

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة
Année 2024

Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers

Département de Géologie

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

Doctorat 3^{ème} Cycle

Domaine : Sciences de la Terre et de l'Univers

Filière : Géologie

Spécialité : Hydrogéologie

*Gestion des ressources en eau du bassin versant
transfrontalier (Medjerda et Mellegue) face à la salinisation des
eaux générée par la géologie et les changements climatiques*

Par : BOUKLAB Mohammed

Devant le Jury

Président :	HANI Azzedine	Pr.	Univ. Badji Mokhtar. Annaba.
Encadreur :	BOUGHERIRA Nabil	Pr.	Univ. Badji Mokhtar. Annaba.
Co-Encadreur :	DJABRI Larbi	Pr.	Univ. Badji Mokhtar. Annaba.
Examineurs :	FEHDI Chemseddine	Pr.	Univ. Larbi Tebessi. Tébessa.
	BAALI Fethi	Pr.	Univ. Larbi Tebessi. Tébessa.
	TRABELSI Fatma	MCA.	Univ. Jendouba. Tunis.

Année universitaire : 2023/2024

Résumé

La gestion durable des ressources en eaux souterraines de plus en plus cruciale dans les politiques publiques et au sein des entreprises, constitue toutefois un défi majeur dans sa concrétisation pratique. La prise de décision en matière de gestion des eaux souterraines nécessite une évaluation approfondie des différents secteurs climatiques, environnementaux et économiques. La présentation de ces résultats aux décideurs est essentielle pour favoriser des choix éclairés et durables, mettant ainsi en évidence l'importance de l'analyse multicritères dans ce processus décisionnel complexe.

L'objectif de cette étude était de développer des stratégies de gestion durable de l'eau pour le bassin versant de la Medjerda, en intégrant des facteurs géographiques, hydrologiques, hydrogéologiques et géologiques, tout en tenant compte des changements climatiques. L'utilisation des Systèmes d'Information Géographique (SIG) a été privilégiée pour visualiser et cartographier les ressources en eau souterraine, constituant des outils décisionnels efficaces. La méthodologie a impliqué la télédétection, l'analyse multicritère, et l'analyse hiérarchique floue, avec l'intégration de données climatiques, satellitaires, géologiques, et hydrogéologiques. Cinq chapitres détaillés ont été élaborés, couvrant la description du bassin, la morphométrie, la climatologie, la cartographie des potentiels en eau souterraine, et l'évaluation de la qualité des eaux. L'étude morphométrique a été associée à une méthode de priorisation pour identifier le sous-bassin propice à la recharge des eaux souterraines.

Les résultats ont démontré une variabilité spatiotemporelle des paramètres hydro-climatiques, soulignant la nécessité d'une gestion adaptative. La cartographie du potentiel aquifère a identifié le SBV de la Medjerda (SBV-12-01) comme très favorable à la recharge, avec des zones fortes représentant la majorité de sa superficie. Les sous-bassins de Meskiana (SBV-12-02) et de Chabro (SBV-12-03), ont été classés comme ayant un potentiel faible à très faible, influencés par la précipitation. L'évaluation de la qualité des eaux a révélé une évolution similaire malgré des différences d'âge des nappes, avec des eaux de bonne qualité pour l'irrigation. En somme, la gestion durable des ressources en eau souterraine dans le bassin versant de la Medjerda nécessite une approche intégrée, combinant SIG, télédétection, et analyses multicritères. Des précautions sont essentielles avant toute utilisation des eaux souterraines, en tenant compte des variations spatiotemporelles et des spécificités de chaque sous-bassin.

Mots clés : Bassin versant de la Medjerda, télédétection, SIG, analyse morphométrique, priorisation, potentiel en eau souterraine, FAHP, salinité.

Abstract

The sustainable management of groundwater resources, increasingly crucial in public policies and within businesses, nevertheless poses a major challenge in its practical implementation. Decision-making in groundwater management requires a thorough evaluation of various climatic, environmental, and economic sectors. The presentation of these results to decision-makers is essential to promote informed and sustainable choices, thereby highlighting the importance of multicriteria analysis in this complex decision-making process.

The objective of this study was to develop sustainable water management strategies for the Medjerda watershed, integrating geographical, hydrological, hydrogeological, and geological factors, while considering climate change. The use of Geographic Information Systems (GIS) was favored for visualizing and mapping groundwater resources, serving as effective decision-making tools. The methodology involved remote sensing, multicriteria analysis, and fuzzy hierarchical analysis, integrating climate, satellite, geological, and hydrogeological data. Five detailed chapters were developed, covering basin description, morphometrics, climatology, groundwater potential mapping, and water quality assessment. Morphometric study was coupled with a prioritization method to identify the sub-basin conducive to groundwater recharge.

The results demonstrated spatiotemporal variability in hydro-climatic parameters, emphasizing the need for adaptive management. Aquifer potential mapping identified the Medjerda watershed (SBV-12-01) as highly favorable for recharge, with strong zones representing the majority of its area. The Meskiana (SBV-12-02) and Chabro (SBV-12-03) sub-basins were classified as having low to very low potential, influenced by precipitation. Water quality assessment revealed a similar evolution despite differences in aquifer ages, with water suitable for irrigation. In conclusion, sustainable management of groundwater resources in the Medjerda watershed requires an integrated approach, combining GIS, remote sensing, and multicriteria analyses. Precautions are essential before any use of groundwater, considering spatiotemporal variations and specificities of each sub-basin.

Keywords: Medjerda watershed, remote sensing, GIS, morphometric analysis, prioritization, groundwater potential, FAHP, salinity.

ملخص

الإدارة المستدامة لموارد المياه الجوفية أصبحت أكثر أهمية بشكل متزايد، في السياسات العامة وداخل الشركات، ومع ذلك، تشكل تحديًا كبيرًا في تنفيذها العملي. اتخاذ القرارات في إدارة المياه الجوفية يتطلب تقييمًا عميقًا لمختلف القطاعات المناخية، البيئية والاقتصادية. إن تقديم هذه النتائج لصناع القرارات ضروري لتعزيز اختيارات مستدامة ومستنيرة، مما يبرز أهمية التحليل متعدد المعايير في هذه العملية الصعبة لاتخاذ القرارات. كان هدف هذه الدراسة هو تطوير استراتيجيات الإدارة المستدامة لمياه حوض وادي المجردة، وذلك عن طريق الاعتماد على عوامل جغرافية، هيدرولوجية، هيدروجيولوجية وجيولوجية، مع مراعاة التغيرات المناخية. تم تفضيل استخدام أنظمة المعلومات الجغرافية لتصوير ورسم خرائط موارد المياه الجوفية، التي تعتبر أدوات فعالة لاتخاذ القرار. شملت المنهجية استخدام أداة الاستشعار عن بعد والتحليل متعدد المعايير والتحليل الضبابي التسلسلي، بدمج البيانات المناخية والفضائية والجيولوجية والهيدروجيولوجية. تم وضع خمس فصول مفصلة، تغطي وصف الحوض والمورفومتريا وعلم المناخ ورسم خرائط القدرة الجوفية وتقييم جودة المياه. تم ربط دراسة المورفومتريا بطريقة تحديد الأولويات لتحديد الحوض الفرعي الملائم لإعادة شحن المياه الجوفية. أظهرت النتائج تباين المؤشرات الهيدرو-مناخية مكانيًا وزمنيًا، مما يبرز ضرورة الإدارة التكيفية. خريطة إمكانية الأحواض المائية حددت حوض وادي المجردة (SBV-12-01) بصفة ملائم للشحن، مع وجود مناطق قوية تمثل معظم مساحته. تم تصنيف الأحواض الفرعية Meskiana (SBV-12-02) و Chabro (SBV-12-03) بأنها ذات إمكانية ضعيفة إلى ضعيفة جدًا، تتأثر بالأمطار المتساقطة. أظهر تقييم جودة المياه تطورًا مشابهًا على الرغم من اختلاف أعمار الآبار، مع مياه جيدة للري. تظهر مياه الصناعة خصائص التكلس، ولكن تتجه نحو تآكل منخفض، مما يقضي على خطر تدهور المُعدّات. في المجمل، تتطلب إدارة المستدامة لموارد المياه الجوفية في حوض وادي المجردة نهجًا متكاملًا، يجمع بين أنظمة المعلومات الجغرافية، والتحليل عن بعد، والتحليل متعدد المعايير. يجب اتخاذ الاحتياطات اللازمة قبل استخدام المياه الجوفية، مع مراعاة التغيرات المكانية والزمانية وخصوصيات كل حوض فرعي.

الكلمات المفتاحية: حوض نهر المجردة، الاستشعار عن بعد، نظام المعلومات الجغرافية، تحليل مورفومتري، الترتيب بالأولويات، الإمكانيات في المياه الجوفية، FAHP، الملوحة.

Dédicace

Je dédie cette thèse à :

Mon défunt grand-père

Ma très chère grand-mère

Ma formidable maman et mon cher papa

À ma chère femme

À Mes adorables frères et sœurs

À mes neveux et nièces.

À Mes tantes

À Pr. Djidel M. et toute sa famille

À tous mes amis

Remerciement

Avant de commencer la présentation de ce travail il est essentiel de rappeler et de reconnaître les efforts, l'aide, et les contributions reçus de quiconque pour l'élaboration de ce document, avant tout. Je tiens à exprimer ma gratitude à DIEU, qui a rendu ce travail possible et qui m'a facilité la tâche en mettant sur mon chemin des gens qui m'ont énormément aidé et soutenu.

*Un spécial remerciement à mon directeur de Thèse, Monsieur **BOUGHERIRA Nabil**, pour l'encadrement et la formation académique reçus, ainsi que pour son aide, notamment au niveau administratif. Je voudrais également adresser ma profonde gratitude pour monsieur **DJABRI Larbi** mon Co-encadreur de thèse pour la confiance qu'il m'a accordé dès le premier jour de ma réussite au concours de doctorat, il a facilité mon intégration dans le projet de collaboration Algéro-belge. Qu'il soit assuré de mes vifs remerciements.*

*Je remercie également mon promoteur en Belgique, Pr. **Marnik Vanclooster**. Un grand merci de m'avoir accueilli dans votre laboratoire et d'avoir facilité la réalisation de ce travail. Merci aussi pour l'encadrement et la formation académique reçus. Votre rigueur scientifique, vos suggestions pertinentes et votre engagement envers l'excellence ont indéniablement enrichi le contenu scientifique de cette thèse. Je vous serai à jamais reconnaissant.*

*Je remercie très particulièrement le Professeur **DJIDEL Mohammed**, mon directeur de mémoire au master, pour sa disponibilité tout au long de ces années de recherche, son accueil au bureau, son aide précieuse. Je lui exprime ici toute ma gratitude.*

Ma gratitude s'adresse également à tous mes enseignants tout au long des années de l'université et qui m'ont donné le savoir académique.

*Cette thèse a été réalisée sur la base de données qui ont été recueillies auprès des organismes divers, notamment la Direction de l'Hydraulique à Souk Ahras, je cite particulièrement le directeur **AOUADI Salah**, et **Mme. SAHTOUT Leila**, la Direction des Services Agricole (DSA). Qu'ils trouvent ici l'expression de mes vifs remerciements.*

*À tous mes amis et collègues du 3ème cycle de l'université d'Annaba et de l'université de Louvain la neuve, qui m'ont apporté leur soutien à un moment ou à un autre, qu'ils retrouvent ici mes sincères remerciements. Je cite plus particulièrement le docteur **KADIR Mokrane**, je ne pourrais plus oublier son aide précieuse durant les mois de stages à l'UCL.*

À tous les membres de jury d'avoir accepté d'examiner ce travail et pour leurs suggestions et remarques constructives.

Mes remerciements chaleureux à l'endroit de ma femme, pour ses encouragements et son réconfort sans relâche tout au long de la réalisation de ma thèse.

Je voudrais surtout témoigner ma profonde gratitude aux membres de ma famille, en commençant par ma grand-mère, ma mère, mon père, à tous mes frères et sœurs.

Je remercie également toute personne, qui m'ont aidé de près ou de loin pour la réalisation de ce travail.

Bouklab Mohammed

Table des matières

<i>Résumé</i>	<i>ii</i>
<i>Abstract</i>	<i>iii</i>
<i>ملخص</i>	<i>iv</i>
<i>Dédicace</i>	<i>v</i>
<i>Remerciement</i>	<i>vi</i>
<i>Table des matières</i>	<i>vii</i>
<i>Liste des figures</i>	<i>xii</i>
<i>Liste des tableaux</i>	<i>xvi</i>
<i>Liste des abréviations</i>	<i>xviii</i>
<i>Introduction générale</i>	<i>1</i>
<i>Chapitre I : Description de la zone d'étude</i>	<i>6</i>
1. <i>Présentation de la région d'étude</i>	<i>6</i>
2. <i>Classification hydrographique du territoire algérien</i>	<i>7</i>
3. <i>Aperçu socio-économique</i>	<i>9</i>
4. <i>Les caractéristiques physiques du bassin</i>	<i>11</i>
4.1. <i>Relief</i>	<i>11</i>
4.2. <i>Pentes</i>	<i>13</i>
5. <i>Occupation du sol</i> :	<i>15</i>
6. <i>Pédologie</i> :	<i>17</i>
7. <i>Aperçu géologique</i> :	<i>20</i>
7.1. <i>Mésozoïque</i>	<i>21</i>
7.1.1. <i>Le Trias</i>	<i>21</i>
7.1.2. <i>Le Jurassique</i>	<i>21</i>
7.1.3. <i>Le Crétacé</i>	<i>21</i>
7.2. <i>Cénozoïque</i>	<i>23</i>
7.2.1. <i>Le Paléogène</i>	<i>23</i>
7.3. <i>Quaternaire</i>	<i>24</i>
7.3.1. <i>Les formations anciennes</i>	<i>25</i>
7.3.2. <i>Formations récentes</i>	<i>25</i>
7.3.3. <i>Formations actuelles</i>	<i>25</i>
8. <i>Aperçu tectonique sur la région d'étude</i>	<i>26</i>
8.1. <i>Phase tectonique</i>	<i>26</i>
8.2. <i>La tectonique du Trias</i>	<i>29</i>

9. Aperçu hydrogéologique.....	29
9.1.1. La nappe superficielle (libre) du Mio-Plio-Quaternaire.....	30
9.1.2. La nappe profonde (captive) des calcaires du Maestrichtien inférieur.....	30
9.2. Synclinal de Terreguelt.....	31
9.2.1. Nappe superficielle (nappe libre du Plio-Quaternaire)	31
9.2.2. Nappe profonde (la nappe captive des calcaires du Maestrichtien supérieur)	31
9.2.3. Nappes de Sedrata-Tiffech.....	31
9.2.4. Nappes d'Oued Kebarit-Sid Fredj-Ain Zerga.....	32
9.3. Les principales aquifères constituant les plaines de Tebessa	32
9.3.1. Aquifères de la plaine de Meskiana.....	32
9.3.2. Aquifères de la plaine de Tebessa.....	33
9.3.3. Aquifères de la plaine de l'Oued Horihir	33
9.3.4. Aquifères de la plaine de l'Oued Kseub :	34
10. Conclusion :	35
Chapitre II : Étude morphométrique et priorisation du bassin	35
1. Caractéristiques morphométriques de la région	35
2. Matériels et méthodes :	37
2.1. Sources de données.....	37
2.2. Logiciels utilisés :	37
2.3. Traitement des couches thématiques	37
3. Les paramètres morphométriques	38
3.1. Paramètres basiques (Surface « A », périmètre « P » et la longueur « Lb »).....	38
3.2. Les paramètres de forme.....	41
3.2.1. Facteur de forme (Ff)	41
3.2.2. Rapport d'allongement (Re).....	42
3.2.3. Rapport de circularité (RC).....	43
3.2.4. Coefficient de compacité (KG)	44
3.3. Paramètres de relief.....	44
3.3.1. Relief du bassin.....	44
3.3.2. Rapport du relief (Rr)	47
3.3.3. Numéro de robustesse (Rn).....	48
3.3.4. Paramètres hypsométriques.....	48
3.3.5. Les indices d'inclinaison	58
3.3.6. Indice d'humidité topographique (TWI)	60

4. Réseau hydrographique	61
4.1. Extraction du réseau hydrographique et sa hiérarchisation sur ArcGIS.....	61
4.2. Caractéristiques du réseau hydrographique	63
4.2.1. Description du réseau hydrographique	63
4.2.2. Aspects linéaires	64
4.2.3. Conclusion	74
4.3. Application de la méthode de priorisation	75
4.3.1. Contexte théorique de l'outil de priorisation	75
4.3.2. Résultats et discussions.....	78
4.3.3. Conclusion	85
Chapitre III : Analyse et cartographie des paramètres climatiques et du bilan hydrique	84
1. Introduction	84
2. Cartographie des indices bioclimatiques :	85
2.1. Indice pluviothermique (Relation précipitation – température).....	85
2.2. Indice d'aridité d'Emmanuel De Martonne.....	90
3 : Bilan hydrique :	92
3.1. Calcul du bilan hydrique selon la formule de CW Thornthwaite	93
3.2. Estimation des composants du bilan hydrique	94
3.2.1. Précipitation :	94
3.2.2. La température :	98
3.2.3. Évapotranspiration potentielle (ETP) :	102
3.2.4. Évapotranspiration réelle (ETR) :	107
3.2.5. Ruissellement :	112
3.2.6. Réserve facilement utilisable (RFU) :	113
3.2.7. L'excédent (surplus d'eau) et le déficit hydrique :	119
3.2.8. Infiltration :	123
4. Conclusion :	125
Chapitre IV. Cartographie du potentiel des eaux souterraines.....	123
1. Introduction	123
2. Matériels et méthodes :	124
2.1. Préparation des données :	126
2.2. La méthode Fuzzy AHP.....	127
2.2.1. Établissement de la matrice floue de comparaison par paires :	128
2.2.2. Combinaison des méthodes MCDM avec le système d'information géographique SIG.....	131

2.3. Validation des résultats	132
3. Résultats et discussions.....	132
3.1. Analyses de facteurs sélectionnés	132
3.1.1. La pente.....	132
3.1.2. Densité de drainage « Dd »	134
3.1.3. Lithologie.....	135
3.1.4. Densité de linéaments	137
3.1.5. La précipitation.....	138
3.1.6. Occupation du sol	140
3.1.7. Le sol.....	141
3.2. Implémentation de la méthode FAHP.....	143
3.3. Zones de potentiel en eau souterraine	145
3.4. Validation.....	149
4. Conclusion	151
Chapitre V : Étude hydrochimique des eaux souterraines dans le bassin versant de la Medjerda.....	151
1. Introduction	151
2. Collecte de données et analyses hydrochimiques	151
3. Analyses des paramètres physico-chimiques	152
3.1. Les paramètres physiques.....	153
3.1.1. La conductivité électrique (CE).....	153
3.1.2. La dureté de l'eau	154
3.1.3. TDS (Total des Solides dessous en eau)	155
3.2. Variations des cations.....	156
3.2.1. Le calcium (Ca ²⁺) et le magnésium (Mg ²⁺).....	156
3.2.2. Le sodium et le potassium.....	157
3.3. Variations des anions.....	158
3.3.1. Bicarbonates (HCO ₃ ⁻).....	158
3.3.2. Le chlorure (Cl ⁻).....	158
3.3.3. Sulfate (SO ₄ ²⁻)	159
3.3.4. Nitrate (NO ₃ ⁻).....	160
4. Qualité des eaux :	160
4.1. Apport du Diagramme de Piper.....	160
5. Origines des faciès chimiques déterminés :.....	163
5.1. L'Indice d'Échange de Base (IEB).....	163

5.2. Apport de la thermodynamique.....	165
5.3. Confirmation de l'origine de la minéralisation par le diagramme de Gibbs	166
5.4. Confirmation à partir du Diagramme de Chadha	166
6. Aptitude des eaux du bassin versant de la Medjerda à l'irrigation :	167
6.1. Risque de salinité	168
6.2. Application du Diagramme de Richards	169
6.3. Risque de sodium	170
6.4. L'indice de perméabilité	171
8. Conclusion :	173
Conclusion générale et perspectives.....	173
Références bibliographiques	179

Liste des figures

Figure 1. Situation géographique administrative du bassin versant de la Medjerda.	6
Figure 2. Localisation hydrographique du bassin versant de la Medjerda (découpage selon l'ANRH).....	8
Figure 3. Relief du bassin versant de la Medjerda.....	12
Figure 4. Carte des pentes du bassin versant de la Medjerda.	14
Figure 5. Carte d'occupation du sol dans le bassin versant de la Medjerda.	16
Figure 6. Types de sols dans le bassin versant de la Medjerda.	20
Figure 7. Carte géologique du bassin versant de la Medjerda.	23
Figure 8. Carte structurale du bassin versant de la Medjerda.	27
Figure 9 : Log lithologique et identification des aquifères	35
Figure 10. Carte des sous bassins versants.....	40
Figure 11. Hypsométrie du bassin versant de la Medjerda.....	47
Figure 12. Hypsométrie du sous-bassin versant de la Medjerda (SBV-12-01).	52
Figure 13. Hypsométrie du sous-bassin versant de Meskiana (SBV-12-02).	53
Figure 14. Hypsométrie du sous-bassin versant de Chabro (SBV-12-03).	55
Figure 15. Hypsométrie du sous-bassin versant du Mellegue amont (SBV-12-04).....	56
Figure 16. Hypsométrie du sous-bassin versant du Mellegue aval (SBV-12-05).....	57
Figure 17. Carte de l'indice d'humidité topographique du bassin versant de la Medjerda.	61
Figure 18. Extraction du réseau hydrographique et délimitation du bassin versant.	63
Figure 19. Carte du Réseau hydrographique du bassin versant de la Medjerda.....	64
Figure 20. Méthodologie adoptée pour le calcul des paramètres morphologiques et topohydrologiques (Rahmati et al., 2019b).	77
Figure 21. Cartographie des facteurs de priorisation.....	80
Figure 22. Priorisation des sous-bassins de la Medjerda.	83
Figure 23: Représentation graphique de l'indice pluviothermique dans les cinq sous-bassins.....	86
Figure 24. Classification du climat selon l'indice ombrothermique (2000-2001).	87
Figure 25. Classification du climat selon l'indice ombrothermique (2010-2011).	88
Figure 26. Classification du climat selon l'indice ombrothermique (2020-2021).	89
Figure 27. Classification annuelle du climat selon l'indice d'aridité De Martonne.	91
Figure 28. Variation spatio-temporelle mensuelle de la précipitation en (2000-2001).....	95
Figure 29. Variation spatio-temporelle mensuelle de la précipitation en (2010-2011).....	96

Figure 30. Variation spatio-temporelle mensuelle de la précipitation en (2020-2021).....	97
Figure 31. Variation spatio-temporelle annuelle de la précipitation.....	98
Figure 32. Variation spatio-temporelle mensuelle de la température (°C) en (2000-2001).	99
Figure 33. Variation spatio-temporelle mensuelle de la température (°C) en (2010-2011).	100
Figure 34. Variation spatio-temporelle mensuelle de la température (°C) en (2020-2021).	101
Figure 35. Variation spatio-temporelle annuelle de la température (°C).....	102
Figure 36. Variation spatio-temporelle mensuelle de l'évapotranspiration potentielle (ETP) pour l'année (2000-2001).	103
Figure 37. Variation spatio-temporelle mensuelle de l'évapotranspiration potentielle (ETP) pour l'année (2010-2011).	105
Figure 38. Variation spatio-temporelle mensuelle de l'évapotranspiration potentielle (ETP) pour l'année (2020-2021).	106
Figure 39. Variation spatio-temporelle de l'évapotranspiration potentielle (ETP) pour les trois années (2000-2011-2021).....	107
Figure 40. Variation spatio-temporelle mensuelle de l'évapotranspiration potentielle (ETR) pour l'année (2000-2001).	108
Figure 41. Variation spatio-temporelle mensuelle de l'évapotranspiration réelle (ETR) pour l'année (2010-2011).....	109
Figure 42. Variation spatio-temporelle mensuelle de l'évapotranspiration réelle (ETR) pour l'année (2020-2021).....	110
Figure 43. Variation spatio-temporelle annuelle de l'évapotranspiration potentielle (ETR).	111
Figure 44. Variation spatio-temporelle annuelle du ruissellement en 2020-2021.....	113
Figure 45. Variation spatio-temporelle mensuelle du RFU pour l'année (2000-2001)....	115
Figure 46. Variation spatio-temporelle mensuelle du RFU pour l'année (2010-2011)....	116
Figure 47. Variation spatio-temporelle mensuelle du RFU pour l'année (2020-2021)....	117
Figure 48. Variation spatio-temporelle mensuelle de l'excédent pour l'année (2000-2001).	120
Figure 49. Variation spatio-temporelle mensuelle de l'excédent pour l'année (2010-2011).	121
Figure 50. Variation spatio-temporelle mensuelle de l'excédent pour l'année (2020-2021).	123

Figure 51. Variation spatiale annuelle de l'infiltration.	124
Figure 52. Organigramme de la méthodologie	126
Figure 53. Structure de la méthode FAHP.	128
Figure 54. Carte des pentes.	134
Figure 55. Carte de densité de drainage.	135
Figure 56. Carte lithologique du bassin versant de la Medjerda.	137
Figure 57. Carte de densité de linéaments.	138
Figure 58. Carte des précipitations.	139
Figure 59. Carte d'occupation du sol.	141
Figure 60. Carte des sols.	142
Figure 61. Carte du potentiel en eau souterraine.	146
Figure 62. Surfaces des différentes classes du potentiel en eau souterraine.	149
Figure 63. Carte de validation de la classification du potentiel en eau souterraine.	151
Figure 64. Répartition géographique des points de prélèvements dans les sous-bassins.	152
Figure 65. Variation spatiale de la conductivité électrique (CE) dans le BV de la Medjerda.	154
Figure 66. Variation spatiale de la dureté dans le BV de la Medjerda.	155
Figure 67. Variation spatiale de la TDS dans le BV de la Medjerda.	156
Figure 68. Variation spatiale des cations dans les eaux souterraines du BV de la Medjerda.	158
Figure 69. Variation spatiale des anions dans les eaux souterraines du BV de la Medjerda.	160
Figure 70. Diagramme de Piper pour les eaux souterraines du bassin versant de la Medjerda.	161
Figure 71. Faciès chimiques des eaux souterraines dans le bassin versant de la Medjerda.	162
Figure 72. L'Indice d'Échange de Base dans les eaux souterraines du BV de la Medjerda.	164
Figure 73. Variation spatiale des indices de saturation.	165
Figure 74. Diagrammes de Gibbs pour les processus hydrogéochimiques des anions et des cations.	166
Figure 75. Diagramme de Chadha pour les eaux souterraines du bassin versant de la Medjerda.	167
Figure 76. Variation de la salinité eaux souterraines du BV de la Medjerda.	168

Figure 77. Diagramme de Richards (SAR) des eaux souterraines dans le bassin versant de la Medjerda..... 169

Figure 78. Diagramme de Wilcox en fonction de (%Na) et de (CE) des eaux souterraines dans le bassin versant de la Medjerda..... 171

Figure 79. Indice de perméabilité..... 173

Liste des tableaux

Tableau 1: Les régions hydrographiques et leurs bassins versants.	7
Tableau 2. Répartition des classes des pentes dans les sous-bassins versants de la Medjerda.....	13
Tableau 3 : Répartition des classes des pentes dans les sous-bassins versants de la Medjerda.....	15
Tableau 4. La répartition en (km) et en pourcentage de chaque type de sol dans les SBV de la Medjerda.....	17
Tableau 5. Caractéristiques des différentes formations géologiques rencontrées dans la zone d'étude.	34
Tableau 6: Répartition de superficie, périmètre, et de longueur dans les sous-bassins versants de la Medjerda.....	39
Tableau 7. Paramètres de forme par sous bassin versant.	41
Tableau 8. Classification de rapport d'élongation.....	43
Tableau 9. Répartition des surfaces en fonction des plages d'altitudes dans le bassin versant de la Medjerda.	45
Tableau 10. Les altitudes Caractéristiques par sous bassin versant.....	50
Tableau 11. Répartition des superficies selon les tranches d'altitudes dans le (SBV-12-01).	51
Tableau 12. Répartition des superficies selon les tranches d'altitudes dans le (SBV-12 02).	53
Tableau 13. Répartition des superficies selon les tranches d'altitudes dans le (SBV-12 03).	54
Tableau 14. Répartition des superficies selon les tranches d'altitudes dans le (SBV-12-04).	56
Tableau 15. Répartition des superficies selon les tranches d'altitudes dans le (SBV-12-05).	57
Tableau 16 : Classification du Relief selon l'Indice Global Ig par L'ORSTOM.	59
Tableau 17: Classification du relief basée sur la Dénivelée Spécifique (DS).....	59
Tableau 18. Valeurs de Ig et Ds par sous bassin versant.....	60
Tableau 19: Longueur des oueds permanents et temporaires par sous-bassin versant.	66
Tableau 20. Caractéristiques du réseau hydrographique par sous-bassin versant.	70
Tableau 21. Classification de texture de drainage selon Smith. (1950).....	71
Tableau 22. Temps de concentration par sous-bassin.....	74

<i>Tableau 23. Matrice de corrélation entre les paramètres linéaires, surfaciques et de forme.</i>	81
<i>Tableau 24. Priorisation et classement final des sous-bassins.</i>	82
<i>Tableau 25. Les coordonnées des stations météorologiques du bassin versant de la Medjerda.</i>	84
<i>Tableau 26. Sources de données pour la mise en œuvre du modèle GWP.</i>	125
<i>Tableau 27. Variables linguistiques pour la comparaison par paire.</i>	129
<i>Tableau 28. Indice aléatoire d'incohérence (RI) pour différentes valeurs de n (Saaty, 1980).</i>	131
<i>Tableau 29. Matrice de comparaison et valeurs de pondération pour la pente.</i>	133
<i>Tableau 30. Matrice de comparaison et valeurs de pondération pour la pente.</i>	134
<i>Tableau 31. Matrice de comparaison et valeurs de pondération pour la pente.</i>	136
<i>Tableau 32. Matrice de comparaison et valeurs de pondération pour la précipitation.</i>	138
<i>Tableau 33. Matrice de comparaison et valeurs de pondération pour la précipitation.</i>	139
<i>Tableau 34. Matrice de comparaison et valeurs de pondération pour l'occupation du sol.</i>	140
<i>Tableau 35. Matrice de comparaison et valeurs de pondération pour l'occupation du sol.</i>	142
<i>Tableau 36. Classement et valeurs de pondération des différents facteurs conditionnant le potentiel en eau souterraine.</i>	143
<i>Tableau 37. Matrice de comparaison et valeurs de pondération pour tous les critères.</i>	144
<i>Tableau 38. Répartition des classes du potentiel en eau souterraine dans les sous-bassins.</i>	145
<i>Tableau 39. Validation des résultats de la classification du modèle FAHP par la matrice de confusion.</i>	150
<i>Tableau 40. Résultats des analyses physico-chimiques des eaux souterraines dans le bassin de la Medjerda.</i>	152
<i>Tableau 41: Résultats de l'IEB dans les eaux souterraines de la Medjerda.</i>	163
<i>Tableau 43. Classification de la qualité de l'eau d'irrigation en fonction du pourcentage de sodium (%Na) et de la conductivité électrique (CE) (Wilcox, 1955).</i>	170
<i>Tableau 44. Catégories de l'indice de perméabilité de l'eau.</i>	172

Liste des abréviations

- ABH** : Agences de Bassin Hydrographique
- ANRH** : Agence Nationale des Ressources Hydriques
- BV** : Bassin Versant
- DSA** : Direction des Services Agricoles
- EPA** : Agence Américaine de Protection de l'Environnement
- ETP** : Évapotranspiration potentielle
- ETR** : Évapotranspiration réelle
- FAHP** : Processus de l'Analyse Hiérarchique Floue
- FAO** : Organisation des nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
- IEB** : Indice d'échange de base
- MADR** : Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural
- MNT** : Modèle Numérique Terrain
- SAR** : Risque du sodium pour l'eau d'irrigation
- SBV** : Sous-bassin versant
- SIG** : Système d'Informations Géographiques
- USGS** : United States Geological Survey (Commission géologique des États-Unis)
- CE** : Conductivité électrique
- WQA** : Water Quality Association (Association de la Qualité de l'Eau)



Introduction générale



Introduction générale

En Algérie, comme partout ailleurs dans le monde, l'eau constitue un pilier essentiel du développement de l'économie nationale, notamment dans les secteurs agricoles et industriels. Elle revêt une importance vitale et participe dans de nombreux processus biologiques et environnementaux. La gestion durable des ressources en eau, tant superficielle que souterraine vise à assurer un accès équitable de l'eau pour l'être humain et le reste (usages domestiques, agricoles et industriels), tout en garantissant la pérennité de cette denrée pour les générations futures et répondre à leurs besoins (Cocody et al. 2013).

L'analyse des données statistiques issues de différentes structures régionales permet d'obtenir une perspective globale des activités à forte consommation d'eau et de comprendre leur impact et leurs contraintes sur les ressources hydriques d'un bassin. Ceci contribue à améliorer la planification future des programmes d'utilisation de ces ressources en vue d'une gestion plus efficace.

Dans le cadre de l'attention portée au secteur de l'eau et à l'utilisation optimale des eaux de pluie et de ruissellement, de nombreux spécialistes ont travaillé en coordination avec les responsables des unités hydrographiques pour la mise en place de plusieurs ouvrages hydrauliques (retenues d'eau (15 de retenues colinéaires) et de barrages (5) ont été réalisés dans la région de Souk Ahras. De cet ensemble d'ouvrage deux sont localisés sur le bassin versant de la Medjerda (ANRH 2009).

Cependant, la mise en place de ces ouvrages, reste insuffisante par rapport à la demande en eau sans cesse croissante (hydro-agricoles, arboriculture, industrie, usage domestique, etc.), ces carences en eau superficielle font que les citoyens s'orientent vers l'exploitation des eaux souterraines par le biais de captages par puits domestiques ou forages.

Le fait que le monde d'aujourd'hui est confronté aux méfaits des changements climatiques critiques et irréguliers, survenant à un rythme très rapide et résultant des contraintes sévères accélèrent le risque de pénurie d'eau dans ces régions. Cet état de fait se traduit par une absence presque totale des précipitations, ces dernières s'accompagnent d'une élévation considérable des températures augmentant ainsi le risque de pénurie d'eau. Par ailleurs ces variations endommagent les écosystèmes allant jusqu'à compromettre leurs existences, impactant négativement les aspects quantitatifs et qualitatifs de l'eau.

La zone d'étude a été subie l'impact d'une période prolongée de sécheresse, accentuant la baisse du volume d'eau du barrage d'Ain al-Dalia, ce dernier est considéré comme la principale source d'approvisionnement pour la région.

Au niveau de ce barrage, l'incidence des changements climatiques est réelle en effet le volume d'eau contenue dans ce barrage avoisine actuellement les 4 millions de m³ au lieu 84 millions de m³ en 1986 et n'était plus que de 70 m³ en 2018. Les chiffres indiqués montrent une baisse du stockage en eau provoqué par la faiblesse des précipitations.

En contrepartie, la demande croissante en eau a conduit à une exploitation anarchique de la ressource et tous les niveaux. Ainsi ces prélèvements entraînent des baisses drastiques des débits des affluents de la Medjerda, ces mêmes affluents sont presque à sec durant la saison dite sèche.

Au cours de la période sèche on assiste dans la partie nord du bassin à un écoulement intermittent se traduisant par un tarissement complet des ouvrages de captage d'eau souterraine, tels que les puits et les sources dénombrées dans la région. L'ensemble de ces facteurs négatifs sont à l'origine de la pénurie d'eau remarquée.

Le comportement irréfléchi de l'être humain par de l'exploitation irrationnelle de l'eau est une autre cause de la crise hydrique qui sévit dans la région. Notons que les demandes croissantes en eau de la population pour l'irrigation et la consommation constituent une pression supplémentaire sur la ressource dans cette région.

L'impact des changements climatiques caractérisé par l'enregistrement de périodes de sécheresse récurrentes sont la source du manque d'eau enregistré au niveau du barrage et des nappes créant un déséquilibre entre la disponibilité des ressources et les besoins compromettant la production agricole au cours de ces dernières années.

La question qui se pose est de savoir si les stocks d'eau disponible sont oui ou non en symbiose avec la demande issue de la croissance démographique.

Il est légitime de se demander si nous ne sommes pas confrontés à un avenir encore plus précaire, en particulier si la situation climatique persiste, ce qui est un sujet d'actualité brûlant. Par conséquent, il est judicieux d'évaluer l'adéquation entre les besoins en eau de la population et la ressource en eau locale renouvelable.

Outre les méfaits des changements climatiques et le facteur humain, la salinité des eaux pose un autre problème entravant l'utilisation rationnelle des ressources hydriques. Ainsi, dans les zones littorales, l'intrusion marine générée par la surexploitation des nappes, devient de plus en plus présente. Au niveau des zones de hautes plaines et des hauts plateaux, la salinité des eaux résultant de la dilution des formations salifères à l'affleurement, constitue un problème pressant qui entraîne une perte significative des sols surtout en l'absence d'un savoir-faire local. La zone d'étude se caractérise par la présence du TRIAS qui compromet l'utilisation des eaux ayant été en contact de ces formations accentuant les pertes en eau tant du point de vue quantitatif que qualitatif.

Notons que les formations gypsifères sont également présentées en Tunisie car la Medjerda est un bassin transfrontalier s'écoulant de l'Algérie vers la Tunisie.

Le parcours de l'Oued Medjerda est jalonné par l'affleurement de formations gypsifères salifères, qui au contact de l'eau et par le processus de la dilution et d'échanges entre l'eau et la roche se traduit par une augmentation de la salinité des eaux.

Par ailleurs le bassin versant de la Medjerda dans sa partie Algérienne est à vocation agro-industrielle. L'agriculture et l'arboriculture, y sont très développées, ce qui entraîne une utilisation intensive de l'irrigation. Cette pratique, associée aux écoulements de surface et au retour des eaux d'irrigation provoque l'enrichissement en sels des eaux qui se déposent directement sur le sol, entraînant ainsi une baisse de la perméabilité.

Le second problème entraîné par l'irrigation est le retour d'une partie des eaux utilisées pour irriguer les plantes. Ainsi, les eaux qui reviennent sont souvent chargées par le sel et sont polluées par les engrais utilisés pour améliorer le rendement. Cette situation entraîne un manque d'eau de bonne qualité, de ce fait une surveillance quasi constante de la qualité des eaux s'impose.

Dans notre travail, nous insisterons sur les aspects quantitatifs et qualitatifs des ressources en eau et leur impact sur le sol, eu égard à l'impact des changements climatiques. Pour pallier aux problèmes de gestion de la ressource en eau et de protection du sol, il est impératif d'impliquer les usagers car ils sont les premiers concernés.

De nombreux chercheurs, dans leurs travaux ont essayé d'élucider l'origine et l'impact des changements climatiques, sur les ressources en eau mais en vain les réponses données sont très pessimistes sur ce plan.

Au niveau local, le bassin versant de la Medjerda, par manque d'outils (équipement de terrain, laboratoire d'analyses, ...), les impacts des changements climatiques sont très peu maîtrisés. Pour une meilleure compréhension des impacts du changement climatique sur le cycle hydrologique, on doit disposer d'un inventaire global (cartographie) des ressources en eau dans ce bassin. Cela permettra de mieux connaître les problèmes qui se posent et de fournir les outils nécessaires à la maîtrise des problèmes aux décideurs pour garantir la durabilité des ressources en eau dans le bassin versant de la Medjerda.

Objectifs :

Le présent travail constitue une étude pluridisciplinaire axée sur l'identification et la cartographie des secteurs à potentialité aquifère dans un bassin méditerranéen, en utilisant une base de données (topographiques, géologiques, hydrogéologiques, hydro-climatologiques, hydrographiques, données de télédétection (images satellitaires, MNT). La combinaison de ceux-ci par la Méthode de l'analyse hiérarchique flou FAHP au sein d'un SIG aboutit à la

production d'une information synthétique sur l'existence de réservoirs d'eau souterraine importants dans le bassin versant de la Medjerda. Elle consiste à l'évaluation de la salinité des eaux souterraines en vue de leur utilisation domestique et agricole.

De manière spécifique, cette recherche consiste à :

- Caractériser la variabilité hydro climatique et ses implications sur les variations spatiotemporelles des ressources en eau du bassin versant.
- Réaliser et structurer une base de données cartographiques afin d'analyser et d'évaluer de manière explicite des paramètres (topographiques, géologiques, hydrogéologiques, climatologiques, réseau hydrographique) ayant trait directement ou indirectement aux ressources en eau souterraines.
- Cartographier spatialement et temporellement les paramètres bioclimatiques, climatiques et le bilan hydrique à l'aide du système d'informations géographique.
- Cartographier le potentiel des eaux souterraines du bassin versant à l'échelle spatiale et temporelle.
- Évaluer et cartographier la qualité physicochimique et la salinité des eaux souterraines dans le bassin versant de la Medjerda.

Agencement du manuscrit :

La présente thèse s'articule autour de trois grandes parties, structurées en chapitres, entamés par une **introduction générale**.

Partie I : « Cadre Général », organisée en deux chapitres :

Chapitre 1. Consacré à une description détaillée de la zone d'étude. Il expose les caractéristiques physiques, géologiques et hydrogéologiques de la zone d'étude.

Chapitre 2. Concerne l'analyse morphométrique et la priorisation des sous-bassins versants en utilisant le SIG.

Partie II : Ce deuxième volet examine la variabilité hydro-climatique, hydrologique et hydrogéologique, les outils de gestion des ressources en eau, ainsi que l'identification spatio-temporelle du potentiel aquifère. Cette section est organisée en deux chapitres distincts de 3 au 4 comme suit :

Chapitre 3. Cartographie de la variabilité hydro-climatique : il présente les données, le matériel utilisé, ainsi que les différentes méthodes appliquées, adaptées à la cartographie spatiotemporelle des paramètres climatiques et du bilan hydrique.

Chapitre 4. Identification et cartographie du potentiel des eaux souterraines : visent à offrir une compréhension approfondie de la cartographie du potentiel des eaux souterraines, de ses méthodes et de ses implications. Cela contribue ainsi à une gestion durable de cette

ressource vitale en représentant la capacité d'une zone géographique donnée à stocker et à fournir de l'eau souterraine de manière soutenable.

Partie III : Concerne l'évaluation de la qualité des eaux souterraines dans le bassin versant, elle comprend un chapitre :

Chapitre 5. Cartographie de la qualité physico-chimique et de la salinité des eaux souterraines sous l'influence géologique et climatique.

En fin une **conclusion générale**, une synthèse des résultats obtenus et présente aussi la contribution de ce travail à la gestion des ressources en eau. Quelques perspectives de recherche, et les sources de références terminent cette étude.

Cadre Général

Partie I

Chapitre 01 : Description de la zone d'étude

Ce chapitre est consacré à une description détaillée de la zone d'étude. Il expose les caractéristiques physiques, géologiques et hydrogéologiques de la zone d'étude.

Chapitre 02 : Étude morphométrique du bassin

Ce chapitre concerne l'analyse morphométrique et la priorisation des sous-bassins versants en utilisant le SIG.



Chapitre I

Description de la zone d'étude



Chapitre I : Description de la zone d'étude

1. Présentation de la région d'étude

Le bassin versant de la Medjerda, est transfrontalier entre l'Algérie et la Tunisie. Côté Algérien, il est situé au Nord-est du pays et englobe presque toute la wilaya de Souk Ahras, une portion importante de la wilaya de Tébessa, ainsi que deux petites zones des wilayas d'Oum El Bouaghi et de Khenchela (Fig.1). Il se situe dans l'intervalle des coordonnées géographiques suivants : (X1= 35°16'N, Y1= 7°30'E) et (X2= 37°35'N, Y2= 10°24'E).

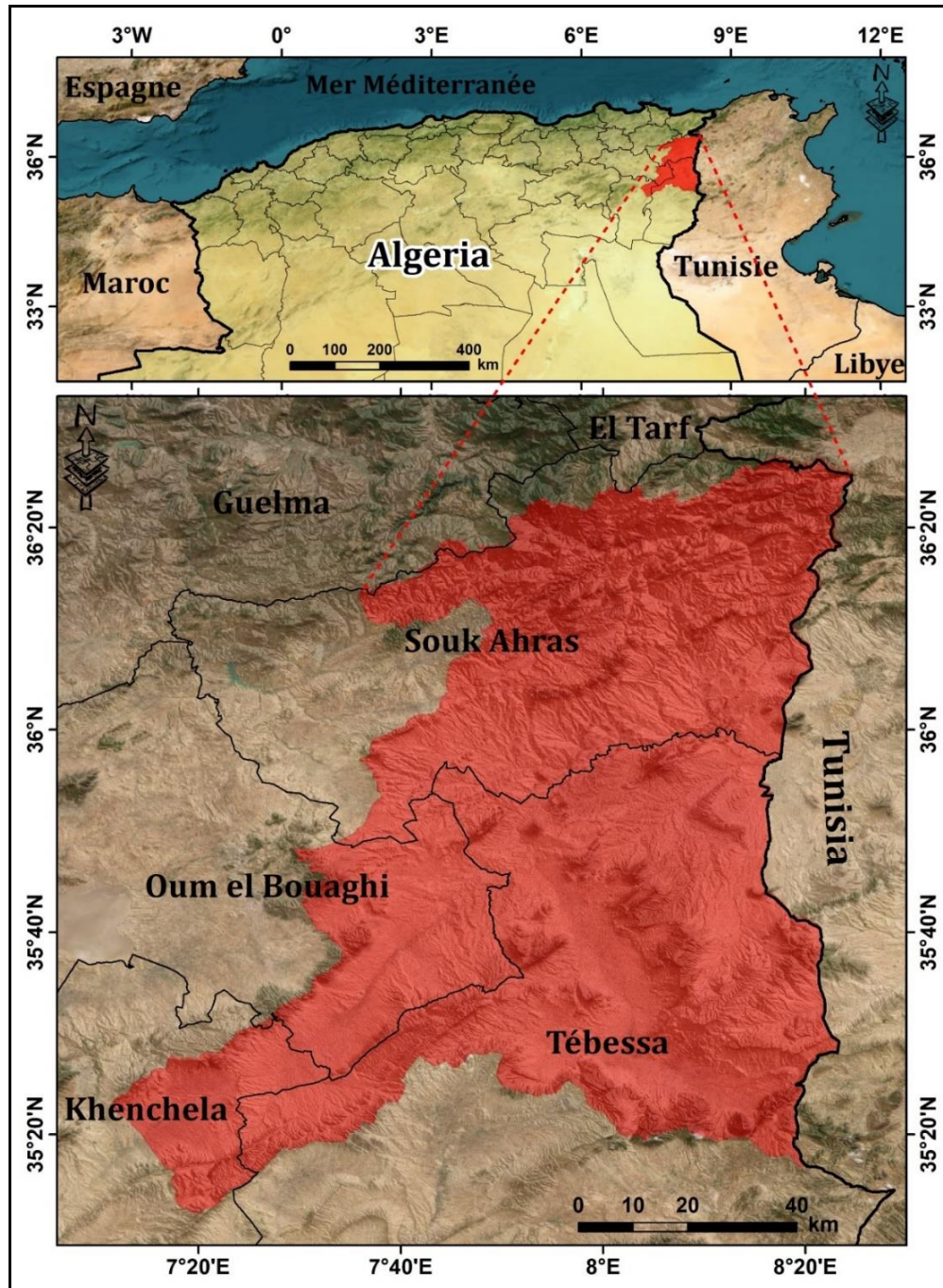


Figure 1. Situation géographique administrative du bassin versant de la Medjerda.

La superficie, le bassin versant de la Medjerda s'étend sur 7787,25 km², est traversé par deux principaux oueds maghrébins, à savoir l'Oued Medjerda, premier affluent important du bassin, parcourant une longueur totale de 460 kilomètres, dont 120 kilomètres en Algérie et 340 km en Tunisie. Sa source se trouve à 400 m d'altitude à la commune de Khemissa (Est de la wilaya de souk Ahras), dans sa partie aval, il traverse la Tunisie pour se déverser en mer Méditerranée au niveau du golf de Tunis. Le deuxième cours d'eau, l'Oued du Mellegue, issue de la confluence de deux cours d'eau l'Oued Meskiana et l'Oued Chabro. Le bassin versant de la Medjerda est délimité au Nord par le bassin versant dit « côtiers constantinois », à l'Est par les frontières Algéro-Tunisienne, à l'Ouest par le bassin versant de la Seybouse ainsi que le bassin des hauts plateaux constantinois au sud.

