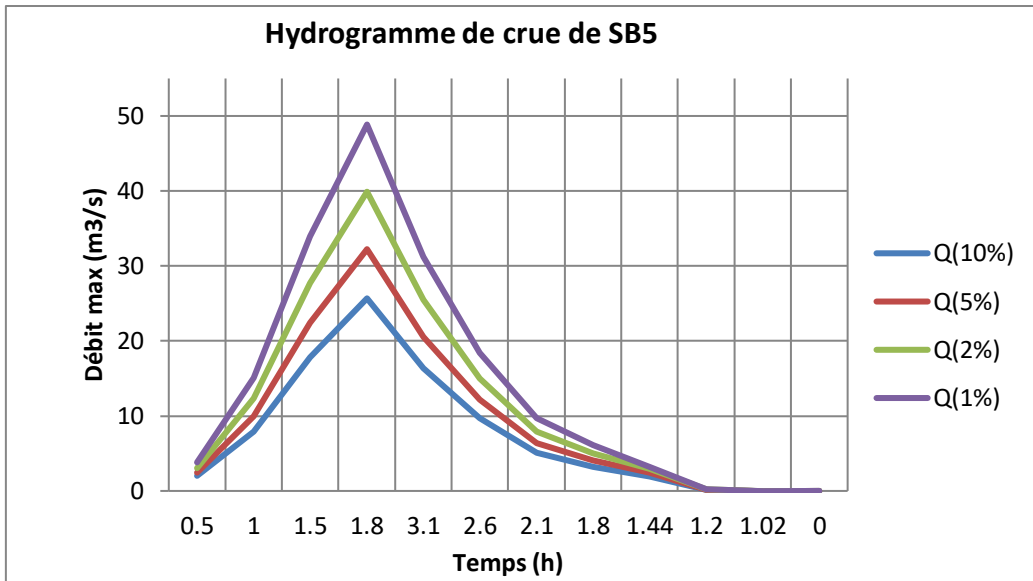


Figure 4 : l'hydrogramme de crue de SB5.