2. Classification hydrographique du territoire algérien

La création des agences de bassin hydrographique (ABH) en 1996, a fait que le territoire Algérien a été divisé en cinq zones hydrographiques. Cette division avait pour objectif la maîtrise de la gestion de la ressource en eau car travaillant à petite échelle et selon les caractéristiques (climatiques, morphologiques, ...) de chaque région. Elle donne un aperçu plus exact sur la catégorisation et la classification des cours d'eau, des lacs, des rivières, des bassins versants, ainsi que d'autres éléments liés à l'eau qui façonnent le paysage d'une région. La figure 2 et le tableau 1, donnent un aperçu sur les caractéristiques des cinq régions hydrographiques, et notre zone d'étude le bassin versant de la Medjerda, appartient à la quatrième de ces régions :

- Région 1 : Oranais-Chott Chergui.
- Région 2 : Chellif-Zahrez.
- Région 3 : Algérois-Soummam-Hodna.
- Région 4 : Constantinois-Seybouse-Mellegue.
- Région 5 : Sahara.

Tableau 1: Les régions hydrographiques et leurs bassins versants.

Bassins hydrographiques	Superficie (km ²)	Bassins versants	Code BV
Oranais-Chott Chergui	77 169	Côtiers oranais	BV04
		Macta	BV11
		Tafna	BV16
		Chott Chergui	BV08
Chellif-Zahrez	56 227	Chélif	BV01
		Chott Zahrez	BV17
		Côtiers Dahra	BV02A
Algérois-Soummam-Hodna	47 431	Chott Hodna	BV05
		Côtiers algérois	BV02B
		Isser	BV09
		Soummam	BV15

Constantinois-Seybouse-Mellegue	44 348	Côtiers constantinois	BV03
		Kébir Rhumel	BV10
		Medjerda-Mellegue	BV12
		Seybousse	BV14
		Hauts Plateaux Constantinois	BV07
Sahara	2 018 054	Chott Melghir	BV06
		Sahara	BV13

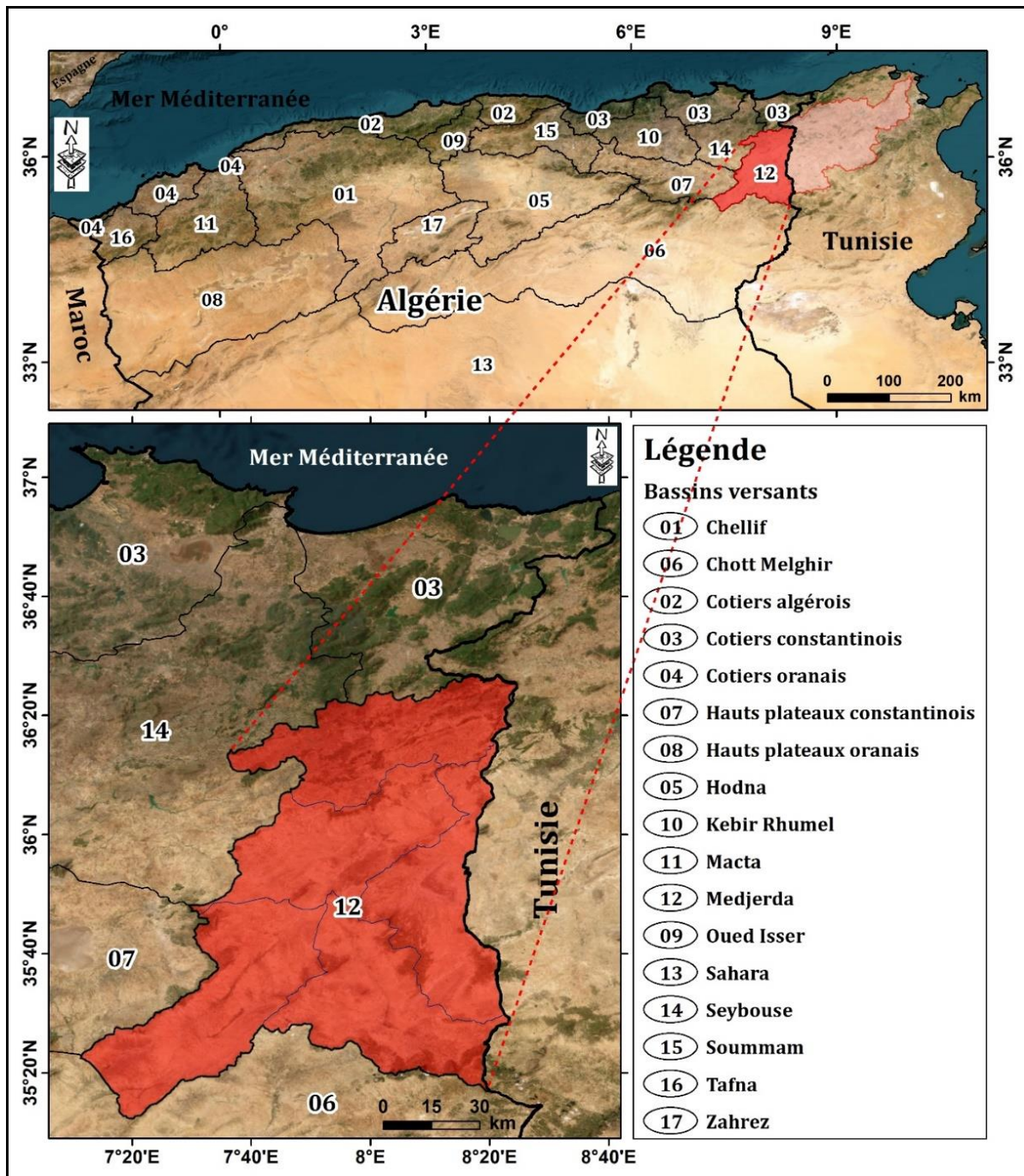


Figure 2. Localisation hydrographique du bassin versant de la Medjerda (découpage selon l'ANRH)

Les cinq régions hydrographiques, contiennent la totalité des 17 bassins versants recensés à travers le pays (comme indiqué dans le tableau 1). Depuis 1993, l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) a regroupé les bassins versants selon les trois zones suivantes :

- Les bassins tributaires de la Méditerranée situés au nord de l'Algérie présentent un apport moyen annuel estimé à 11 milliards de m³.
- Les bassins endoréiques situés dans les Hautes Plaines connaissent un écoulement annuel moyen estimé à environ 700 hm³, bien que la majeure partie de leurs eaux se perde par évaporation dans les chotts.
- Les bassins sahariens, quant à eux, affichent un apport moyen annuel d'environ de 650 hm³ caractérisés par la présence des eaux fossiles.

3. Aperçu socio-économique

Le bassin de la Medjerda s'étend sur quatre wilayas comme cité précédemment Souk Ahras, Oum El Bouagui, Tebessa et Khenchela. Par ailleurs, la wilaya de Souk Ahras constitue plus de 60% de la superficie du sous-bassin de la Medjerda et du Mellegue et se caractérise par une diversité morphologique, comprenant un massif montagneux au nord partagé avec les wilayas de Tarf et Guelma, des plaines céréalières à l'est, notamment à Sedrata et M'Daourouch, et des plateaux semi-arides au sud. Il s'étend sur 4 359,65 km², la population occupant la zone est estimée à 573063 habitants. Elle est divisée en trois grandes zones, avec 26 communes regroupées en 10 Daïras (ABH, 2013). L'agriculture est pratiquée sur l'ensemble de la zone et est diversifiée, on note les céréales, maraîchères et arboricoles. Les méthodes d'irrigation varient entre l'approche traditionnelle gravitaire et des techniques modernes telles que l'irrigation par canaux d'aspersion, en fonction du type de culture. Dans le détail et suite à l'inventaire de la petite irrigation dans la zone, la superficie irriguée développée de 3 999 ha, principalement dédiée au maraîchage (2 366 ha) et à l'arboriculture (1 334 ha). La surface agricole utile (SAU) irrigable atteint 6 252 ha, représentant un potentiel de mise en valeur de 40%. La plupart des exploitants enquêtés sont des propriétaires privés, utilisant majoritairement l'irrigation gravitaire.

Sur le plan socio-économique, l'âge moyen des exploitants est de 52 ans, avec une majorité (60,7%) ayant plus de 50 ans. Environ 65% des exploitants ont un niveau d'instruction entre le primaire et le secondaire. La taille moyenne des (SAU) irriguée par exploitation est d'environ de 2,46 ha. La commercialisation se fait principalement au marché de gros, et près de 43% des exploitants sont membres d'une association agricole.

Pour pallier à la pression sur la ressource en eau, cette dernière est conjointement issue des eaux superficielles et souterraines. Les prélèvements des eaux superficielles se fait à même

l'Oued au niveau des vallées les plus favorables, cependant les eaux tirées de l'oued Mellegue, présentent une certaine minéralisation donc doivent être utilisées avec prudence pour l'irrigation. Les ressources souterraines, notamment celles provenant de l'Atlas Tellien et des Monts de Souk Ahras, sont exploitées mais restent en deçà de leur potentiel. Notons que certaines zones du bassin, comme Bir El Akhal et le Bassin crétacé d'Ain Beida, connaissent une surexploitation, accentuée par la diminution de la pluviométrie.

En conclusion, la gestion des ressources en eau doit se faire de manière concertée, en particulier pour les ressources souterraines, avec un suivi régulier des nappes. La construction de nouveaux ouvrages de stockage est préconisée pour mobiliser davantage d'eau. De plus une coordination entre les différentes parties chargées de la gestion de l'eau doit être établie pour garantir l'accès à l'eau et garantir la réussite des projets dans cette région aux multiples facettes géographiques et socio-économiques.

La wilaya de Tébessa, située à l'extrême Est de l'Algérie, délimitée au nord par la wilaya de Souk Ahras, au sud par la wilaya d'El Oued Souf, à l'Est par la Tunisie, et à l'Ouest par les wilayas de Khenchela et Oum El Bouaghi. Elle couvre les sous-bassins de Mellegue, Chabro et une petite portion du sous-bassin de Meskiana, s'étendant sur une superficie de 3 625 km², avec une population estimée à 657 227 habitants et un taux annuel de croissance démographique de 3%, elle est divisée en 28 communes. Elle est confrontée à des défis considérables en termes de gestion de son développement démographique important. La région est fortement orientée vers l'agropastoralisme, avec un cheptel ovin et des parcours steppiques jouant un rôle crucial dans les revenus des habitants. La sécheresse passée a entraîné des déficits alimentaires pour le bétail, stimulant le développement d'aires irriguées avec une emphase sur la mobilisation des ressources en eau souterraine. La plaine de Tébessa, adjacente au centre urbain, est le moteur économique de la région. Sur le plan touristique, la wilaya dispose d'un riche patrimoine historique et naturel, avec plus d'une centaine de sites archéologiques, contribuant au tourisme religieux et culturel, notamment des sites comme le temple de Minerve, la muraille byzantine, et la basilique romaine. En ce qui concerne l'industrie, Tébessa connaît une expansion significative, avec des ateliers de confection, des unités industrielles et artisanales, bénéficiant de gisements et de substances utiles, et devenant ainsi un pôle industriel essentiel pour une population en quête d'opportunités d'emploi.

La Wilaya de Oum El Bouaghi se situe dans la partie nord-est de l'Algérie, limitée au nord par les wilayas de Constantine et de Mila, à l'Ouest par la Wilaya de Batna, au Sud par la wilaya de Khenchela, et à l'Est par les Wilayas de Guelma et de Souk Ahras. Elle s'étend sur une superficie d'environ 428 Km², et comprend 29 communes, avec environ 831 163 habitants. Elle joue un rôle significatif dans le bassin Constantinois Seybouse Mellegue,

représentant près de 1% de la superficie totale. Les ressources en eau souterraines proviennent de différentes nappes, notamment la région d'Oum El Bouaghi-Ain Beida, la plaine de Teleghma et Ain M'Lila, la plaine d'El Madher, la Plaine de Boulhilet, la plaine de Remila Khenchela, la Plaine de Meskiana, et la région de Constantine, totalisant une évaluation annuelle de 88,72 Hm³. La gestion de l'eau dans la wilaya comprend 1 648 points d'eau dédiés à l'usage agricole, dont 690 forages et 958 puits domestiques, bien que ces derniers ne soient pas équipés de compteurs. Les prélèvements d'eaux souterraines s'élèvent à 13,61 millions m³/an, tandis que les besoins agricoles nécessitent 48,67 millions m³/an. Le secteur agricole de la wilaya compte 1 648 exploitations sur une superficie totale de 13 493,33 ha, dont 1 630 exploitations privées représentant 98% de la SAU totale, et 18 exploitations étatiques occupant 2% de la SAU totale. Le nombre total d'utilisateurs d'ouvrages de prélèvement d'eau est de 1654, dont 690 utilisent des forages (soit 42%) et 964 utilisent des puits (soit 58%). Les volumes prélevés sont respectivement de 40 Hm³/an (soit 32%) pour les forages et de 85 Hm³/an (soit 68%) pour les puits. En ce qui concerne les cultures, l'arboriculture domine la superficie irriguée avec 46%, suivie des cultures maraîchères 19%, des cultures fourragères 8%, et de la céréaliculture 5%. Le mode d'irrigation prédominant est l'irrigation par aspersion, représentant 66%, suivi de l'irrigation gravitaire 8%, goutte à goutte (2%), et localisée 0,3%. Cette diversité dans les ressources et les pratiques agricoles reflète la dynamique de la wilaya d'Oum El Bouaghi dans le contexte régional.

4. Les caractéristiques physiques du bassin

Le contexte physique d'un bassin versant est caractérisé par plusieurs éléments, notamment le relief, le réseau hydrographique, les types de sols, l'utilisation des terres et la couverture végétale. Une connaissance approfondie de ces caractéristiques revêt une importance capitale pour assurer une gestion efficace et durable des ressources en eau et aussi pour évaluer l'influence de ces caractéristiques sur les écosystèmes et leurs incidences sur les réserves des eaux superficielles et souterraines.

4.1. Relief

L'analyse du relief, joue un rôle prépondérant dans la connaissance de la répartition spatiale des paramètres climatiques, morphométriques et la détermination des composants du bilan hydrique, hydrologique et hydrogéologique, d'où la détermination du potentiel en eau souterraine et sa relation avec son environnement. La région d'étude constitue une zone de transition entre l'Atlas Tellien au nord et l'Atlas Saharien au sud. Elle est considérée comme une extension naturelle des hautes plaines constantinoises, bien que ses caractéristiques naturelles et physiques ne soient pas identiques à celles de cette dernière (Guasmi, 2005). Le

bassin versant de la Medjerda se caractérise par une topographie diversifiée comprenant des sommets, montagnes, plaines, collines, un ensemble de Djebel, des formations de pentes ainsi que des dépressions allongées et étroites. La carte altimétrique extraite du modèle numérique de terrain MNT (Fig.03), montre une altitude maximale de la région de 1 626m en amont des sous-bassins de la Medjerda et de Meskiana, avec une chaîne montagneuse qui s'étend progressivement vers le Nord-est de la Tunisie (David 1956). Le sous bassin versant de cote - 12-01 s'élargit et les altitudes diminuent, variant entre 601 et 700 m à Souk Ahras, entre 230 et 600 m à Ouenza, et au niveau du sous bassin versant (12-04), pour atteindre 200 m en aval du bassin versant de la Medjerda aux frontières Tunisiennes. Cette mosaïque est susceptible de créer une variété de nuances climatiques dans la région (Ben Boubaker., 2000). Selon David, deux caractéristiques de variations de l'altitude prédominent dans le bassin versant de la Medjerda :

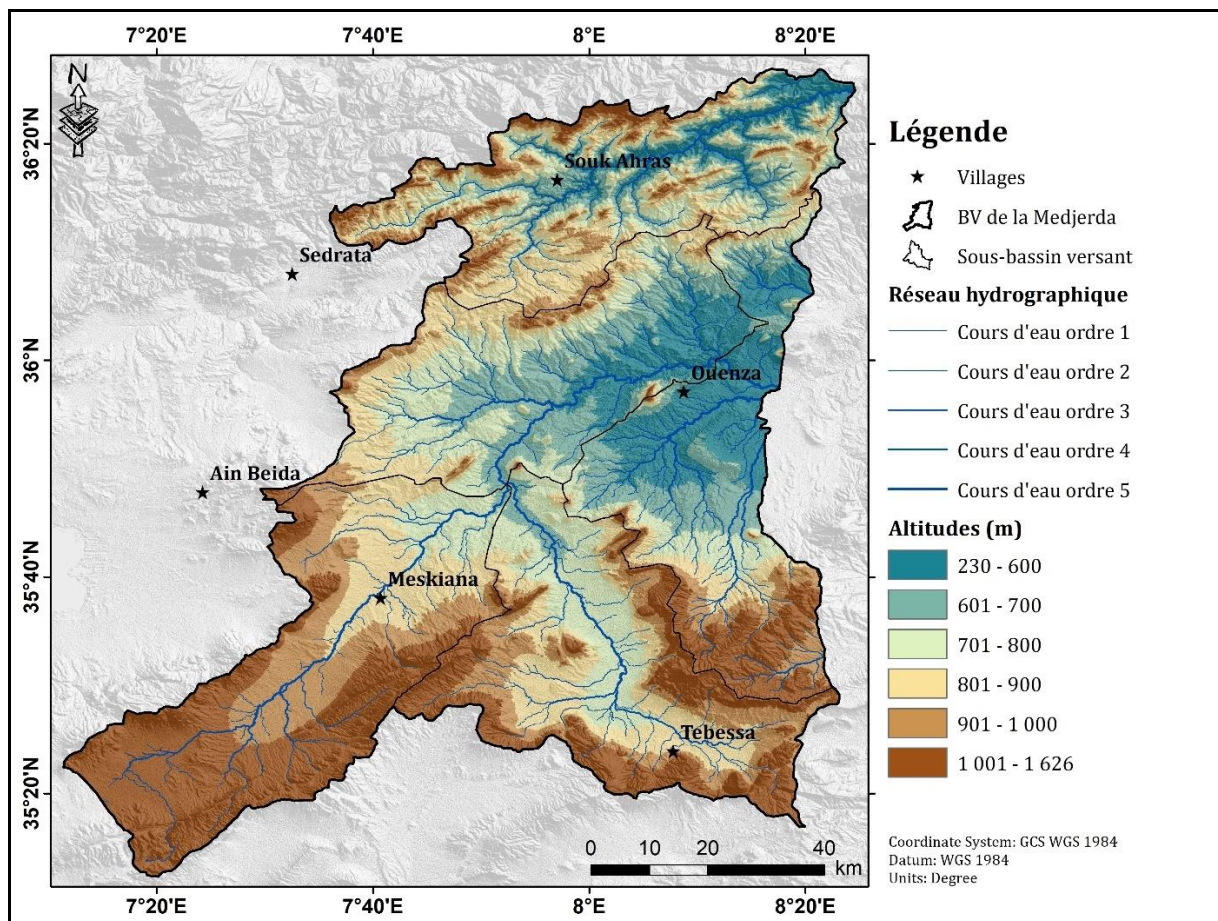


Figure 3. Relief du bassin versant de la Medjerda.

La première s'étend du Sud-ouest (SW) vers le Nord-est (NE), caractérisée par une diminution régulière de l'altitude depuis le massif culminant de Ras Al Alia (1 423 m) jusqu'à la crête dorsale à la frontière Algéro-Tunisienne, atteignant 1 000 m.

La deuxième, se caractérise par une diminution significative de la pente du Nord-ouest (NW) au Sud-est (SE), atteignant d'une part la vallée de Seybouse ou la plaine de Bone à moins de

200 m et d'autre part les hautes plaines qui s'étendent à plus de 500 m d'altitude situées dans la zone du versant septentrionale et jalonnées principalement par Sedrata, Montesquieu, et le dj. Ladjbel. Cette diminution de l'altitude du relief, influence défavorablement l'augmentation des précipitations, d'un autre côté, elle favorise la pénétration accrue de l'eau dans la profondeur du sol permettant ainsi la recharge des réservoirs d'eau souterraine.

D'une manière détaillée, on distinguera trois zones longitudinales, à savoir la haute chaîne centrale, le versant septentrional et le versant méridional.

La carte altimétrique (Fig. 3), illustre généralement la répartition altimétrique et nous permet de dégager les formes du relief les plus caractéristiques du bassin versant et leurs altitudes. On distingue six tranches d'altitude selon un axe Sud-est Nord-est. La première tranche, allant de l'altitude minimale 230 à 600 m, principalement localisée autour des cours d'eau principales de la Medjerda et du Mellegue, ainsi que dans la partie aval du sous bassin de la Medjerda (SBV-12-01) à proximité des frontières tunisiennes. Les tranches d'altitude suivantes (601-700 m, 701-800 m, 801-900 m) soulignant une légère augmentation progressive de l'altitude à mesure que l'on s'éloigne des zones alluviales les plus basses du bassin. Cependant, les tranches d'altitude supérieures (901-1000) et (1001-1026) représentent les limites des deux sous bassins du Meskiana (SBV-12-01) et Chabro (SBV-12-03) indiquant un relief montagneux prononcé.

4.2. Pentés

La réalisation de la cartographie des pentes a été élaborée à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) avec le logiciel ArcGIS, spécifiquement à travers le module Spatial Analyst Tools → surface → Slope. Cette approche nous a permis de créer une carte détaillée des pentes, exprimées en pourcentage, et divisée en cinq classes distinctes : « 0%- 06% », « 06% - 12% », « 12% - 18% », « 18% - 25% », et « > 25 ».

Tableau 2. Répartition des classes des pentes dans les sous-bassins versants de la Medjerda

La pente	Surface SBV-12-01		Surface SBV-12-02		Surface SBV-12-03		Surface SBV-12-04		Surface SBV-12-05	
	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%
0 - 6	188,97	12,60	1206,95	66,02	768,71	48,38	814,02	54,54	712,72	51,71
6 - 12	301,80	20,13	373,01	20,40	375,82	23,65	447,12	29,96	411,19	29,83
12 - 18	316,09	21,08	126,18	6,90	173,09	10,89	123,07	8,25	136,62	9,91
18 - 25	280,19	18,69	66,49	3,64	113,97	7,17	55,47	3,72	59,06	4,29
> 25	412,29	27,50	55,45	3,03	157,41	9,91	52,89	3,54	58,64	4,26
Total	1499,34	100	1828,08	100	1589,00	100	1492,57	100	1378,23	100

(0 – 6) : Très faible, (6 – 12) : Faible, (12 – 18) : Modérée, (18 – 25) : Forte, (> 25) : Très forte

Les pentes abruptes exercent une influence significative sur la dynamique du ruissellement au sein d'un bassin versant, accélérant le déplacement de l'eau vers les oueds, les rivières, et d'autres cours d'eau qui convergent vers l'embouchure du bassin, participant à l'alimentation des nappes alluviales. En revanche, les pentes douces ralentissent la vitesse du flux d'eau superficiel, favorisant une distribution plus homogène à la surface du sol. Cette caractéristique particulière facilite l'infiltration de l'eau dans le sol, contribuant à la recharge des eaux souterraines.

L'analyse de la distribution des classes de pentes au sein des sous-bassins versants de la Medjerda révèle une topographie diversifiée impactant les écoulements de surface, pouvant influencer éventuellement le cycle hydrique, hydrologique et hydrogéologique de la région.

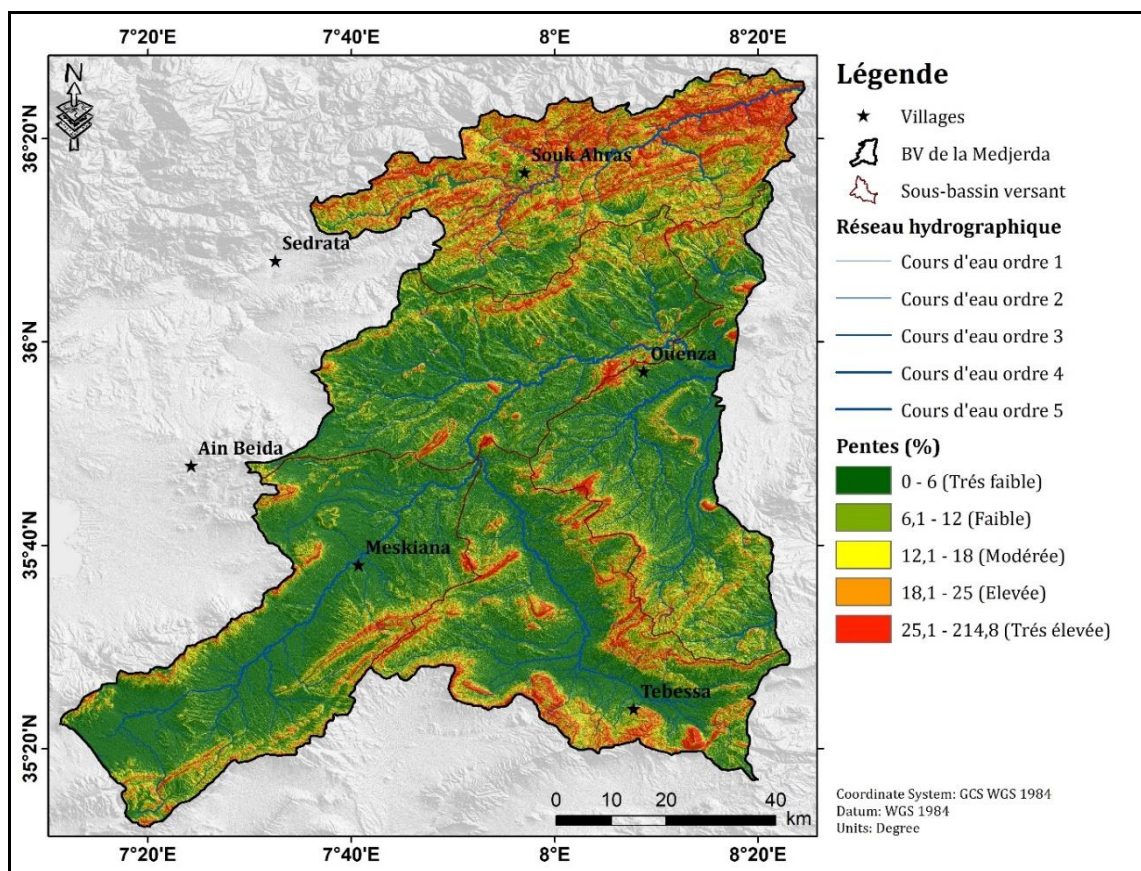


Figure 4. Carte des pentes du bassin versant de la Medjerda.

Les zones caractérisées par une pente très faible (0 – 6%) sont prédominantes dans le SBV du Meskiana (12-02), SBV du Mellegue amant (12-04), et SBV du Mellegue aval (12-05), représentant respectivement 66,02%, 54,54%, et 51,71% de leurs superficies. Ceci montre des terrains propices au ruissellement lent et à une infiltration efficace, notamment en ce qui concerne la recharge des nappes souterraines.

La seconde classe caractérisée par des pentes relativement faibles (6 - 12 %), SBV-12-02 et SBV-12-04, correspondent à des proportions significatives de 20,40% et 29,96%, dans cette

catégorie la pente légèrement plus prononcée mais n'entrave pas la distribution uniforme de l'eau, située au centre du bassin versant (entre le Nord et le Sud) de la Medjerda.

Le sous bassin versant (12-01), présente des pentes modérées (12 - 18 %), dont 21,08% de sa superficie, indique des terrains propices à une infiltration intermédiaire.

Les pentes plus raides, caractéristiques de la classe de pente forte (18 - 25 %), sont observées principalement dans le SBV-12-01 et le SBV-12-03, représentant respectivement 18,69% et 10,89%. Ces zones indiquent un potentiel accru de ruissellement rapide et peuvent favoriser la densité de drainage.

Enfin, les pentes très raides (> 25 %), caractérisant le SBV-12-01 et le SBV-12-03, représentant 27,50% et 9,91%, indiquent des zones où le ruissellement rapide est prédominant, compromettant potentiellement l'infiltration. Cette classe est fréquente dans les zones montagneuses de fortes altitudes situées au nord du SBV-12-01. Cette répartition des pentes montre la complexité du réseau hydrographique et la diversité des conditions topographiques dans la région de la Medjerda constituant un obstacle à la gestion efficace de l'eau.

5. Occupation du sol :

La carte d'occupation des sols a été réalisée en utilisant des images satellitaires Landsat 8-OLI avec une résolution de 30 mètres par pixel, obtenue via le site web du United States Geological Survey (USGS 2021). La carte des utilisations des terres et de couverture végétale a ensuite été reclassée en cinq classes, à savoir :

- Surface d'eau,
- Forêt,
- Surfaces agricoles,
- Surface urbaine et Sol nu.

Tableau 3 : Répartition des classes des pentes dans les sous-bassins versants de la Medjerda.

Occupation des sols	Surface SBV-1201		Surface SBV-1202		Surface SBV-1203		Surface SBV-1204		Surface SBV-1205	
	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%
Surface agricole	664,94	44,35	357,56	19,56	251,92	15,85	148,94	9,98	211,19	15,32
Forêt	314,01	20,94	80,21	4,39	156,54	9,85	75,88	5,08	180,80	13,12
Sol nu	440,96	29,41	1352,38	73,98	1124,16	70,75	1235,33	82,76	955,72	69,34
Surface urbaine	76,55	5,11	36,67	2,01	56,04	3,53	19,36	1,30	29,83	2,16
Surface d'eau	2,78	0,19	1,19	0,07	0,34	0,02	13,19	0,88	0,61	0,04
Total	1499,24	99,99	1828,01	100,00	1589,00	100,00	1492,70	100,01	1378,15	99,99

L'analyse du tableau 3 et de la figure 5 fournit une vue détaillée de la répartition spatiale aléatoire d'occupation du sol dans les cinq sous-bassins versants (SBV-12-01 à SBV-12-05).

En ce qui concerne **les surfaces agricoles** :

- Le SBV-12-01, dont 44,35% de sa superficie totale, constituent les plaines cultivées au sud du bassin de la Medjerda.
- Le SBV-12-04 affiche la plus faible proportion, soit 9,98%.

La couverture forestière, reste tributaire du SBV-12-01 à 20,94%, tandis que la seconde proportion se localise au niveau du SBV-12-05.

- Le SBV-12-02, reste le maillon faible en espace forestier avec seulement 4,37%. Cette variété forestière considérable est particulièrement observée dans la chaîne Tellienne au nord du bassin de la Medjerda.

Les surfaces urbaines se concentrent principalement dans les grandes villes, la proportion la plus importante se répartie dans la wilaya de souk Ahras au niveau du SBV-12-01, représentant 5,11%. Alors que le SBV-12-04 enregistre la plus faible proportion de zones urbaines avec seulement 1,30%.

La classe du sol nu est presque présente dans tous les sous-bassins, cependant le SBV-12-01 occupe la plus faible proportion, soit 29,41% de sa surface, par contre le SBV-12-04 se caractérise par la plus grande proportion de sol nu avec 82,76%.

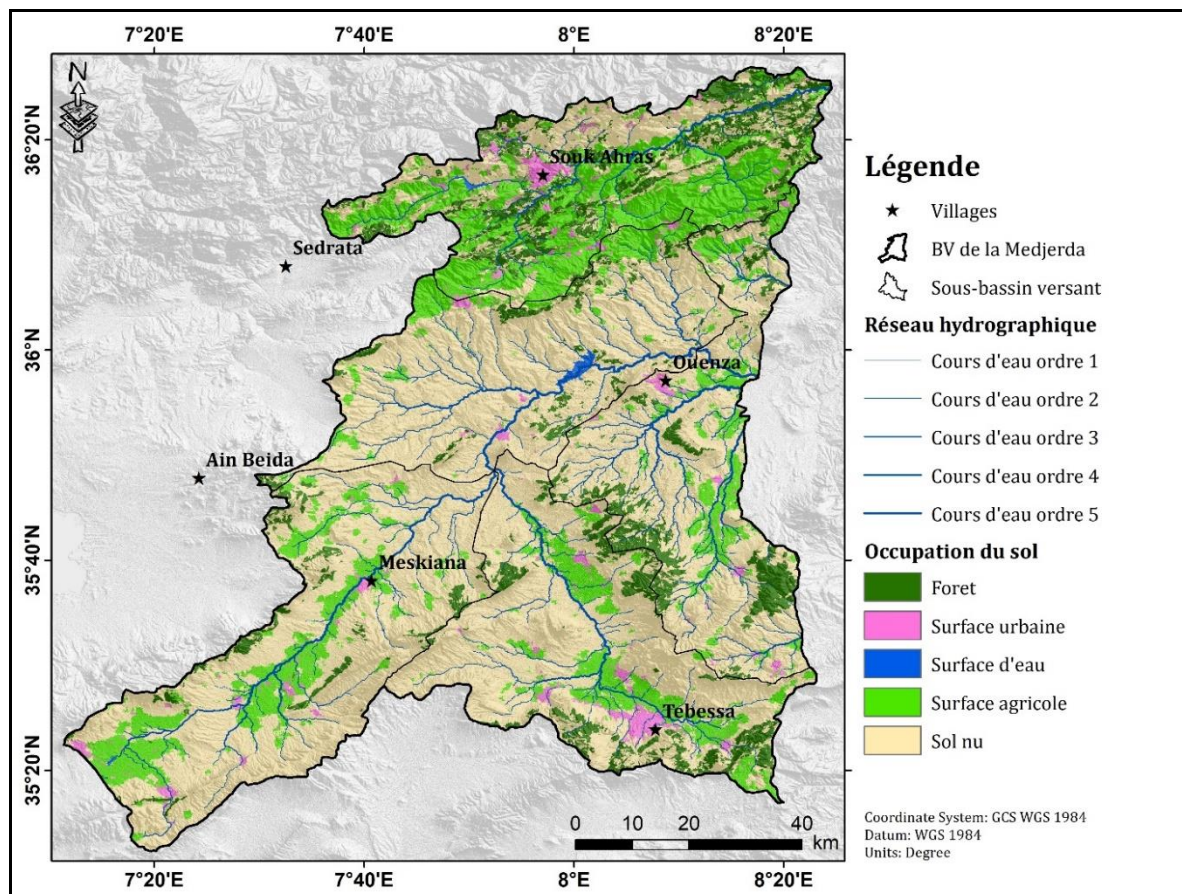


Figure 5. Carte d'occupation du sol dans le bassin versant de la Medjerda.

La répartition des surfaces d'eau varie d'un sous-bassin à l'autre, caractérisée par la présence de barrages, des lacs, et des cours d'eau. Le SBV-12-04 indique la plus importante proportion, soit 0,88%, attribuée à la présence du barrage de Mellegue.

La seconde proportion, située, en amont du SBV-12-01, avec 0,19%, contient le barrage d'Ain Dalia.

Ces variations montrent des changements significatifs dans l'utilisation des terres entre les sous-bassins, fournissant ainsi des informations importantes pour la planification et la gestion des ressources naturelles, la préservation de la biodiversité et le développement urbain durable. Il est important de souligner que cette répartition est étroitement liée à la topographie du terrain et aux variations climatiques découlant de la proximité du Sahara au sud et de la mer Méditerranée au nord.

6. Pédologie :

La carte des sols (Fig. 6) a été élaborée en numérisant la carte pédologique obtenue auprès du Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural (MADR 2018), à une échelle de 1/500000. En tenant compte de la topographie et de la géomorphologie de la région, trois grands ensembles de sols ont été identifiés : Les sols des Djebels et collines situées dans les zones montagneuses de forte altitude, et les sols des piémonts et des plaines dans les régions de faible altitude.

Après les étapes de géoréférencement, de digitalisation, de rasterisation et de cartographie finale réalisées à l'aide du logiciel ArcGIS, huit classes de sol ont été déterminées, comprenant les sols podzoliques, les sols insaturés, les sols calcaires humifères, les sols calcaires, les sols alluviaux basiques, les sols de marais, les sols salins solonchak et la roche mère. Cette répartition spatiale significative est principalement attribuable à la nature lithologique hétérogène et complexe, ainsi qu'à des événements structuraux et climatiques.

Tableau 4. La répartition en (km) et en pourcentage de chaque type de sol dans les SBV de la Medjerda.

Sols	Surface SBV-1201		Surface SBV-1202		Surface SBV-1203		Surface SBV-1204		Surface SBV-1205	
	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%
Sk	0,00	0,00	34,25	1,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ch	1081,55	72,13	215,03	11,76	408,12	25,68	477,36	31,98	750,16	54,43
m	0,00	0,00	16,25	0,89	8,30	0,52	0,00	0,00	0,00	0,00
pq	60,13	4,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
i	181,21	12,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
cq	158,15	10,55	1032,56	56,48	635,80	40,01	985,42	66,02	499,77	36,26
ab	0,00	0,00	347,26	19,00	485,31	30,54	4,00	0,27	102,09	7,41
rm	18,23	1,22	182,69	9,99	51,49	3,24	25,94	1,74	26,15	1,90
Total	1499,27	100	1828,04	100	1589,02	100	1492,72	100	1378,18	100

(Sk) : Sols salin solonchak, (ch) : Sols calcaires humifères, (m) : Sols de marais, (pq) : Sols

podzoliques, **(i)** : Sols insaturés, **(cq)** : Sols calciques, **(ab)** : Sols alluviaux basiques, **(rm)** : Roche mère

L'analyse détaillée de la distribution des classes de sols dans les cinq sous-bassins (SBV-12-01 à SBV-12-05) révèle des variations significatives de leur composition ainsi que leur répartition spatiale. Nous déduisons les sols suivants :

- Les sols calcaires humifères **(ch)** sont présents dans tous les sous bassins et occupent des surfaces importantes, particulièrement dans les régions du Nord-ouest et du centre. Ils occupent 72.13% de la surface du SBV-12-01. Ce type des sols se compose principalement de la matière organique, apportant une certaine légèreté et une texture plus friable facilitant ainsi l'écoulement de l'eau à travers leurs particules.

- Les sols calciques **(cq)**, présents également dans tous les sous-bassins mais restent importants dans le SBV-12-04, couvrant 66,02% de sa superficie, au niveau de la zone Sud de la région étudiée. Ce type des sols, présente une texture motteuse, influencée par la prédominance du calcaire dans la fraction sableuse. Bien que contenant des matières organiques appréciables (entre 0,3 et 1%), ces sols sont souvent associés à une croûte calcaire imperméable aux racines, limitant leur potentiel pour les eaux souterraines. Malgré une texture légère favorisant la perméabilité, la présence de cette croûte peut restreindre l'infiltration d'eau dans le sol, impactant ainsi le potentiel hydrologique des sols calciques (Benchetrit, 1956).

- Les sols de marais **(m)**, sont présents de manière accessoire dans le SBV-12-02 et le SBV-12-03. Ils résultent de l'accumulation quasi permanente d'eau, se subdivisant en sols acides, neutres, salés et asséchés. Leur texture est principalement argileuse en raison de cette humidité continue, créant un horizon sombre et argileux où la pédogenèse est active, surtout dans les sols acides (J.-H. Durand, 1954), ces caractéristiques peuvent affecter la perméabilité du sol, influençant ainsi sa capacité à stocker et à transmettre l'eau souterraine.

- La partie sud de la Medjerda se caractérise par la présence des sols alluviaux basiques **(ab)** de texture variable et bien drainés présentant une variabilité notable et occupent au plus 30,54% du SBV-12-03, autour des oueds de Meskiana et Chabro mais diminue dans le SBV-12-04. Ce type de sol est constitué de dépôts résultant du transport et de la sédimentation de particules par des cours d'eau. Ces sols alluviaux peuvent être subdivisés en fonction de leur texture, de leur pH (acidité ou alcalinité) et de leur teneur en calcaire, ce qui permet de catégoriser et de caractériser ces sols en fonction de leurs propriétés physiques et chimiques (J.-H. Durand, 1954).

- Les sols podzoliques **(pq)** et les sols insaturés **(i)** présents au nord du SBV-12-01, occupent entre 4,01 et 12,09 % de la superficie. Ils sont développés sur les terrains forestiers dans la

partie aval du SBV-12-01. Ces sols, caractérisés par leur acidité élevée, et une texture grossière influencée par le lessivage des éléments fins vers les horizons inférieurs, laissant une couche supérieure riche en éléments grossiers et pauvre en bases.

- Les sols insaturés résultent de la décomposition superficielle de roches non calcaires, créant des éléments grossiers riches en bases ou des éléments argileux imperméables, tels que ceux formés par les schistes, les micaschistes, basaltes, granites basiques, ainsi que sur les alluvions argileuses. D'autres roches, comme les gneiss et certains schistes créacés, relativement perméables, produisent, par altération, des produits fins peu perméables et pauvres en bases, donnant naissance à une autre catégorie de sols insaturés : les sols insaturés acides. Ces sols, généralement présents en montagne et plus ou moins argileux, démontrent la diversité des textures et de leurs impacts potentiels sur le potentiel des eaux souterraines (Benchetrit, 1956).

- Les sols salins solonchak (**Sk**) prédominent dans les hautes plaines de la Meskiana en amont du SBV-12-02 et les surfaces humides en général, avec environ de 1,87 %. Les sols salins solontchak résultent souvent d'un excès initial de sels solubles, qui provient de la décomposition de roches salifères, cette salinité pose des défis pour l'exploitation agricole. Les solontchak ne se forment pas sur place, nécessitant une accumulation de sels en surface dans des bassins fermés en raison d'une pluviométrie insuffisante pour lessiver les sels accumulés en profondeur. Ce type de sol est caractérisé par une texture Argilo-limoneuse, sa composition chimique est prédominée par les chlorures et le sodium. Cette texture spécifique limite le potentiel des eaux souterraines en entravant la capacité du sol à soutenir des cultures sans une gestion appropriée (Benchetrit, 1956).

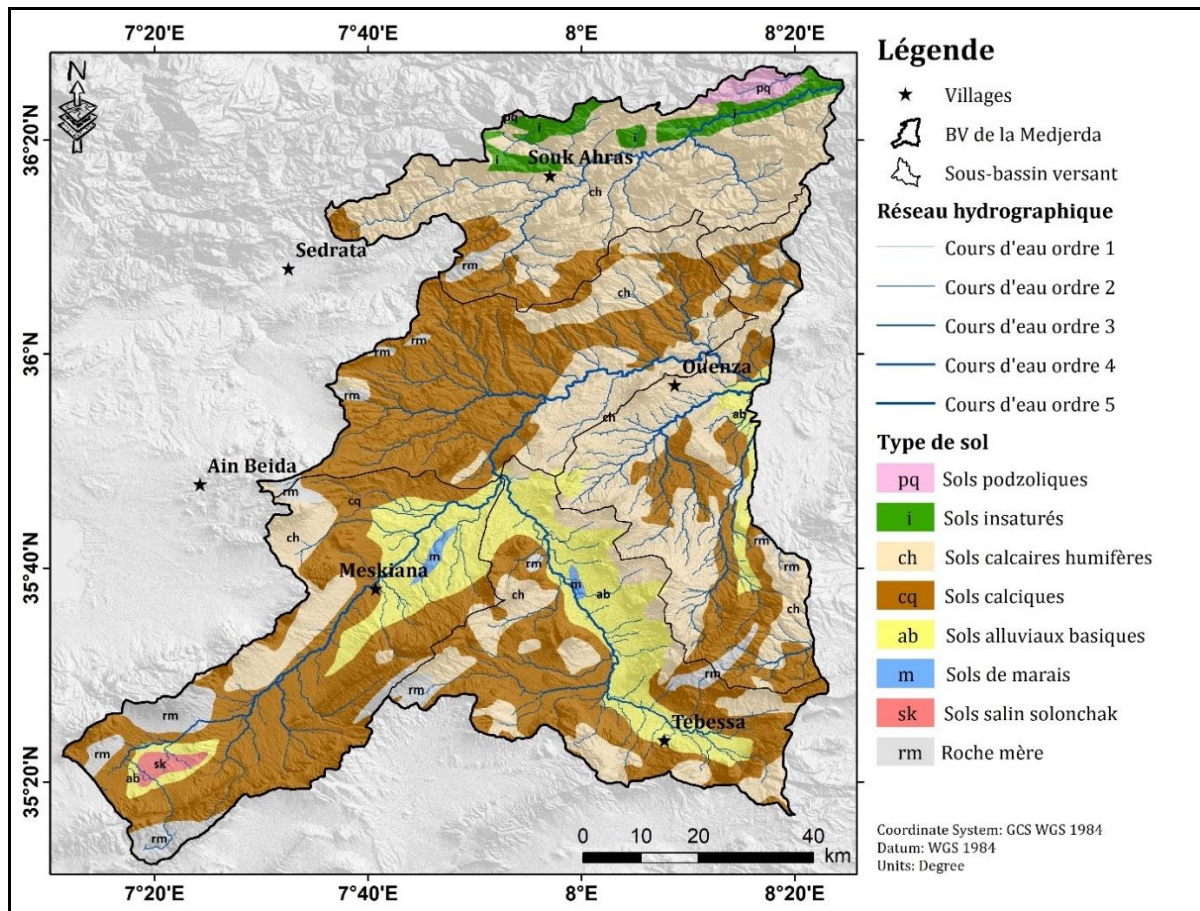


Figure 6. Types de sols dans le bassin versant de la Medjerda.

(Extrait de la carte des Sols d'Algérie. Constantine. Feuille N.J. 32 S.O. échelle 1/500.000

éditée en 1948 par Durand, M.J-H., Barbut, M.M)

Enfin, la présence de la roche mère (**rm**) est ubiquitaire, sont présents dans le SBV-12-02 avec 9,99%. Les roches mères, en tant qu'affleurements géologiques non évolués, peuvent se présenter sous la forme de roches peu perméables, restreignant ainsi l'infiltration de l'eau dans le sol. Cette distribution des classes de sols est importante pour la compréhension de la variabilité géologique et hydrologique des sous-bassins, jouant un rôle déterminant dans les processus d'infiltration (recharge des nappes) et du ruissellement.

7. Aperçu géologique :

Les travaux, réalisés par David (1956) et Villa (1980, 1994) ont permis de mieux connaître la stratigraphie, de la composition lithologique des différentes formations géologiques, ainsi que l'emplacement géographique des affleurements dans cette région. Étant donné que les caractéristiques géologiques sont importantes particulièrement vis-à-vis de la gestion et l'évaluation de la qualité physico-chimique et par conséquent de la salinité des eaux souterraines dans un contexte géologique variable et un climat influencé par les changements climatiques, nous examinons donc les formations géologiques présentes dans le bassin versant de la Medjerda, comme illustré à la figure 7.

En se basant sur l'analyse de cette carte géologique à l'échelle 1/250 000, nous avons pu élaborer une colonne stratigraphique représentative reflétant les caractéristiques géologiques de la région d'étude et composée principalement de terrains sédimentaires allant du Trias au Quaternaire selon l'ordre croissant suivant :

7.1. Mésozoïque

7.1.1. Le Trias

Les affleurements triasiques sont les plus anciens terrains datés dans les monts de la Medjerda, localisés au centre du massif, à Souk Ahras, au nord de notre zone d'étude, couvrant une surface considérable par rapport à celle des autres régions de l'Algérie. Les affleurements triasiques se divisent principalement en deux zones distinctes :

- La première est celle de la région du Tel, où le Trias présente une structure extravasée en raison de plissements intenses comme observé à Ouled Driss, Ragouba et Hennancha, dans le massif de Mechroha-Nador-N'Bails.
- La seconde concerne l'Atlas saharien, où le Trias émerge à travers la voûte de certains anticlinaux créacés par un processus de diapirisme simple. D'un point de vue hydrogéologique, les dépôts triasiques font partie de la semelle des nappes telliennes, une extension présente également en Tunisie. En direction du sud, ces dépôts sont visibles à Oued Kebarit.

7.1.2. Le Jurassique

Les dépôts jurassiques n'affleurent pas à la surface dans la région étudiée.

7.1.3. Le Crétacé

À Souk-Ahras, le développement géologique inclut les dépôts de calcaires néritiques du Crétacé inférieur, surmontés par des strates argilo-marneuses sombres contenant des microfaunes planctoniques du Maestrichtien (Crétacé supérieur) et du Pliocène. En direction sud de Souk Ahras, le Crétacé inférieur, daté de l'Aptien et de l'Albien-Cénomaniens, présente une caractéristique entièrement marine, sans transgression visible (David, 1956).

a. Le Crétacé inférieur

L'Aptien affleure dans quatre zones distinctes : la zone saharienne, la zone méridionale et septentrionale, et la zone tellienne. Dans la zone saharienne, les affleurements se situent principalement dans l'anticlinal du Dj. Ladjbel et en bordure du diapir triasique d'El Ousta. Ils se caractérisent par un faciès marno-gréseux, présentant une alternance de marnes grises ou noirâtres avec de petits bancs gréseux gris ou blanchâtres, parfois calcareux et à patine brune. Cette zone saharienne présente également un autre faciès de calcaires, avec des intercalations d'énormes lentilles de calcaires gris clair, souvent massives et à patine blanchâtre. En revanche, dans la zone tellienne, le Crétacé débute par des marnes violacées avec des

intercalations de marno-calcaires gris, présentant une patine rose, sous forme de bancs de 0,10 à 0,20 m. En résumé, l'Aptien affleure dans la région de Nador, au cœur de la zone tellienne. Les faciès de cette région se rapprochent de ceux de l'Aptien de la zone saharienne méridionale, étant plus calcaires et moins schisteux que ceux de la zone septentrionale, bien que plus proche, mais plus orientale.

b. Le Crétacé supérieur : constitue la dernière période après le Trias, marquée par les formations géologiques suivantes :

- **Le Cénomani** se manifeste par une épaisse succession de marnes homogènes qui s'étend sur l'ensemble des monts de la Medjerda. Cette séquence est surmontée de calcaires, signalant ainsi le début de la sédimentation du Turonien inférieur, avec une épaisseur croissante en direction du nord. Les affleurements de la zone saharienne se situent principalement au sud, englobant l'anticlinal du Dj-Ladjabel, d'El Ouasta-Sakiet, et de Sidi Mohammed Sasi, ainsi qu'au nord, recouvrant la vallée de la Medjerda. Dans la zone tellienne, l'Albien est observable au sud de Nador et à proximité de Medjez Sfa.

- **Le Turonien** est formé d'une série principalement de calcaires. La proportion entre les calcaires et les marnes varie considérablement d'un point à l'autre. Au nord, le Turonien présente une caractéristique calcaire uniquement à la base, avec une épaisseur dépassant les 200 mètres. En revanche, vers le Sud, il est soit entièrement calcaire, soit marneux avec une épaisseur ne dépassant pas les 100 mètres.

- **L'Emschérien**, comprenant le Coniacien et le Santonien, se distingue par un ensemble principalement marneux d'épaisseur notable, reposant au-dessus de la barre calcaire turonienne. Il est observé que les couches du Coniacien sont principalement constituées de marnes associées à du quartz, des micas et des calcaires blanchâtres.

- **Le Campanien** se distingue par une grande uniformité entre les calcaires blancs détritiques et les marnes grises, parfois bleutées en surface et parfois présentant une teinte verdâtre similaire à celles observées depuis le début du Crétacé.

- **Le Maestrichtien** débute près du sommet des marnes intermédiaires. Il est principalement caractérisé par la présence de la deuxième barre des calcaires, ainsi que par les marnes supérieures. Notant que les calcaires du Crétacé sont présents dans les monts d'Ain Soltane, dans le Nord-Est de Sedrata, ainsi que dans les flancs du synclinal de Dréa-Taoura-Mérahna et de Bordj M'Raou, où ils sont recouverts par les grès du Miocène et les alluvions du Quaternaire. Les épaisseurs de ces calcaires peuvent atteindre jusqu'à 300 mètres.

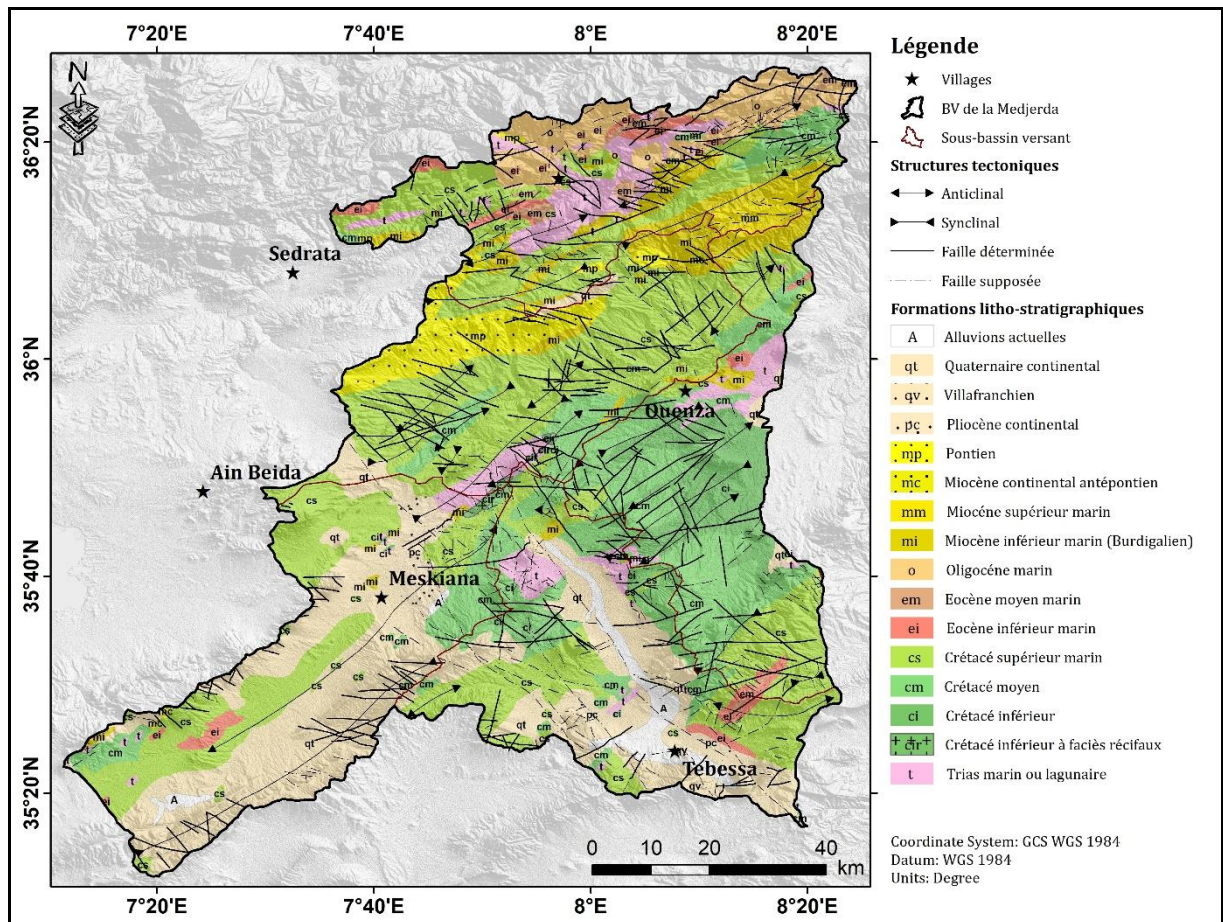


Figure 7. Carte géologique du bassin versant de la Medjerda.

(ANRH, 2008/ Échelle 1/200000)

7.2. Cénozoïque

7.2.1. Le Paléogène

a. Éocène inférieur et moyen

La limite entre l'Éocène inférieur et moyen est marquée au sein de la formation constituée de calcaires à Nummulites, sans discontinuité de sédimentation. Il offre quelques coupes pour illustrer en détail cette transition, mettant particulièrement l'accent sur les massifs les plus occidentaux.

L'examen approfondi de l'Éocène inférieur et moyen révèle une diversité lithologique à travers trois faciès distincts. Dans le faciès septentrional, les marnes argileuses noires en concordance avec le Maestrichtien, forment la base, suivies d'une barre calcaire noire ou gréseuse, siliceuse et bitumineuse. Cette barre présente des caractéristiques telles que des lits phosphatés fréquents et de nombreux silex noirs, tandis que les marnes noires à boules ou les bancs de calcaire gris à patine jaune, datant du lutétien, comportent des lumachelles rares aux sommets. D'autre part, le faciès méridional s'ouvre sur une base de marnes argileuses noires de transition, suivie d'une barre calcaire connue sous le nom de calcaire à nummulites. Les calcaires évoluent de gris à blanc, agrémentés de lumachelles composées de grandes

nummulites. La présence d'un niveau phosphaté à la base et au sommet, accompagné de silex blonds rares, plus fréquents dans le faciès de transition, caractérise cet ensemble correspondant à l'Yprésien et à la base du lutétien. Les marnes lumachelles à débris et les grès d'âge Lutétien supérieur dans ce faciès sont notablement moins épais que la série précédente.

Enfin, le faciès littoral se distingue par une réduction significative des assises, toutes exhibant des traits littoraux marqués. La faible épaisseur de ces quelques mètres de sédiments les différencie nettement des autres faciès, soulignant ainsi la spécificité de cette zone côtière dans la séquence stratigraphique.

Les faciès septentrional et méridional présentent des similitudes globales malgré des différences dans la lithologie, la faune et l'âge. Les niveaux supérieurs indiquent une rapide diminution de la profondeur vers le sud, préfigurant l'émersion jusqu'au Miocène. Au nord, la profondeur reste relativement constante, avec une interruption brève mais abrupte de la sédimentation avant le retour de la mer dès le Préabonien. En se rapprochant du rivage, la puissance de la série diminue progressivement vers le sud.

b. Les formations de l'Oligocène et de l'Oligo-miocène : développées à Ain Zana, Mechroha et Madène-Medjerda sont attribuées à la nappe numidienne, qui est constituée de bas en haut par des marnes grises argileuses sous-numidiennes de l'Oligocène, caractérisées par une faible présence de calcaires, suivies de bancs gréseux séparés d'argiles schisteuses de l'Aquitainien. Cette séquence met en évidence les variations stratigraphiques entre les périodes oligocènes et oligo-miocènes.

7.2.2. Le Néogène

a. Le Miocène : marin révèle des caractéristiques de littoral ou de mer peu profonde, se manifestant à travers :

- des marnes noires qui, par altération, adoptent une teinte brune assez claire, tout en étant riches en calcaire plus ou moins ferrugineux et en gypse.
- des grès blancs, roux ou bruns, avec un ciment calcaire ou calcareux-siliceux, souvent accompagnés de conglomérats, de sables, de glauconites et de coquilles.

b. Le Mio-Pliocène : regroupe l'ensemble des formations continentales qui se sont formées après la dernière transgression marine du Miocène. On y trouve des marnes blanches à gypse, des calcaires bicolores gris bleu et jaune vif, ainsi que des argiles et des conglomérats rouges. Ces dépôts remplissent le synclinal de Taoura-Merahna, atteignant une épaisseur de 350 mètres.

7.3. Quaternaire

D'après L. David (1956), cette période correspond à l'ensemble des formations géologiques postérieures à la dernière phase significative de plissement survenue après le dépôt du Mio-

Pliocène continental. Le Quaternaire s'étend sur de vastes étendues à l'ouest de la wilaya, notamment dans les régions de Sedrata, Bir Bouhouche, Terreguelt, Oum el Adeim et Saf el Ouiden. On y identifie une variété de formations continentales récentes, allant des nappes d'épandage aux terrasses fluviales en passant par les croûtes de calcaire, les dépôts lacustres, les travertins, les limons et cailloutis, ainsi que les éboulis.

Ces diverses formations ont été regroupées en trois catégories distinctes :

7.3.1. Les formations anciennes

Ces formations prédominent essentiellement sur la versant méridional des monts de la Medjerda, caractérisées par deux types distincts de dépôts :

a. Vieilles nappes d'épandage : Représentée par la croûte calcaire, qui se compose de roches carbonatées blanches, jaunâtres et roses. Elle affiche une texture granuleuse, terreuse et poussiéreuse, et se trouve principalement sur le versant sud des monts de la Medjerda.

b. Formations des plateaux :

Les cailloutis : situés au sud de Souk Ahras, sur le Trias, se trouvent à des altitudes variant de 660 à 700 m, faisant partie de formations quaternaires anciennes qui ont été démantelées par l'érosion.

7.3.2. Formations récentes

Elles se manifestent par des alluvions et des cailloutis, principalement observés dans les hautes plaines d'inondations et les terrasses des grands oueds tels que la Medjerda, le Renem, et le Mellah qui caractérisent ces types de dépôts.

7.3.3. Formations actuelles

Elles se composent de quatre types principaux de dépôts :

- Limons et cailloutis résultant du lessivage de la portion superficielle altérée des marnes (limons) et du transport des éboulis des calcaires (cailloutis). En ce qui concerne les travertins, ils résultent des dépôts générés par des sources thermales, notamment celles de Hammam N'Bails, Ain el Hammam, Ben Nour (situées à 24 km de Souk Ahras), et Hammam Tassa.
- Éboulis présents au pied des montagnes.
- Par ailleurs, le Quaternaire se caractérise également par des terrasses étagées, principalement observées le long de la Medjerda et de l'oued Renem. Ces terrasses se divisent généralement en deux parties distinctes :
- Une très haute vallée à pente très raide, comprenant le lit actuel de la rivière d'une part, et une très basse terrasse, d'une hauteur de 3 à 5 m, préservée principalement dans les méandres, correspondant au lit majeur d'autre part.

- Pour la haute vallée, la Medjerda traverse un manteau d'alluvions dominant de 1 à 2 m le fond de son lit, avec une basse terrasse à 10 m au-dessus du fond du lit actuel. Une moyenne terrasse, située à 30 m, est formée de cailloutis et de sable, tandis qu'une haute terrasse, à une altitude de 100 m au-dessus de la rivière, présente un matériau consolidé en poudingues.
- La description géologique détaillée a été mentionnée dans le tableau 3, en fournissant les caractéristiques (lithologie, perméabilité et intérêt hydrogéologique) de chaque formation, du Trias au Quaternaire.

8. Aperçu tectonique sur la région d'étude

8.1. Phase tectonique

Les monts de la Haute Medjerda, situés entre les zones telliennes et sahariennes, ont connu une phase orogénique significative, s'étendant de la fin du Lutétien au Quaternaire, comme indiqué par David en 1956. Passons en revue brièvement les principales phases tectoniques selon les observations de L. David (1956) :

- **Phase préliminaire, post-Lutétien et anté-Bartonien** : Cette phase initiale a donné lieu aux premiers plissements substantiels des assises préalables.
- **Première phase majeure post-Oligocène et anté-Miocène**, précédant la transgression miocène.
- **Deuxième phase majeure, post-Miocène inférieur et anté-Miocène supérieur** : Une période paroxysmale qui marque la disparition de la mer dans l'Est algérien et où toutes les nappes de glissement reposent sur le Miocène.
- **Phase post-Miocène et anti-Pliocène** : Une période de distension, caractérisée par l'enfoncement progressif de certains panneaux du socle, donnant naissance aux bassins d'effondrement.
- **Phase post-Pliocène** : marque la fin du régime subsident des bassins d'effondrement.

Il est à noter que la période pré-orogénique enregistrée dans les chaînes littorales ne trouve pas d'équivalent observable dans les monts de la Medjerda.

Concernant la structure générale, les zones sahariennes et telliennes sont en contact l'une avec l'autre, mais il s'agit d'un passage progressif entre les deux pays : les plis se poursuivent plus au moins d'une zone dans l'autre.

Cinq zones structurales ont été identifiées pour décrire la tectonique régionale dans la région d'étude :

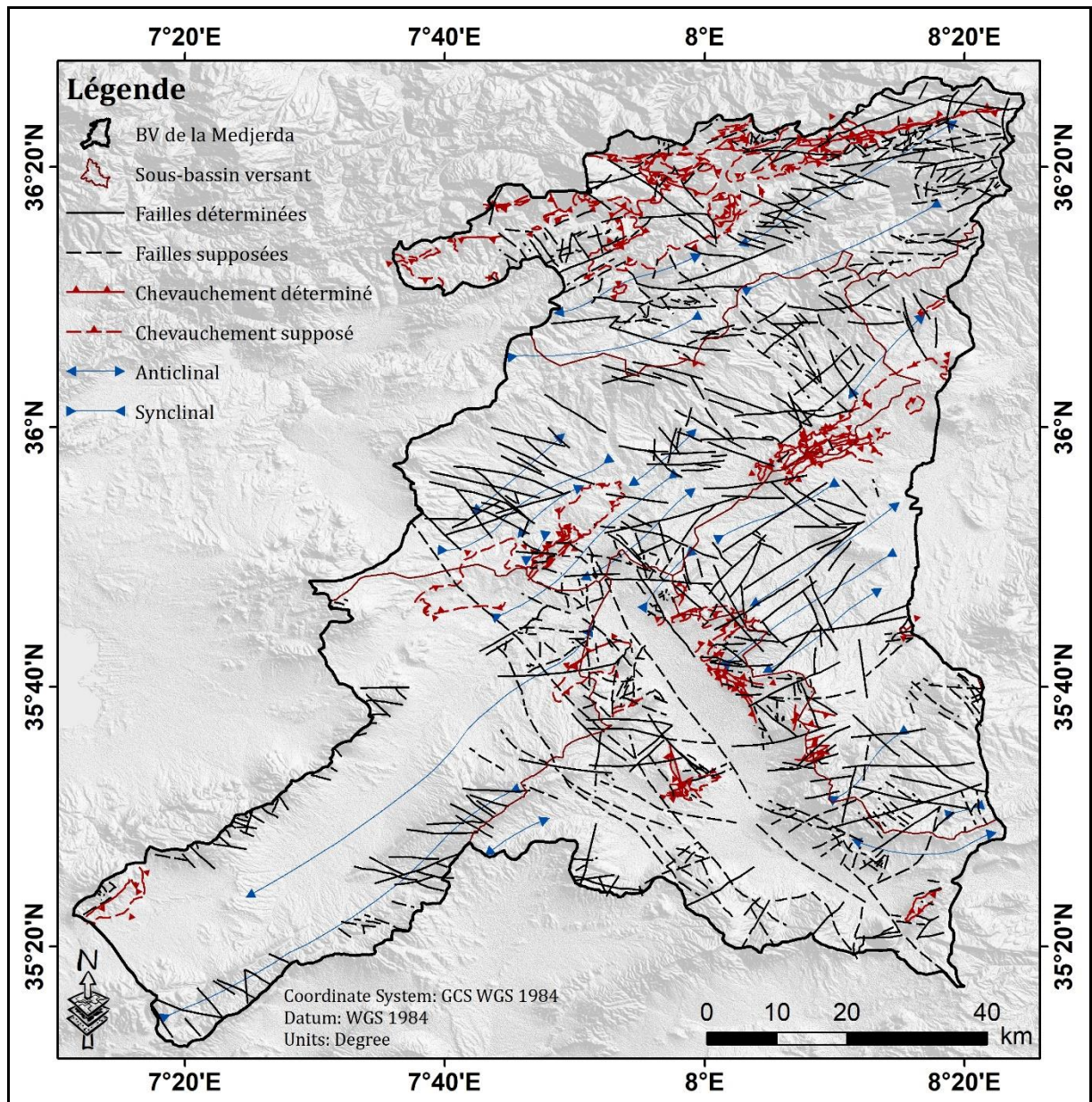


Figure 8. Carte de linéaments du bassin versant de la Medjerda.

(ANRH, 2008/ Échelle 1/200000)

A- La zone saharienne : c'est une zone de structure relativement simple, montrant une succession régulière de plis simples de type jurassien avec des anticlinaux étroits et de vastes synclinaux à fond plat (style éjectif). L'orientation des plis presque exactement sud-ouest, nord-est. Seuls les diapirs triasiques et les bassins d'effondrement rompent la monotonie. Elle contient plusieurs structures :

- De l'anticlinal d'Ouenza-Dj. Ladjbel ;
- Du synclinal d'Ain zerga-Ain kerma ;
- De l'anticlinal d'El Ouasta-Sakiet ;
- De l'aire synclinale d'Ain Farah-Ain el Anz, anticlinal du Dj. Choucha ;

- De l'anticlinal de Sidi Mohammed Sassi ;
- Du synclinorium de Montesquieu-Gambetta-Mérahna ;
- De l'anticlinal du Dj. Zellez-Dj. Zarouria-Hammam Tassa-Dj. Berda-Dj. Graouet ;
- De l'anticlinal du Dj. Serou-Dj. Dekma-Dj. Bou kebech ;
- Du synclinorium de la haute Medjerda ;
- Des plis telliens.

B- La zone tellienne :

La transition vers la zone tellienne se manifeste progressivement par une accentuation des plis et un changement de leur orientation, qui tend à adopter une direction ouest-est. Certains anticlinaux sont simplement inclinés ou renversés, mais la plupart ont évolué vers des plis-failles ou des écailles imbriquées les unes dans les autres. À quelques exceptions près, tous les chevauchements présentent une amplitude relativement faible. Par exemple, celui de l'écaille supérieure du dj-Kelaia atteint 6 km, tandis que celui de la petite nappe du Guern Djedi-dj. El Hamra ne dépasse pas 5 km. Ces manifestations marquent les dernières expressions orientales des grandes nappes de glissement de l'algérois.

C- Les bassins d'effondrements :

Les bassins d'effondrement dans la région comprennent les éléments suivants :

- **Bassin de Gambetta**

Il s'est formé dans la partie sud-occidentale du grand synclinal de Mérahna, ce bassin se caractérise par d'importantes failles d'effondrement orientées NNW-SSE, pratiquement perpendiculaires à la direction du synclinal.

- **Bassin du Nador N'Bails**

Il constitue un exemple classique de bassin d'effondrement intra-tellien, entièrement délimité par d'importantes fractures. La direction prédominante des failles est, comme dans le bassin de Gambetta, NNW-SSE. Les autres failles limitant le bassin sont orientées SW-NE et localement SSW-NNE, globalement parallèles aux plis. En résumé, les bassins d'effondrement des monts de la Haute Medjerda suivent principalement une direction NW-SE, conditionnée par les fractures profondes du socle.

D- les structures transversales : Les failles transversales importantes influent tant sur les chaînons telliens que sahariens. Dans la région de la Medjerda, on distingue deux types de structures transversales majeures marquées par de grandes fractures ou failles orientées SW-NE et les failles locales orientées SSW-NNE.

8.2. La tectonique du Trias

Elle englobe le Trias des anticlinaux, des écaïlles, des grandes fractures, et des grands massifs.

Dans notre étude nous avons réalisé une cartographie détaillée des failles géologiques (Fig. 8), en tant qu'élément fondamental dans la cartographie du potentiel en eau souterraine et la prise de décision en matière de gestion des ressources en eau. La répartition spatiale de ces structures dans la région d'étude nous a permis de comprendre les variations de perméabilité du sous-sol, et d'anticiper les zones propices à l'accumulation d'eau souterraine. Cette introduction souligne l'importance des linéaments dans l'évaluation du potentiel en eau souterraine.

9. Aperçu hydrogéologique

L'exploration de l'hydrogéologie de la région s'avère particulièrement fascinante, car elle nous offre une perspective approfondie sur les mécanismes dont les aquifères s'alimentent, la détermination de la direction d'écoulement souterraine, ainsi de comprendre les interactions et les interrelations complexes entre les eaux souterraines et les eaux de surface.

Il est crucial de souligner que cette zone abrite plusieurs aquifères monocouches ou multicouches, continues ou discontinues, possédant des ressources locales très limitées. Elle contient des formations lithologiques sans aquifères, soulignant ainsi l'importance cruciale de définir avec précision les limites de ces nappes. Les conditions hydrogéologiques peuvent être appréhendées de manière indirecte à travers des indicateurs tels que la géomorphologie (Djidel, 2008). Cependant, la définition et l'évaluation du potentiel en eau des aquifères souterrains sont soumises à une multitude de facteurs spatiaux et temporels, tels que la composition lithologique, le système de drainage, le type de sol, la topographie, la pente, le climat local, l'utilisation des terres, et les conditions hydrologiques (Bouklab et al., 2022).

Les eaux souterraines exercent une influence significative sur les propriétés pétrophysiques des roches (Guasmi, 2009). Ces caractéristiques sont tributaires de la nature, de la perméabilité, de la structure, de la fissuration et de la composition chimique des roches traversées (Bahir et al., 2001).

Dans cette section, nous allons fournir une brève présentation des aquifères dans la région de la Medjerda en se reposant sur une synthèse des travaux effectués au niveau de cette zone (David, 1956, Guasmi, 2009). Trois horizons formant l'aquifère ont été révélés au sein de trois âges géologiques distincts :

- **Dans les massifs diapiriques**, la fonction des roches qui renferment l'eau est double, assurée à la fois par d'importants blocs de calcaires poreux et de dolomies. Les horizons

ainsi formés déchargent dans les zones de fractures ou en contact avec les roches du Crétacé, se manifestant sous la forme de sources dont le débit varie de 0,1 à 0,3 L/s.

- **Horizons aquifères présents dans les calcaires du Campanien et du Maestrichtien :** leur teneur en eau atteint des niveaux particulièrement élevés. Les calcaires, fissurés et poreux, reposant sur des marnes imperméables, renferment une eau pure au goût agréable, déchargée par des sources alimentant la localité, avec un débit oscillant entre 0,5 et 1 L/s.
- **Les horizons aquifères situés dans les sédiments du Miocène et du Pliocène** sont associés aux grès et aux conglomérats dotés de bonnes propriétés filtrantes. Ces horizons se déchargent à travers des sources, avec un débit variant de 0,2 à 1,5 L/s en fonction des surfaces de contact avec les masses argileuses et marneuses sous-jacentes.

9.1 : Les principales nappes constituant l'aquifère de Souk-Ahras :

Le système aquifère de Souk-Ahras se caractérise principalement par deux nappes majeures, accompagnées de nappes secondaires, toutes situées au sud du chef-lieu de la wilaya de Souk-Ahras. Ces éléments ont été définis par l'intermédiaire de quatre champs captants clés, à savoir Taoura, Terguelt, Tiffech et Sedrata, (Aouadi & Zeghadnia (1990), Aggoun (1993), et Bousnoubra (2002).

Le Synclinal de Taoura, se forme par la superposition de deux horizons aquifères distincts. Le premier, situé en surface dans le Mio-Plio-Quaternaire, présente une potentialité relativement faible. Le second horizon, plus profond, se trouve dans les formations calcaires du Maestrichtien.

9.1.1. La nappe superficielle (libre) du Mio-Plio-Quaternaire

Elle est contenue dans des matériaux tels que des argiles, marnes, conglomérats, grès, limons sableux, graviers, éboulis de calcaires et cailloutis. Son épaisseur peut atteindre jusqu'à 20 mètres, et elle repose librement sur le substratum argilo-calcaire du Maestrichtien supérieur.

9.1.2. La nappe profonde (captive) des calcaires du Maestrichtien inférieur

Elle constitue l'autre horizon aquifère du Synclinal de Taoura. Les calcaires du Maestrichtien inférieur présentent une fissuration significative, abritant ainsi un aquifère d'importance notable. Ces fissures peuvent atteindre des dimensions équivalentes à de véritables cavernes, comme démontré par le forage "T1" qui a identifié une caverne à une profondeur de 103 mètres (Friane, 2000). La distribution de cet aquifère s'étend sur l'ensemble du synclinal, mais il cesse d'exister au nord-est vers Merahna, dissimulé sous une couche épaisse de marnes miocènes d'une épaisseur de 400 mètres. Son substratum, dont la profondeur dépasse les 400 mètres, n'a jamais été atteint. En revanche, sa limite supérieure est représentée par la

formation argilo-calcaire du Maestrichtien supérieur. La superficie de cette nappe est estimée à 700 km² par planimétrie.

Cette nappe constitue une source d'exploitation substantielle, avec un débit de l'ordre de 251 l/s, destiné à l'approvisionnement en eau potable des villes de Souk-Ahras, Taoura, Merahna, Drea, Zaarouria et M'Daourouche.

En présence des marnes du Miocène, les calcaires fissurés génèrent de multiples sources (environ 14 sources, mentionnées ultérieurement), cumulant ainsi un débit de 51,5 L/s destiné à approvisionner en eau potable les différentes municipalités de la wilaya de Souk-Ahras.

L'écoulement des eaux souterraines s'oriente généralement du sud vers le nord. Il est donc important de souligner que la capacité estimée des calcaires fissurés du synclinal de Taoura s'élève à 44 millions de mètres cubes (ANRH 2013).

D'un point de vue hydrodynamique, la transmissivité varie entre 10⁻¹ et 10⁻² m²/s, ce qui explique la fissuration considérable et la karstification intense de la nappe. Le coefficient d'emmagasinement est d'environ 9.10⁻³, (Toubal en 1993).

9.2. Synclinal de Terreguelt

Situé au sud-ouest de la ville de Souk-Ahras, composé de deux nappes aquifères superposées, l'une en surface et l'autre en profondeur :

9.2.1. Nappe superficielle (nappe libre du Plio-Quaternaire)

Elle est constituée d'argiles graveleuses, de calcaires, de galets et de cailloutis. Elle est contenue dans les formations du Plio-quaternaire et s'étend sur une superficie de 196 km². L'épaisseur de cette nappe varie de 10 à 75 mètres, avec un substratum de type marno-argileux.

9.2.2. Nappe profonde (la nappe captive des calcaires du Maestrichtien supérieur)

Elle se compose de calcaires fissurés avec des intercalations marneuses du Maestrichtien supérieur, sur lesquels reposent des formations plus récentes d'âge plio-quaternaire. Cette nappe s'étend sur une superficie d'environ 216 km², mais sa capacité reste indéterminée en raison de l'état des forages exploités.

En raison de son épaisseur indéfinie, dépassant les 180 mètres, cette nappe est exploitée par plusieurs forages et un puits, générant respectivement des débits de 74 L/s et de 1,5 L/s. Ces infrastructures sont essentielles pour l'approvisionnement en eau potable des communes de Sedrata et Terreguelt. Du point de vue hydrodynamique, la transmissivité de la nappe, mesurée aux forages TR6 et TROB, varie entre 2,22.10⁻³ m²/s et 2,35.10⁻⁴ m²/s. La perméabilité moyenne de cette nappe est estimée à environ 10⁻⁵ m/s, (Aggoun,1993).

9.2.3. Nappes de Sedrata-Tiffech

Sont principalement constituées d'argiles sableuses, de grès, de graviers plus ou moins argileux datant du Mio-Pliocène, ainsi que de calcaires durs attribués au Mio-Plio-Quaternaire. La superficie de la plaine de Sedrata s'étend sur 190 km² (Ghachi ,1990). La profondeur moyenne, mesurée au forage F4, est de 64 mètres. Les forages ont un débit d'exploitation avoisinant les 3 L/s, tandis que les sources contribuent à un débit total de 26 L/s. Sur le plan hydrodynamique, la transmissivité moyenne, mesurée au forage F1, est d'environ 3.10^{-4} m²/s. La perméabilité moyenne est estimée à $1,2.10^{-5}$ m/s, avec un coefficient d'emménagement évalué à $2,3.10^{-4}$, (Aouadi & Zeghadnia en 1990).

9.2.4. Nappes d'Oued Kebarit-Sid Fredj-Ain Zerga

Elles occupent principalement les calcaires du Maestrichtien qui recouvrent les marnes argileuses du Miocène. Ces nappes, ayant une épaisseur moyenne d'environ 130 mètres, sont exploitées par le biais de quatre forages et huit sources. Ces infrastructures contribuent à des débits totaux respectifs de 65 L/s et 7 L/s.

9.3. Les principales aquifères constituant les plaines de Tebessa

9.3.1. Aquifères de la plaine de Meskiana

Située au sommet de l'anticlinal de la Meskiana au niveau du SBV-12-02. Administrativement, il englobe deux portions importantes des deux wilayas d'Oum El Bouaghui et Khenchela (Fig. 01). Il est délimité par la structure monoclinale des Dj. Tafrennt – Boutokhma – Fedjidjet à l'ouest et la structure synclinale de Delâa – Zoui à l'est. Ses limites sud-ouest et nord-est sont marquées respectivement par l'axe Dj. Chettaïa – Dj. Tadelist et l'axe routier Aïn Beïda – Tebessa. Géologiquement, la plaine est caractérisée par des dépôts alluvionnaires d'âge Plio - Quaternaire, tandis que les côtes environnantes sont recouvertes de croûtes calcaires de la même période. L'anticlinal de la Meskiana, recouvert de complements Quaternaires, présente une composition lithologique diversifiée, comprenant des calcaires à silex de l'Éocène au sommet et des marnes sénoniennes à la base. Les formations aquifères comprennent le Plio-Quaternaire, l'Éocène, Maestrichtien, et le Turonien, chacune avec des extensions spécifiques, telles que la rive droite de l'Oued Meskiana, Aïn Dalaa (nord-est), et une profondeur reconnue par les forages de la ville de Meskiana pour le Turonien. La superficie totale des aquifères s'étend sur environ 1634 km², avec des puissances variant de 60 m au centre de la plaine pour le Plio-Quaternaire avec des profondeurs de la surface piézométrique allant de 3.5 à 70.3 m pour le Plio-Quaternaire, l'Éocène, le Maestrichtien. Les ouvrages existants, captent ces aquifères à des profondeurs comprises entre 10 et 40 m pour les puits, et entre 100 et 300 m pour les forages. Les capacités des ouvrages varient d'un aquifère à l'autre. Pour l'aquifère du Plio-Quaternaire, les puits affichent des débits allant de 1

à 7 l/s, tandis que les forages présentent des débits de 03 à 10 l/s. Quant aux aquifères de l'Eocène et du Maestrichtien certains forages atteignent des débits de 30 l/s.

9.3.2. Aquifères de la plaine de Tebessa

La plaine de Tebessa, située dans la wilaya de Tebessa et englobant le sous-bassin versant de Chabro 12-03. Il présente une orientation NE-SO. Ses limites sont définies par les unités de Meskiana et de Chéria à l'ouest, les massifs de Bou Khadra, Ez-Zitoun, et Dir à l'est, les formations Triasiques d'El Aouinet au nord-ouest, et Dj. Bou Roumane et Dj. Es Sif au sud-est. Géologiquement, elle est caractérisée par des dépôts alluvionnaires Plio-Quaternaires et des séries Eocènes, Sénoniennes, et Turoniennes avec diverses compositions lithologiques. Les aquifères comprennent le Plio-Quaternaire, Eocène, Maestrichtien, et le Turonien, occupant différentes zones et profondeurs. La superficie totale des aquifères s'étend sur environ 1025.70 km², avec des puissances variant de 40 à 50 m. Les ouvrages existants, tels que les puits et les forages, captent ces aquifères avec des profondeurs de 15 à 30 m pour les puits et de 100 à 400 m pour les forages.

Les capacités des ouvrages varient d'un aquifère à l'autre. Dans l'aquifère du Plio-Quaternaire, les forages affichent des débits allant de 10 à 40 l/s. Pour l'aquifère de l'Eocène, les forages présentent des débits variants entre 30 et 40 l/s, tandis que les forages du Maestrichtien atteignent des débits de 06 à 30 l/s.

9.3.3. Aquifères de la plaine de l'Oued Horihir

La plaine de l'Oued Horihir, qui englobe une portion significative du SBV-12-05, s'étend entre l'Algérie et la Tunisie, intégrant la plaine d'Ouled Bou Ghanem du côté tunisien et la vallée de l'oued Horihir du côté algérien, orientée sensiblement du nord au sud. Délimitée à l'est par la frontière tunisienne, à l'ouest par les dômes des Dj. Def et El Méridj, et au sud par la forêt de Bou Rbaia, Dj. Ed Dyr et Dj. Ez Zitoun, cette zone présente des sédiments alluvionnaires quaternaires, dominés par des graviers, des sables, des argiles et des limons, avec une présence notable de croûtes calcaires quaternaires. Les aquifères comprennent les alluvions du quaternaires, les calcaires du Maestrichtien et de l'Eocène, les calcaires de l'Albien, et l'aquifère Aptien profond. La superficie totale des aquifères est d'environ 283 km², avec des puissances variant de 10 à 12 m pour l'aspect alluvionnaire, alors qu'elle ne dépasse pas les 5 m dans la partie avale de la vallée, et jusqu'à 20 m pour les croûtes calcaires. Pour les autres formations du Maestrichtien et de l'Eocène, de l'Albien, et de l'Aptien profond, la puissance ne dépasse pas les 100 m. Les ouvrages existants, tels que les puits et les forages, ont des capacités diverses selon le type d'aquifère, avec des débits allant de 1.0 à 3.0 l/s pour les puits ayant une profondeur de 15 à 35 m et de 7 à 30 l/s pour les forages d'une profondeur de 150 à 300m.

9.3.4. Aquifères de la plaine de l'Oued Kseub :

La plaine de l'Oued Kseub, située dans la wilaya de Tebessa au niveau du SBV-12-05 et se présente comme un affluent de l'oued Mellegue, délimitée par Djebel Ouenza au flanc NO (nord-est) et Djebel Def au flanc SE (sud-est) dans sa partie amont, tandis que sa partie avale est ceinturée par la plaine de l'Oued Horihir au Sud et Dj. Ouenza à l'Ouest. Géologiquement, elle est caractérisée par des sédiments quaternaires hétérogènes, comprenant des alluvions, conglomérats, calcaires lacustres, croûtes calcaires, graviers, sables, et argiles à limons. Le Miocène présente une composition grés-marneuse riche en gypse, tandis que la série du Turonien à l'Albien inférieur est principalement marneuse avec des assises calcaires. Les aquifères incluent le Quaternaire, le Miocène, l'Albien moyen, et l'Aptien profond. La superficie totale des aquifères atteint environ 75 km², avec des puissances de 10 à 12 m pour l'aquifère quaternaire, environ 100 m pour le Miocène et l'Albien moyen. Les puits, d'une profondeur de 15 à 35 m, et les forages de 200 à 500 m, présentent des capacités variables, avec des débits allant de 1.0 à 3.0 l/s pour les puits et 2 l/s pour les forages. Des sources telles que Aïn Karetta et la source "Romaine" sont également présentes, avec des débits respectifs de 0,5 l/s et 3 l/s. Le tableau suivant donne un aperçu sur la présence des parties aquifères au cours des différentes périodes.

Tableau 5. Caractéristiques des différentes formations géologiques rencontrées dans la zone d'étude.

Age	Composition lithologique	Épaisseur (m)	Perméabilité	Intérêt hydrogéologique
Quaternaire	Alluvions récentes et actuelles	Faible	Perméable	Aquifère
	Limons			
	Éboulis de pente			
	Croute calcaire			
	Calcaires lacustres et travertins			
Plio-quaternaire	Poudings, graviers et argile, rouge	30 à 50	Perméable	Aquifère
Mio-Pliocène	Poudingues, argiles rouges et grises calcaires lacustres	350	Perméable	Aquifère
Miocène	Marnes argileuses, grès et poudingues.	(150-200)	Imperméable	Substratum
Oligo-Miocène	Couches numidiens, alternance de grès à patine rousse et d'argiles.	+1000	Imperméable	Toit
Éocène supérieure	Marnes grises, et brunes quelquefois à lumachelles.	350	Imperméable	Toit
	Marnes noirâtres, à rognons calcaires.			
Éocène inférieur et moyenne	Calcaires blancs et beiges à nummulites	150	Perméable	Aquifère
	Calcaires et brunes bitumineux à globigérines			
Paléocène	Argiles noires et marnes grises à intercalations de calcaires marneux	150	Imperméable	Toit, substratum
Maestrichtien	Calcaires blancs à la base, marnes argileuses au sommet	300	Perméable	Aquifère
Campanien	Calcaires et marno-calcaires blancs à incérâmes, marnes grises au sommet	100 à 250	Perméable	Aquifère

Emschérien et base du campanien inf.	Marnes et marnes argileuses grises, à intercalations de marno-calcaires.	100 à 250	Perméable	Aquifère
Turonien	Calcaires gris, calcaires marneux et marnes argileuses	Très profond		
Cénomanién	Marnes argileuses à intercalation de marno-calcaires et calcaires noir	100 à 150	Perméable	Aquifère
Albo-Cénomanién	Marnes argileuses grises intercalation de marno-calcaires et calcaires noir	100 à 150	Perméable	Aquifère
Aptien	Alternance de marnes argileuses grises, calcaires, marno-calcaire, grès	100	Perméable	Aquifère
Trias	Formations marno-gypso-gréseuse à fragments et blocs de roches divers	Profond	Perméable	Aquifère

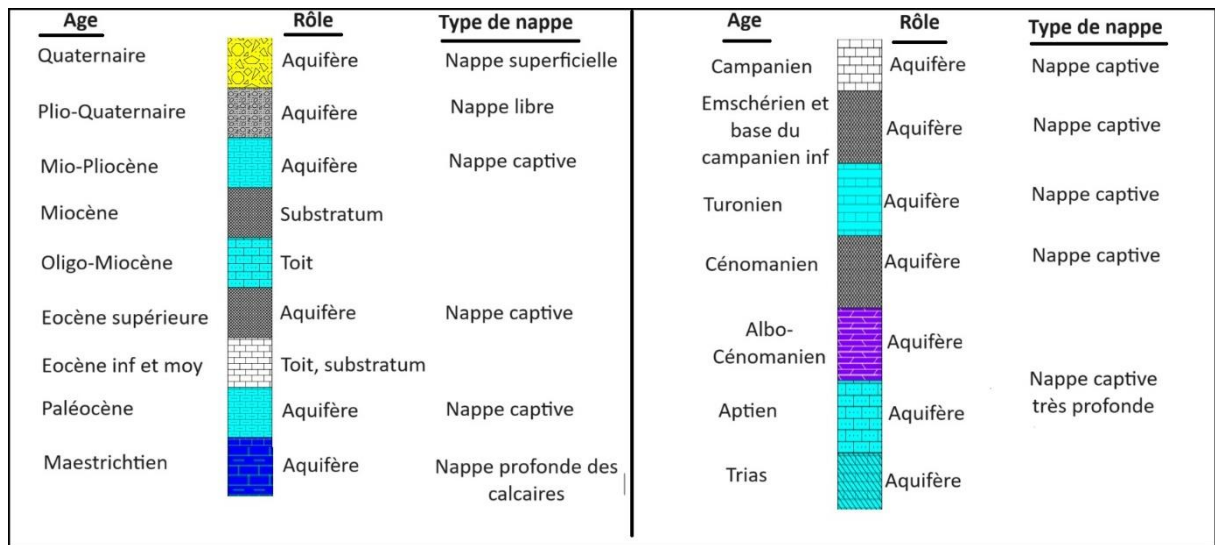


Figure 9 : Log lithologique et identification des aquifères.

10. Conclusion :

Les caractéristiques hydrogéologiques de la région se manifestent par la présence d'une nappe aquifère dans les dépôts alluviaux et de plusieurs nappes aquifères au sein des formations rocheuses. Les horizons aquifères situés dans le calcaire des étages Campanien et Maestrichtien du Miocène et du Pliocène présentent la plus haute teneur en eau.

Dans les massifs de Diapirs, les roches enclavant de l'eau, également appelées collecteurs, sont constituées de gros blocs de calcaire poreux et de dolomite cellulaire. Les horizons formés dans ces zones se déchargent dans les zones de fractures ou aux surfaces de contact avec les roches du Crétacé, prenant la forme de sources avec des débits variant de 0,1 à 0,3 L/s. L'étude des nappes calcaires s'avère complexe, et l'évaluation des ressources en eau souterraines représente un défi local, national, et mondial.



Chapitre II

*Étude morphométrique et
priorisation du bassin*



Chapitre II : Étude morphométrique et priorisation du bassin

1. Caractéristiques morphométriques de la région

L'analyse morphométrique d'un bassin versant constitue une démarche quantitative approfondie mettant en lumière la compréhension de diverses caractéristiques liées à son système hydrologique, surtout le régime d'écoulement, sa dynamique, sa vitesse et sa direction. Elle fournit aussi des informations précieuses dans les études d'érosion des sols, le comportement du ruissellement de surface, la capacité d'infiltration et le potentiel global des eaux souterraines (P. Nikhil Raj & A. Azeez, 2012). Elle joue un rôle important dans l'analyse hydrologique, notamment en pédologie, en gestion des eaux souterraines et en protection de l'environnement (Aadil Hamid, 2013; Odiji et al., 2021). Elle fournit, des indications significatives sur les risques hydrologiques et les catastrophes naturelles, notamment les zones vulnérables aux crues soudaines. Cette contribution est particulièrement recommandée dans les régions où des enregistrements climatiques et hydrologiques ne sont pas disponibles en quantité suffisante (Adnan et al., 2019; Obeidat et al., 2021; Saha et al., 2022; Zhai et al., 2021).

L'analyse morphométrique, est une méthode systématique pour déduire le comportement hydrogéologique du bassin et évaluer le potentiel des ressources en eaux souterraines. De plus, elle permet de retracer les événements tectoniques ou structuraux qui ont une incidence sur l'évolution du bassin (MR et al., 2019).

Dans ce chapitre, nous allons analyser de manière approfondie les caractéristiques morphométriques du bassin versant de la Medjerda, telles que la géométrie, la forme, la taille, la densité du réseau hydrographique, etc... Cette analyse morphométrique est utile particulièrement aux planificateurs pour la gestion efficace des ressources en eau. Elle constitue un apport appréciable pour la prise de décisions en matière de l'identification du potentiel des eaux souterraines.

Ce chapitre nous guidera à déterminer les caractéristiques morphométriques du bassin versant. Au jour d'aujourd'hui, les techniques de télédétection et de systèmes d'information géographique (SIG) dans l'analyse morphométrique des bassins versants, sont d'un apport considérable particulièrement dans les grands bassins versant où est difficile de couvrir toute la superficie en plus du fait que le bassin de la Medjerda est transfrontalier ce qui demande beaucoup d'effort et de temps.

Ainsi pour démontrer l'efficacité de ce système, nous prenons le cas de l'étude réalisée par Brahim et al. (2016) a démontré l'efficacité de la télédétection et du SIG dans la priorisation des bassins versants, mettant en évidence la protection potentielle contre les risques d'inondation et de glissement de terrain. Aussi Arabameri et al. (2020), dans son travail basé

sur un modèle numérique de terrains (MNT) a évalué les caractéristiques morphométriques et hiérarchiser les sous-bassins versants en fonction de leur sensibilité à l'érosion hydrique. Cette étude, menée dans le bassin versant de Kalvari en Iran, a intégré des données basées sur la télédétection et le SIG. De même, Jothimani et al. (2022) ont utilisé la télédétection et le SIG, ainsi que des images du modèle d'élévation SRTM, pour délimiter le bassin versant, extraire le réseau hydrographique dans l'environnement ArcGIS et réaliser une analyse morphométrique. L'objectif était d'évaluer le potentiel des eaux souterraines pour favoriser le développement durable dans le bassin versant de la rivière Iyenada au sud de l'Éthiopie. Cependant peu d'études ont porté sur le bassin versant de la Medjerda. Belloula et al. (2008) a étudié la relation entre les débits liquides et les débits solides pour déterminer les zones à risques d'inondations au niveau du sous bassin du Meskiana (SBV-12-02).

Djaba hichem (2010), dans son travail a utilisé un Modèle Numérique Terrain (MNT), afin d'analyser la morphométrie du bassin versant de la Medjerda. Malgré son importance et sa position (transfrontalier), on remarque un manque sur les informations détaillées portant sur les caractéristiques morphométriques de ce bassin versant.

Nous remarquons que la plupart des études menées en Algérie, ne traitent des bassins versants dans leur globalité et ne touchent qu'une faible partie de ces structures. Ceci est probablement lié à la taille (superficie) de ces structures.

Cette situation (absence d'étude), impacte négativement l'économie, la vitalité de l'écosystème et la méconnaissance des risques posés (inondations, glissements de terrain, ...) d'une région par la présence de lacunes dans l'information scientifique. Ces lacunes seraient à l'origine des perturbations des processus hydrologiques et à la détérioration de l'écosystème. (Bureau, 2011; Odiji et al., 2021). Cette situation nous a contraint à la réalisation d'une analyse en priorisant les sous-bassins du bassin versant de la Medjerda afin de déterminer ses caractéristiques, ses composantes et son comportement, en vue d'une gestion judicieuse de ses ressources naturelles.

Les objectifs de ce chapitre se déclinent comme suit :

- (1) délimiter le bassin de la Medjerda et de ses sous-bassins versants,
- (2) évaluer ses paramètres linéaires, de surface et topographiques,
- (3) attribuer des priorités à ce dernier en utilisant des données issues de la télédétection et des systèmes d'information géographique (SIG).

Cette étude va dans le renforcement de la gestion durable des bassins versants tout en améliorant la planification de l'exploitation des eaux et l'utilisation des terres.

2. Matériels et méthodes :

2.1. Sources de données

Pour réaliser notre étude, nous avons combiné des données satellitaires, topographiques et hydrologiques.

En matière de données satellitaires, nous avons utilisées les images d'un Modèle Numérique du terrain (MNT) d'une résolution de 30 m, accessible via la mission topographique radar de la navette spatiale (SRTM) sur <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

Le bassin versant de la Medjerda, englobe cinq scènes des images MNT, ces dernières ont été utilisées de manière exhaustive pour extraire des informations nécessaires telles que l'extraction du réseau hydrographique drainant le bassin versant, la délimitation du bassin et des sous-bassins, les caractéristiques topographiques (pente, altitude, etc..) et d'autres caractéristiques morphométriques du bassin versant.

2.2. Logiciels utilisés :

Nous avons utilisé le logiciel Arc Gis 10.8, développé par la société ESRI, leader mondial des Systèmes d'Information Géographique (SIG), il offre une gamme d'applications regroupées dans la version de base "ArcGIS Desktop" ou "Arc View". Cette dernière comprend des outils tels que, Arc Catalog, Arc Map, Arc Toolbox, ainsi que l'extension Spatial Analys Tools, permettant d'accomplir diverses tâches tel que le SIG, la cartographie et la gestion de données, en passant par l'analyse géographique, la modification des données et le géo-traitement. Il contient entre autres ArcMap, l'application principale d'ArcGIS Desktop, se divise en deux interfaces distinctes : La visualisation et le traitement des données géographiques s'opèrent dans la fenêtre "Data View", tandis que la conception de la mise en page de la carte s'effectue dans la fenêtre "Layout View".

2.3. Traitement des couches thématiques

Un deuxième jeu de données a été utilisé pour la mise en place de l'analyse et de la cartographie morphométrique. En effet, les couches thématiques topographiques et hydrologiques ont été numérisées, géoréférencées et projetées sur le système de coordonnées géographique WGS 1984 zone 32. L'empilement de ces couches avec le MNT a permis de créer une vue 3D d'une carte riche en informations. Cela permet de bien identifier les différentes tranches de l'altitude ainsi que les classes d'eau et de faire la correspondance avec leur réponse spectrale sur les images satellitaires (MNT). Tous ces traitements ont été réalisés au niveau du logiciel Arc Gis.

Dans le contexte de la caractérisation et de la hiérarchisation des sous-bassins versants de la Medjerda en matière de recharge et de stockage des eaux souterraines, tous les paramètres

morphométriques ont été identifiés et calculés. Douze (12) paramètres ont été utilisés pour l'application de la méthode de Rahmati pour le processus de priorisation. Ces paramètres ont été directement mesurés à partir du Modèle Numérique Terrain (MNT) en utilisant des techniques de Système d'Information Géographique (SIG), englobant des aspects tels que la superficie du bassin, la longueur du bassin, le périmètre, ainsi que le nombre et la longueur des cours d'eau pour chaque ordre.

Après la délimitation des sous-bassins basée sur l'utilisation du réseau des cours d'eau et les cartes d'accumulation de débit comme références, la méthode de la somme pondérée appliquée par Rahmati en 2019, a été utilisée pour l'analyse et l'extraction cartographique de ces paramètres. Cette méthode permet d'évaluer l'importance des paramètres morphométriques dans l'identification, la gestion et la protection des ressources en eau d'un bassin, établissant ainsi une base solide pour l'évaluation de la susceptibilité des sous-bassins à la recharge et aux autres risques liées à l'eau.

3. Les paramètres morphométriques

Après plusieurs analyses des différents paramètres morphométriques, nous avons opté pour les quatre types de paramètres morphométriques permettent d'expliquer le comportement hydrologique des bassins :

- Les paramètres basiques
- Les paramètres linéaires
- Les paramètres de forme
- Les paramètres de relief

La majorité de ces paramètres ont été calculés à l'aide d'outils informatiques tels que, ArcGIS et Arc-Hydro. Cependant, les paramètres sujets à des variations spatiales ont été analysés, pondérés, classifiés et représentés par la cartographie. Cette approche permet de leur conférer une signification importante sur le bassin, offrant ainsi une interprétation approfondie des changements observés dans l'environnement étudié. L'analyse et la cartographie des paramètres morphométriques ont été réalisées sur l'ensemble du bassin y compris les sous bassins recensés et ceci dans l'objectif de déterminer les zones susceptibles d'être propice à la recharge et au stockage des eaux souterraines. Les résultats issus de cette étude donneront d'autres informations sur par exemple, la vulnérabilité, l'érosion et les inondations. Nous allons détailler les différents types de paramètres morphométriques.

3.1. Paramètres basiques (Surface « A », périmètre « P » et la longueur « Lb »)

Un bassin versant est une entité géographique caractérisée par des précipitations, ces dernières s'accumulent ou s'écoulent, alimentant des cours d'eau (Oued), des barrages ou s'infiltrant

dans les nappes. La vitesse et la direction de l'écoulement superficiel sont déterminées par les caractéristiques topographiques telles que la pente, le relief et le type de sol traversé.

Après l'extraction du réseau hydrographique et la définition des limites du bassin, la surface du bassin a été la première caractéristique géométrique calculée à l'aide du logiciel ArcGIS 10.8. Cet élément constitue la base essentielle à partir duquel d'autres paramètres peuvent être dérivés et évalués (tableau 6).

Tableau 6: Répartition de superficie, périmètre, et de longueur dans les sous-bassins versants de la Medjerda.

Bassin	Code : (SBV)	Superficie (Km ²)	Superficie (%)	Périmètre	Longueur (Lb)
Medjerda	12-01	1499,30	19,25	250,952	75,73
	12-02	1828,06	23,47	242,587	83,08
	12-03	1589,03	20,40	254,755	71,79
	12-04	1492,66	19,16	233,454	67,09
	12-05	1378,21	17,69	264,936	33,44
	Medjerda	7787,25	100	596,41	118,69

(SBV-12 01): Oued Medjerda, (SBV-12 02): Oued Meskiana, (SBV-12 03): Oued Chabro, (SBV-12 04): Oued Mellegue amont, (SBV-12 05): Oued Mellegue aval.

Le tableau précédent 6 et la figure 10, donnent la répartition spatiale de ces trois paramètres morphométriques essentiels (la superficie, le périmètre et la longueur), on note des variations dans l'extension des paramètres. La répartition des surfaces dans les sous-bassins reflète une diversité significative au sein de la région hydrographique de la Medjerda. Le SBV-12-02 (Oued Meskiana) se distingue par la plus vaste superficie, représentant 23,47% de la superficie totale du bassin de la Medjerda, suggérant une prépondérance hydrologique notable et un potentiel significatif de ruissellement. En revanche, le SBV-12-05 (Oued Mellegue aval) affiche une superficie moindre, soit 17,69% de la superficie totale du bassin de la Medjerda. Cette diversité peut résulter des variations topographiques influençant négativement le régime hydrologique et sur l'usage des terres.

L'analyse de la longueur de la ligne de contour du bassin (périmètre), utilisé comme indicateur précieux de la forme et de la taille spécifique d'un bassin, révèle que le SBV-12-05 se caractérise par le plus grand périmètre, atteignant 264,936 km, indiquant une complexité topographique notable dans cette zone. Tandis que le SBV-12-04 présente la valeur minimale de 233,454 km.

La longueur du bassin représente la distance linéaire directe entre l'embouchure du bassin et le point le plus éloigné de la ligne de partage des eaux. Dans le cas présent la longueur du bassin (L_b) varie de 33,44 km pour SVB-12-05 à 83,08 km pour SVB-12-02, indiquant un réseau hydrographique étendu contribuant à la distribution spatiale des eaux dans le bassin. On déduit que les sous-bassins caractérisés par une grande longueur sont associés à des réseaux hydrographiques plus développés, avec des cours d'eau plus étendus dans des régions montagneuses où les reliefs accidentés (SBV-1201 et SBV-1205), favorisent la formation de rivières plus longues. À l'inverse, les sous-bassins avec des longueurs plus modestes, se situent dans les zones plates (plaines), avec des cours d'eau moins longs.

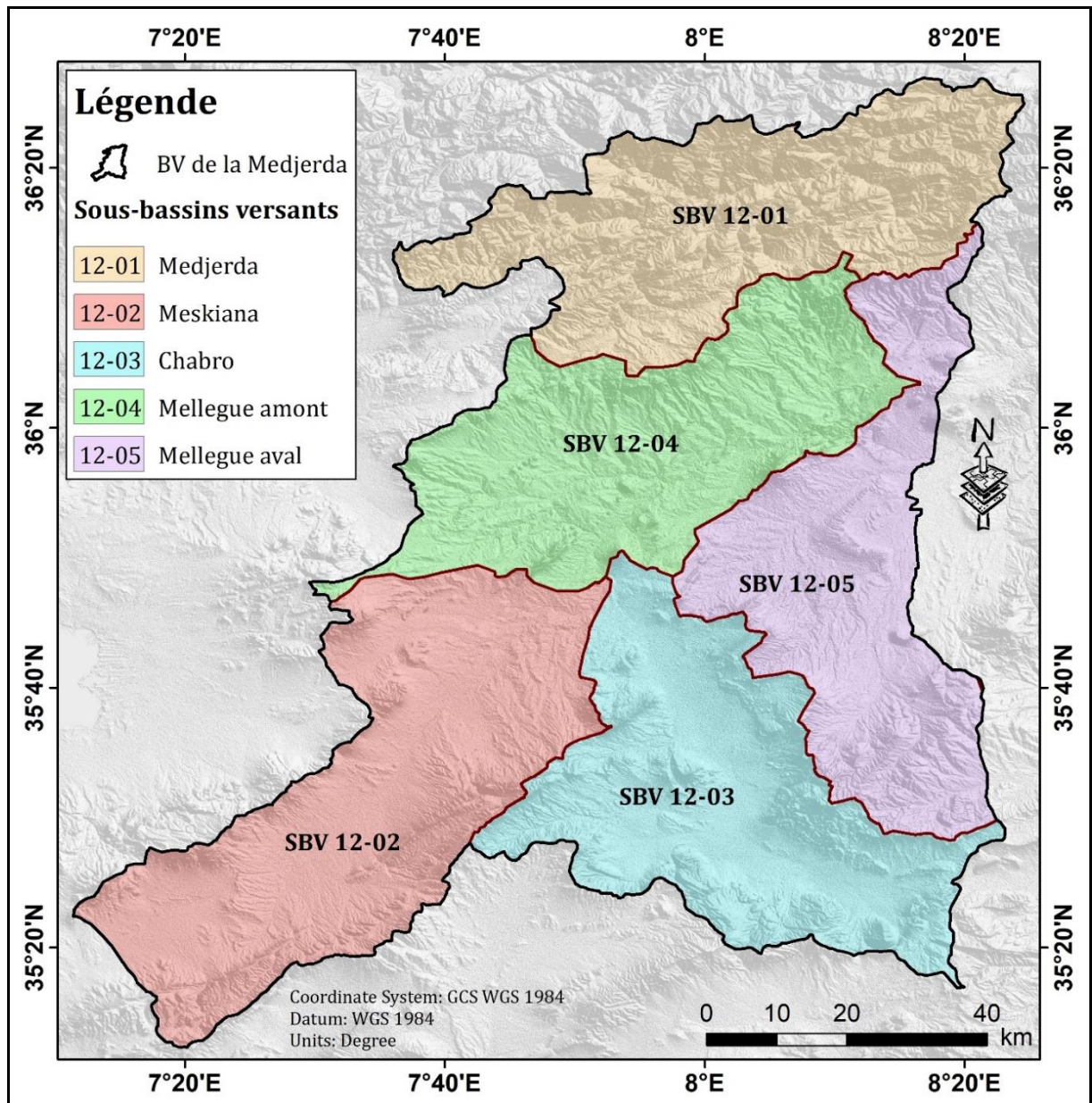


Figure 10. Carte des sous bassins versants.

Globalement, cette analyse, montre l'hétérogénéité des caractéristiques topographiques et hydrologiques au sein de la Medjerda, on doit donc prendre en compte ces variations pour assurer une gestion efficace des ressources en eau.

3.2. Les paramètres de forme

La forme d'un bassin versant est déterminée par plusieurs paramètres calculés et reportés dans le tableau N°7 suivant :

Tableau 7. Paramètres de forme par sous bassin versant.

Bassin	Code SBV	Facteur de forme (Ff)	Rapport d'élongation (Re)	Rapport de circularité (Rc)	Coefficient de compacité (Kg)
Medjerda	12-01	3,83	0,29	0,30	1,03
	12-02	3,78	0,29	0,39	0,90
	12-03	3,24	0,31	0,31	1,02
	12-04	3,02	0,32	0,34	0,96
	1205	0,81	0,63	0,25	1,14

3.2.1. Facteur de forme (Ff)

Ce paramètre offre des indications précieuses sur les caractéristiques d'écoulement d'un bassin (Castillo et al., 1988). Le coefficient caractérisant la forme (Ff) défini par Horton.(1932), est un indicateur clé de la configuration d'un bassin exprimant le rapport entre la superficie du bassin et le carré de sa longueur. Il est calculé par l'équation suivante :

$$Ff = \frac{A}{(Lb)^2}$$

Avec :

Ff : Facteur de forme

A : Superficie du bassin (Km²)

Lb² : Longueur du bassin

Si les valeurs de Ff sont inférieures à 0,7854, on a un bassin parfaitement circulaire (Bali et al., 2012 ;Mahala, 2020).

Si une valeur de Ff plus petite, ceci indique un bassin plus allongé, avec des traits fortement étirés, quand Ff est égale à l'unité (**1**), ceci indique une forme quasi-circulaire avec un débit de pointe élevé.

Plus la valeur de **Ff** est élevée, plus le bassin est de forme circulaire, traduisant un débit de pointe élevé sur des périodes plus courtes. À l'inverse, une valeur plus basse de **Ff** indique une forme plus allongée, associée à un débit de pointe plus faible sur une durée plus longue (Bali et al., 2012).

En appliquant la formule définissant le Ff, pour le bassin versant de la Medjerda, on remarque que les sous-bassins SBV-12-01, SBV-12-02, et SBV-1203, ont des facteurs de forme relativement élevés, allant de 3,24 à 3,83, indiquant une forme circulaire de ces sous bassins et par conséquent des cours d'eau de forme plus étirée, pouvant être associée à des vallées allongées ou à des régions topographiques spécifiques. Le sous-bassin 12-05 affiche une faible valeur de facteur de forme, atteignant 0,81, donc, il a une forme allongée avec une morphologie arrondie et un débit des cours d'eau faible (Mahala, 2020).

3.2.2. Rapport d'allongement (R_e)

Le rapport d'allongement (R_e) est un indicateur de la forme du bassin (Horton, 1932). Il exprime le rapport entre le diamètre d'un cercle ayant la même superficie que le bassin et la longueur maximale du bassin (Schumm, 1956), il est donné par l'équation suivante :

$$R_e = \frac{\sqrt{(A/\pi)}}{L_b}$$

Avec :

- **A** : Superficie du bassin (Km^2)
- **π** : 3,14
- **L_b** : Longueur du bassin (km)

Le coefficient de forme du bassin versant (R_e) est classé en quatre catégories distinctes : si

- $R_e < 0,5$ (plus allongé),
- $0,5 > R_e < 0,7$ (allongé),
- $0,7 > R_e < 0,8$ (moins allongé),
- $0,8 > R_e < 0,9$ (ovale)
- $R_e > 0,9$ (circulaire).

Lorsque les valeurs de R_e , sont de un (1), elles caractérisent une zone à relief très faible mais quand elles oscillent entre 0,6 et 0,8, elles indiquent des bassins présentant un relief élevé et des pentes abruptes (Dar et al., 2013; Obeidat et al., 2021). Appliquée au bassin versant de la Medjerda, on remarque que la valeur de R_e est de 0,5, on déduit que le bassin versant est de forme allongée. Concernant, les cinq 5 sous-bassins, on remarque que les valeurs de R_e varient entre de 0,29 à 0,63 (Tableau 7), ainsi on note que tous les sous-bassins versants présentent une forme plus allongée à allongée, indiquant un relief modéré.

Tableau 8. Classification de rapport d'élongation.

N °	Valeur du rapport d'élongation (Re)	Catégorie du bassin versant
01	[0,9 – 1,0]	Circulaire
02	[0,8 – 0,9]	Ovale
03	[0,7 – 0,8]	Moins allongé
04	[0,5 – 0,7]	Allongé
05	[> 0,5]	Plus allongé

3.2.3. Rapport de circularité (Rc)

Le coefficient de circularité (Rc), est le rapport entre la surface d'un bassin et celle d'un cercle partageant le même périmètre (Strahler, 1964), il varie dans une plage allant de 0 à 1. Il est exprimé par la formule suivante :

$$Rc = \frac{4\pi A}{P^2}$$

Avec :

- A : Superficie du bassin (Km²)
- Π : 3,14,
- P : Périmètre du bassin.

La mesure de ce facteur est influencée par plusieurs paramètres, tels que :

- la fréquence de drainage,
- la densité de drainage,
- le climat,
- la structure géologique,
- la pente,
- le relief.

Ces paramètres fournissent, une indication significative du stade géomorphologique du bassin (Mahala, 2020). Les bassins allongés indiquent un Rc proche de 0, tandis que les bassins circulaires montrent un Rc proche de 1 (Bisht et al., 2018). Après calcul, nous remarquons que tous les sous-bassins versants de la Medjerda présentent des valeurs de Rc oscillant entre 0,25 et 0,39 (Tableau 7). Dans le détail, les sous-bassins SBV-12-02 et SBV-12-04 présentent des rapports de circularité relativement plus élevés, de 0,39 et de 0,34 respectivement. En revanche, le SBV-12-05 se démarque par un rapport de circularité plus bas, atteignant 0,25,

cette valeur indique une morphologie moins régulière et plus étirée du sous bassin. Les sous-bassins de la Medjerda peuvent être qualifiés comme étant fortement allongés. Cependant la diversité observée entre les sous-bassins pourrait être attribuée à des variations dans la topographie.

3.2.4. Coefficient de compacité (K_G)

Le calcul de l'indice de Gravelius (1914), est un indicateur prédominant, pour la détermination de la forme d'un bassin, il est défini par le rapport entre la circonférence d'un bassin et celle d'un cercle ayant la même superficie. Il donne un aperçu sur la géométrie du bassin.

Le coefficient est obtenu par l'application de la formule suivante :

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Avec :

- K_G : indice de compacité de Gravelius,
- A : superficie du bassin versant (km^2),
- P : périmètre du bassin versant (km).

Si :

$K_G \leq 1 \rightarrow$ Bassin versant de forme circulaire.

$K_G = 1.12 \rightarrow$ Bassin versant de forme carrée.

$K_G > 1.12 \rightarrow$ Bassin versant de forme allongée.

Les valeurs de coefficient de compacité (tableau 07) révèlent une diversité dans la forme des sous-bassins. Ainsi, les deux sous-bassins 12-02 et 12-04 avec des valeurs inférieures à 1 (0,90 et 0,96 respectivement), adoptent une forme allongée, tandis que les trois autres sous-bassins 12-01, 12-03, 12-05 affichent des valeurs élevées supérieures à 1, indiquant une forme circulaire prononcée.

3.3. Paramètres de relief

Les caractéristiques topographiques, sont importantes, elles fournissent des informations sur le comportement de l'écoulement superficiel se produisant au d'un bassin versant.

3.3.1. Relief du bassin

Le paramètre du relief bassin (R) représente les variations de l'élévation entre les points les plus élevés et les points les plus bas d'un même bassin. C'est une variable morphométrique permettant l'évaluation des caractéristiques morphologiques et topographiques d'un bassin versant. Il est important pour connaître le développement du réseau hydrographique,

l'écoulement des eaux de surface et souterraines, la perméabilité et les propriétés érosives du terrain (Magesh et al., 2011). Une élévation importante de (R) permet le transport et le dépôts des sédiments dans des zones plates ou plus basses (Hadely and shum, 1961). La comparaison entre le relief des cinq sous-bassins met en évidence des contrastes significatifs, reflétant les diverses structures géomorphologiques distinctes englobant la région hydrographique de la Medjerda.

Pour le SBV-12-01, le relief varie de 229 m à 1350 m, on note une élévation significative favorisant à un écoulement de surface fort et rapide, pouvant provoquer des inondations dans ce cas le degré d'infiltration faible. Les sous-bassins 12-02, 12-03, 12-05, se distinguent par un relief élevé, tandis que les sous-bassins 12-02, 12-04 présentent un relief plus modéré (tableau 9).

Les zones à relief bas, présentent une topographie plate avec une pente douce. Ces caractéristiques, laissent supposer une utilisation potentielle des activités agricoles le long des cours d'eau (nature plate de la région et accès à l'eau). En observant la répartition des superficies par tranches d'altitude dans la Medjerda, nous constatons que les classes d'altitude comprises entre 700 et 1000 mètres se caractérisent par les superficies étendues, atteignant respectivement 1 373,45 km², 1 561,87 km², et 1 174,16 km² soit 17,63%, 20,05% et 15,07% de la surface totale du bassin. Les altitudes intermédiaires englobent des sous-bassins versants plus vastes, couvrant presque la moitié des SBV-12-01, 12-02 et 12-03, ainsi que la partie sud du SBV-12-04. En revanche, les tranches d'altitude variant entre 230 à 600 m, présentent des superficies plus modestes, indiquant la présence de sous bassins versants de plus petite échelle dans des régions de relief moins prononcé pas clair. Par ailleurs les altitudes élevées, dépassant 1 300 mètres, se localisent dans la partie nord-est du bassin de la Medjerda, en amont du SBV-12-02, et aux limites sud du SBV-12-03. Les pourcentages cumulés, montrent que la grande partie de la superficie du bassin est concentrée dans les altitudes plus basses. Démontrant une répartition asymétrique des superficies.

Tableau 9. Répartition des surfaces en fonction des plages d'altitudes dans le bassin versant de la Medjerda.

Classes	Altitude (m)	BV-Surface (Km ²)	Surface partielle (%)	Surface cumulée (%)
230 - 300	250	4,72	0,06	100,00
300 - 400	350	21,42	0,27	99,94
400 - 500	450	180,83	2,32	99,66
500-600	550	708,77	9,10	97,34
600 - 700	650	959,87	12,32	88,24

700 - 800	750	1373,45	17,63	75,92
800 - 900	850	1561,87	20,05	58,28
900 - 1000	950	1174,16	15,07	38,22
1000 - 1100	1050	915,63	11,75	23,15
1100 - 1200	1150	513,27	6,59	11,39
1200 - 1300	1250	225,80	2,89	4,80
1300 - 1400	1350	124,31	1,59	1,90
1400 - 1500	1450	20,51	0,26	0,30
1500 - 1600	1550	2,85	0,03	0,04
1600 - 1700	1650	0,18	0,002	0,00
Total		7787,72	100,00	0,00

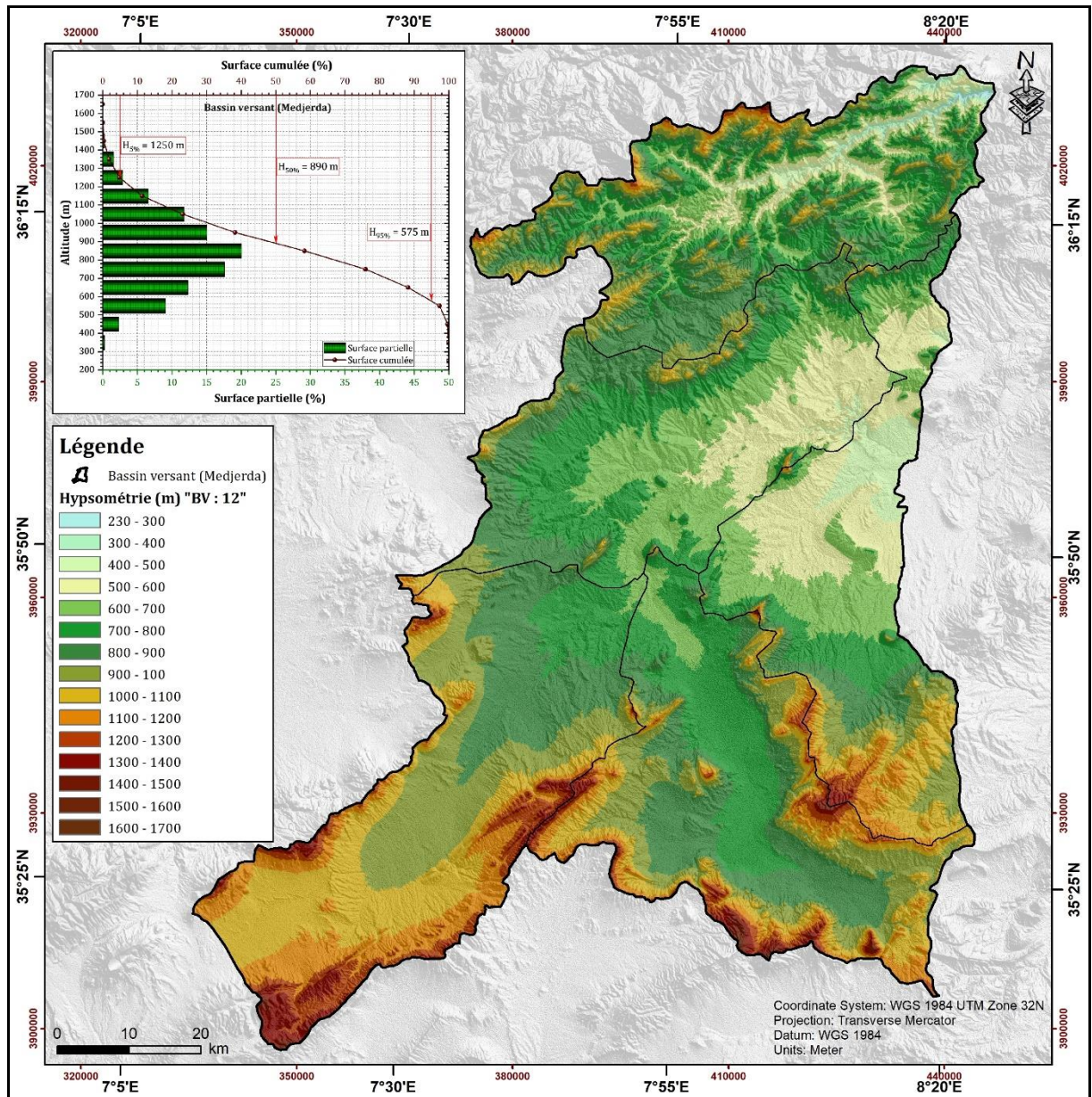


Figure 11. Hypsométrie du bassin versant de la Medjerda.

3.3.2. Rapport du relief (Rr)

Le ratio de relief (Rr), est le rapport du relief total d'un bassin (la différence d'élévation entre le point le plus bas et le point le plus élevé d'un bassin) et la longueur du flux de drainage principal, il est donné par l'équation suivante :

$$Rr = \frac{Bh}{Lb}$$

Avec :

- Bh : Relief du bassin
- Lb : Longueur du bassin

Le rapport du relief (Rr), est influencé par les facteurs liés aux caractéristiques de surface et du relief du bassin, il offre un aperçu de la pente globale du bassin versant et des processus de

dégradation associés (Schumm, 1956). Les valeurs de R_r tendent à être plus élevées dans les environnements montagneux par rapport aux bassins fluviaux des plateaux.

La valeur maximale est enregistrée dans le SBV-12-05 avec 29,96, ce SBV se caractérise par une tranche d'altitude très élevée de 1000 à 1500 m dans sa partie amont. Le SBV-12-01, prenant sa source dans la région de la ville de khemissa, indique un R_r important, environ 15,55. Cette valeur est due au fait qu'il se situe dans une zone montagneuse particulièrement dans sa partie supérieure du bassin, démontrant l'influence de la topographie sur la valeur du R_r . La valeur la plus faible de 10,98 est enregistrée dans le SBV-12-02. Par ailleurs les SBV-12-03 et SBV-12-04, indiquent des valeurs de R_r basses de 13,54 et 11,01. Les valeurs obtenues indiquent la forme allongée des sous-bassins, et leurs faibles reliefs.

3.3.3. Numéro de robustesse (R_n)

Les travaux de Strahler (1957) et Melton (1958), portant sur le nombre de robustesse (R_n), est issu de la multiplication de la densité de drainage (D_d) avec l'amplitude du relief du bassin (B_h), exprimés dans la même unité. Il est donné par l'équation suivante :

$$R_n = B_h * D_d$$

Tel que :

- B_h : Relief du bassin
- D_d : Densité de drainage

Appliquée à la Medjerda, nous remarquons que les valeurs R_n varient entre 3,07 et 16,13. La valeur la plus élevée 16,13 caractérise le SBV-12-05. Les sous-bassins versants 12-01 (4,24), 12-02 (3,07), 12-03 (4,72) et 12-04 (4,95), présentent les plus faibles valeurs de R_n . Les valeurs élevées de R_n , démontrent que la région est considérablement exposée aux d'inondations et à l'érosion, en raison de la complexité structurelle du terrain (Samal et al., 2015). Les valeurs de R_n , les plus élevées, constituent un indice du degré de densité de drainage et un degré faible de recharge des eaux souterraines.

3.3.4. Paramètres hypsométriques

a- La courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique, illustre la distribution de la surface du bassin versant en relation avec son altitude. Les courbes hypsométriques sont un outil utile pour comparer plusieurs bassins ou différentes sections d'un seul bassin.

b- Les altitudes caractéristiques

- **Altitudes maximales et minimales** : elles sont obtenues à partir de cartes topographiques, elles facilitent les calculs et l'établissement des relations climatologiques et hydrologiques.

La variation spatiale de l'altitude dans une région peut s'accompagner d'une variation des processus climatiques, hydrologiques et hydrogéologiques. La différence entre l'altitude maximale et minimale permet de déterminer l'amplitude altimétrique d'un bassin versant. Par ailleurs, ces altitudes interviennent dans le calcul de la pente. Les résultats obtenus sont condensés dans le tableau 10.

- **Altitude moyenne** : elle correspond à la somme des altitudes de chaque cellule et est divisée par le nombre total de cellules, comme écrit dans la formule suivante :

$$H_{moy} = \frac{\sum(h_i \cdot A_i)}{A}$$

Avec :

- H_{moy} : altitude moyenne du bassin (m)
- A_i : aire comprise entre deux courbes de niveau (Km²)
- h_i : altitude moyenne entre deux courbes de niveau (m)
- A : superficie totale du bassin versant (Km²)

La valeur obtenue donne une indication générale de l'élévation médiane du bassin et peut être utilisée pour caractériser le profil altimétrique de la région. Elle est utile pour comprendre la distribution verticale des altitudes et peut avoir des implications significatives dans l'évaluation des propriétés hydrologiques du bassin.

- **Altitude médiane** : importante pour la caractérisation du relief d'un bassin versant, elle est déterminée en lisant l'altitude correspondant à 50% de la surface totale du bassin sur la courbe hypsométrique. Cette mesure est importante lorsque la courbe hypsométrique présente une pente régulière, se rapprochant ainsi de l'altitude moyenne. En pratique, l'altitude médiane offre des indications importantes sur la topographie générale du bassin et peut influencer les aspects des processus hydrologiques et géomorphologiques.

- **L'altitude H95%** : est déterminée en lisant la courbe hypsométrique au point d'abscisse correspondant à 95% de la surface totale du bassin versant. Cette mesure offre un repère essentiel pour déduire la distribution verticale des altitudes.

- **L'altitude H5%** : c'est l'altitude lue au point d'abscisse correspondant à 5% de la surface totale du bassin sur la courbe hypsométrique, elle donne la hauteur au-dessus de laquelle se localise 5% de la superficie totale du bassin. Elle correspond à l'élévation minimale à partir de laquelle s'étend une petite fraction du bassin. Elle renseigne sur la distribution altitudinale du bassin, permettant une caractérisation détaillée de ses reliefs et une meilleure compréhension des variations altimétriques à différentes échelles spatiales.

Tableau 10. Les altitudes Caractéristiques par sous bassin versant.

Bassin	Code SBV	Altitude minimale (m)	Altitude Maximale (m)	Altitude moyenne (m)	Altitude médiane	Altitude H95%	Altitude H5%
Medjerda	12-01	228	1406	781,35	850	530	1090
	12-02	657	1569	1011,69	1055	810	1350
	12-03	654	1626	931,45	950	760	1310
	12-04	455	1194	723,55	765	575	1000
	12-05	421	1423	748,6	740	515	1185
	Medjerda	228	1626	839,33	890	575	1250

L'analyse des altitudes caractéristiques au sein des différents sous-bassins, présentée dans le tableau 10, révèle des variations des altitudes, fournissant ainsi un aperçu détaillé de la topographie de chaque zone. Ces données altimétriques, proviennent des images MNT (Model Numérique Terrain), sont importantes pour de l'évaluation topographique.

Le SBV-12-01, montre une variation des altitudes, oscillant de 228 m (Medjerda est) à 530 m (Medjerda ouest), c'est aussi le cas pour les sous bassins SBV-12-02, SBV-12-03, et SBV-12-04. Ces variations, concernent également les altitudes moyennes, calculées à partir des courbes hypsométriques spécifiques pour chaque sous-bassin, présentant des variations notables, allant de 723,55m dans le SBV-12-04 à 1011,69m dans le SBV-12-04. Associées à d'autres paramètres hydrologiques tel que le débit et la hauteur des cours d'eau, le ruissellement, et l'infiltration, elles facilitent l'identification des zones propices à une infiltration efficace.

Les valeurs maximales de l'altitude (1569 m) et (1626 m) sont respectivement enregistrées dans les sous bassins de Meskiana (SBV-12-02) et de Chabro (SBV-12-03). L'altitude minimale (228 m) est enregistrée dans le (SBV-12-01), principalement situé dans sa partie avale à proximité des frontières tunisiennes. En ce qui concerne l'altitude moyenne, elle varie dans de faibles proportions pour les (SBV-12-04, SBV1205, SBV1201) avec des valeurs de (723,55 m, 748,6, 781,35) respectivement. La valeur maximale (1011,69 m) est enregistrée dans la partie amont du (SBV-12-02). La médiane altimétrique varie de 740 m (SBV-12-03) à 1055 m (SBV-12-02). L'altitude au 95 % calculée à partir de la courbe hypsométrique varie dans de faibles proportions (515 m (SBV-12-05), 530 m (SBV-12-01), 575 m (SBV-12-04), 760 m (SBV-12-03), 810 m (SBV-12-02), tandis que l'altitude au 5 % affiche de valeurs

élevées dépassant les 1000 m pour tous les sous bassins, avec une valeur maximale de 1350 m caractérisant toujours la partie amont du (SBV-12-02). Cette variabilité altimétrique offre un indice sur la topographie complexe du bassin. Elle offre également une meilleure compréhension de l'influence de la topographie sur les caractéristiques hydrologiques et le comportement hydrogéologique des sous-bassins.

Le sous bassin versant (12-01) SBV-1201 (Fig.12) :

Tableau 11. Répartition des superficies selon les tranches d'altitudes dans le (SBV-12-01).

Classes	Altitude (m)	Surface (Km ²)	Surface partielle (%)	Surface cumulée (%)
230 - 300	250	4,73	0,32	100,00
300 - 400	350	21,43	1,43	99,68
400 - 500	450	60,56	4,04	98,26
500-600	550	120,13	8,01	94,22
600 - 700	650	220,38	14,70	86,20
700 - 800	750	322,08	21,48	71,51
800 - 900	850	420,24	28,03	50,02
900 - 1000	950	224,33	14,96	22,00
1000 - 1100	1050	77,44	5,16	7,03
1100 - 1200	1150	20,69	1,38	1,87
1200 - 1300	1250	6,40	0,43	0,49
1300 - 1400	1350	0,93	0,06	0,06
1400 - 1500	1450	0,02	0,00	0,00
Total		1499,34	100,00	0,00

Le tableau 11, ci-dessus et la figure 12, montrent, la répartition des superficies par tranches d'altitude dans le SBV-12-01, fournit des informations significatives sur la morphologie hydrographique de cette région. Les superficies maximales (322,08 et 420,24 km²) sont caractérisées par une tranche d'altitude modérée allant de 700 à 900 m couvrant les formations montagneuses en amont du SBV-12-01, représentant ainsi 21,48 et 28,03 % respectivement.

Ces résultats, obtenus indiquent que cette gamme d'altitudes peut abriter des réseaux hydrographiques plus étendus. En revanche, les classes d'altitude inférieures, notamment celles situées entre 230 et 400 m, se caractérisent par des superficies relativement faibles, localisées dans des zones topographiques moins accentuées et à proximité du lit principal de l'oued de la Medjerda. Notons, l'absence de tranches d'altitudes supérieures à 1500 m dans le

SBV-12-01. L'analyse des pourcentages cumulés souligne également une concentration significative de la superficie totale dans les altitudes plus basses, avec environ 50,02% située en dessous de 900 mètres.

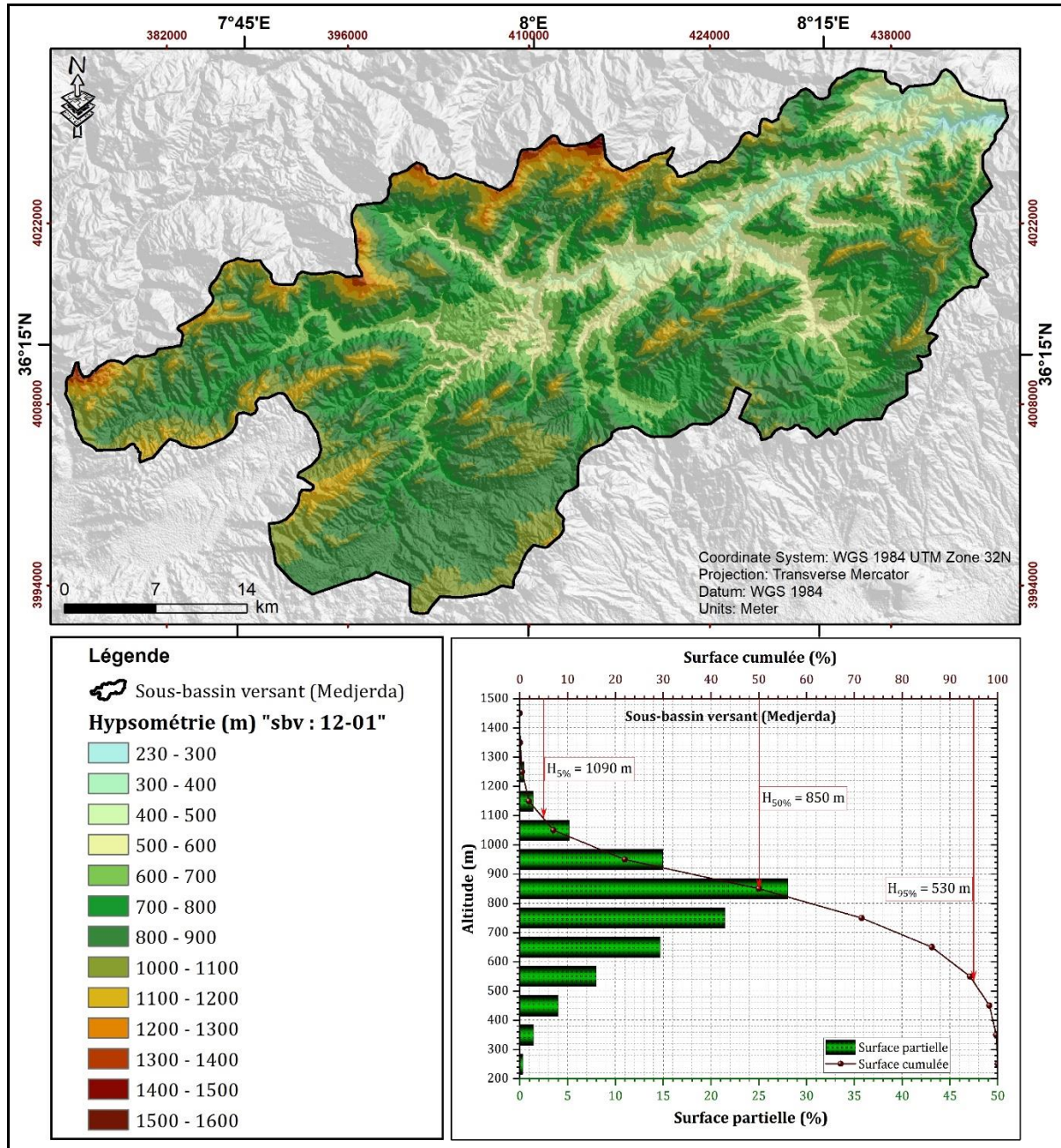


Figure 12. Hypsométrie du sous-bassin versant de la Medjerda (SBV-12-01).

Le sous bassin (12-02) SBV-12-02 (Fig.13) : L'altitude, varie entre 250 et 1550 m. Les classes d'altitude inférieures, allant de 230 à 600 mètres, caractérisent des superficies nulles, indiquant des zones plates ou des plaines sont limitées spatialement. La classe d'altitude variant entre 600 et 700 m, occupe une superficie de 8,49 km², soit 0,46% de la superficie totale, on a une augmentation significative de la surface, des zones de cette altitude. En examinant l'évolution des superficies allant de 700 à 1 050 mètres, on constate une croissance

progressive, atteignant une superficie maximale de 450,40 km² soit 24,64% de la superficie totale.

Tableau 12. Répartition des superficies selon les tranches d'altitudes dans le (SBV-12 02).

Classes	Altitude (m)	Surface (km ²)	Surface partielle (%)	Surface cumulée (%)
600 - 700	650	8,49	0,46	100,00
700 - 800	750	130,93	7,16	99,54
800 - 900	850	332,17	18,17	92,37
900 - 1000	950	415,61	22,73	74,20
1000 - 1100	1050	450,40	24,64	51,47
1100 - 1200	1150	270,00	14,77	26,83
1200 - 1300	1250	132,93	7,27	12,06
1300 - 1400	1350	80,32	4,39	4,79
1400 - 1500	1450	6,67	0,37	0,40
1500 - 1600	1550	0,57	0,03	0,03
Total		1828,08	100,00	0,00

Les altitudes les plus élevées, dépassant 1 500 m, occupent la partie amont au sud du SBV-12-02 avec 0,03%. La superficie cumulée diminue, indiquant une diminution relative de la contribution des altitudes supérieures à la morphologie du bassin versant.

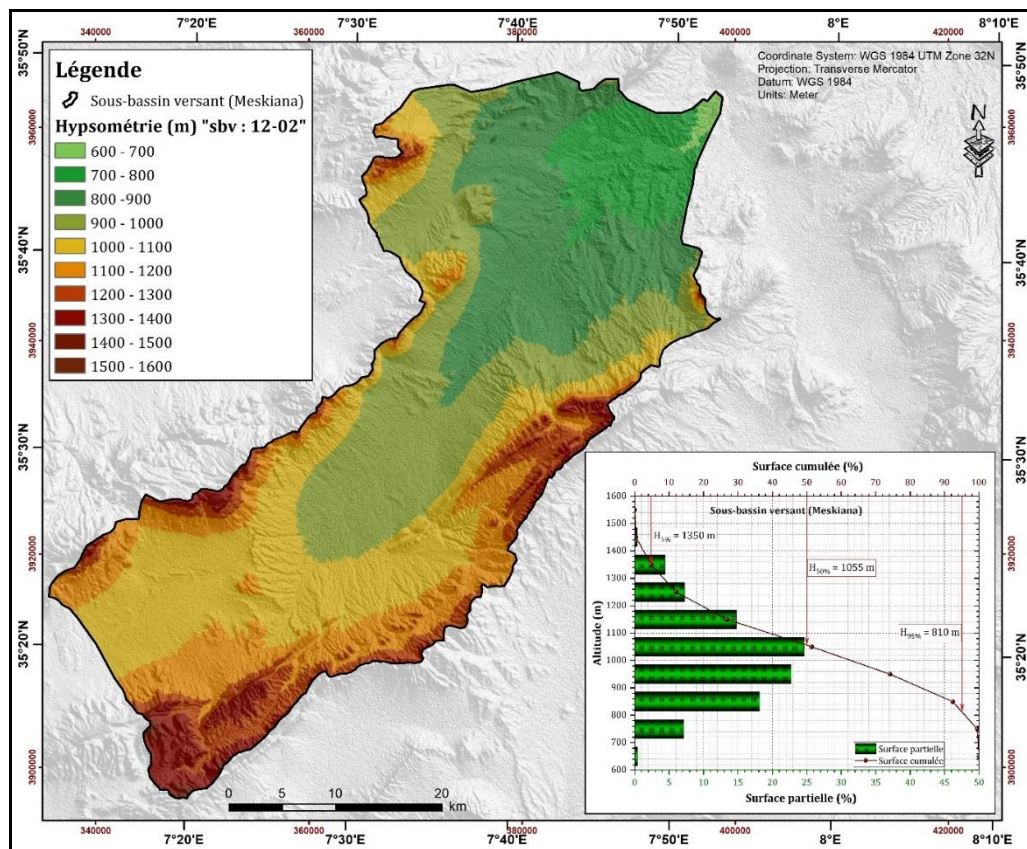


Figure 13. Hypsométrie du sous-bassin versant de Meskiana (SBV-12-02).

Le sous bassin versant (12-03) SBV-12-03 (Fig.14) :

Ce sous bassin est parmi les sous bassins caractérisés par des hautes altitudes dans la région de Tébessa. Les altitudes inférieures, variant entre 230 et 600 m, affichent des superficies nulles traduisant une absence de plaines pour ces classes d'altitude. La zone dont les altitudes varient entre 600 et 700 m occupent avec une superficie de 44,18 km², soit 2,78% de la surface totale. Cela indique probablement des caractéristiques topographiques propices à la formation de bassins versants dans cette gamme d'altitude particulière. Au fur et à mesure qu'on examine les altitudes plus élevées, on note que la superficie cumulée diminue progressivement, soulignant une diminution relative de la contribution des altitudes supérieures à la morphologie du bassin versant. La classe dont les altitudes varient entre 700 et 800 m, prend une part importante de la superficie, soit 361,84 km², soit 22,77% de la surface totale.

Tableau 13. Répartition des superficies selon les tranches d'altitudes dans le (SBV-12 03).

Classes	Altitude (m)	Surface (km ²)	Surface partielle (%)	Surface cumulée (%)
600 - 700	650	44,18	2,78	100,00
700 - 800	750	361,84	22,77	97,22
800 - 900	850	387,22	24,37	74,45
900 - 1000	950	310,62	19,55	50,08
1000 - 1100	1050	216,55	13,63	30,53
1100 - 1200	1150	145,39	9,15	16,90
1200 - 1300	1250	70,39	4,43	7,75
1300 - 1400	1350	36,58	2,30	3,32
1400 - 1500	1450	13,77	0,87	1,02
1500 - 1600	1550	2,29	0,14	0,16
1600 - 1700	1650	0,19	0,01	0,01
Total		1589,00	100,00	0,00

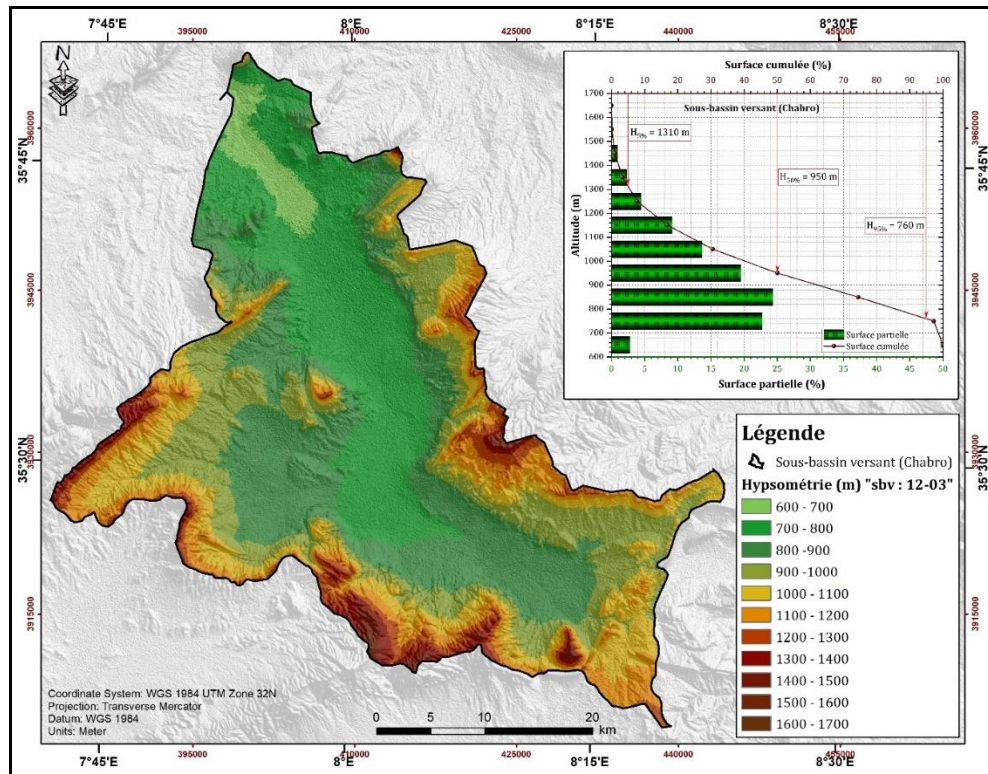


Figure 14. Hypsométrie du sous-bassin versant de Chabro (SBV-12-03).

Le sous bassin versant (12-04) SBV-12 04 (Fig.15) :

Les altitudes inférieures, allant de 230 à 600 m, occupent de petites superficies presque négligeables. La classe d'altitude allant de 600 à 700 m, occupent une superficie de 406,37 km², soit 27,23% de la surface totale, mettant en évidence des caractéristiques topographiques propices à l'extension du sous bassin versant. Ceci démontre une influence significative de la topographie sur la morphologie hydrographique à ces niveaux d'altitude spécifique.

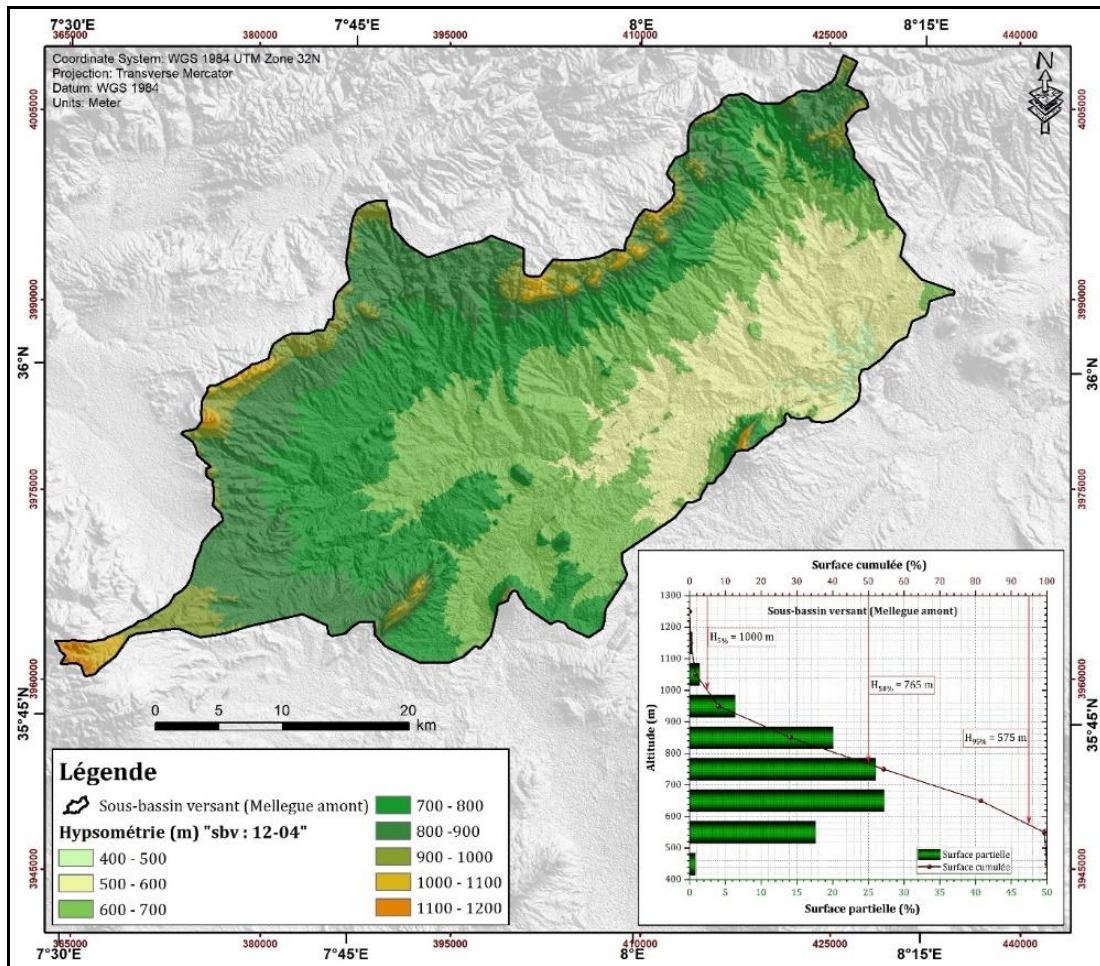


Figure 15. Hypsométrie du sous-bassin versant du Mellegue amont (SBV-12-04).

Tableau 14. Répartition des superficies selon les tranches d'altitudes dans le (SBV-12-04).

Classes	Altitude (m)	Surface (km ²)	Surface partielle (%)	Surface cumulée (%)
400 - 500	450	11,77	0,79	100,00
500-600	550	263,68	17,67	99,21
600 - 700	650	406,37	27,23	81,55
700 - 800	750	389,29	26,08	54,32
800 - 900	850	299,96	20,10	28,24
900 - 1000	950	95,28	6,38	8,14
1000 - 1100	1050	21,19	1,42	1,76
1100 - 1200	1150	5,03	0,34	0,34
Total		1492,57	100,00	0,00

La classe d'altitude oscillant entre 700 et 800 mètres occupe 389,29 km², de la superficie, avec 389,29 km², soit 26,08% du total.

Le sous bassin versant (12-05) SBV-12 05 (Fig.16) :

La classe des altitudes peu élevées, allant de 230 à 500 m, occupent des superficies relativement modestes, de ce fait la topographie est moins propice à la formation de sous bassins versants plus étendus.

La classe d'altitude situées entre 500 et 600 mètres se distingue avec une superficie de 324,96 km², soit 23,58% de la surface totale, cette zone est probablement propice à la présence de

caractéristiques topographiques allant vers la présence de réseaux hydrographiques plus vastes.

Au fur et à mesure l'altitude augmente, on observe une diminution progressive de la superficie cumulée, indiquant une diminution de la contribution des altitudes supérieures à la morphologie du bassin versant.

La classe d'altitude située entre 600 et 700 m, reste importante et occupe une superficie totale de 280,46 km², correspondant à 20,35% de la surface totale du bassin versant.

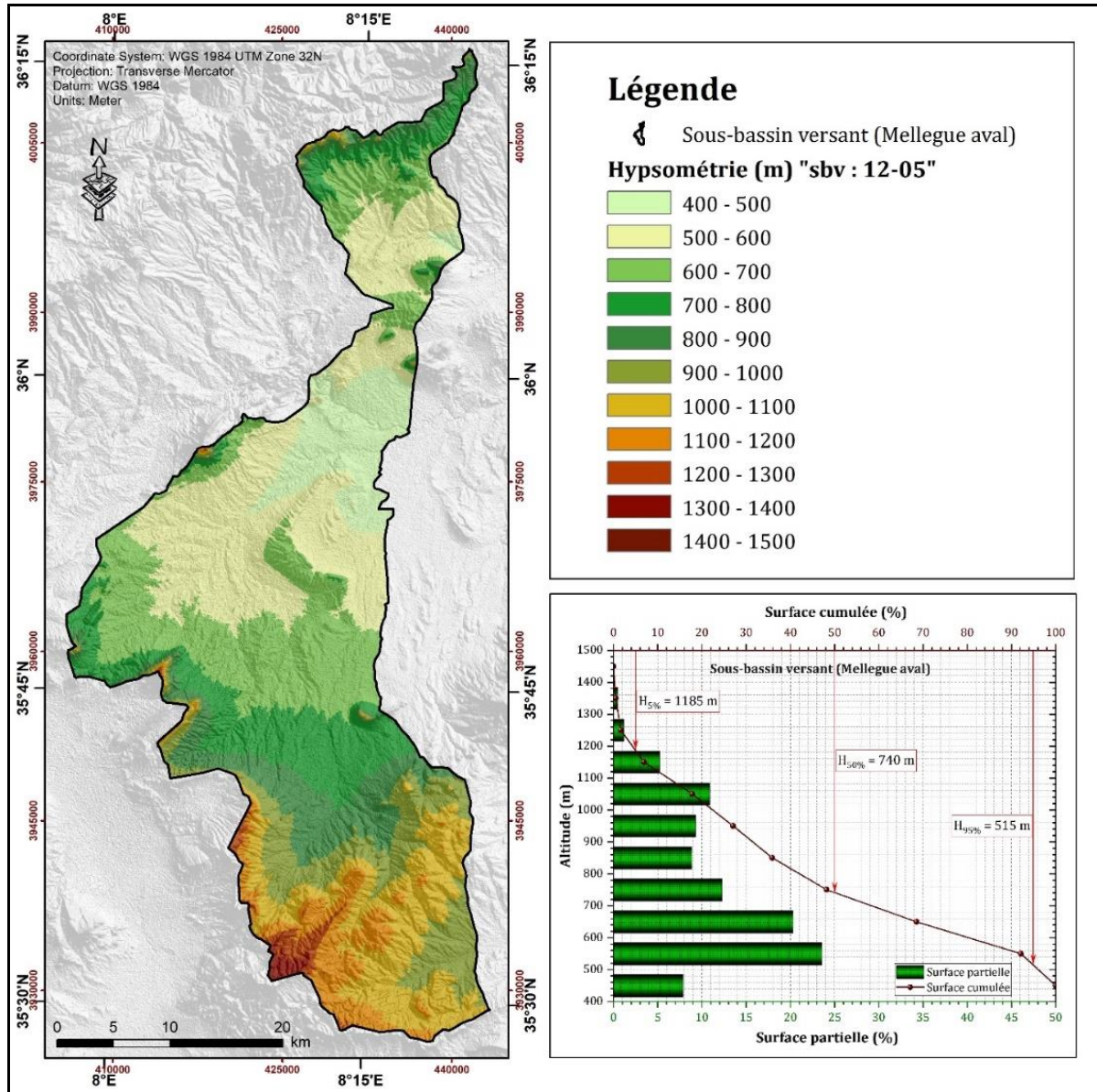


Figure 16. Hypsométrie du sous-bassin versant du Mellegue aval (SBV-12-05).

Tableau 15. Répartition des superficies selon les tranches d'altitudes dans le (SBV-12-05).

Classes	Altitude (m)	Surface (km ²)	Surface partielle (%)	Surface cumulée (%)
400 - 500	450	108,51	7,87	100,00
500-600	550	324,96	23,58	92,13
600 - 700	650	280,46	20,35	68,55
700 - 800	750	169,31	12,28	48,20

800 - 900	850	122,29	8,87	35,91
900 - 1000	950	127,83	9,27	27,04
1000 - 1100	1050	150,06	10,89	17,77
1100 - 1200	1150	72,17	5,24	6,88
1200 - 1300	1250	16,10	1,17	1,64
1300 - 1400	1350	6,49	0,47	0,47
1400 - 1500	1450	0,06	0,00	0,00
Total		1378,23	100,00	0,00

Conclusion de l'hypsométrie

Les résultats obtenus à partir de l'interprétation des courbes hypsométriques (les figures 12, 13, 14,15, et 16), donnent des indications sur la distribution des altitudes dans les différents sous-bassins de la Medjerda. On note que plus de 50 % de la surface totale du bassin de la Medjerda correspond à des altitudes comprises entre 600 et 1000 m. Les zones d'altitude comprises entre 1000 et 1100 m, couvrent une superficie de 915,63 km², soit 11,75% de la superficie totale de ce bassin, elles se situent principalement à l'amont du SBV-12-02. Les zones d'altitudes supérieures à 1 100 m, sont associées aux lignes de crêtes des SBV-12-01, 12-02 et 12-03. Cette analyse hypsométrique montre la répartition des altitudes dans le bassin versant de la Medjerda, montrant une éventuelle influence de la topographie sur le comportement des eaux superficielles ou souterraines dans une région donnée.

3.3.5. Les indices d'inclinaison

a- La pente S_b

Ce paramètre peut avoir une influence sur les processus hydrologiques, modulant la quantité, la vitesse, et la direction du ruissellement en surface, ainsi que le temps nécessaire à son acheminement vers les canaux de drainage (Altaf et al., 2014). La variation spatiale du degré de pente entraîne une différence dans la quantité d'eau de surface qui s'infiltré dans le sol, contribuant à recharger et à reconstituer les réservoirs d'eau souterraine (Bouklab et al., 2022). Les calculs effectués et se rapportant à la région de notre étude, montrent une variation spatiale des pentes, expliquant les variations des caractéristiques topographiques et structurelles hétérogènes de la région (Tableau 2, Fig. 4). Les valeurs de pente très élevées (> 25 %) sont enregistrées dans les SBV-12-01 et SBV-12-03. Cependant, la pente diminue considérablement lorsque le SBV-12-02 pénètre dans les zones de plaine, les faibles valeurs de S_b sont enregistrées au niveau des plaines des sous-bassins 12-02, 12-04, et 12-05, d'où une possibilité élevée pour qu'une région puisse avoir un potentiel significatif de recharge des eaux souterraines. Les indicateurs de pente sont évalués en tenant compte la connaissance et de la distribution hypsométrique dans le bassin versant (Derradji, 2023). Leur identification peut s'effectuer à l'aide des deux indices suivants :

- L'indice de pente global I_g

Défini par la relation suivante :

$$I_g = \frac{D}{L}$$

- D : dénivelé entre les altitudes correspondant à 5% et 95% de la surface du bassin versant, extrait de la courbe hypsométrique (m).
- L : longueur du rectangle équivalent (m).

Le tableau suivant (N°16), donne la classification des reliefs établie par l'ORSTOM

Tableau 16 : Classification du Relief selon l'Indice Global I_g par L'ORSTOM.

Type de relief	Indice de pente globale
Relief très faible	$I_g < 0.002 \text{ m/Km}$
Relief faible	$0.002 < I_g < 0.005$
Relief assez faible	$0.005 < I_g < 0.01$
Relief modéré	$0.01 < I_g < 0.02$
Relief assez fort	$0.02 < I_g < 0.05$
Relief fort	$0.05 < I_g < 0.5$
Relief très fort	$I_g > 0.5 \text{ m/Km}$

b- Dénivelée spécifique

La dénivelée spécifique est utilisée pour caractériser les divers types de relief des bassins versants. Contrairement à l'indice global I_g , la dénivelée spécifique ne prend pas en considération la taille du bassin, permettant ainsi la comparaison entre des bassins de tailles différentes en fonction de leur relief. Exprimée par la formule suivante :

$$D_s = I_g \times \sqrt{S} = \frac{D}{L} \times \sqrt{S}$$

Tableau 17: Classification du relief basée sur la Dénivelée Spécifique (DS).

Ds < 10	Relief très faible
10m < Ds < 25m	Relief faible
25m < Ds < 50m	Relief assez faible
50m < Ds < 100m	Relief modéré
100m < Ds < 250m	Relief assez fort
250m < Ds < 500m	Relief fort
Ds > 500m	Relief très fort

Tableau 18. Valeurs de Ig et Ds par sous bassin versant.

Bassin	Code SBV	Nom Sous-bassin	Superficie (Km ²)	Ig	Ds	Classe de relief
Medjerda	12-01	Oued Medjerda	1499.34	4,63	178,76	Relief assez fort
	12-02	Oued Meskiana	1828.08	5,20	222,60	Relief assez fort
	12-03	Oued Chabro	1589.00	5,23	207,04	Relief assez fort
	12-04	Oued Mellegue amont	1492.57	3,95	152,36	Relief assez fort
	12-05	Oued Mellegue aval	1378.23	5,57	206,02	Relief assez fort

Le tableau 18, donne de manière significative, la classification des sous-bassins en fonction de l'Ig et de la Ds. Cependant, selon la classification de L'ORSTOM, les sous-bassins de la région se caractérisent par des valeurs d'Ig supérieures à 0,5 m/Km, traduisant un relief très fort. Ce dernier joue un rôle déterminant dans le comportement hydrologique du bassin, notamment lors des précipitations et au cours du drainage. Dans le détail, on remarque que les dénivelées spécifiques les plus élevées (Ds), s'observent au niveau des sous-bassins 12-02, 12-03, et 12-05, correspondant à la classe « relief assez fort », les valeurs se situent entre 100 et 250m. En revanche, les valeurs les plus basses de Ds, sont enregistrées au niveau des sous-bassins 12-01 et 12-04, caractérisant les hauts plateaux et les plaines agricoles.

3.3.6. Indice d'humidité topographique (TWI)

L'indice de TWI, correspond à l'accumulation d'humidité sur le territoire. Il est utilisé pour classer les zones du bassin versant en fonction de leur capacité à être plus humides ou plus sèches en raison du ruissellement (Hojati & Mokarram, 2016).

L'indice (TWI) obtenu à partir du modèle numérique terrain (MNT) permet de prédire le niveau d'humidité dans le sol. Il varie entre 0 et 25. La plage de valeurs de l'indice TWI dans le bassin versant de la Medjerda varie de 06,04 à 25,34, comme illustré dans la figure 17.

Les valeurs élevées sont principalement localisées au niveau des zones plates présentant à faible pente ou à basse altitude et à proximité du cours d'eau principal, traduisant une forte accumulation d'eau conduisant à une humidité élevée du sol (> 15). Ces valeurs élevées de l'indice TWI peuvent être utilisées comme un guide pour identifier les plaines inondables, les zones humides et la diversité des espèces de flore et de faune, car une forte accumulation d'eau est essentielle à leur survie. Les valeurs basses de l'indice TWI sont attribuées aux pentes abruptes où l'eau s'écoule rapidement.

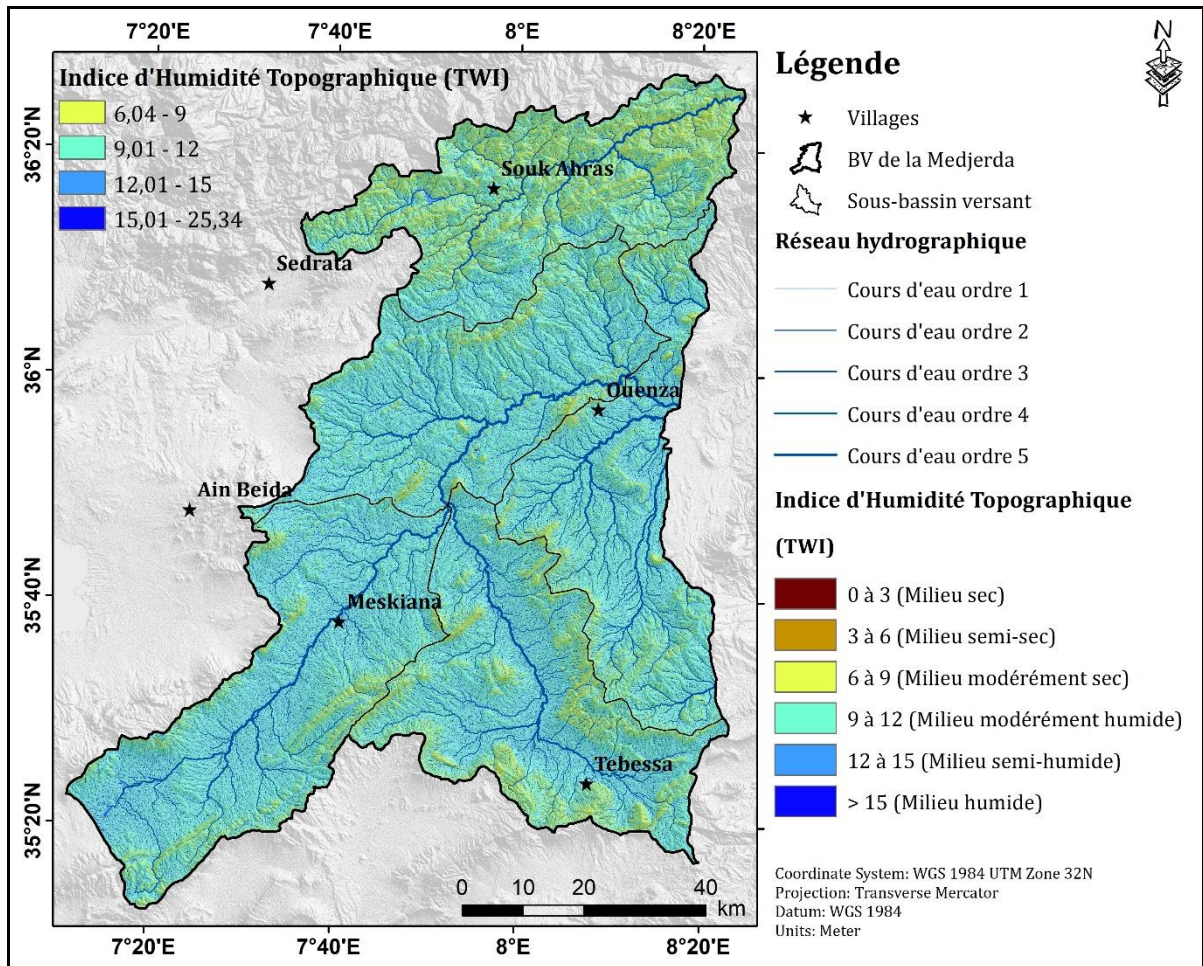


Figure 17. Carte de l'indice d'humidité topographique du bassin versant de la Medjerda.

4. Réseau hydrographique

L'organisation d'un bassin versant est exclusivement déterminée par la configuration de son réseau d'hydrographique, ce dernier englobe l'ensemble des cours d'eau, qu'ils soient naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, contribuant à l'écoulement. La configuration peut varier considérablement en raison de divers facteurs climatiques, topographiques, et pédologiques qui influent directement sur la direction et la densité du réseau de drainage, et de l'écoulement superficiel.

Divers paramètres, tel que la densité de drainage, la fréquence des talwegs, le coefficient de torrentialité, le rapport de confluence, le rapport des longueurs et le temps de concentration jouent un rôle clé dans la régulation du régime hydrologique d'un cours d'eau. Chacun de ces éléments contribue au façonnement de la configuration et du comportement du réseau hydrographique, fournissant ainsi une compréhension approfondie des caractéristiques hydrologiques d'une région donnée.

4.1. Extraction du réseau hydrographique et sa hiérarchisation sur ArcGIS

Les sous-bassins versants et les réseaux hydrographiques qui les composent ont été générés à partir d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) d'une résolution de 30 m, en utilisant l'outil

Arc Hydro dans ArcGIS, permettant de reproduire le chevelu hydrographique avec ses ordres. Lors de la délimitation des bassins versants ou de la définition des réseaux hydrographiques, plusieurs étapes sont nécessaires et doivent être appliquées :

-Au début du processus de modélisation, l'outil de remplissage « fill » a été utilisé pour rectifier le modèle d'altitude initial en raison d'erreurs présentes dans le Modèle Numérique de Terrain (MNT), souvent apparaissent comme des dépressions ou cuvettes (généralement le modèle d'altitude comporte des erreurs, certains emplacements de cellules risquent d'être plus bas que les cellules environnantes. Dans ce cas, tout le flux de surface qui se dirige vers la cellule n'en sortira pas. Ces dépressions se nomment des cuvettes).

-En seconde étape, le sens et l'accumulation du flux ont été calculés pour chaque emplacement de cellule. Le choix du seuil lors de l'extraction du réseau conditionne la qualité du réseau hydrographique.

Pour une résolution identique du MNT, plus le seuil est faible, plus le réseau hydrographique est dense. Dans notre cas, nous avons utilisé la valeur d'accumulation seuil 500, ce qui signifie que chaque cellule du réseau de drainage a un minimum de 500 cellules contributrices, aboutissant à un réseau hydrographique moins dense qu'avec une valeur seuil inférieure, en fonction de la taille du bassin versant (Arabameri et al. 2020; Chang 2014; Odiji et al. 2021).

Une fois que les directions d'écoulement et les réseaux hydrographiques sont établis, d'autres outils d'analyse hydrologique (Flow Accumulation Tool, Snap Pour Point Tool, Watershed Tool) peuvent être utilisés pour déterminer les ordres hydrographiques et les propriétés spécifiques des cours d'eau. En somme, le processus permet de créer des modèles hydrologiques précis en prenant en compte les caractéristiques du terrain et en garantissant une représentation fiable des réseaux hydrographiques.

Le modèle illustré à la figure 18 récapitule les différentes étapes de la délimitation du bassin et de la modélisation hydrologique.

La délimitation d'un bassin versant topographique repose sur la sélection d'un exutoire à partir duquel le géo-traitement peut générer des lignes de crêtes. Ensuite, pour chaque point de contour, l'outil « Watershed » a été utilisé pour calculer les sous-bassins versants. Ces derniers sont ensuite convertis en polygones et fusionnés avec la superficie du plan d'eau pour former le bassin versant total. En hydrologie, on peut décrire un bassin comme un système complexe qui transforme les précipitations en débit surfaciques. Ceci découle de multiples interactions entre la topographie et les divers éléments du réseau hydrographique. Par conséquent, une étude pluie-débit, fondée sur des données physiques, requiert une approche précise et objective dans l'analyse des schémas de drainage (Kim & Jung, 2015).

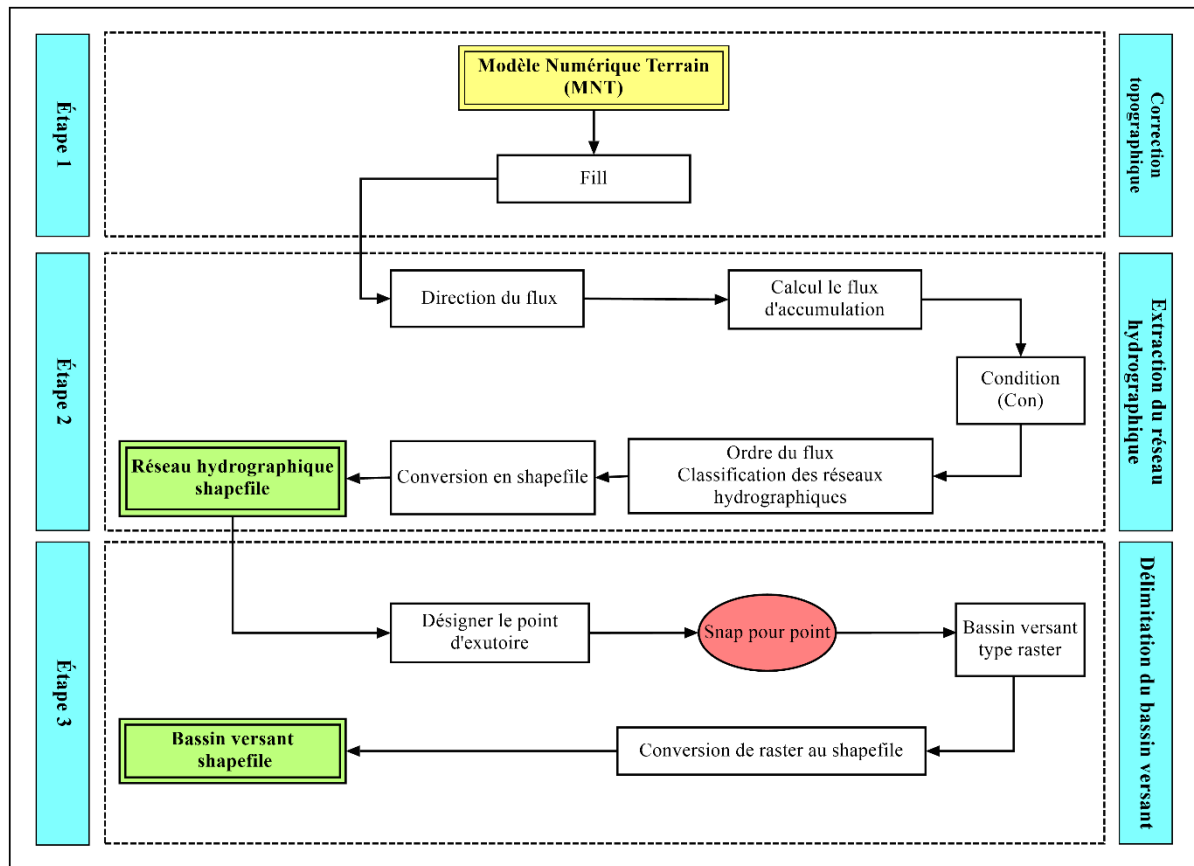


Figure 18. Extraction du réseau hydrographique et délimitation du bassin versant.

Afin de quantifier la hiérarchie du réseau hydrographique, on attribue pour chaque cours d'eau un numéro selon son importance. Cette numérotation, appelée ordre des cours d'eau, peut varier d'un auteur à l'autre. Dans le cadre de ce modèle, les ordres de flux ont été déterminés en suivant la théorie élaborée par Strahler (1964), qui considère un segment sans affluents comme un flux de premier ordre. Lorsque deux segments de flux de premier ordre se rejoignent, ils forment un segment de flux de deuxième ordre, et ainsi de suite. Cette approche permet de catégoriser et de structurer le réseau hydrographique en fonction de la confluence des cours d'eau, offrant une compréhension de la hiérarchie des flux dans le bassin versant.

4.2. Caractéristiques du réseau hydrographique

4.2.1. Description du réseau hydrographique

Le bassin versant de la Medjerda situé au Sud-est de la région hydrographique constantinoise et est identifié sous le numéro 12 selon la nomenclature de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH). Ce bassin, est subdivisé en cinq sous-bassins couvrant une superficie totale de 7 787.25 km², soit 17.69 % de la surface totale. La vallée de la Medjerda demeure encaissée entre les sommets élevés des montagnes de la Medjerda. L'analyse du réseau hydrographique de la zone montre les principaux cours d'eau contribuant au potentiel hydrique immédiatement exploitable, incluant les oueds Medjerda, Chabro, Meskiana et Mellegue. La configuration détaillée de cette subdivision est présentée par la figure 19, de ce

fait on a une vision permettant la compréhension de la répartition spécifique du bassin versant de la Medjerda.

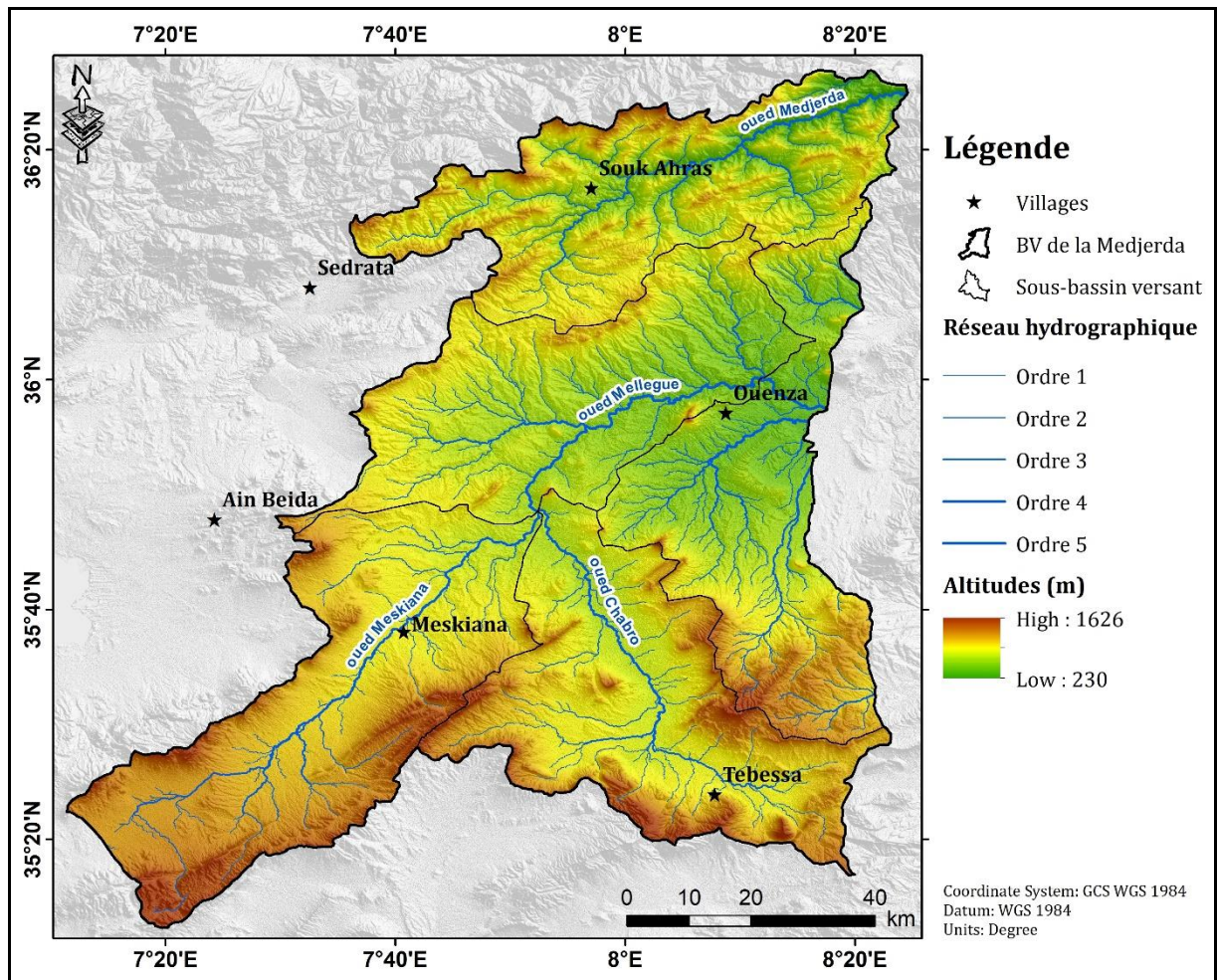


Figure 19. Carte du Réseau hydrographique du bassin versant de la Medjerda.

Ainsi deux secteurs sont identifiés dans cette zone hydrographique :

1. Le premier secteur s'étend dans la partie NN-NE de la région étudiée, avec une densité significativement plus élevée. Il présente un réseau hiérarchisé centré autour de la Medjerda.
2. Le deuxième secteur se situe dans la partie Sud-ouest de la région, caractérisé par une densité modérée. Son réseau est hiérarchisé autour de l'Oued Charef.

Par ailleurs, les caractéristiques physiques du réseau, en lien avec le relief, confirment la présence de ces deux ensembles. Ces secteurs se distinguent par un écoulement rapide SW-NE, parfois agressif, à travers des lits d'oueds encaissés (dans le premier secteur). En revanche, le deuxième secteur présente un écoulement régulier, voire faible en période sèche, avec des lits d'oueds plus larges.

4.2.2. Aspects linéaires

- **Ordre du flux « U » (Stream order)**

Pour analyser le cadre hydrologique, géomorphologique et morphométrique d'un bassin versant, la première étape consiste à établir les ordres du flux des cours d'eau. Le concept de l'ordre du flux a été élaboré par Horton (1945), et offre une représentation essentielle du réseau de drainage du bassin versant, dévoilant la hiérarchie des ramifications des cours d'eau. La loi d'Horton, indique que les flux non ramifiés sont catégorisés comme de premier ordre, et lorsque deux flux de premier ordre se rejoignent, ils acquièrent le statut de deuxième ordre. Pour réaliser notre travail, nous avons utilisé la méthode de Strahler (1957,1964) pour sa simplicité et de son utilisation fréquente par plusieurs chercheurs (Kumar Dubey, 2015; Asfaw & Workineh, 2019; Mustafa et al., 2016; Resmi et al., 2019; Arabameri et al., 2020; Odiji et al., 2021). Le bassin versant de la Medjerda et en fonction de l'ordre de drainage (Strahler) comprend 509 cours d'eau connectés répartis sur cinq ordres distincts, comme illustré dans la figure 18.

Traditionnellement, l'ordre le plus élevé parmi les cours d'eau dans le réseau hydrographique du bassin est considéré comme l'ordre du bassin versant (Umrikar, 2017; Odiji et al., 2021). On déduit que le bassin versant de la Medjerda, est considéré comme un système de bassin versant de cinquième ordre de longueur totale de 9 011,35km. Les cinq sous-bassins versants de la Medjerda présentent une variation d'ordres de flux allant du premier au cinquième ordre. Les cours d'eau de premier ordre sont généralement nombreux et courts, émanant des régions vallonnées et des paysages montagneux accidentés du bassin versant situés dans le sous bassin de la Medjerda (SBV-12-01) et du Mellegue amont et aval (12-04, 05), tandis que le cours d'eau de l'ordre élevé, représentant la principale rivière du bassin, se trouve dans la plaine ou la vallée du sous bassin du Mellegue (SBV-12-04).

- Nombre total du flux « Nu » (Stream number)

Les travaux d'Horton et Strahler, réalisés respectivement en 1945 et en 1964, montrent que le nombre de flux (Nu) constitue le total des segments de flux au sein d'un réseau hydrographique. En nous référant à la table attributaire des couches de flux dans l'Arc Gis 10.8 pour extraire les chiffres de l'analyse hiérarchisée du réseau hydrographique du bassin versant de la Medjerda. On détermine dans les cinq sous-bassins le nombre total de cours d'eau (Nu) s'élève à 509. Ce constat montre que le nombre du flux diminue de manière géométrique quand l'ordre du flux augmente dans l'ensemble des sous-bassins (Horton, 1945). Le SBV-12-05 détient le Nu le plus élevé, avec 196 cours d'eau, soit 38,50 % du total. La portion la plus faible du Nu se trouve dans le SBV-12-01, avec 65 cours d'eau, soit 12,77 %. Les autres sous-bassins présentent respectivement 83 flux pour le SBV-12-02, soit 16,30 %, 74 flux pour le SBV-12-03, soit 14,53 %, et enfin, le SBV-12-04 est représenté par 91 flux,

soit 17,87 %. Le Nu le plus élevé indique un potentiel significatif de ruissellement et un faible degré d'infiltration.

Les longueurs des cours d'eau permanents et temporaires par bassin sont répertoriées dans le tableau 19 suivant :

Tableau 19: Longueur des oueds permanents et temporaires par sous-bassin versant.

B. V	SBV	Lp (km)	Lt (km)	L (km)	Nu (km)	Lu (km)	Lum (km)	RLu (km)	Rb (km)	Rbm (km)
Medjerda	12-01	154,85	555,04	709,89	65,00	409,02	6,29	0,59	2,80	2,80
	12-02	220,35	1054,23	1274,57	83,00	510,74	6,15	0,80	3,07	3,07
	12-03	119,59	689,82	809,42	74,00	554,59	7,49	1,39	2,56	2,56
	12-04	116,71	550,61	667,32	91,00	670,86	7,37	1,27	2,72	3,40
	12-05	103,91	539,13	643,04	196,00	741,92	3,79	1,69	2,56	3,20

(Lp : Longueur des oueds permanents, Lt : Longueur des oueds temporaires, L : Longueur total, Nu : Nombre total, Lu : Longueur total du flux, Lsm : Longueur du flux moyen, RLu : Rapport de longueur du flux, Rb : Rapport de bifurcation, Rbm : Rapport moyen de bifurcation)

- Longueur total du flux « Lu »

Les longueurs du flux sont déterminées en mesurant la somme des longueurs de tous les segments du flux de différents ordres du flux (U) (Horton, 1945). Donnée par la formule suivante :

$$Lu = L1 + L2 + \dots Ln$$

Tel que :

- **N1** : Cours d'eau de premier ordre
- **N2** : Cours d'eau de second ordre
- **Nn** : Nombre de cours d'eau

Pour notre zone d'étude (Lu) s'élève à 2887,13 km². L'analyse de la distribution de la longueur totale du flux dans le bassin versant de la Medjerda montre une décroissance du nord-est (SBV1201) vers le sud-est (SBV1205). Ce dernier se caractérise par une Lu élevée, atteignant environ 741,92 km, soit 25,70 % de la longueur totale du bassin de la Medjerda. Les SBV-12-04 et SBV-12-03 présentent respectivement des longueurs de 670,80 km et 554,59 km, contribuant à 23,24 % et 19,21 %. En revanche, les SBV-12-02 et SBV-12-01 ont des parts modestes, couvrant 510,74 km et 407,02 km, soit 17,69 et 14,17% respectivement, comme indiqué dans le tableau 19. Selon l'ordre des flux, l'examen de tous les sous-bassins révèle une tendance où la longueur totale des segments du flux atteint son maximum dans les

flux de premier ordre, diminuant progressivement à mesure que l'ordre du flux augmente. Selon les observations d'Horton 1945, cette tendance s'explique par l'origine des variations topographiques (un relief marqué par des altitudes élevées ou des pentes modérément raides, avec une lithologie variable). Dans le contexte de cette étude, il est manifeste que la longueur totale des segments de flux est maximale dans les flux de premier ordre et minimale dans ceux du cinquième ordre.

- Longueur moyenne du flux « *Lsm* »

La longueur moyenne d'un cours d'eau constitue une caractéristique intrinsèque liée à la structure du réseau fluvial et à la superficie de son bassin versant associé, comme défini par Strahler en 1964 a, b.

Elle est exprimée par l'équation ci-dessous :

$$Lsm = \frac{Lu}{Nu}$$

Où :

- Lu : Longueur moyenne des cours d'eau d'un ordre donné (km).
- Nu : Nombre de segments des cours d'eau.

Généralement, à mesure que l'ordre d'un cours d'eau s'accroît, on observe simultanément une augmentation de sa longueur moyenne. Toutefois, des exceptions se manifestent dans certains sous-bassins, où un cours d'eau d'ordre plus élevé présente une longueur moyenne réduite, phénomène attribuable à des variations spatiales et topographiques, comme indiqué dans le tableau 19. Cette anomalie a été signalée dans plusieurs études antérieures (Pophare & Balpande, 2014). La plupart des études indiquent que la valeur de *Lum* est plus basse dans les régions montagneuses que dans les zones de plateaux ou de plaines, comme souligné par (Rai et al., 2017). Cette constatation indique que les cours d'eau en milieu montagneux ont généralement des longueurs spécifiques moins importantes par rapport à ceux évoluant dans des environnements de plateaux ou de plaines de faibles pentes. La longueur moyenne du flux dans le bassin de la Medjerda varie d'un sous-bassin à l'autre entre 3,79 et 7,49.

La valeur maximale est affichée dans le SBV-12-03. Les SBV-12-01, 02, 04, 05 affichent des valeurs suivantes 6,29, 6,15, 7,37 et 3.79. Notons que la topographie d'une région influence le système de drainage, et donc la longueur moyenne du flux. Les cours d'eau dans les terrains plats peuvent avoir des longueurs moyennes plus importantes, tandis que les régions montagneuses peuvent présenter des longueurs moyennes plus courtes en raison de l'incidence des pentes sur l'écoulement.

- Rapport de longueur du flux « *RLu* »

En référence à la loi d'Horton (1945), le rapport de longueur du flux (Rlu) représente le rapport entre la longueur moyenne d'un ordre (Lu) et celle d'un ordre inférieur (Lu-1), tel que :

$$Rlu = \frac{Lu}{lu - 1}$$

Où :

Lu : Longueur totale des cours d'eau de l'ordre (u).

Lu-1 : Longueur totale des cours d'eau de l'ordre inférieur suivant.

Dans le bassin étudié, le calcul du rapport de longueur des cours d'eau révèle des variations avec des valeurs de Rlu oscillant entre 0,59 et 1,69. De ce fait, les variations du rapport de longueur des cours d'eau sont le résultat direct de la pente et de la nature topographique. Parallèlement, certaines recherches indiquent une irrégularité dans le rapport de longueur des cours d'eau des bassins fluviaux montagneux-plaines, par rapport aux bassins fluviaux typiques bordant un plateau (Magesh & Chandrasekar, 2012).

- Rapport de bifurcation (Rb) / Rapport moyen de bifurcation (Rbm)

Le rapport de bifurcation, défini comme le nombre du flux d'un ordre à l'ordre suivant (Schumm, 1956), calculé en utilisant l'équation suivante :

$$Rb = \frac{Nu}{Nu + 1}$$

Avec :

- Nu : Nombre de segments des cours d'eau présents dans l'ordre donné.
- Nu+1 : Nombre de segments de l'ordre supérieur suivant.

Selon Horton (1945), le paramètre Rb est considéré comme un indice de relief ou de dissection. En 1957, Strahler a démontré que le Rb présente une variation faible et limitée dans différentes régions, à l'exception des situations où un contrôle géologique significatif domine, notamment dans des environnements variés. Il a également indiqué en 1964 que les valeurs de Rb varient généralement entre 3 et 5 pour les bassins versants où les structures géologiques n'altèrent pas significativement le système de drainage ou ont une influence négligeable.

Les valeurs spécifiques du Rb et de Rbm pour chaque SBV du bassin de la Medjerda sont détaillées dans le tableau 19. Les valeurs du Rb varient de 2,56 à 03,07. Les sous-bassins caractérisés par le nombre élevé de segments des cours d'eau présentent le rapport de bifurcation le plus élevé, induisant un ruissellement et un débit de surface importants en raison d'un relief vallonné et de roches résistantes moins profondes. Pour l'ensemble du bassin versant de Medjerda, le Rbm varie d'un SBV à l'autre, entre 2,56 pour le SBV-12-03 et 3,40

pour le SBV-12-04, la faible valeur du Rbm, indique que le drainage n'est pas influencé par des perturbations structurelles. Cette observation montre l'influence modérée des facteurs tels que les conditions climatiques, le relief, et le taux d'infiltration sur le réseau de drainage, plutôt que des perturbations d'origine structurelle.

- Densité de drainage « D_d »

La densité de drainage (D_d), reflète la proximité des canaux dans un bassin. D_d mesure le rapport entre la longueur totale des cours d'eau et la surface unitaire du bassin. Cette mesure varie de 0,55 à 2,09 km/km² dans les régions humides (Joji et al., 2013; Mahala, 2020). Elle se calcule par l'équation suivante :

$$D_d = \frac{\Sigma L}{A}$$

Avec :

- D_d : Densité de drainage (Km/Km²).
- ΣL : Somme des Longueur de tous les cours d'eau (Km).
- A : Surface du bassin drainé (Km²)

Différents facteurs influencent la densité de drainage d'une région donnée, principalement les précipitations car principales sources de tout flux superficiels. Les facteurs topographiques (pente, relief) ont un impact significatif sur l'intensité, la densité, la vitesse et la direction du flux superficiel. Les facteurs pédologiques (type, composition et texture du sol et sa capacité d'infiltration) conditionnent les quantités d'eau infiltrées. Les facteurs géologiques et structuraux (composition lithologiques, linéaments) jouent également un rôle dans la répartition des affluents sur la surface d'un bassin. L'occupation du sol, comprenant l'utilisation des terres et la couverture végétale, constitue ainsi un autre élément important. Elle donne la vitesse du flux superficiel et favorise l'infiltration et la percolation souterraine.

Le bassin versant de la Medjerda, se caractérise par des valeurs de densité de drainage différentes 0.48, 0.70, 0.52, 0.45 et 0.47 Km/Km² respectivement. La valeur la plus faible 0.45 est enregistrée dans le sous-bassin (SBV-12 04), tandis que la valeur élevée de D_d , 0,78 caractérise le sous-bassin SBV-12-02 (Cf. tableau 19). Cette valeur élevée indique que le sol ou la roche traversée se distingue par une faible perméabilité, une pente raide et un débit d'eau fort. En contrepartie, les plaines plus basses du bassin présentent une perméabilité élevée, un relief plat et des régimes de couts d'eau moins marqués, d'où la très faible D_d .

Les valeurs de D_{dp} (densité de drainage permanent) sont faibles et approximatives pour tous les sous-bassins, avec 0.10 pour SBV-12-01, 0.12 pour SBV-12-02 et 0.08 pour les autres sous-bassins (SBV-12-03, SBV-12-04 et SBV-12-05). De même, pour la D_{dt} (densité de drainage total), on remarque un léger changement variant d'un sous-bassin à l'autre. Ces

résultats laissent supposer que les bassins versants sont généralement bien drainés. Les valeurs de densité de drainage par sous-bassins sont récapitulées dans le tableau 20 suivant :

Tableau 20. Caractéristiques du réseau hydrographique par sous-bassin versant.

Nom sous-bassin	Superficie (km ²)	Ddp	Ddt	Dd	Ddp/Dd	Ddt/Dd
Oued Medjerda	1499,29	0,10	0,37	0,48	21,81	78,19
Oued Meskiana	1828,06	0,12	0,58	0,70	17,29	82,71
Oued Chabro	1589,02	0,08	0,44	0,52	14,78	85,22
Oued Mellegue amont	1492,65	0,08	0,37	0,45	17,49	82,51
Oued Mellegue aval	1378,21	0,08	0,39	0,47	16,16	83,84

- Fréquence de drainage « Fs » ou (Fréquence des talwegs)

La fréquence des cours d'eau dans un bassin versant est définie par la proportion du nombre total de cours d'eau (N) par unité de surface (A) (Horton, 1945). Elle est donnée par la formule suivante :

$$F_s = \frac{N}{A}$$

Où :

- N : Nombre total de cours d'eau
- A : Superficie du bassin (km²)

La taille de la zone de drainage est un élément à prendre en compte lors de la comparaison des valeurs de densité de drainage et de fréquence des cours d'eau en fonction de la superficie des bassins versants. Un grand bassin peut présenter une densité similaire de cours d'eau par unité de surface à celle d'un petit bassin, tout en comportant fréquemment un débit plus important. Ce phénomène peut être masqué par l'augmentation de la densité de drainage et de la fréquence des cours d'eau sur les pentes plus abruptes typiquement associées aux bassins versants plus petits (Horton, 1945). Les valeurs de fréquence de drainage faibles, comprises entre 1,0 et 3,5, signalent un contrôle morphologique structural par des fractures, tandis qu'une fréquence élevée, allant de 4 à 10, indique une perméabilité réduite et un ruissellement de surface plus important (Melton, 1958).

La Medjerda, se caractérise par une fréquence des cours d'eau variant de 0,04 à 0,14, avec une valeur de 10,3 pour le bassin versant principal de la Medjerda, traduisant un ruissellement de surface élevé et une infiltration limitée. Le SBV-12-05 se démarque des autres et indique une plus grande vulnérabilité aux inondations car présentant une capacité d'infiltration et du stockage des eaux restreinte. Nous remarquons aussi que la grande partie des sous-bassins versants affichent des valeurs très faibles de fréquence des cours d'eau comprises entre 0,04 et 0,06, montrant une corrélation directe significative entre cette fréquence et la susceptibilité à la recharge des eaux souterraines. Par conséquent, le SBV-12-05 obtient le classement le plus élevé (5), favorisant un écoulement superficiel significatif.

- Texture de drainage (Rapport de texture) « D_t » ou (Coefficient de torrentialité)

La texture de drainage est déterminée par le nombre total de segments des cours d'eau pour chaque unité de périmètre de la zone. Calculée comme suit :

$$D_t = Dd \frac{N_j}{A}$$

Où :

- D_t : Coefficient de torrentialité du flux d'ordre (Texture de drainage).
- Dd : Densité de drainage (km/km²).
- N_j : Nombre de cours d'eau d'ordre j.
- A : Surface du bassin (km²).

Horton a identifié que la capacité d'infiltration est le facteur déterminant pour ce paramètre fluvial, soulignant son importance dans la caractérisation de l'espacement relatif du réseau de drainage d'un bassin. Selon Smith (1950), la texture du drainage est conditionnée par une série de facteurs naturels complexes. Ces facteurs comprennent, en premier lieu, la quantité des précipitations, qui assurent le modelage des réseaux de drainage. La densité de la végétation influençant la manière dont l'eau s'écoule à travers le paysage, les types de sol présents dans une région jouent un rôle fondamental dans la texture du drainage (certains sols ont une capacité d'infiltration plus élevée, permettant à l'eau de pénétrer plus facilement dans le sous-sol, tandis que d'autres sols peuvent être plus imperméables, entraînant un ruissellement plus important en surface). Le relief, avec ses variations d'altitude et de pente, a un impact significatif sur la définition de la texture du drainage. En effet, Smith (1950) a identifié cinq catégories distinctes de texture de drainage, comme mentionné dans le tableau suivant :

Tableau 21. Classification de texture de drainage selon Smith. (1950).

Catégories	Valeurs de texture de drainage	Type de texture
01	<2	Très grossière
02	(2-4)	Grossière
03	(4-6)	Modérée
04	(6-8)	Fine
05	>8	Très fine

Le bassin versant de la Medjerda présente la valeur de texture de 0,14, indiquant ainsi une texture de drainage très grossière selon le Tableau 21. Les valeurs de texture de drainage pour les sous bassins varient entre 0.01 pour le SVB-12-01 et le SVB-12-02, et 0,08 pour le SBV-12-05, indiquant une texture très grossière d'où une infiltration significative, et un relief peu marqué dans le bassin de Medjerda.

Le tableau 21, montre que le coefficient de torrentialité du bassin de la Medjerda est inférieur à 4, correspondant ainsi à une texture de drainage très grossière, favorisant l'infiltration et la recharge en eau souterraine.

- Indice d'infiltration I_f

L'indice d'infiltration (I_f) est un paramètre morphométrique permettant la détermination de la perméabilité de surface d'un bassin versant. Il dépend de la densité et de la fréquence de drainage. Autrement dit, il représente le produit de la densité de drainage par la fréquence de thalwegs, et peut être calculé par l'équation suivante :

$$I_f = D_d \cdot F$$

Avec :

- D_d : Densité de drainage (km/km^2)
- F : Fréquence des thalwegs

Comme les deux autres paramètres (D_d et D_t), cet indice est soumis à l'influence de facteurs tels que le relief, la pente, la lithologie et la couverture végétale. Selon Prabhakaran & Jawahar Raj (2018), l'indice d'infiltration reflète le potentiel de transmission de l'eau d'un bassin versant. Les valeurs plus élevées de l'indice d'infiltration indiquent une surface imperméable et une résistance à la perte du sol, tandis que les valeurs plus basses indiquent la propension érosive des bassins versants (River et al., 2018; Ghosh & Gope, 2022).

Les indices d'infiltration calculés, montrent que le SVB-12-05 présente la plus faible valeur 3,79, révélant un faible degré de recharge et un écoulement superficiel important, tandis que le SVB-12-03 affiche la valeur la plus élevée 7,49, indiquant un haut degré d'infiltration favorisant la recharge et le stockage des eaux souterraines. Les sous-bassins versants avec de faibles valeurs d' I_f indiquent une infiltration importante dans le sol, et par conséquent, un ruissellement faible, mais cela dépend si le taux de précipitation ne dépasse pas le taux d'infiltration (Odiji et al., 2021). Cependant, les sous-bassins versants SBV-12-01, 02, 03, 04 ont des valeurs d' I_f élevées, ce qui signifie que l'infiltration d'eau est faible et le ruissellement de surface est élevé. Cette relation complexe entre la densité de drainage, la fréquence de drainage et l'indice d'infiltration souligne l'importance de comprendre les processus hydrologiques pour évaluer la dynamique des bassins versants. Il donne une idée sur le comportement du réseau de drainage.

- Longueur de l'écoulement terrestre (L_g)

Il s'agit de la distance parcourue par les précipitations à la surface avant de s'écouler dans le canal d'un cours d'eau défini (Horton 1945). Calculée en utilisant l'équation suivante :

$$L_g = \frac{1}{2Dd}$$

Avec :

- D_d : Densité de drainage (km/km^2)

La longueur de l'écoulement de surface est le synonyme de longueur d'écoulement en nappe, établissant une distinction claire entre l'écoulement de surface et l'écoulement du canal. L'écoulement terrestre est soutenu par une mince couche de rétention en surface qui disparaît rapidement après la pluie. En revanche, le flux des canaux est alimenté par le stockage accumulé et peut persister pendant des heures, voire des jours, après la fin du flux du canal provenant du ruissellement de surface. De plus, la longueur de l'écoulement terrestre émerge comme une variable indépendante cruciale influençant le développement hydrologique et physiographique des bassins versants (Horton, 1945).

Le (L_g) du bassin versant de la Medjerda a été estimée à 2,4 km, indiquant ainsi un parcours d'écoulement étendu avec un ruissellement réduit. La (L_g) présente une variation allant de 0,14 à 0,27 dans les cinq sous-bassins versants. Les valeurs de (L_g) sont minimales dans les sous-bassins versants SBV-12-01, 02, 03, révélant une infiltration rapide dans les canaux des cours d'eau. Ces zones sont caractérisées par des pentes abruptes, entraînant un ruissellement élevé. Les zones présentant des valeurs de la (L_g) faibles sont particulièrement défavorables à la recharge des eaux souterraines en raison de la légère infiltration dans le sol. À l'inverse, les zones avec des valeurs élevées de L_g indiquent une infiltration accrue et un ruissellement de surface moins direct.

- Constante de maintenance du canal (Constant chanel maintenance) « CCM » :

La constante de maintenance du canal (CCM), définie comme l'inverse de la densité de drainage selon la définition de Schumm (1956), peut être compris de manière indirecte comme la superficie minimale requise pour le développement d'un canal, (Dutta et Roy, 2012). Exprimée en km^2/km , son calcul est donné par la formule suivante :

$$CCM = \frac{1}{Dd}$$

Où :

- D_d : Densité de drainage

Les environnements montagneux présentent généralement des valeurs de CCM plus faibles en raison d'une infiltration réduite du sol et d'un écoulement terrestre plus élevé. À l'inverse, les plateaux et plaines affichent des CCM plus élevées en raison d'une faible densité de drainage et d'une infiltration plus importante. Les valeurs de la CCM pour les cinq sous-bassins versants varient entre 1,86 et 3,67. Les valeurs élevées sont enregistrées pour le SBV-12-01,

02, 03, avec une décroissance observée du Nord-est vers le Sud-est. La valeur maximale enregistrée dans le SBV-12-01, implique des taux d'infiltration significativement plus élevés que les autres sous-bassins, tandis que la faible valeur de CCM a été observée dans le SBV-12-05. La variabilité de ces valeurs souligne les nuances dans la susceptibilité à la recharge à l'échelle du bassin.

- Temps de concentration

Le temps de concentration d'un bassin versant est défini comme la durée maximale requise pour qu'une particule d'eau, provenant de la partie la plus éloignée du bassin, atteigne l'exutoire. Ce paramètre est calculé en utilisant la formule de GIONDOTTI suivante, qui prend en compte diverses caractéristiques du bassin, notamment sa topographie, la superficie, et la distribution spatiale des altitudes.

$$TC = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{H_{moy} + H_{min}}}$$

Avec :

- TC : temps de concentration (heure)
- S : superficie du bassin (km²)
- L : longueur du talweg principal (km)
- H_{moy} : altitude moyenne (m)
- H_{min} : altitude minimale (m)

Les temps de concentration présentés par les sous bassins versant varient ainsi de 7,26 h à 10,56 h.

Tableau 22. Temps de concentration par sous-bassin.

Nom sous-bassin	Superficie (km ²)	F	Dt	TC
Oued Medjerda	1499,29	0.04	0.01	10,56
Oued Meskiana	1828,06	0.05	0.01	9,05
Oued Chabro	1589,02	0.05	0.05	8,39
Oued Mellegue amont	1492,65	0.06	0.06	9,29
Oued Mellegue aval	1378,21	0.14	0.08	7,26

4.2.3. Conclusion

Le bassin versant de la Medjerda occupe la partie Sud-est du constantinois, il est divisé en cinq sous-bassins, il couvre 7 787,72 km², représentant 17,69 % de la surface totale du

constantinois. Chaque sous-bassin, est influencé par divers facteurs tels que le climat, la topographie, l'hydrologie, la pédologie et la géologie, présente des configurations hydrographiques distinctes. Le réseau hydrographique est caractérisé par cinq cours d'eau principaux, dont deux d'ordre 5 (Medjerda et Mellegue). Le Mellegue sert de point de convergence pour les cours d'eau des sous-bassins de Meskiana et Chabro. Le deuxième cours d'eau de la Medjerda prend sa source dans les monts de la Medjerda, traverse Souk Ahras, et se dirige vers le Nord-est, atteignant son embouchure en Tunisie. Les principaux cours d'eau d'ordres 4 et 5, tels que Medjerda, Chabro, Meskiana, et Mellegue, contribuent à l'accroissement du potentiel hydrique du bassin versant.

4.3. Application de la méthode de priorisation

4.3.1. Contexte théorique de l'outil de priorisation

Dans cette partie, on expose la raison ayant conduit à la création et à l'application de l'outil (SWPT) dans la priorisation des sous-bassins versants face à divers problèmes naturels, tels que les inondations et la dégradation du sol. Dans notre contexte spécifique, l'outil (SWPT) a été déployé pour identifier le potentiel en eaux souterraines et classer les sous-bassins selon leur capacité à recharger et stocker les eaux souterraines. Selon Rahmati et al. (2019a), cet outil a été développé dans le but de hiérarchiser les sous-bassins versants dans des régions où les données sont rares ou inexistantes, en utilisant des facteurs morphométriques et topohydrologiques pour évaluer la distribution spatiale du drainage et de l'infiltration au niveau des sous-bassins. Cela s'avère particulièrement utile, notamment en l'absence de données cruciales telles que la carte des sols (Abdulkareem et al., 2018a; Abdulkareem et al., 2018b; Rahmati et al., 2019).

L'objectif principal de l'application de cette thématique de priorisation consiste à développer une méthodologie permettant la hiérarchisation des bassins versants, en identifiant le sous bassin susceptible de stocker un potentiel en eau souterraine significatif. Cette approche repose sur divers paramètres, notamment les caractéristiques morphométriques et hydrologiques associés à chaque sous bassin versant. Étant donné que la cartographie du potentiel en eau souterraine requiert une analyse détaillée de différents paramètres, dont les paramètres climatiques, hydrologiques, hydrogéologiques, pédologiques et géologiques, et que les paramètres morphométriques et hydrologiques figurent parmi ces paramètres de conditionnement du potentiel en eau souterraine, l'application de la priorisation revêt une importance cruciale dans cette perspective, visant à évaluer l'influence de ces paramètres morphométriques et hydrologiques sur la recharge et le stockage des eaux souterraines et garantir la protection de ces ressources précieuses en élaborant des stratégies ciblées basées sur une compréhension approfondie des interactions entre les paramètres mentionnés.

Une étude morphométrique d'un bassin versant implique une mesure précise de divers paramètres qu'ils soient basiques, linéaires, de forme, et du relief, car contribuant à l'évaluation de la densité et de la texture de drainage, permettant ainsi d'identifier les zones susceptibles d'absorber des volumes importants d'eau et, par conséquent, de contribuer à la recharge des nappes d'eau souterraines. Cependant, deux types de paramètres, morphométriques et topo-hydrologiques ont été utilisés pour appliquer l'outil (SWPT) notamment :

- (1) Les aspects surfaciques (densité de drainage (D), fréquence des cours d'eau (Fs), texture du drainage (Rt), facteur de forme (Rf), rapport de circularité (Rc), constante de maintien du canal (C), rapport d'allongement (Re) et coefficient de compacité (Cc)) ;
- (2) Les aspects linéaires (rapport de bifurcation (Rb)) ;
- (3) Les facteurs topo-hydrologiques (indice d'humidité topographique (TWI), indice de puissance du cours d'eau (SPI) et indice de transport des sédiments (STI)) (Tableau 21).

La conception de l'outil (SWPT) repose sur l'approche de somme pondérée, une méthode d'analyse multicritères associée aux technologies géospatiales, fournit la possibilité de pondérer et de combiner les différents paramètres d'entrées pour créer une analyse intégrée, elle consiste à multiplier les valeurs de champ désignées pour chaque raster en entrée par la pondération spécifiée suivie de l'addition pour créer un raster de sortie. L'ensemble de ce processus vise à estimer la signification relative de chaque paramètre via la corrélation statistique, et attribue également le poids à chaque paramètre en fonction de son importance, calculé selon l'équation suivante (Aher et al., 2014).

$$\text{Priorisation} = \sum_{i=1}^n (W_i \times X_i), \text{ tel que :}$$

- W_i : est le poids de chaque paramètre morphométrique calculé par l'approche WSA.
- X_i : représente la valeur des paramètres morphométriques.

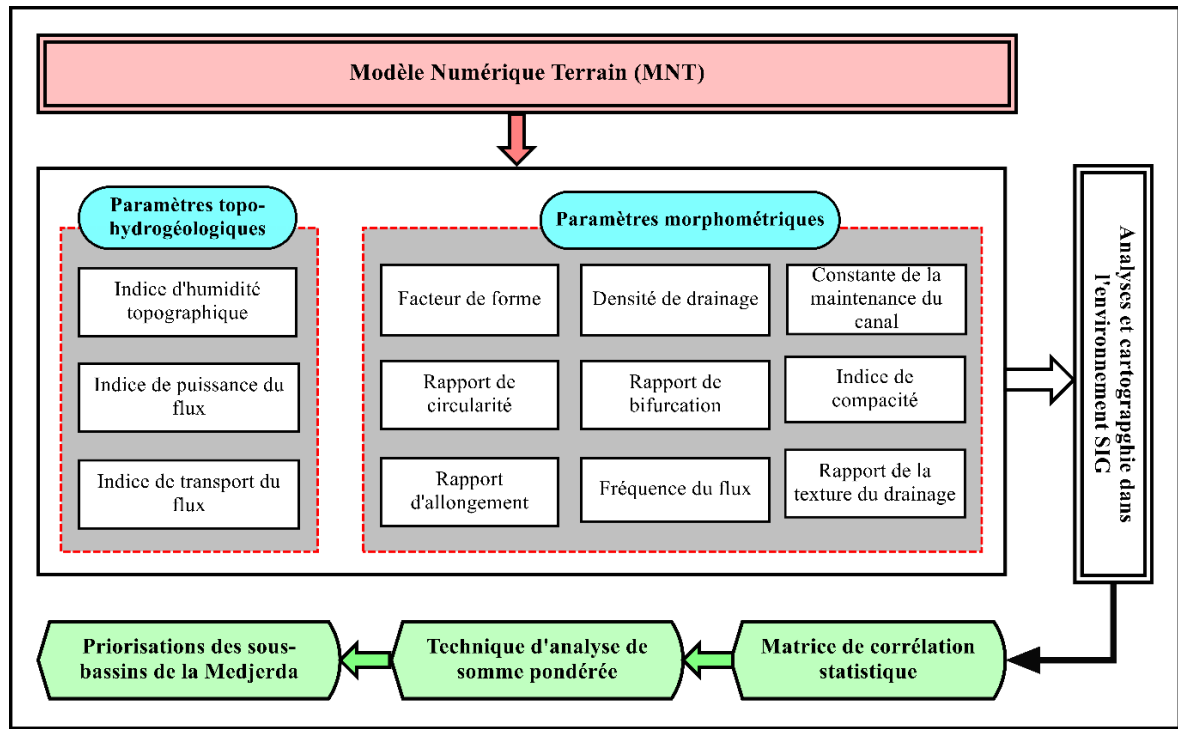


Figure 20. Méthodologie adoptée pour le calcul des paramètres morphologiques et topohydrologiques (Rahmati et al., 2019b).

Cette approche présente la capacité d'évaluer le degré d'influence de chaque facteur de manière distincte. Cependant, et malgré son efficacité, son application montre certaines limites (Rahmati et al., 2019). Avant d'activer l'outil de la somme pondérée dans l'environnement SIG, l'ensemble des paramètres morphométriques et topographiques nécessite un calcul mathématique préalable à l'étape de rasterisation et de reclassification. De plus, pour estimer la corrélation et le poids des paramètres, et afin de surmonter les contraintes mentionnées, un Framework efficace a été développé dans le langage de programmation. Son utilisation présente plusieurs avantages, notamment sa disponibilité gratuite pour tous les utilisateurs, ce qui leur donne l'opportunité de concrétiser leurs idées par l'assemblage et la connexion de différents logiciels existants. Par conséquent, l'outil de priorisation des sous-bassins (SWPT) a été introduit dans ArcToolbox et fonctionne comme une extension du logiciel ArcGIS (Marowka, 2018; Rahmati et al., 2019). L'architecture conceptuelle du SWPT est donnée dans la figure précédente (fig. 20).

a. Analyses hydro-géo morphométriques

Les facteurs morphométriques englobent la densité de drainage (D_d), la fréquence du cours d'eau (F_s), la texture de drainage (R_t), le facteur de forme (R_f), le rapport de circularité (R_c), la constante d'entretien du canal (C), le rapport d'allongement (R_e), le coefficient de compacité (C_c) et le rapport de bifurcation (R_b); tandis que les paramètres topo-hydrologiques comprennent l'indice d'humidité topographique (TWI), l'indice de puissance des cours d'eau (SPI) et l'indice de transport des sédiments (STI). Ces deux ensembles de facteurs ont été

utilisés pour concevoir le SWPT afin de prioriser les sous bassins versants. Cette priorisation consiste à établir un classement des différentes zones au sein d'un bassin en fonction de leur besoin d'une planification et d'une gestion des ressources en eau et du sol. Cette démarche vise à hiérarchiser les priorités pour une utilisation optimale des terres et des ressources hydriques, en tenant compte des particularités de chaque sous-bassin. En d'autres termes, elle permet d'identifier et de classer les zones qui nécessitent une attention particulière en termes de préservation des sols et de gestion de l'eau, afin de mettre en place des stratégies adaptées à leurs besoins spécifiques) un bassin versant à des fins de traitement. Un modèle numérique d'élévation de la zone d'étude, avec une résolution de pixel de 30 mètres, a été préparé. À partir de ce modèle, les facteurs morphométriques et topo-hydrologiques ont été extraits pour chaque sous-bassin versant, le tout calculé automatiquement par l'outil d'extension SWPT (Fig. 20).

b. Priorisation des sous-bassins versants

En utilisant les facteurs sélectionnés, l'outil SWPT calcule également l'indice WSA grâce auquel les sous-bassins versants seront priorisés. L'outil peut trier les sous-bassins versants sur la base des informations ci-dessus de manière décroissante, de sorte que le sous-bassin versant le plus susceptible à la recharge en eau souterraine soit classé numéro 1, et que le moins sensible soit positionné au bas de la liste. (Rahmati et al., 2019).

4.3.2. Résultats et discussions

Pour évaluer les propriétés des réseaux de drainage dans les cinq sous-bassins versants, une analyse morphométrique a été réalisée. Trois classes de paramètres morphométriques ont été prise en considération lors de l'application de l'outil SWPT, comprenant les paramètres linéaires, surfaciques, et de forme. Les valeurs quantitatives de ces différents paramètres sont répertoriées dans le tableau 21. Après le traitement des données et l'analyse morphométrique, pour chaque paramètre on a attribué un poids de pondération spécifique. Ces pondérations sont ensuite utilisées pour calculer une valeur de priorisation distincte pour chaque sous-bassin versant, comme présenté dans le tableau 24.

a. Calculs géo-morphométriques

Le tableau 21, reprend les résultats obtenus à partir des calculs issus de l'utilisation de l'outil automatisé (SWPT) basé sur le SIG. On remarque que la fréquence des cours d'eau (F_s) varie entre $5,96E-08$ pour SBV-12-02 et $1,45E-07$ pour SBV-12-05. Concernant le rapport de bifurcation (R_b), le SBV-1204 affiche la valeur la plus élevée (2,16), tandis que la plus basse (1.80), se rapporte au SBV-12-01. Concernant les rapports R_f et R_e , les SBV-12-01 et 12-02 affichent la même valeur (0.26), c'est la valeur la plus faible mais la valeur la plus élevée

(0,80) est enregistrée pour le SBV-12-05. Le rapport d'allongement (Re), le SBV-12-01 et SBV-12-02 se caractérisent par la plus faible valeur (0.58) et le SBV-12-05 affiche la valeur la plus élevée (0.80). Le rapport de circularité (Rc), indique que le SBV-12-02, présente la valeur la plus élevée (0,24), tandis que le SBV-12-05 à la plus faible valeur (0,16).

Les résultats de densité de drainage (Dd) et de texture de drainage (Rt), conduit aux observations suivantes, le SBV-12-01 se caractérise par les plus faibles valeurs (respectivement 2,73E-04 et 2,05E-04), tandis que le SBV-12-05 affiche les valeurs maximales (respectivement 4,97E-04 et 6,00E-04). Les valeurs les plus élevées et les plus basses du coefficient de compacité (Cc), sont respectivement de 2.53 pour le SBV-12-05 (2,53) et de 2.06 pour SBV-12-02. Le facteur de constante de la maintenance du canal (C), les SBV-12-01 (3665,55) et 5 (578,91) occupent respectivement la première et la dernière position. Les facteurs topographiques, indiquent pour le TWI, la priorisation montre que la plus faible valeur (10,19), est celle enregistrée pour le SBV-12-01, tandis que la valeur la plus élevée (11,31) est enregistrée pour le SBV-12-02. Le sous bassin SBV-12-01, se caractérise par un SPI de 5.15, cependant le SBV-12-01 présente la valeur la plus élevée (6,41). Enfin, le SBV-12-01 a une valeur STI de 19.67 considérée comme la plus élevée mais le SBV-12-05 enregistre la valeur la plus faible de 16.86. La variation spatiale des valeurs des paramètres morphométriques confirme la variation topographique spatiale de la zone d'étude influençant le comportement superficiel et souterraine des cours d'eau. Le tableau suivant N°21, reprend les valeurs des différents paramètres déterminés.

Tableau 21 : Paramètres morphométriques et topo-hydrologiques des sous-bassins.

Nom	SBV 12 01	SBV 12 02	SBV 12 03	SBV 12 04	SBV 12 05
Fs	4,34E-08	4,54E-08	4,59E-08	5,96E-08	1,45E-07
Rb	1,80	2,07	1,94	2,16	1,84
Rf	0,26	0,26	0,31	0,33	0,51
Re	0,58	0,58	0,63	0,65	0,80
Rc	0,19	0,24	0,19	0,21	0,16
D	2,73E-04	2,79E-04	3,04E-04	3,58E-04	4,97E-04
Rt	2,05E-04	2,66E-04	2,27E-04	2,99E-04	6,00E-04
Cc	2,31	2,06	2,28	2,17	2,53
C	3665,55	3580,30	3286,90	2797,07	2012,30
TWI	10,19	11,31	10,95	11,08	11,04
SPI	6,41	5,15	5,53	5,33	5,37
STI	19,67	17,99	18,42	17,31	16,86

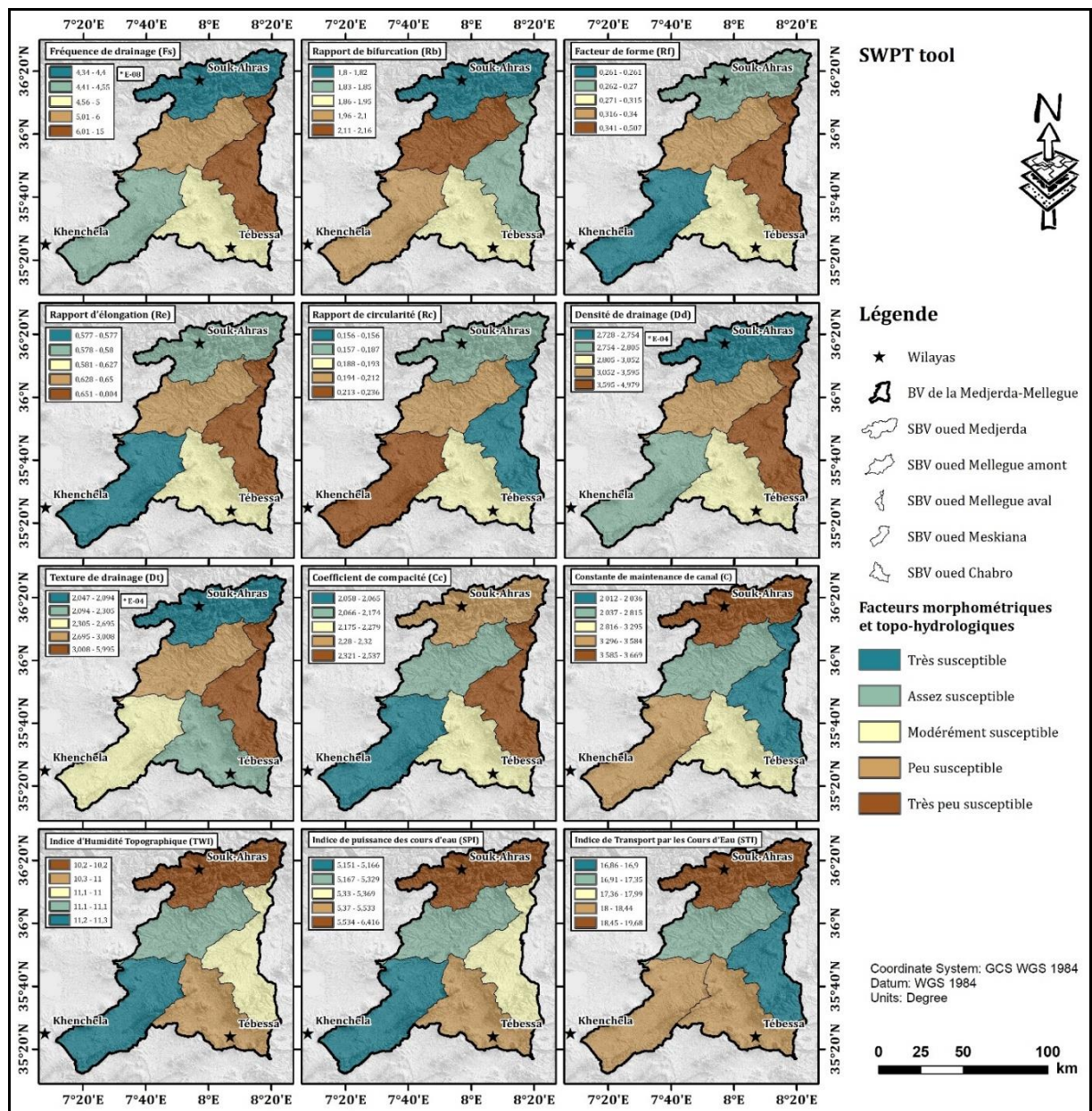


Figure 21. Cartographie des facteurs de priorisation.

b. Analyse de la matrice du (WSA)

La matrice de corrélation issue de l'approche d'analyse par somme pondérée (WSA) révèle des relations significatives et complexes entre les paramètres morphométriques des cinq sous-bassins. La fréquence des cours d'eau (Fs) présente des corrélations positives Significatives avec des valeurs des rapports de forme (Rf) et d'allongement (Re) et ($r = 0,98$ et $0,97$ respectivement), ainsi qu'avec la densité de drainage (Dd), le facteur de texture de drainage (Rt), et le coefficient de compacité (Cc) ($r = 0,97, 0,99,$ et $0,80$ respectivement). On note également des corrélations négatives dans le cas du rapport de bifurcation (Rb), du facteur de rapport de circularité (Rc), le coefficient de constance de la maintenance du canal (C), de l'indice de la configuration du sol (SPI), et l'indice de la texture du sol (STI). Les coefficients

de corrélation sont respectivement de $r = -0,34$, $r = -0,74$, $r = -0,93$, $r = -0,28$, et $r = -0,7$. Notons que le rapport de bifurcation (Rb) et à l'exception du rapport de circularité (Rc), et du l'indice d'Humidité Topographique (TWI), et avec un faible coefficient de corrélation avec le (C), il ne présente aucune corrélation positive significative avec les autres paramètres morphométriques du bassin versant. Les rapports de forme (Rf) et d'allongement (Re) montrent une forte corrélation entre eux ($r = 0,99$), ainsi qu'une association positive notable avec (Fs), (Dd), (Rt), et (Cc) avec ($r = 0,98$, $0,99$, $0,97$, et $0,81$ respectivement), mais révèle une corrélation très élevée et négative avec (C) ($r = -0,97$).

Le facteur rapport de circularité (Rc) présente des corrélations positives avec (Rb) et (C) et ($r = 0,76$ et $0,65$ respectivement), et des corrélations négatives avec (Fs), (Dd), (Rt), (SPI), et (STI) dont ($r = -0,74$, $-0,7$, $-0,65$, $-0,34$, et $0,14$ respectivement).

La densité de drainage (Dd) et le facteur de texture de drainage (Rt) sont fortement corrélés positivement ($r = 0,97$), montrant des liens positifs avec (Fs), (Rf), (Re), et (Cc) ($r = 0,97$, $0,99$, $0,99$, et $0,97$ respectivement), mais des corrélations négatives avec (C) et (SPI) ($r = -0,99$ et $-0,36$ respectivement). La combinaison entre le coefficient de compacité (Cc) et le facteur de constance de maintenance du canal (C) présentent des corrélations variées, avec (Cc) montrant des associations positives avec (Fs), (Dd), (Rt), (SPI), et (STI) ($r = 0,8$, $0,75$, $0,72$, $0,27$, et $-0,2$ respectivement), tandis que (C) présente des corrélations négatives avec (Fs), (Rf), (Re), (Dd), (Rt), (SPI), et (STI) ($r = -0,93$, $0,07$, $-0,97$, $-0,98$, $-0,93$, $0,41$, et $0,84$ respectivement). L'indice d'humidité topographique (TWI) est positivement corrélé avec (Fs) et (Rb) avec ($r = 0,22$ et $0,67$ respectivement), et négativement avec (C) et (SPI) avec ($r = -0,34$ et $-0,78$ respectivement). Enfin, (SPI) et (STI) montrent des corrélations négatives avec la plupart des paramètres, à l'exception de corrélations positives avec (Cc), (C), et SPI pour (STI) ($r = 0,83$), et une corrélation positive notable entre (SPI) et (STI) ($r = 0,83$). Cette analyse donne un aperçu sur les interrelations existantes entre les caractéristiques morphométriques des sous-bassins versants avec des associations et des oppositions significatives entre les paramètres étudiés (tableau 23 suivant).

Tableau 23. Matrice de corrélation entre les paramètres linéaires, surfaciques et de forme.

	Fs	Rb	Rf	Re	Rc	Dd	Rt	Cc	C	TWI	SPI	STI
Fs	1	-0,34	0,98	0,97	-0,74	0,97	0,99	0,8	-0,93	0,22	-0,28	-0,7
Rb	-0,34	1	-0,28	-0,26	0,76	-0,19	-0,24	-0,75	0,07	0,67	-0,67	-0,42
Rf	0,98	-0,28	1	1	-0,76	0,99	0,97	0,81	-0,97	0,25	-0,32	-0,74
Re	0,97	-0,26	1	1	-0,75	0,99	0,96	0,8	-0,98	0,26	-0,33	-0,75
Rc	-0,74	0,76	-0,76	-0,75	1	-0,7	-0,65	-0,99	0,65	0,39	-0,34	0,14
Dd	0,97	-0,19	0,99	0,99	-0,7	1	0,97	0,75	-0,99	0,29	-0,36	-0,79

Rt	0,99	-0,24	0,97	0,96	-0,65	0,97	1	0,72	-0,93	0,33	-0,38	-0,77
Cc	0,8	-0,75	0,81	0,8	-0,99	0,75	0,72	1	-0,69	-0,32	0,27	-0,2
C	-0,93	0,07	-0,97	-0,98	0,65	-0,99	-0,93	-0,69	1	-0,34	0,41	0,84
TWI	0,22	0,67	0,25	0,26	0,39	0,29	0,33	-0,32	-0,34	1	-1	-0,78
SPI	-0,28	-0,67	-0,32	-0,33	-0,34	-0,36	-0,38	0,27	0,41	-1	1	0,83
STI	-0,7	-0,42	-0,74	-0,75	0,14	-0,79	-0,77	-0,2	0,84	-0,78	0,83	1

La priorisation finale des sous-bassins versants est déterminée en tenant compte des valeurs des paramètres composés (CPV), évaluées à partir des poids attribués à chaque paramètre morphométrique. Les résultats de cette classification sont reportés dans le tableau N° 24.

Tableau 24. Priorisation et classement final des sous-bassins.

Nom	Priorisation (CPV)	Rang	Catégorie
SBV-1201	-1180,56	1	Très forte
SBV-12 02	-1152,57	2	Forte
SBV-1203	-1058,51	3	Modérée
SBV-1204	-901,01	4	Faible
SBV-1205	-648,83	5	Très faible

L'analyse du tableau, montre que la CPV de -1180.56 occupe de rang N°1 et correspond à une priorité significative très élevée, tandis que la valeur 5 est attribuée au sous-bassin ayant la priorité la plus faible. Le SBV-12-01 est classé comme une priorité très élevée, suivi par le SBV-1202, situé en amont du grand bassin de la Medjerda, qui prend le deuxième classement. En revanche, le troisième classement est attribué au SBV-12-03, caractérisé par une priorité modérée de -1058,51. Le SBV-12-04 est classé comme une faible priorité (-901,01), et le SBV-12-05 est considéré comme ayant une très faible priorité (-648,83). Un sous-bassin avec un rang très faible (01), qui correspond à une catégorie de priorisation très élevée, indique une forte probabilité de recharge et de stockage des eaux souterraines. En revanche, un rang élevé, associé à une priorité très faible, d'où une capacité limitée des sous-bassins à recharger et à stocker les eaux souterraines. Par conséquent, des mesures de conservation des sols et de l'eau pourraient être préconisées dans les sous-bassins versants affichant des priorités très élevées et élevées. La Figure 22 présente la carte du classement final par priorité des cinq sous-bassins étudiés.

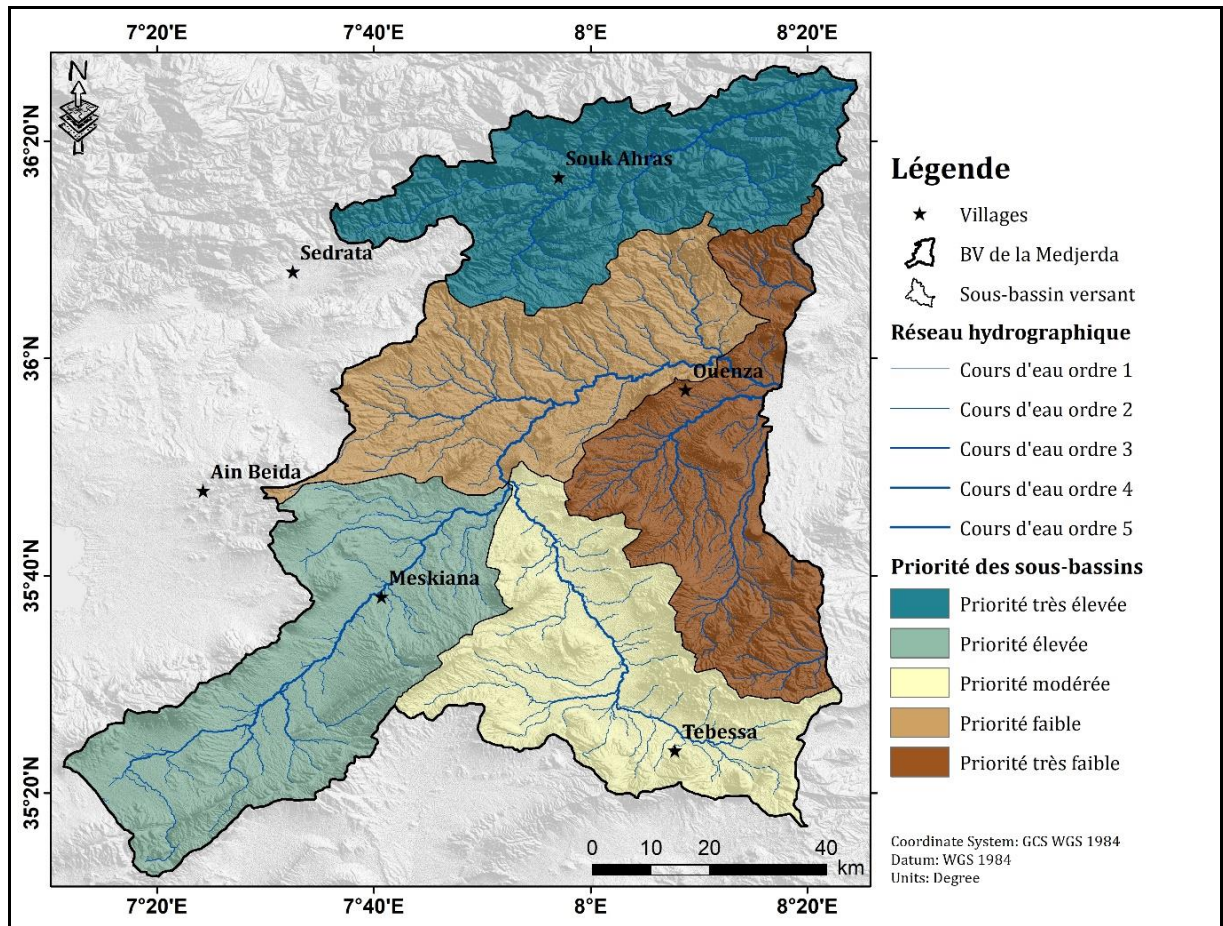


Figure 22. Priorisation des sous-bassins de la Medjerda.

c. Discussions

L'analyse morphométrique réalisée vise l'évaluation des caractéristiques et propriétés en termes de réseaux de drainage et de leur contribution à la recharge des eaux souterraines du bassin versant et ses cinq sous bassins. Les paramètres à étudier ont été regroupés en deux catégories principales :

- les paramètres topo-hydrologiques comprenant (l'indice d'humidité topographique, l'indice de puissance de flux et l'indice du transport du flux),
- les paramètres morphométriques, cette dernière catégorie englobe les paramètres linéaires tels que (rapport de bifurcation, constante de la maintenance du canal, rapport de circularité), paramètres surfaciques incluent (la densité de drainage, fréquence des cours d'eau, rapport de texture de drainage) et paramètres de forme représentée par (le facteur de forme, rapport de circularité, coefficient de compacité et rapport d'allongement). Les valeurs quantitatives de ces paramètres linéaires, surfaciques et de forme sont fournies dans le Tableau 21.

L'analyse morphométrique, a conduit à un classement préliminaire des priorités, il a été établi pour les cinq sous-bassins (Cf. tableau 24).

L'analyse cartographique des différents paramètres déterminés par cette méthode montre des variations significatives pour la densité de drainage des cinq sous-bassins (Tableau 21, Fig. 20). La densité de drainage est de 2,728 km/km² pour le SBV-12-01 et de 4,979 km/km² pour le SBV-12-05. La densité maximale enregistrée dans le (SBV-12-01) indique un réseau de drainage bien développé et efficace avec une faible infiltration attribuable à un sol moins perméable et à une topographie complexe caractérisée par des pentes abruptes facilitant le transport vers le lit principal de la Medjerda. Ce processus favorise l'accumulation des eaux superficielles et une infiltration significative dans les zones fortement fracturées (failles, chevauchements, etc.), contribuant à la recharge des nappes alluviales. Le sous-bassin (SBV-12-01), se caractérise également par une couverture végétale dense influençant la vitesse et la direction de l'écoulement superficiel d'un côté en favorisant l'infiltration et la percolation des eaux vers d'autres zones. En revanche, les valeurs les plus faibles de densité observées dans les SBV-12-04, SBV-12-05 indiquent un réseau de drainage faible. Les corrélations positives significatives entre la densité de drainage, le rapport de bifurcation, la texture de drainage et la fréquence de drainage soulignent leur relation complémentaire, influencée par les caractéristiques topographiques, climatiques, structurelles et potentiellement anthropiques (comme l'utilisation des terres) dans le bassin versant.

La variation spatiale du rapport de bifurcation est en relation directe avec la structure morphologique, où des valeurs élevées indiquent un fort contrôle structural sur le réseau de drainage, tandis que les faibles valeurs caractérisent des bassins versant peu influencés par des perturbations structurales majeures. Cette observation permet de conclure que le système de drainage comprenant la densité, la texture, la fréquence, la bifurcation partage une relation étroite avec le relief. Ce qui revient à dire que les caractéristiques morphologiques du paysage exercent une influence significative sur la configuration et le comportement du réseau de drainage, soulignant l'impact du relief sur la dynamique hydrologique du bassin versant.

Les données concernant la fréquence des cours d'eau des cinq sous-bassins sont reportées de manière détaillée dans le Tableau 21 et sur la figure 5. Cette fréquence varie de 4,34*E-08 km⁻² (SBV-12-01) à 15*E-08 km⁻² (SBV-12-05). Une valeur basse de la fréquence des cours d'eau indique un faible ruissellement, d'où une possible infiltration d'eau, surtout dans les zones plates ou dans les plaines, tandis qu'une valeur plus élevée signifie un ruissellement plus important dans le secteur étudié. Le rapport de texture, présente des valeurs oscillent entre 2,047 au (SBV-12-01) et 5,995 km⁻¹ au (SBV-1201), tous les sous-bassins sont regroupés dans la catégorie de texture grossière de drainage (<4), à l'exception d'une petite portion du (SBV-12-05) marquée par une texture intermédiaire.

Les paramètres de forme, dont la valeur du facteur de forme des cinq sous-bassins est indiquée dans le Tableau 21, démontrant une variation allant de 0,261 à 0,507, à partir de cette valeur, on s'aperçoit que les cinq sous-bassins affichent une forme allongée, caractérisée par un écoulement maximal plus faible s'effectuant sur longue durée. Les rapports de circularité pour les cinq sous-bassins, varient de 0,156 à 0,236. En somme les paramètres morphométriques offrent des indications sur la forme, la compacité et le relief des sous-bassins. Les valeurs spécifiques révèlent des tendances générales, telles que des formes allongées, des sous-bassins compacts et des reliefs prononcés dans l'ensemble du système hydrographique étudié.

Les variabilités des comportements hydrologiques constatés dans les divers sous-bassins sont conditionnées par les variations spatiotemporelles de leurs caractéristiques morphométriques, topographiques et hydrologiques, soulignant ainsi l'importance cruciale de l'identification des bassins versants critiques. Cette approche s'avère indispensable dans la gestion des risques liés aux ressources naturelles, particulièrement dans le cadre des stratégies visant à optimiser la gestion des bassins versants. Dans cette étude nous avons utilisé cette approche basée sur l'analyse multicritères pour identifier les sous-bassins versants les plus appropriés à la recharge et au stockage des eaux souterraines. Les résultats obtenus démontrent que les sous-bassins 1 et 2 sont les plus susceptibles d'avoir un potentiel important en eau souterraine. Le sous-bassin 05 est classé le dernier, sur la base des paramètres morphométriques et topographiques, et est sélectionné comme le sous-bassin versant le moins susceptible à la recharge et le plus susceptible à l'écoulement superficiel, favorisant ainsi le risque des inondations. L'exactitude de l'outil SWPT a été évaluée en le comparant aux résultats rapportés dans les deux chapitres 3 et 4, qui ont classé ce SBV le premier en termes de précipitation, d'infiltration, ainsi que du potentiel en eau souterraine. On peut donc conclure que sous-bassin doit être pris en compte dans les plans de gestion des bassins versants. En fait, l'outil SWPT fournit des résultats efficaces.

4.3.3. Conclusion

Le travail réalisé, basé sur l'utilisation du système d'information géographique (SIG) et la méthode de Rahmati porte sur l'analyse morphométrique des cinq sous-bassins du bassin versant de la Medjerda, ce qui a permis d'estimer les paramètres morphométriques (linéaires, superficiels et de forme) de ces sous-bassins.

Cette étude de priorisation vise à identifier les zones favorables à la recharge des eaux souterraines, ainsi que celles susceptibles d'accumuler des quantités importantes d'eau de drainage. Cela contribue au développement des ressources en eau superficielles par la construction de barrages en aval des sous-bassins, présentant trois avantages significatifs : la

réduction du potentiel de crues soudaines, l'utilisation judicieuse des eaux de surface pour l'irrigation, et la recharge des aquifères souterrains. Les résultats de l'analyse et de la cartographie des paramètres morphométrique ont révélé une variation spatiale des différentes caractéristiques morphométriques dans un contexte topographique et géomorphologique différent, variant d'un sous-bassin bassin à l'autre. Cette variation influence la réponse hydrologique, en particulier par rapport la sensibilité à la recharge des eaux souterraines. Les sous-bassins SBV-12-01 et SBV-12-02 sont particulièrement favorables à avoir un potentiel en eau souterraine élevé. En revanche, le SBV-12-05 (Mellegue aval) est classé en cinquième ordre pour le degré de susceptibilité à la recharge et au stockage des eaux souterraine.

La carte de priorisation pourrait être un outil essentiel pour les planificateurs et les décideurs, guidant l'implantation de nouveaux forages d'eau, la construction de barrages, et la création de retenues collinaires. Elle revêt également une importance cruciale en cas de catastrophes naturelles telles que les inondations et les érosions. Ces cartes facilitent l'adaptation de mesures d'atténuation et prévention, telles que la plantation de végétation, le terrassement des pentes, la construction de canaux de dérivation, de barrages, et de bassins de rétention. De plus, elle confirme l'importance de l'intégration de l'analyse morphométrique avec les systèmes d'information géographique (SIG) pour une compréhension approfondie des propriétés des sous-bassins versants.

Estimation quantitative des ressources en eau

Partie II

Chapitre 03 : Analyse et cartographie des paramètres climatiques et du bilan hydrique

Cartographie de la variabilité hydro-climatique : il présente les données, le matériel utilisé, ainsi que les différentes méthodes appliquées, adaptées à la cartographie spatiotemporelle des paramètres climatiques et du bilan hydrique.

Chapitre 04 : Cartographie du potentiel des eaux souterraines

Identification et cartographie du potentiel des eaux souterraines : visent à offrir une compréhension approfondie de la cartographie du potentiel des eaux souterraines, de ses méthodes et de ses implications. Cela contribue ainsi à une gestion durable de cette ressource vitale en représentant la capacité d'une zone géographique donnée à stocker et à fournir de l'eau souterraine de manière soutenable.



Chapitre III

*Analyse et cartographie des
paramètres climatiques et du
bilan hydrique*



Chapitre III :

Analyse et cartographie des paramètres climatiques et du bilan hydrique

1. Introduction

L'analyse des données climatiques est nécessaire pour la compréhension du comportement hydrologique des cours d'eau et l'impact des changements spatiotemporels de l'utilisation des terres et du couvert végétal donnant des indices sur une possible recharge des réservoirs d'eau souterraine. L'analyse méticuleuse des données climatiques permet de déterminer les tendances météorologiques et climatiques impactant directement les cycles hydrologique et hydrogéologique. Cette connaissance contribue à améliorer la prévision des conditions hydriques, conduisant à une gestion efficace des ressources en eau.

La région méditerranéenne au même titre que les autres régions est impactée par les changements climatiques, se traduisant par un dérèglement au niveau de l'utilisation et l'évolution des sols causant des transformations des paysages agroforestiers dans leur dimension temporelle et spatiale. Les travaux de Dünkeloh & Jacobeit, 2003, montrent que cette partie du globe présente une importante variabilité en matière de précipitations. Ces variations impactent négativement le bilan hydrique, accentuant l'aridité des sols allant vers une diminution de la productivité des terres.

Au cours des dernières décennies, les variations de température et de précipitations, ainsi que leurs impacts, ont été traités à l'échelle du bassin. Un intérêt particulier a été accordé aux variations de précipitations car elles influencent directement le calcul du bilan hydrique ainsi que la préservation des écosystèmes, l'approvisionnement et la gestion de l'eau, les débits des rivières donc le bien-être humain et la stabilité des politiques régionales.

Dans cette partie de la thèse, nous allons étudier la relation entre les variations spatio-temporelles du bilan hydrique et du potentiel des eaux souterraines. Cette étude a été menée en utilisant les données climatiques recueillies au niveau des six stations de précipitations pour la période allant de 2000 à 2021. Les coordonnées géographiques de ces stations sont répertoriées dans le tableau N°25 ci-dessous.

Tableau 25. Les coordonnées des stations météorologiques du bassin versant de la Medjerda.

Stations	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Altitude
Ain Dalia	35.45	7.56	980.68
Bou Khadra	35.75	8.03	848.64
M'Daourouch	36.07	7.84	840.79
Ouenza	35.95	8.14	566.77
Souk Ahras	36.28	7.97	655.15
Tébessa	35.42	8.12	824.00

Les variations des précipitations et des températures observées aux stations concernées ont été analysées et cartographiées tant à l'échelle spatiale que temporelle.

2. Cartographie des indices bioclimatiques :

Nous avons calculé deux indices majeurs, à savoir l'indice pluviothermique et l'indice de De Martonne. Une fois les calculs réalisés nous aurons probablement une représentation plus précise de l'évolution du climat au niveau de chaque sous-bassin versants. En outre, une comparaison interannuelle ou mensuelle de chaque indice a été effectuée. Ceci permettra de faire une interprétation approfondie des résultats portant sur la variabilité spatiale et temporelle des précipitations, de la température et des autres facteurs climatiques.

2.1. Indice pluviothermique (Relation précipitation – température)

Plus connu sous le nom de diagramme ombrothermique. C'est une expression relative de la sécheresse estivale en termes de durée et d'intensité. En considérant les moyennes mensuelles des précipitations (p en mm) et de la température (t en °C), et en se basant sur la formule ($P \leq 2T$), Nous avons présenté graphiquement les températures moyennes en relation avec les précipitations moyennes mensuelles, en utilisant sur l'axe des abscisses les 12 mois de l'année et une échelle double sur l'axe des ordonnées avec d'une part les précipitations totales du mois en (mm) et d'autre part les températures moyennes du mois exprimées en (°C). Cette expression mathématique ($P \leq 2T$) permet d'élaborer des diagrammes Pluviothermiques, lesquels permettent de visualiser la durée de la saison sèche en fonction des points d'intersection des deux courbes.

D'après les diagrammes de chaque station pour chaque sous bassin (Fig. 22) on peut déduire deux saisons bien distinctes :

- Une saison humide, s'étalant du mois d'octobre jusqu'au mois de mai, caractérisée par des précipitations moyennes 72.5 et 47.5 mm enregistrées au mois de janvier pour les stations de Ouenza et de M'daourouch situées dans les deux sous bassins de Mellegue amont (SBV-12-04) et Mellegue aval (SBV-12-05) respectivement. Pour les stations situées au niveau des sous bassins de Medjerda (SBV-12-01), Meskiana (SBV-12-02) et Chabro (SBV-12-03), la saison humide s'étend du mois de Septembre jusqu'au mois de Mai avec des précipitations maximales de l'ordre de 105 mm pour la station de souk ahras située dans le (SBV-12-01), 52.5 mm pour la station du (SBV-12-02), et 50 mm pour la station du (SBV-12-03)
- Une saison sèche et chaude pour le reste des mois de l'année. En général, les périodes humides aux stations étudiées sont caractérisées par des températures très basses par rapport à la température moyenne annuelle, surtout en janvier, et par des précipitations maximales, surtout entre novembre et février. Les périodes sèches sont caractérisées par de faibles précipitations, notamment en juin, juillet et août lorsque les températures sont plus élevées.

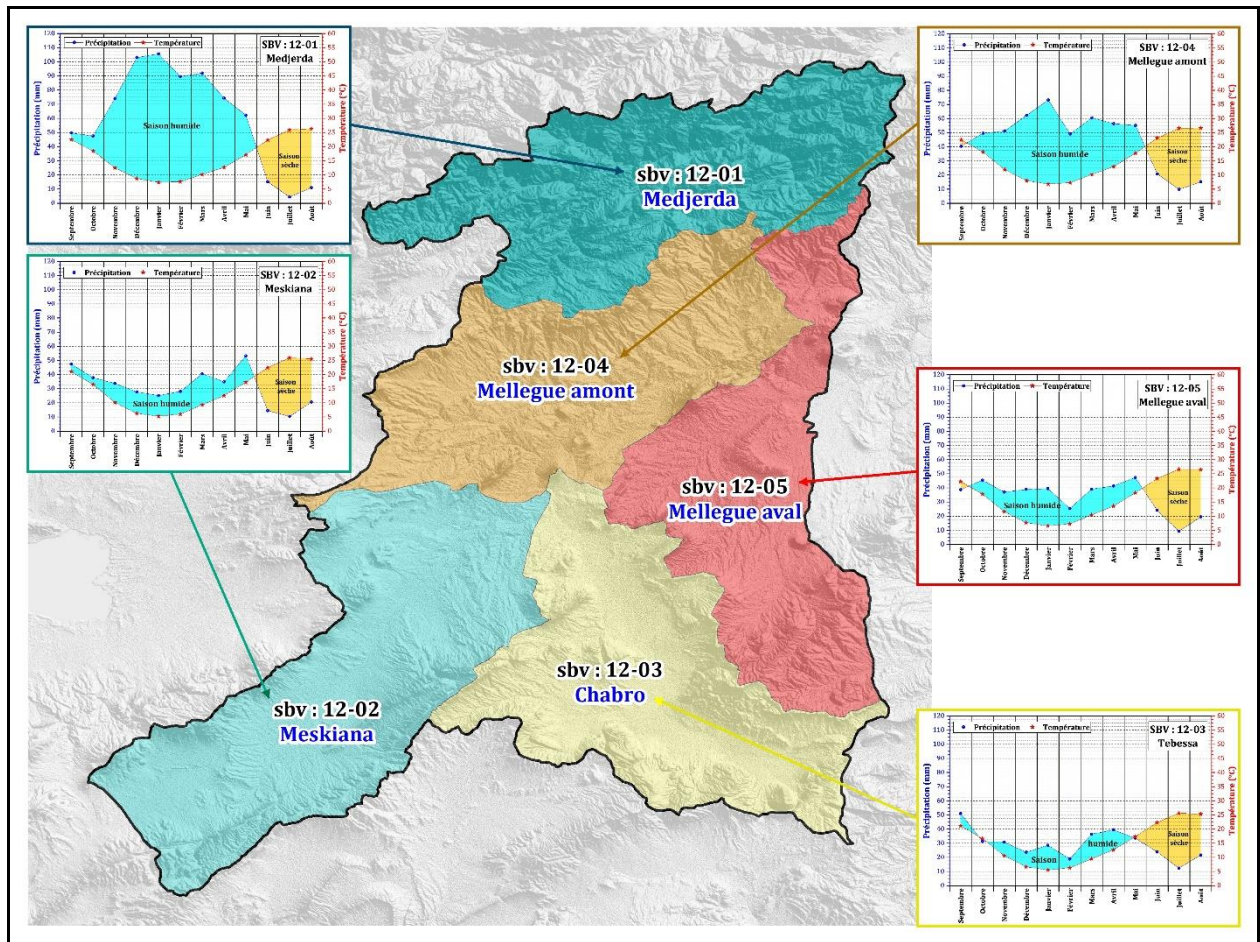


Figure 23: Représentation graphique de l'indice pluviothermique dans les cinq sous-bassins

Pour suivre la variation spatiale de cet indice au sein des sous-bassins versants, nous avons exploité l'outil Map Algebra dans le logiciel ArcGIS pour générer une cartographie mensuelle de l'indice ombrothermique, reflétant la répartition spatio-temporelle des mois secs et humides. Toutefois, afin de représenter la variation de cet indice bioclimatique dans le bassin versant de la Medjerda, caractérisé par une topographie complexe et des gradients d'altitude marqués, nous avons opté pour l'application de la technique d'interpolation spatiale IDW (index distance weighted) dans la création de la carte correspondante.

Si $p < 2t$ le mois est considéré comme sec, indiquant que les pertes en eau, potentiellement liées à des températures élevées, excèdent les apports de précipitations. À l'inverse, lorsque $p > 2t$, le mois est classé comme humide. La représentation cartographique de cet indice offre la possibilité d'identifier le classement des mois (secs ou humides). De plus, elle permet de mettre en évidence les périodes de sécheresse spécifiques dans chaque sous-bassin.

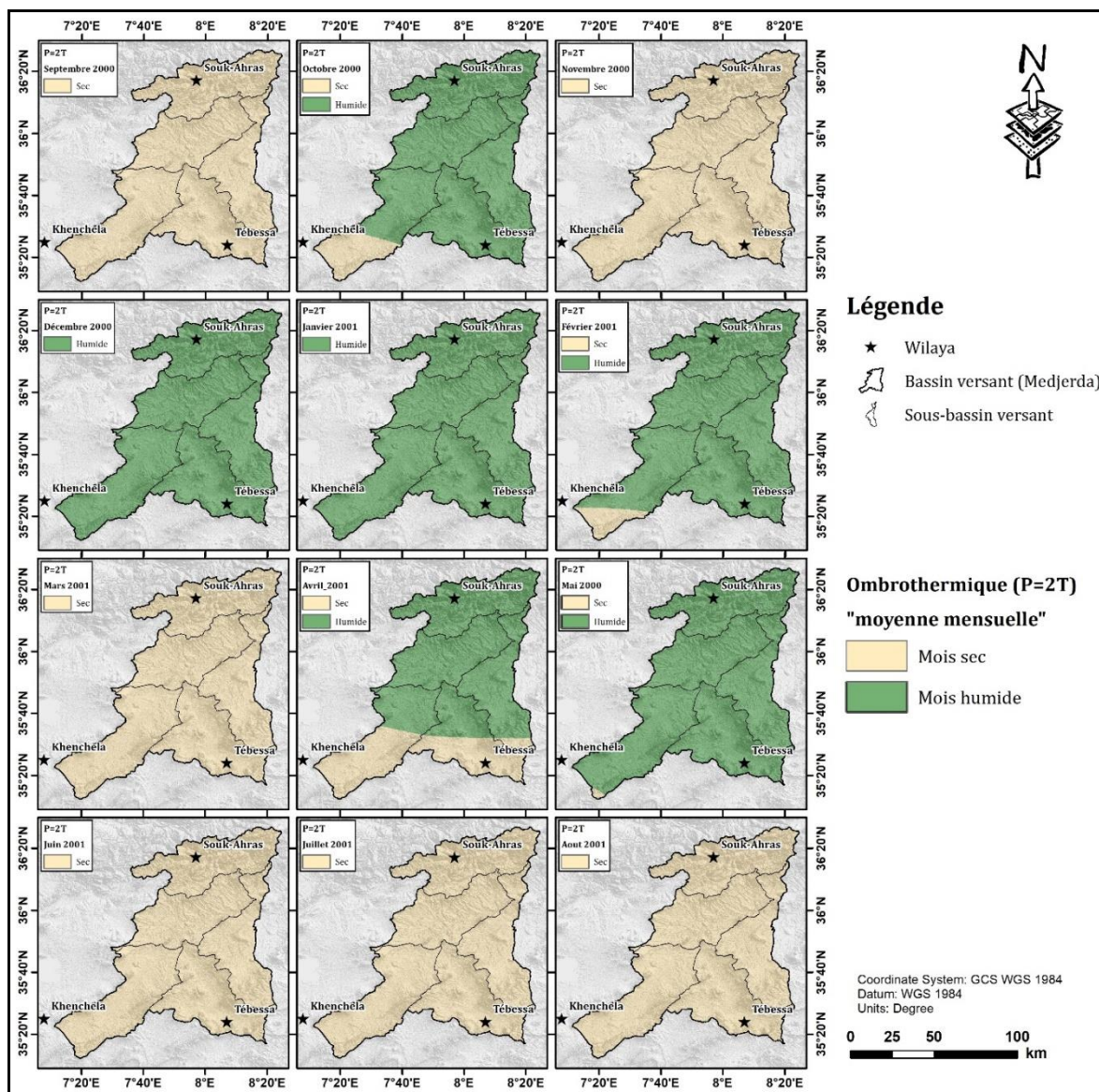


Figure 24. Classification du climat selon l'indice ombrothermique (2000-2001).

L'analyse des figures caractérisant les trois années 2001, 2011, 2021 révèle deux saisons bien définies : une saison humide caractérisée par des précipitations relativement élevées, étalée sur 6 mois et l'autre sèche caractérisée par des précipitations faibles et des températures élevées.

-l'année (2000-2001) : les mois de décembre, de janvier et de mai, se distinguent par des valeurs maximales de précipitation de l'ordre moyenne de 167.36 mm, couvrant la totalité du bassin versant de la Medjerda. Les mois de septembre, de février et d'avril, présentent des précipitations plus faibles au niveau des sous-bassins de Meskiana (12-02) de 27,5 mm Chabro (12-03) de 20 mm et Mellegue aval (12-05) de 25 mm. La saison sèche et chaude prédomine pour le reste des mois, notamment septembre, novembre, mars, juin, juillet et août. Dans l'ensemble, les périodes humides, se caractérisent par des températures très basses par rapport à la température moyenne annuelle, particulièrement en janvier avec une valeur de 10 °C, et par des précipitations maximales, surtout durant la période décembre, janvier et février. Lors des périodes sèches, les

précipitations sont faibles, particulièrement aux mois de juin, juillet et août, ces mois se caractérisent par de fortes températures.

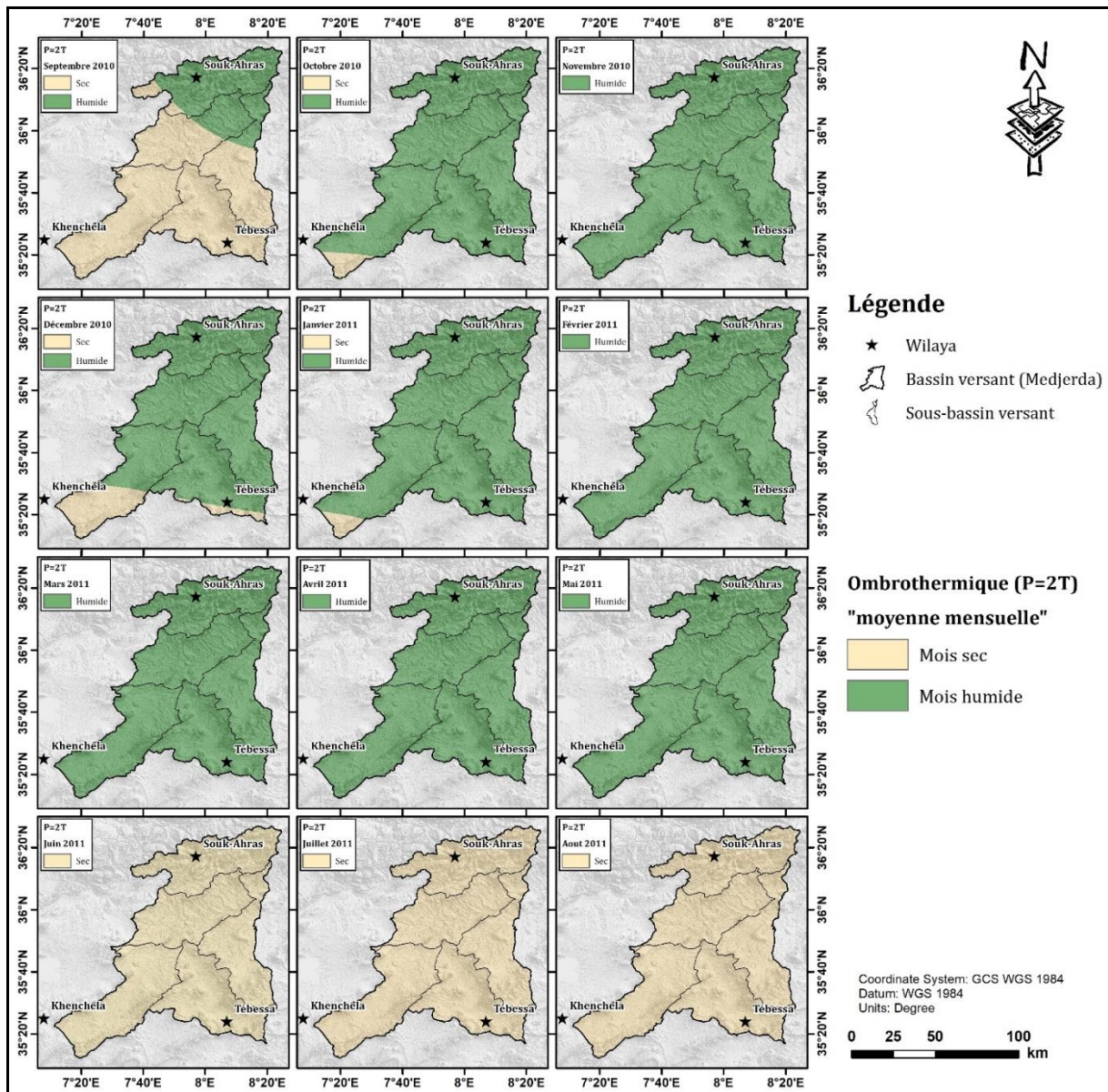


Figure 25. Classification du climat selon l'indice ombrothermique (2010-2011).

La même situation est observée au cours de l'année (2010-2011), les valeurs de l'indice ombrothermique, montrent deux périodes climatiques régnant au niveau du bassin versant. Ainsi la première est dite humide et allant du mois d'octobre au mois de mai, entre coupée de période sèche caractérisant les mois de novembre et de mars. On note une diminution des précipitations enregistrées sur une partie (presque la moitié) de la surface du bassin. La deuxième période va du mois de juin jusqu'au mois de septembre, au cours de cette partie de l'année le climat devient sec, de ce fait il y a une augmentation des températures sur l'ensemble du bassin. Ces observations, confirment le rythme saisonnier dont jouie la région marquée par l'alternance des saisons humides et sèches, traduisant les méfaits des changements climatiques.

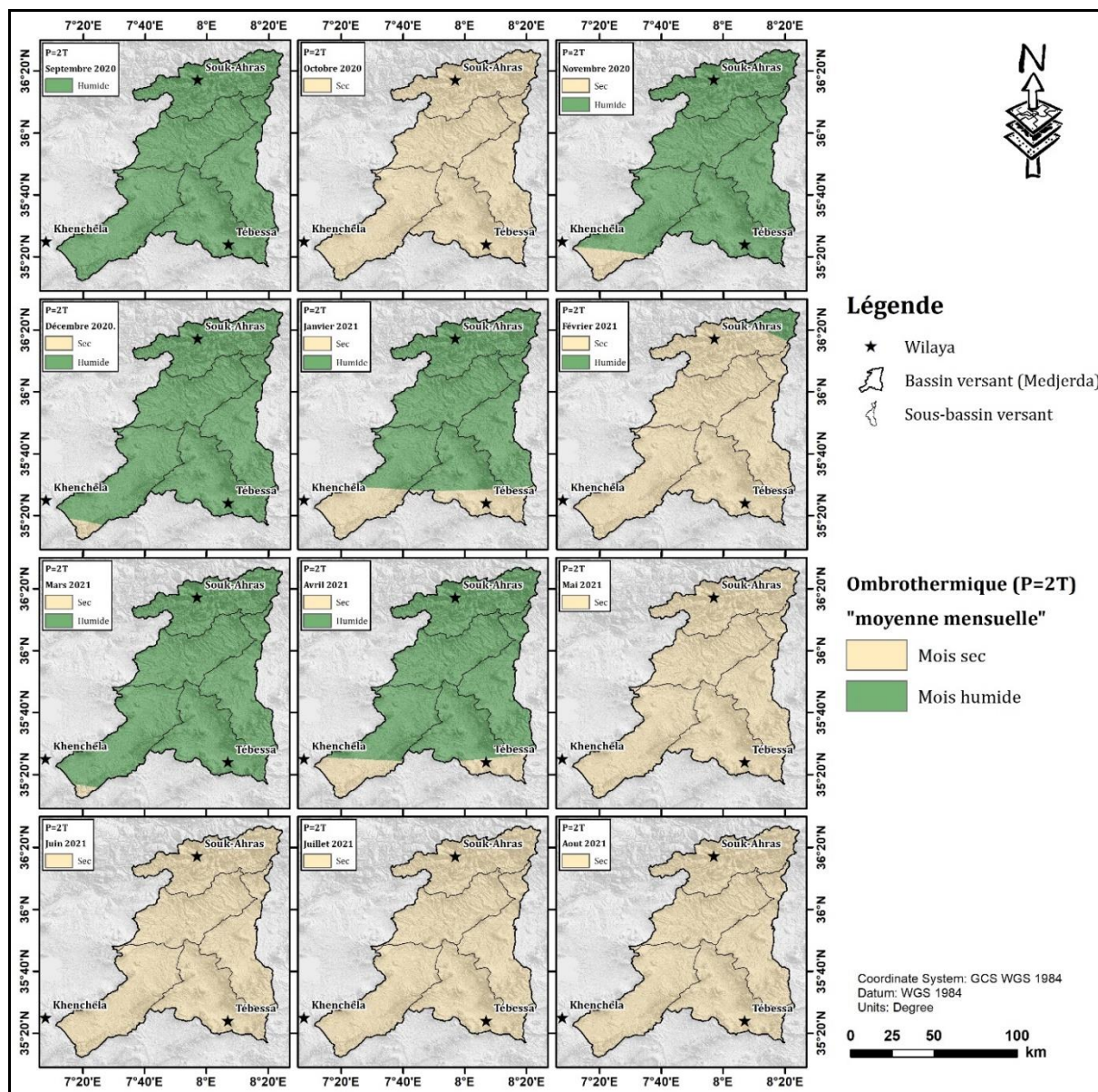


Figure 26. Classification du climat selon l'indice ombrothermique (2020-2021).

En observant l'année (2020-2021) : on note une saison humide caractérisée par des précipitations relativement élevées, sur une période de 6 mois, cependant les mois de novembre et décembre, indiquent des précipitations maximales atteignant respectivement 113 (novembre) et 127 mm (décembre). Cette évolution se concentre dans la partie aval du sous-bassin versant de la Medjerda. Les quatre autres mois humides, à savoir septembre, janvier, février et avril, affichent des précipitations plus faibles au niveau des sous-bassins (SBV-1202, 1203, 1205).

La période sèche et chaude prédomine pour le reste des mois, surtout octobre, février, mai, juin, juillet et août. Dans l'ensemble, les mois humides, se caractérisent par des précipitations relativement élevées, surtout en Novembre et décembre, et des températures sont très basses froides ou tempérées, surtout au mois de janvier où elles varient entre 6 et 10 °C. En revanche, pendant la période estivale (chaude), caractérisant les mois de juin, juillet et août, les précipitations sont faibles, et les températures sont élevées, atteignant des valeurs variantes entre

24,5 et 30,3 °C. Ce premier constat, nous permet de dire que l'année hydrologique (2020-2021) se caractérise par un climat modérément humide dans la majeure partie du sous-bassin de la Medjerda, tandis que les sous-bassins (SBV-12-02, 12-03, 12-04, 12-05) dans la région de Tébessa connaissent un climat sec à très sec, influençant ainsi l'indice ombrothermique de la région. La variation spatiale du régime mensuel de l'indice ombrothermique s'explique par plusieurs facteurs particulièrement les variations saisonnières des deux principaux paramètres climatiques (la précipitation et la température). Notons que la topographie par le biais de ses variations peut influencer les paramètres du climat. En effet, au cours de la période hivernale la topographie joue un rôle prépondérant dans la présence des précipitations plus abondantes sur les versants montagneux exposés au vent. Cependant au printemps, on pourra dire que la couverture végétale, influence les températures et favorise l'infiltration efficace des précipitations. Au cours de l'été, la topographie est à l'origine des microclimats mais en automne, les zones montagneuses peuvent de nouveau connaître des précipitations significatives.

La spatialisation du climat dans le bassin versant de la Medjerda permet de distinguer un zonage régional différent. Il s'agit, des secteurs telliens montagneux au nord caractérisés par un climat humide et froide, les zones de plaines au centre et au sud du bassin caractérisés par un climat semi-aride à aride, et chaude.

2.2 Indice d'aridité d'Emmanuel De Martonne

Partant du fait que les changements du régime d'aridité pourraient influencer de manière significative les terres subhumides et sèches. Dans ce contexte, nous avons étudié la variabilité spatiale des divers paramètres du bilan hydrique, ainsi que l'indice d'aridité pour les trois années hydrologiques (2000-2001, 2010-2011, 2020-2021). L'équation de De Martonne (1926), prend en compte la mesure d'aridité climatique à l'échelle annuelle pour avoir une classification du climat, définie par le quotient :

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

I_A : Indice d'aridité annuelle

P : précipitation annuelle moyenne (mm)

T : température annuelle moyenne (C°)

L'indice d'aridité augmente à mesure que la valeur de l'indice diminue. Au niveau mondial, De Martonne a identifié six grands types de macroclimats, allant des zones désertiques arides ($I < 5$) aux zones humides à forêt prépondérante ($I > 40$) comme suit :

- $I > 40$: climat hyper humide.
- $30 > I < 40$: climat humide.
- $20 < I < 30$: climat tempéré.

- $10 < I < 20$: climat semi-aride.
- $5 < I < 10$: climat aride.
- $I < 5$: climat hyper aride.

Avant d'aller vers la cartographie il faut un tableau donnant les valeurs obtenues.

La cartographie est réalisée en utilisant les données climatiques recueillies auprès de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) pour six stations pluviométriques réparties dans la région étudiée. Nous avons utilisé la méthode d'interpolation de pondération par l'inverse de distance (IDW) et ceci pour avoir plus de précision et une répartition spatiale importante de l'indice d'aridité. La valeur de cet indice est issue de l'utilisation des données des précipitations et des températures.

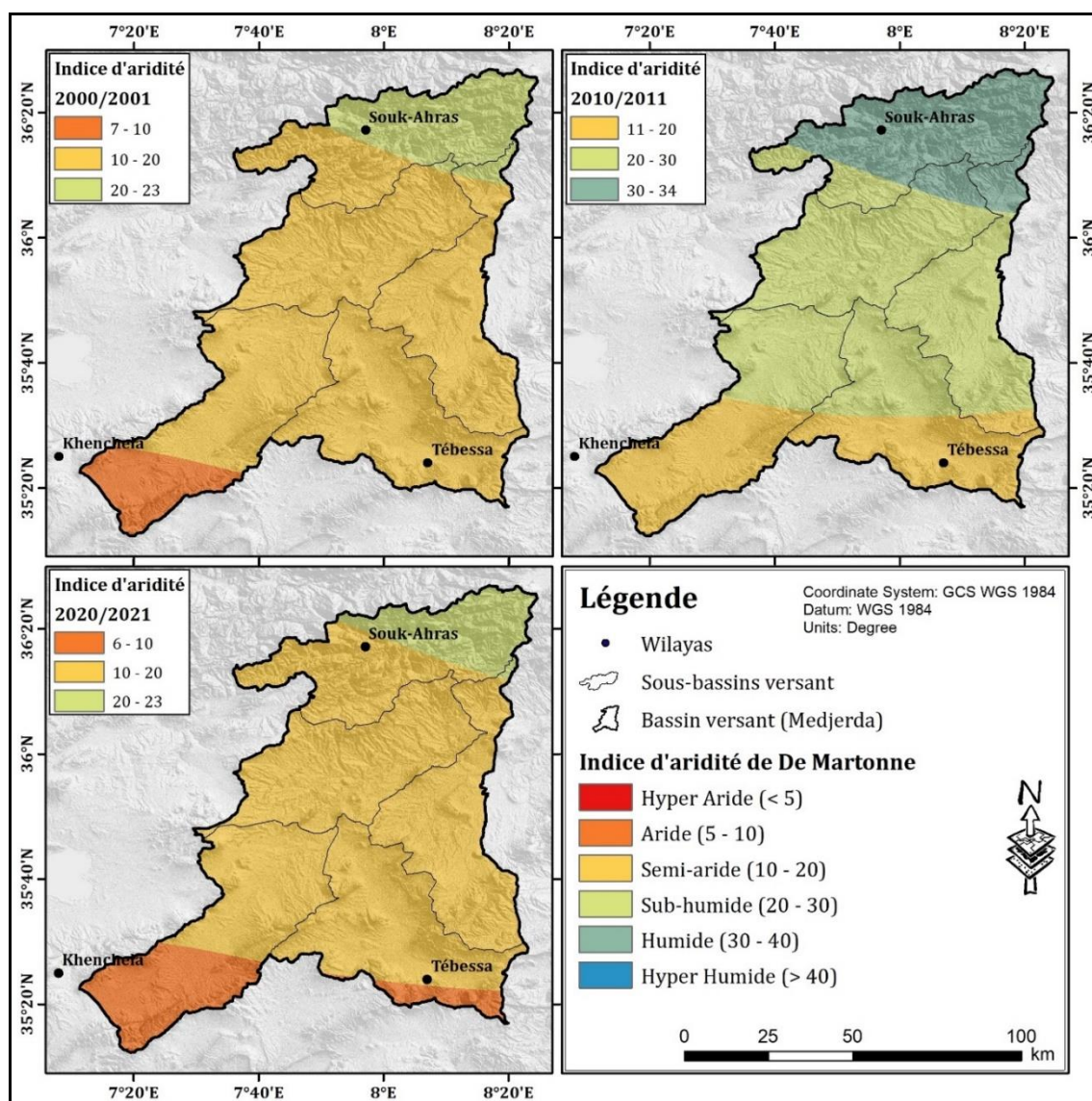


Figure 27. Classification annuelle du climat selon l'indice d'aridité De Martonne.

La figure 25, réalisée, montre les résultats obtenus à partir de la formule De Martonne ayant servis à la cartographie de l'indice d'aridité au cours des trois années hydrologiques (2000-2001,

2010-2011, 2020-2021). On remarque que les trois indices d'aridité présentent des valeurs oscillantes entre 6 et 23, définissant ainsi les climats suivants :

- (6-10, climat aride),
- (10-20, semi-aride),
- (20-23, climat subhumide).

À l'échelle du bassin, on note que plus de 60 % de la superficie totale du bassin, est caractérisée par un climat semi-aride, ce dernier recouvre pratiquement l'intégralité des quatre sous-bassins (SBV-12-02, 12-03, 12-04, 12-05). En revanche, le sous-bassin de la Medjerda (SBV-12-01), est caractérisé par un climat semi-aride en amont et subhumide dans sa partie aval, avec des valeurs d'indice d'aridité allant de 20 à 30 en raison de l'intensité des précipitations. Pour les quatre autres sous-bassins (SBV-12-02, 12-03, 12-04, 12-05), l'indice d'aridité se situe entre 10 et 20, d'où la prédominance d'un climat semi-aride.

En observant la topographie, on remarque que les régions caractérisées par un climat semi-aride sont principalement localisées dans des zones au relief peu accentué, comprenant des terrains plats et des plaines situés dans la partie sud de la région de souk ahras et de Tébessa principalement dans les sous bassins de Meskiana (SBV-12-02), chabro (SBV-12-03), et Mellegue amont (SBV-12-04), et Mellegue aval (SBV-12-05). Les chaînes montagneuses présentant des valeurs élevées allant de 20 au 30, caractérisent un climat généralement subhumide, voire humide, généré par les grandes quantités de précipitations enregistrées au niveau de ces régions montagneuses.

3 : Bilan hydrique :

Il existe plusieurs méthodes pour le calcul du bilan hydrique, cependant la plus usuellement utilisée est celle de Thornthwaite (1948), basée sur l'évaluation de l'évolution temporelle des paramètres climatiques. Cependant peu d'études ont traité ce sujet en utilisant le contexte cartographique. Ainsi, et dans le but d'analyser l'impact des changements climatiques sur l'évolution du bilan hydrique et pour évaluer et identifier la capacité de recharge des eaux souterraines, il s'agit d'une composante vitale de la gestion durable des ressources en eau.

Le présent chapitre est scindé en deux parties, la première porte sur l'analyse détaillée de l'historique de chaque composant du bilan hydrique. Nous décrirons comment déterminer ces éléments à partir de données simples, en se basant sur les équations mathématiques de (Thornthwaite). La seconde partie, consiste à intégrer les résultats des calculs dans le système d'informations géographique (SIG).

Les paramètres du bilan hydrique au sein du logiciel ArcGIS, sont calculés de manière à être compatibles avec une interpolation spatiale IDW (Inverse Distance Weighting). Cette méthode fait usage de l'outil Spatial Analysis Tools, offrant une facilité dans la génération de cartes

mensuelles et annuelles. Ces cartes, sont importantes, permettent l'évaluation de l'impact des changements climatiques sur la capacité de recharge des eaux souterraines.

Le bassin versant de la Medjerda dépend principalement du secteur agricole pour son développement économique, qui représente près de 60 % de l'économie et contribue à plus de 40 % du Produit Intérieur Brut (PIB) (MADR). Actuellement, cette région se trouve pénalisée en matière de développement liés au manque des ressources en eau, résultant d'un changement climatique criard se traduisant par une faiblesse pluviométrie présente sur toute l'échelle de la région méditerranéenne.

Pour satisfaire les demandes de la population, le développement économique, repose entièrement sur deux facteurs essentiels : la pluviométrie et les apports des cours d'eau. Ces deux paramètres sont les principaux moteurs de la rentabilité des activités de tout genre, particulièrement l'agriculture. Le bilan hydrique est calculé et interprété pour l'examen entre les apports et les pertes au sein d'une unité hydrologique spécifique au cours d'une période donnée. Le bilan est évalué par divers facteurs du système hydrologique, comprenant notamment les précipitations, le ruissellement, l'infiltration et l'évapotranspiration. La méthode de Thornthwaite (1948), reste la plus appropriée particulièrement pour les régions semi-arides sous un climat méditerranéen. L'expression du bilan est donnée par la formule suivante :

$$P = ETR - R + I$$

Avec :

P : Précipitation moyenne annuelle en (mm).

ETR : Évapotranspiration réelle moyenne annuelle en (mm).

R : Ruissellement moyen annuel en (mm).

I : infiltration moyenne (mm).

3.1. Calcul du bilan hydrique selon la formule de CW Thornthwaite

Cette méthode intègre une évaluation théorique de l'évapotranspiration potentielle, basée sur la température et la durée d'insolation. Bien que la méthode de Thornthwaite n'ait pas été initialement conçue à cette fin, elle est couramment utilisée en hydrologie. Elle permet d'évaluer, à partir du calcul théorique de l'évapotranspiration potentielle, différents termes du bilan hydrique, en particulier le déficit d'écoulement réel, en se basant sur certaines hypothèses simplificatrices, notamment concernant la réserve en eau du sol.

Pour établir le bilan hydrique, nous avons appliqué l'équation de Thornthwaite en utilisant les données de température mensuelle de six stations réparties sur la surface du bassin versant de la Medjerda. Cette équation évalue l'évapotranspiration potentielle en fonction de la température mensuelle et de la latitude du site. Cette méthode est basée sur le concept de RFU (Réserve

Facilement Utilisable), elle suppose qu'une hauteur maximale de 100 mm d'eau stockée dans le sol est sujette à l'évapotranspiration.

3.2. Estimation des composants du bilan hydrique

L'estimation des composantes du bilan hydrique à l'échelle spatiale et temporelle permet d'identifier les zones favorables à la recharge des nappes d'eau souterraines. Les éléments du bilan sont les précipitations, la température, l'évaporation et l'infiltration etc.

3.2.1. Précipitation :

Pour étudier ce paramètre nous avons analysé les tendances des précipitations annuelles et mensuelles au niveau de six stations météorologiques situées sur le bassin versant de la Medjerda pour une période de 30 ans (1991-2020). L'objectif principal est de générer une cartographie spatiale pour identifier le sous-bassin propice à des précipitations abondantes et, par conséquent, à une forte capacité d'infiltration. Globalement, le climat de la Medjerda est devenu plus aride au cours des 20 dernières années, particulièrement dans les régions du sud.

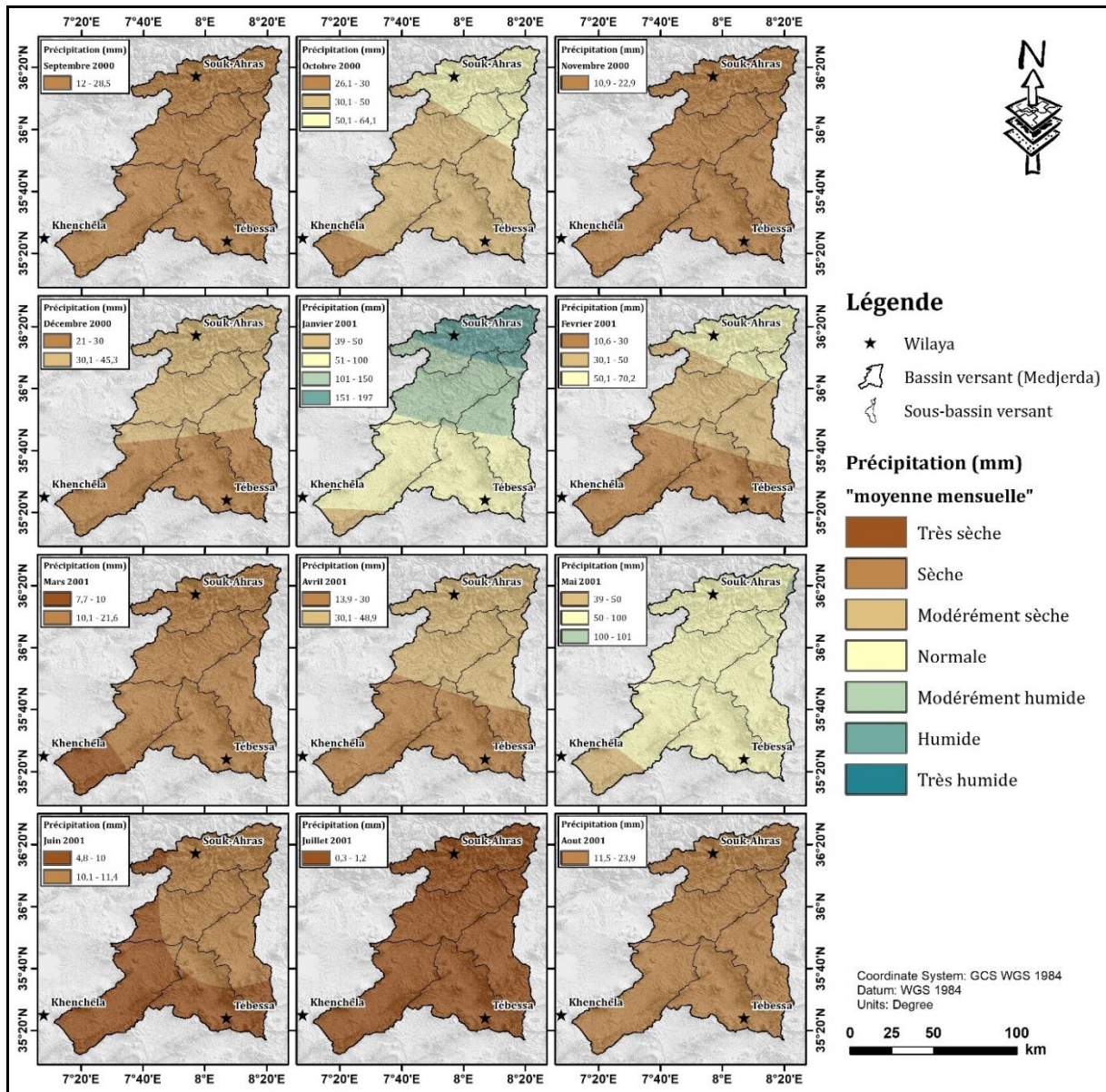


Figure 28. Variation spatio-temporelle mensuelle de la précipitation en (2000-2001).

L'observation de la figure 28, montre la variation des précipitations à l'échelle du bassin versant de la Medjerda. Concernant l'année (2000-2001), on note des tendances fortement significatives à la baisse des précipitations au niveau des sous-bassins SBV-12-02, SBV 12-03 et SBV 12-04, cette baisse serait liée en partie à la faiblesse du couvert végétale limitant la recharge des eaux souterraines. A l'inverse, les changements les plus notables et fortement significatifs à la hausse des précipitations caractérisent la moitié septentrionale du sous-bassin de la Medjerda situé à 1600 mètres d'altitude, dans cette zone la couverture végétale est intense, induisant un fort potentiel de recharge en eaux souterraines.

La Figure 29, illustre les variations spatio-temporelles mensuelles pour l'année (2010-2011). Le mois de novembre est le mois le plus arrosé, affichant une valeur maximale de (144,7 mm), suivi par le mois de février (143mm). La saison d'été apparaît comme la saison la moins arrosée avec des précipitations de 0,3 à 1,2 mm enregistrées au mois de juillet.

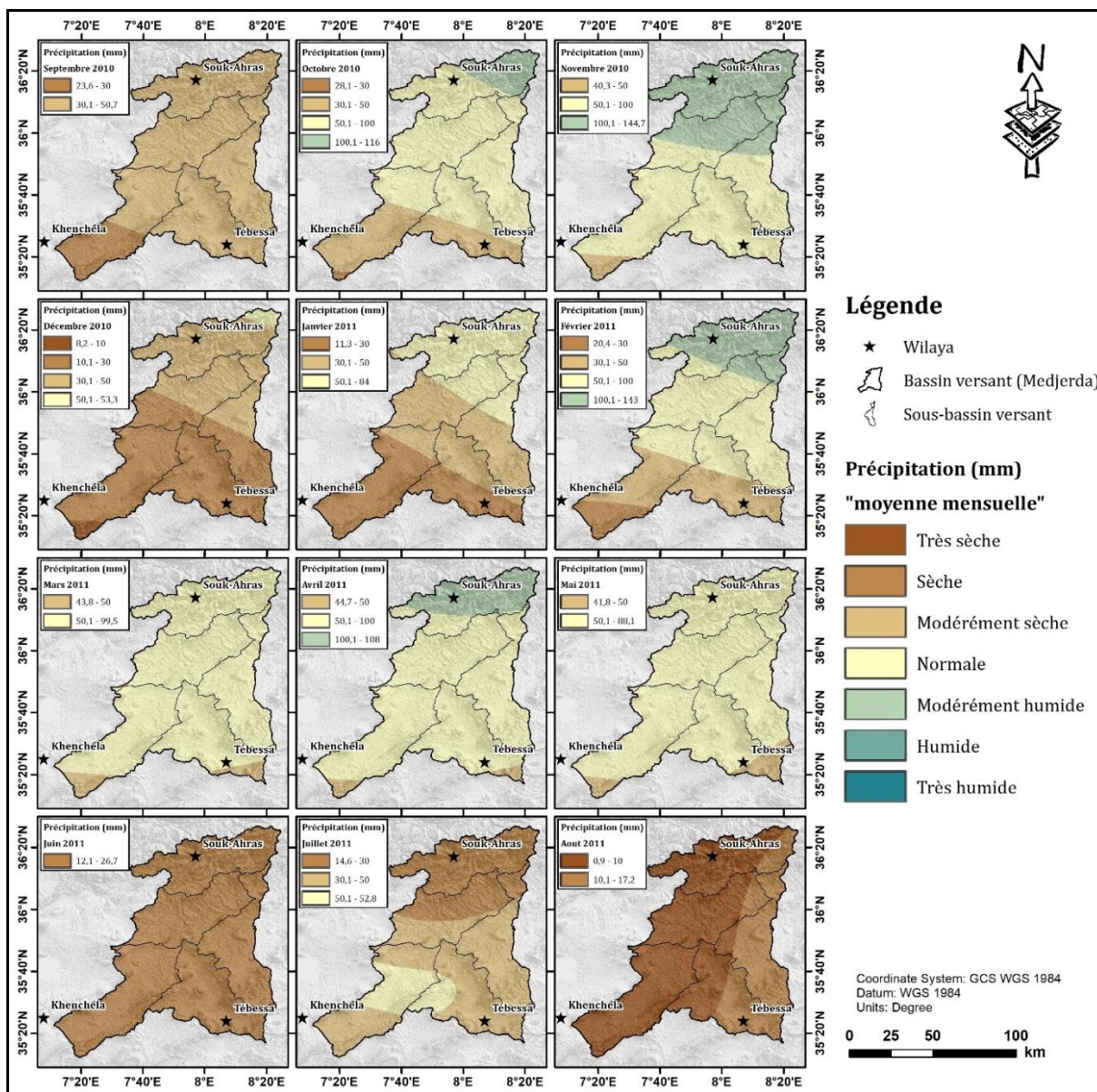
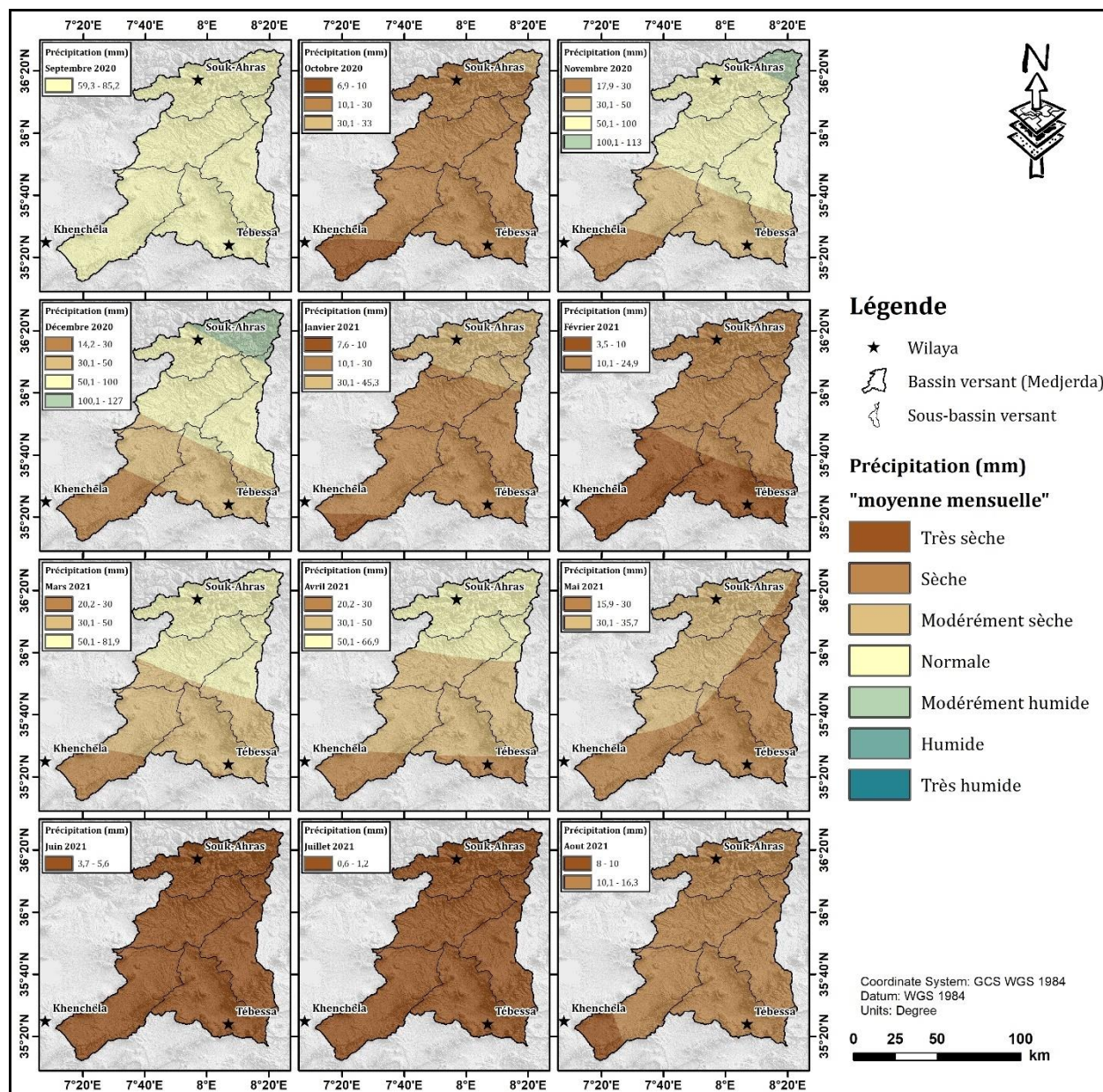


Figure 29. Variation spatio-temporelle mensuelle de la précipitation en (2010-2011).

L'analyse cartographique de l'année hydrologique 2020-2021 (fig. 30) montre d'importantes variations spatiales des précipitations, allant de 0,6 mm au mois de juillet indiquant un climat sec à environ 127 mm en janvier correspondant à un climat humide spécifiquement dans le sous-bassin de la Medjerda au niveau des régions montagneuses à haute altitude. Au cours des autres mois de l'année, les précipitations sont faibles caractérisant un climat aride et semi-aride avec des valeurs allant de (3,5 à 50 mm).



Les résultats obtenus dans le bassin versant de la Medjerda montrent que la grande partie des tendances fortement significatives à la baisse ont été observées dans les sous-bassins (SBV-12-02, 12-03, 12-04), indiquant une faible couverture végétale et une recharge des eaux souterraines limitée. À l'inverse les changements les plus notables et fortement significatifs à la hausse ont été détectés dans la moitié septentrionale du sous-bassin de la Medjerda située à 1600 mètres d'altitude, caractérisé par une couverture végétale intense et un fort potentiel des eaux souterraines.

En ce qui concerne les pluviométries moyennes annuelles (Fig. 31), Les valeurs enregistrées au niveau du BV de la Medjerda, sont semblables à celles de tout le Nord Algérien. Elles sont de type méditerranéen. Elles se caractérisent par des hivers doux et humides et des étés chauds et secs. Au niveau du bassin versant et du point de vue spatial, on remarque que le SBV-12-01

couvre la zone la plus pluvieuse pour les trois années, la pluviométrie maximale en hiver a dépassé 900 mm/an, particulièrement dans la partie aval. L'année (2000-2001), affiche les plus basses précipitations oscillantes entre 500 et 615 mm/an. Les moyennes annuelles des précipitations pour l'année (2010-2011) vont de 307 mm à 923 mm/an et sont supérieures à celles des deux autres années (2000-2001) et (2020-2021).

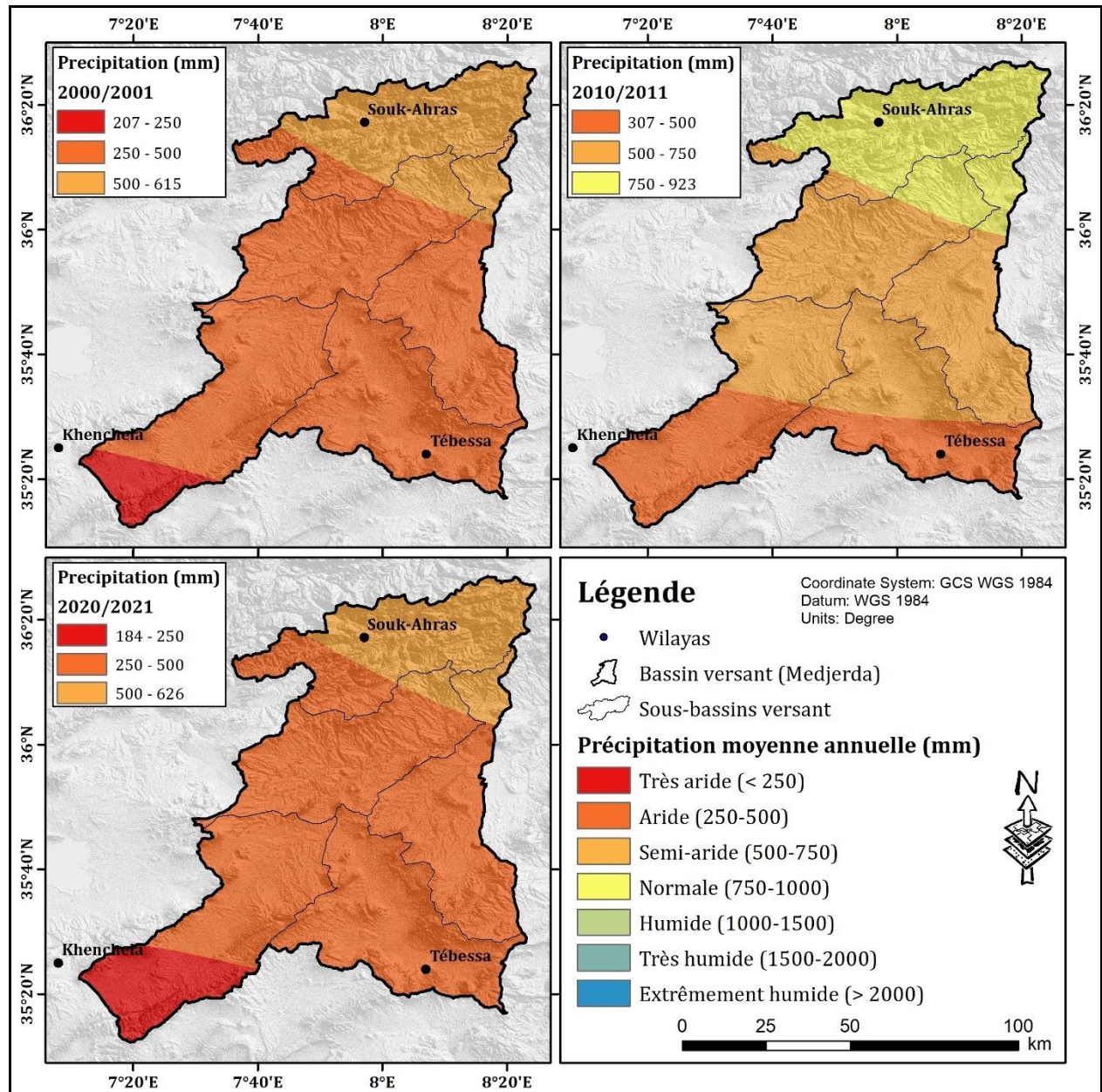


Figure 31. Variation spatio-temporelle annuelle de la précipitation.

3.2.2. La température :

La température est le second facteur nécessaire à l'établissement du bilan hydrique. Au cours de la l'année (2000-2001), la saison estivale, se caractérise par une température élevée oscillante entre 26 et 30. 3°C, pendant toute la saison d'été. En hiver la température sur tout le bassin versant varie entre de 6 à 10 °C, indiquant des températures froides (Fig. 32).

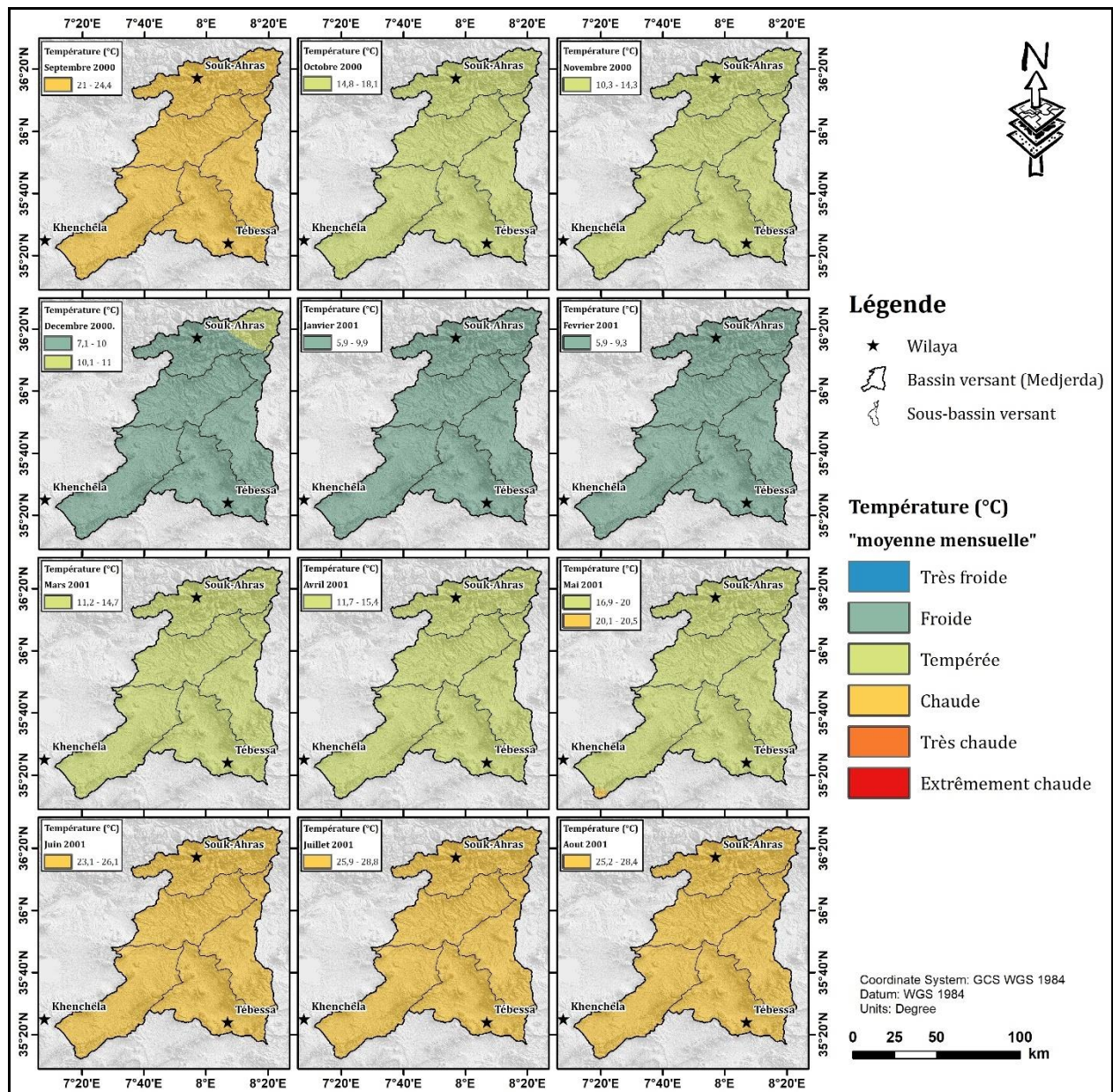


Figure 32. Variation spatio-temporelle mensuelle de la température (°C) en (2000-2001).

L'examen des cartes mensuelles de températures relatives à l'année 2010-2011 (Fig. 33), indique que cette dernière est une année charnière, présentant trois catégories de températures : chaudes, tempérées et froides. La période chaude, s'étale sur quatre (04) mois, allant du mois de juin jusqu'au mois de septembre compris. La température maximale 29 (°C) est enregistrée au mois de juillet, ces températures sont présentes sur l'ensemble du bassin versant de la Medjerda au cours de ces quatre mois. Les mois d'octobre, novembre, avril et mai affichent des températures moyennes variant entre 10,1 et 20 °C, traduisant des températures tempérées. En fin, au cours des mois de décembre, janvier, février et mars, on enregistre respectivement les températures les plus basses (6.7, 5.2, 5.1, 8.3°C) se sont des températures froides. Notons que le mois de mars se démarque des autres car le climat est de type tempéré dans la partie amont du SBV-12-01, dans la partie aval du SBV-12-02, ainsi que la partie sud du SBV-12-03 et SBV-12-05.

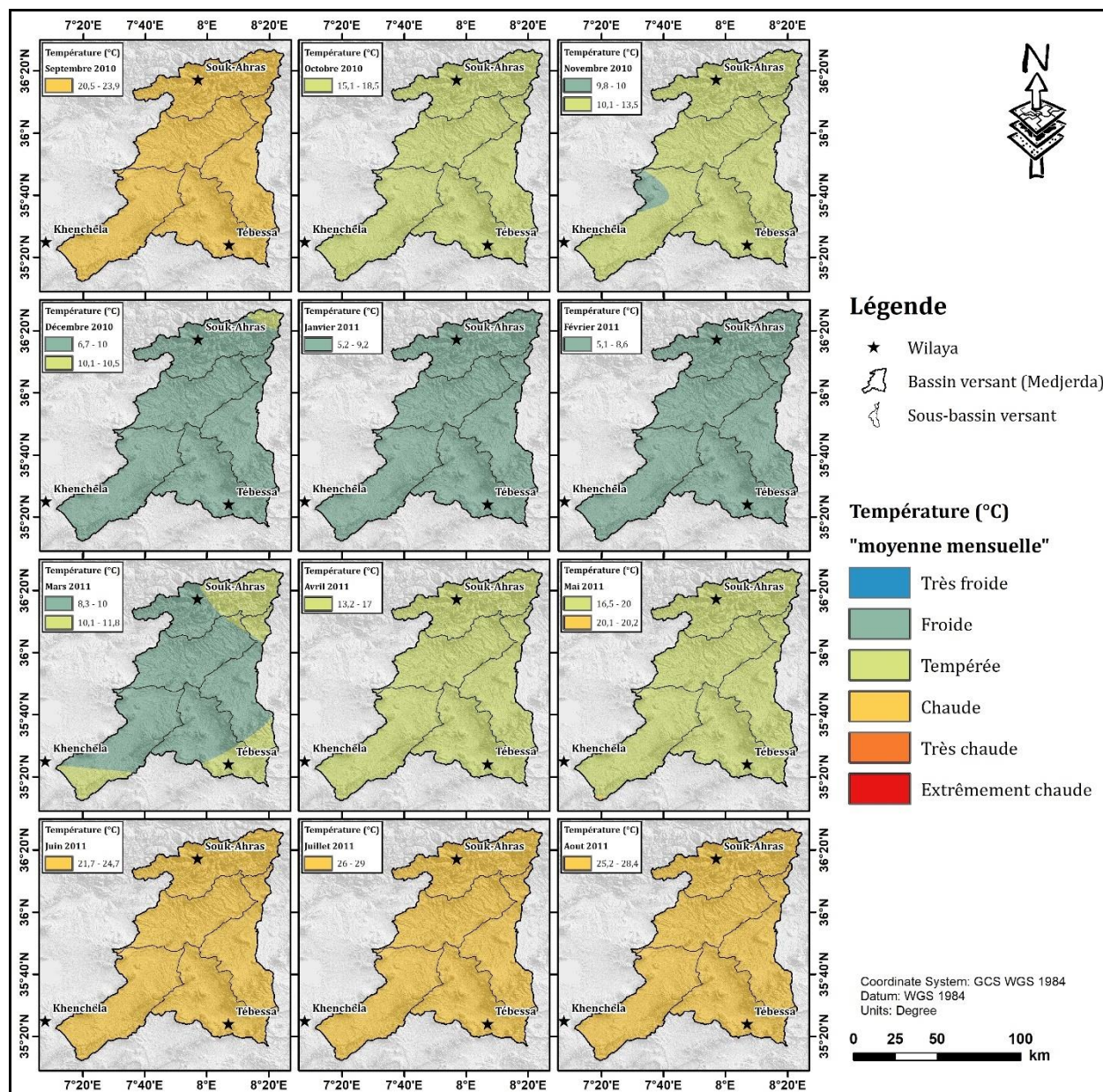


Figure 33. Variation spatio-temporelle mensuelle de la température (°C) en (2010-2011).

Concernant l'année hydrologique 2020-2021, l'analyse de la figure 34 révèle une variation mensuelle de la température à travers le bassin versant de la Medjerda. Quatre différentes températures sont enregistrées au cours de l'année. La température qualifiée de froide caractérise les mois de décembre, janvier, février et mars, les températures mesurées oscillent entre 6 et 10 °C. Les mois d'octobre, novembre, avril et mai présentent des températures moyennes, tandis que les mois de février et mars se distinguent par des températures très basses (8 et 10 °C), avec une légère augmentation au niveau de la partie amont du SBV-12-02, de la partie aval du SBV-12-02, ainsi que la partie sud des SBV-12-03 et SBV-12-05.

Les dites chaudes (élevées), sont enregistrées au cours des mois de juin, juillet, août et septembre donc la saison estivale. Les températures maximales sont observées au mois d'août, cette augmentation est limitée au niveau de la zone amont du SBV-12-02.

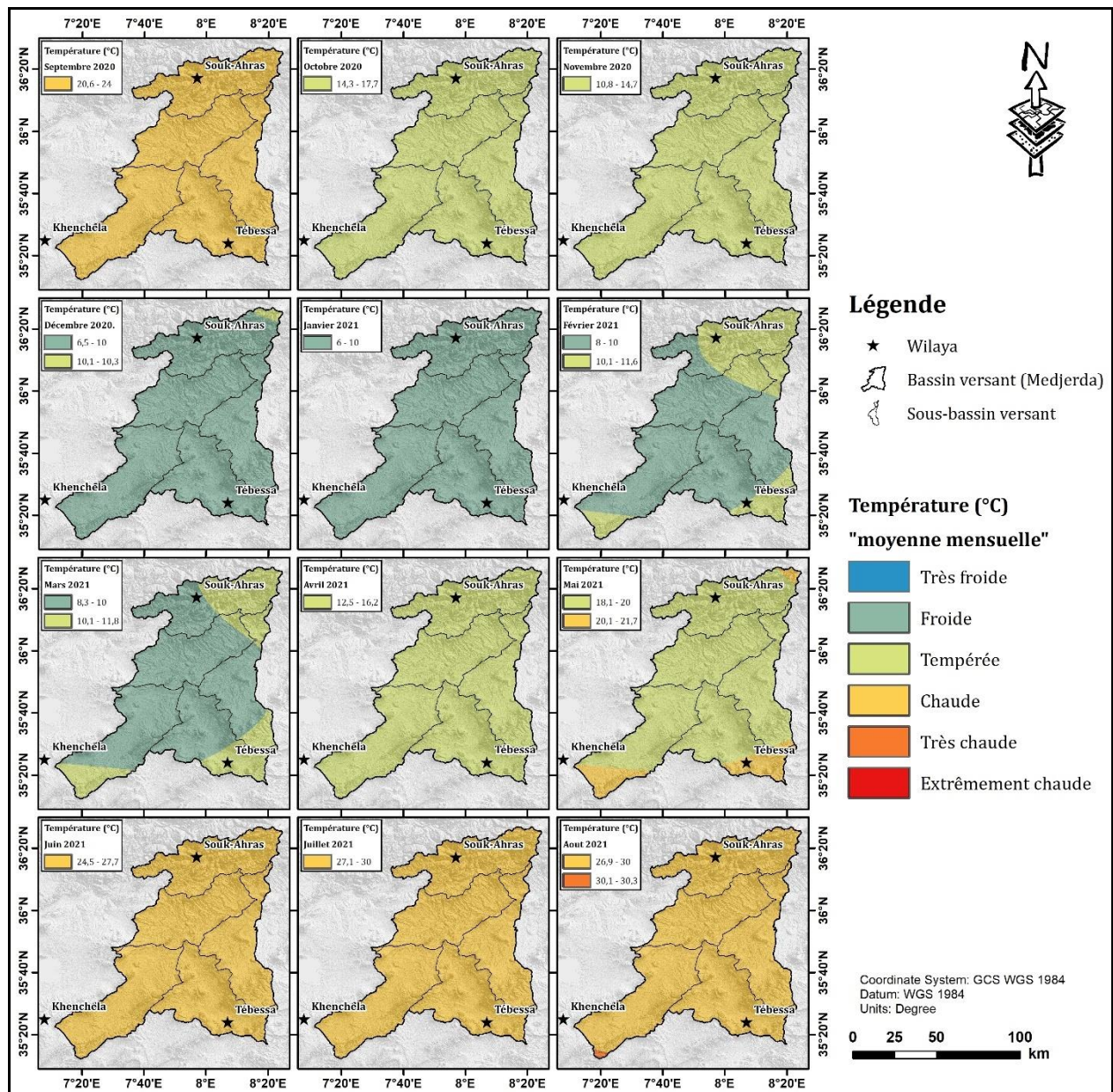


Figure 34. Variation spatio-temporelle mensuelle de la température (°C) en (2020-2021).

Les températures moyennes annuelles présentent une faible variation spatiale à l'échelle du bassin de la Medjerda pour les trois années, avec un climat tempéré caractérisé par des valeurs de températures variant entre 14 et 18 °C.

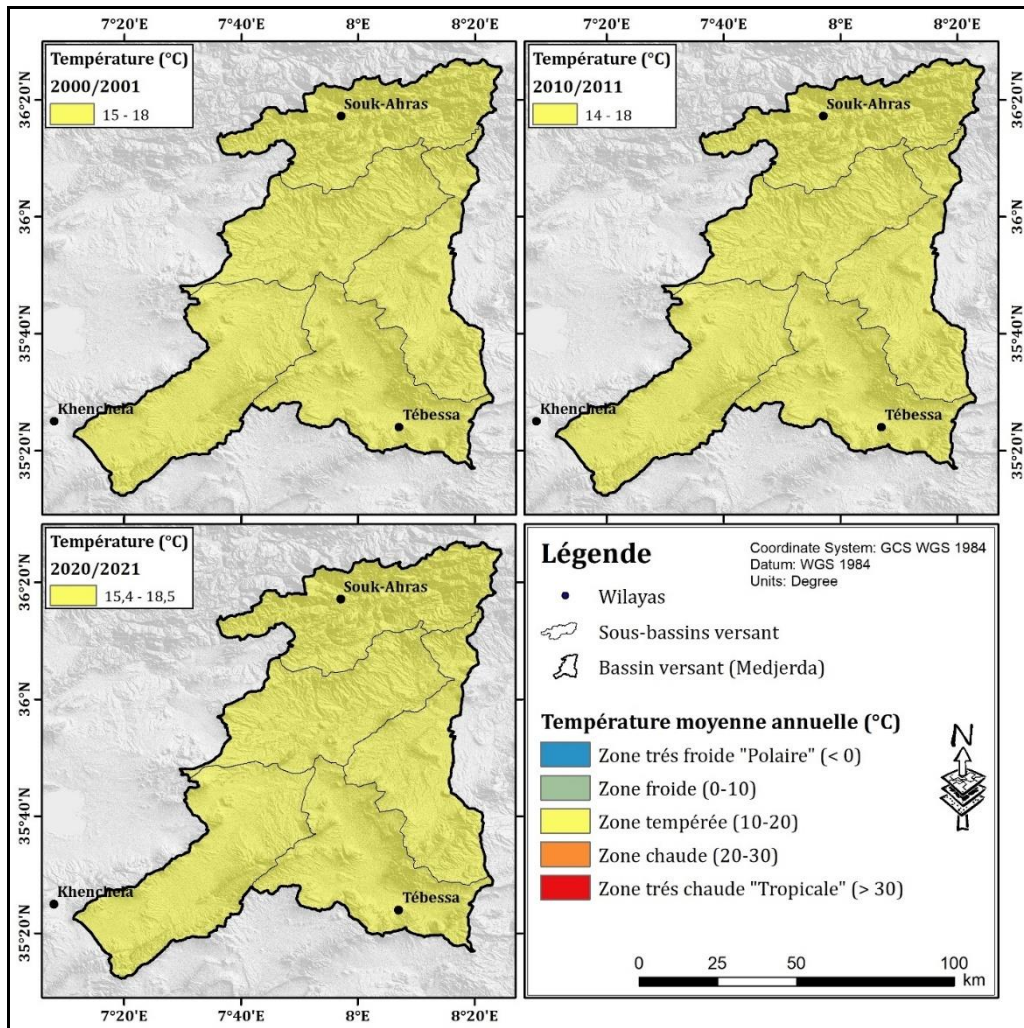


Figure 35. Variation spatio-temporelle annuelle de la température (°C).

3.2.3. Évapotranspiration potentielle (ETP) :

L'évapotranspiration, est un paramètre important pour l'estimation du bilan hydrique. L'utilisation de la formule de Thornthwaite 1948, est sujette aux conditions suivantes :

1^{er} cas : Lorsque la température moyenne mensuelle est inférieure à 26,5°C : le calcul de l'évapotranspiration potentielle mensuelle se fait selon la formule suivante :

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

T : Température moyenne mensuelle du mois concerné en (°C).

I : Indice thermique mensuel : est la somme des indices mensuels obtenus à partir des températures moyennes mensuelles, selon la formule suivante :

$$I = \sum i = \sum \left(\frac{T}{5} \right)^{1.514} \text{ Avec } a = 0.016I + 0.5$$

ETP : Évapotranspiration potentielle mensuelle du mois concerné en (mm).

K : Le coefficient de correction, lié à la latitude et déterminé par une table, est appliqué. La valeur de l'évapotranspiration potentielle annuelle résulte de la somme des 12 valeurs mensuelles d'évapotranspiration potentielle.

2^{ème} cas : Si la température moyenne mensuelle est égale à 26,5°C ou comprise entre 26,5°C et 38,0°C, l'évapotranspiration potentielle mensuelle non corrigée est directement extraite d'une table. Le calcul de l'évapotranspiration potentielle mensuelle est corrigé en appliquant le coefficient de correction mensuel.

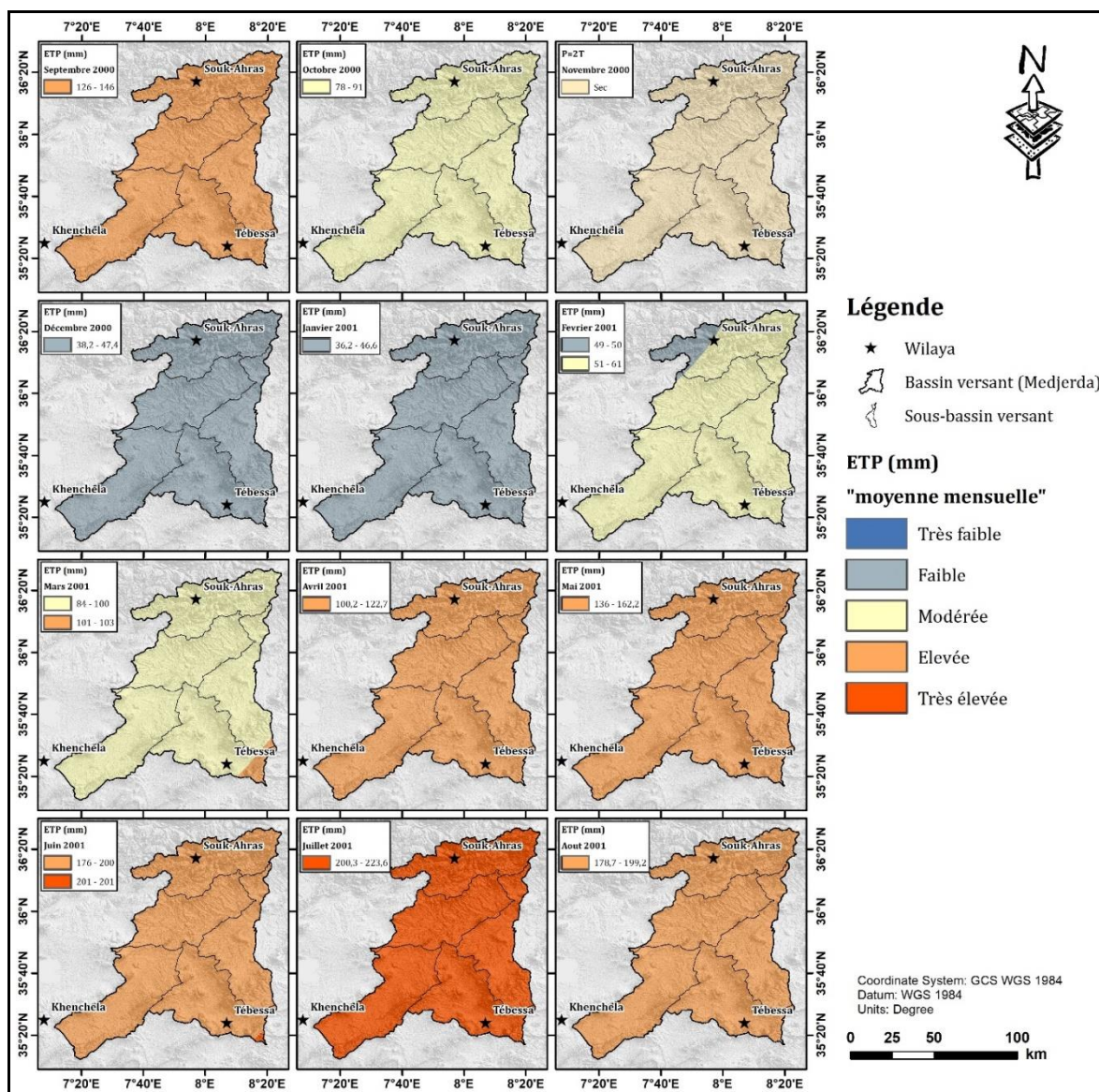


Figure 36. Variation spatio-temporelle mensuelle de l'évapotranspiration potentielle (ETP) pour l'année (2000-2001).

Pour mettre en évidence la variation spatio-temporelle de l'ETP, nous nous sommes intéressés aux interactions entre la saisonnalité climatique et la fraction des précipitations tombée annuellement au cours des années 2001, 2011 et 2021, ainsi qu'à la structure géomorphologique (variation altitudinale ou la courbe hypsométrique) afin d'établir la corrélation entre tous ces paramètres.

À l'échelle mensuelle de l'année 2000-2001 (Fig. 36), l'évapotranspiration potentielle (ETP) indique des valeurs allant de 36,2 à 223,6 mm/ mois. La première valeur de 36,2 mm caractérise le mois de janvier et la valeur maximale (223,6 mm), se rapporte au mois de juillet. Notons que cette valeur persiste à peu près jusqu'au mois d'octobre, et diminue pour atteindre 38,42 mm au mois de décembre. Les valeurs élevées de l'ETP mensuelle s'observent généralement entre le mois d'avril et le mois de septembre, caractérisant une période chaude et sèche avec des températures élevées. Du mois d'octobre jusqu'au mois de mars, l'ETP, présente des valeurs particulièrement faibles au mois de janvier oscille entre (36,2-46,6 mm), Ces baisses de valeurs de l'ETP, est liée aux précipitations se produisant au cours de cette partie de l'année. Aussi durant cet intervalle de temps les températures sont relativement faibles et froides. Par ailleurs la forte humidité dans l'air favorise les évènements pluvieux marquant la saison hivernale froide.

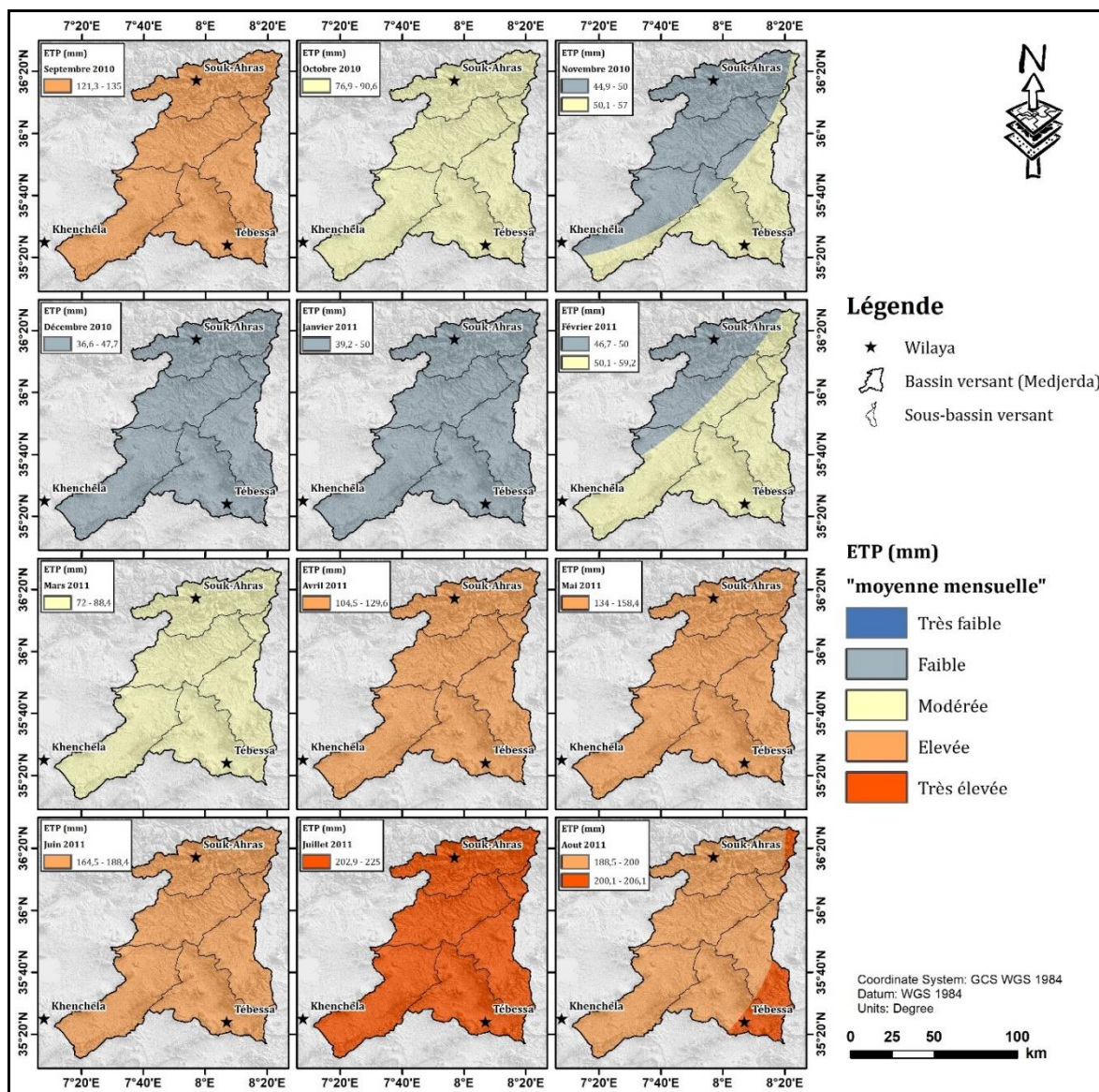


Figure 37. Variation spatio-temporelle mensuelle de l'évapotranspiration potentielle (ETP) pour l'année (2010-2011).

Les valeurs moyennes mensuelles de l'évapotranspiration potentielle (ETP) pour l'année 2010-2011 (Fig. 37), varient entre 36,6 mm et 225 mm. Au cours du mois de janvier, l'ETP, est de 36,6 mm et atteint sa valeur maximale de 225 mm en juillet, pour toute la surface du bassin de la Medjerda. Au mois d'octobre l'ETP est de 135 mm indiquant une diminution du potentiel.

Cependant, les mois de novembre, de décembre, de janvier et de février se caractérisent par des valeurs d'ETP relativement faibles oscillent entre 36,6 et 59,2 m. Au cours de cette partie de l'année, l'évapotranspiration est moins élevée car on est en période pluvieuse. L'accroissement de l'ETP, reprend au mois d'avril, où on enregistre des valeurs oscillantes entre 104,5 et 129,6 mm.

Au cours des mois de juillet et d'août, l'ETP, atteint son maximum et varie entre 188,5 et 225 mm. Cette fluctuation montre l'impact des changements saisonniers sur les caractéristiques des éléments du bilan hydrique.

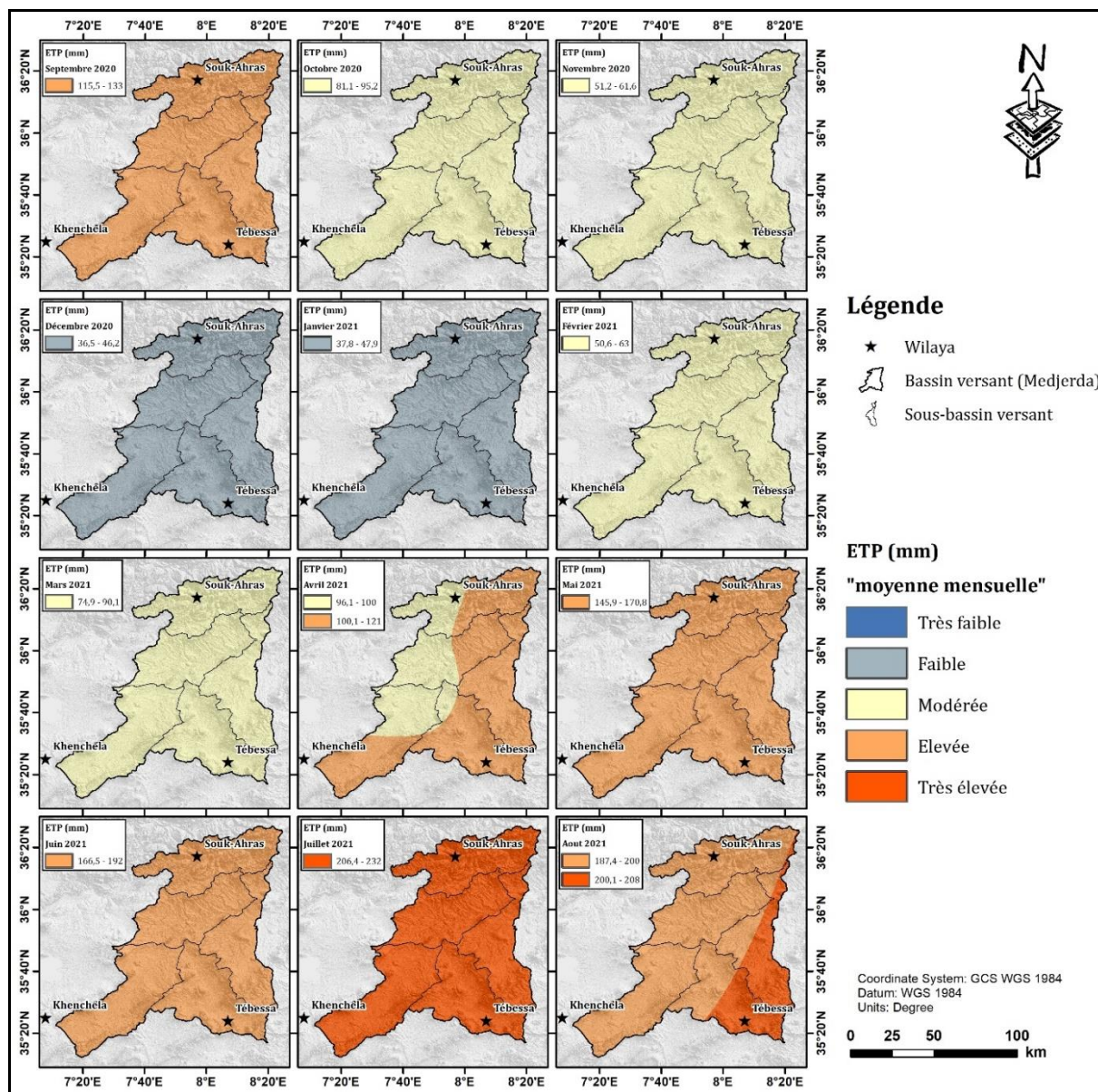


Figure 38. Variation spatio-temporelle mensuelle de l'évapotranspiration potentielle (ETP) pour l'année (2020-2021).

Au cours de l'année 2020-2021 (Fig. 38), l'évapotranspiration potentielle (ETP), oscillait entre 36,5 et 232 mm par mois. Elle est de 36,2 mm au mois de décembre et atteint son maximum de 232 mm au mois de juillet. Les valeurs mensuelles de l'ETP, les plus importantes sont calculées au cours de la période allant du mois d'avril au mois de septembre, au cours de cette partie de l'année les températures atmosphériques sont élevées. Dès le mois d'octobre et jusqu'au mois de mars, l'ETP, est faible, les quantités enregistrées sont comprises entre 36,2 mm et 46,6 mm.

La figure 39, montre la variation spatio-temporelle de l'évapotranspiration potentielle à l'échelle du bassin versant de la Medjerda pour les années (2000-2011-2021). On remarque une faible fluctuation de l'ETP au cours des trois années. Cependant, l'ETP reste élevée au niveau du bassin versant pour les trois périodes considérées, avec des valeurs variant entre 1250 et 1465 mm, enregistrées au cours de l'année hydrologique (2000-2001). Cette fluctuation peut être attribuée

aux facteurs climatiques influençant l'évapotranspiration potentielle, tels que la température, la durée d'insolation, la topographie, et la couverture végétale. On peut donc conclure que les variations spatio-temporelles de l'ETP résultent de la combinaison de tous les facteurs météorologiques et topographique caractérisant la région.

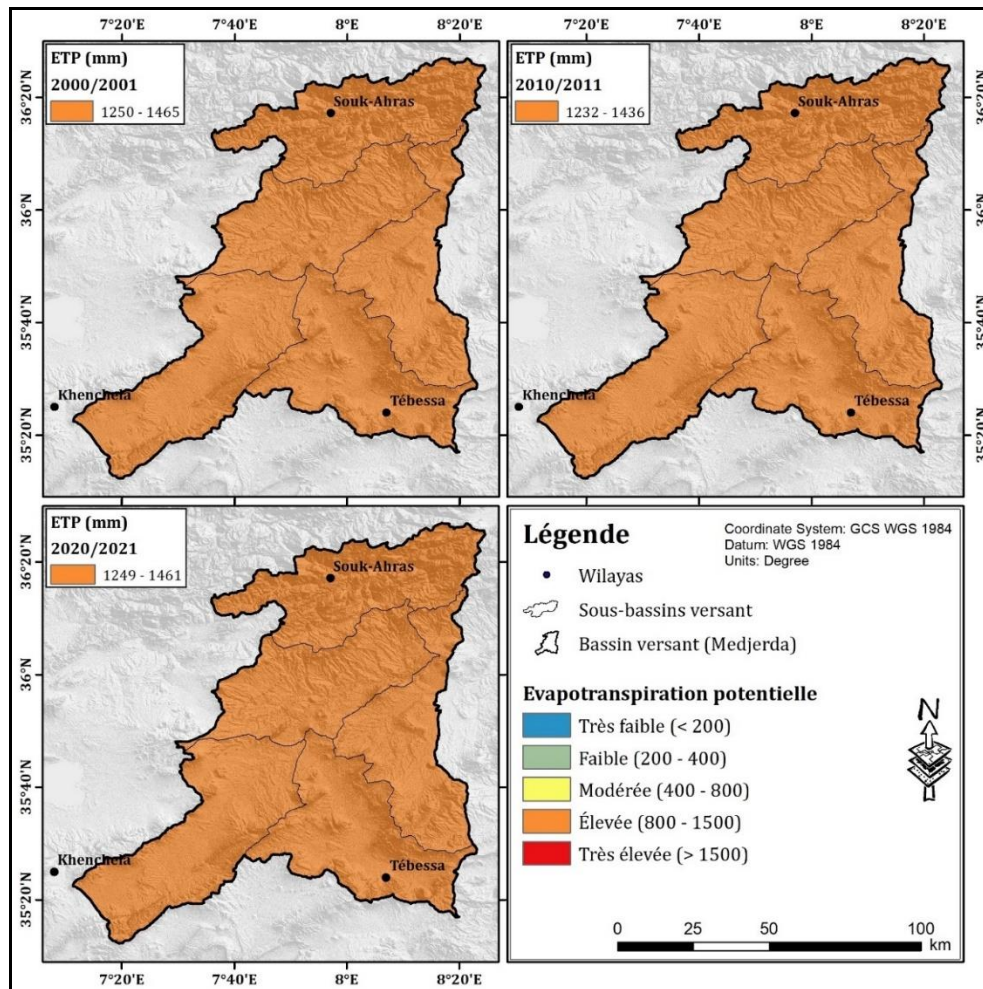


Figure 39. Variation spatio-temporelle de l'évapotranspiration potentielle (ETP) pour les trois années (2000-2011-2021).

3.2.4. Évapotranspiration réelle (ETR) :

L'évapotranspiration réelle résulte de l'évaporation de la surface du sol et de la transpiration des cultures.

Le calcul de l'évapotranspiration réelle mensuelle (ETR), se fait selon l'un des cas suivants :

1 : Lorsque $ETP < P \implies ETR = ETP$: La quantité d'eau correspondante à la différence entre les précipitations (P) et l'évapotranspiration potentielle (ETP) est stockée dans le sol jusqu'à ce qu'il atteigne sa capacité maximale de saturation.

La portion excédentaire, dépassant éventuellement la capacité maximale de rétention d'eau du sol, forme l'excédent water-surplus et devient disponible pour le ruissellement et l'infiltration.

2 : $ETP = P \implies ETR = ETP = P$: Les réserves en eau du sol restent les mêmes que celles du mois précédent.

3 : $ETP > P \implies ETR = P$ La totalité ou une partie de la réserve en eau du sol est utilisée jusqu'à son épuisement. Lorsque les réserves en eau du sol sont épuisées et que l'évapotranspiration potentielle (ETP) est supérieure à l'évapotranspiration réelle (ETR), la différence ($ETP - ETR$) est dénommée le déficit hydrique. La valeur de l'évapotranspiration réelle annuelle est obtenue en sommant les 12 valeurs mensuelles de l'année considérée.

Les figures 40, 41 et 42, montrent la dynamique de variation spatio-temporelle mensuelle de l'évapotranspiration réelle (ETR) dans le bassin versant de la Medjerda.

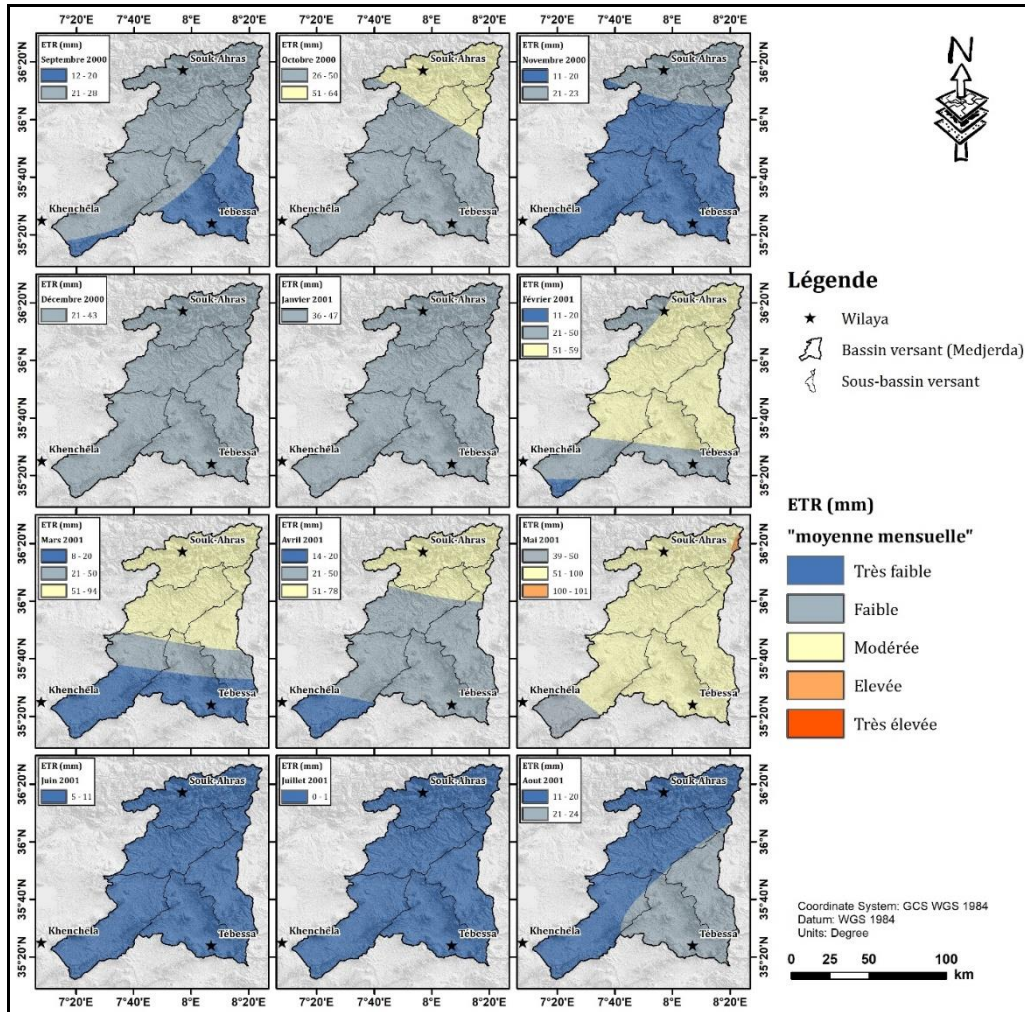
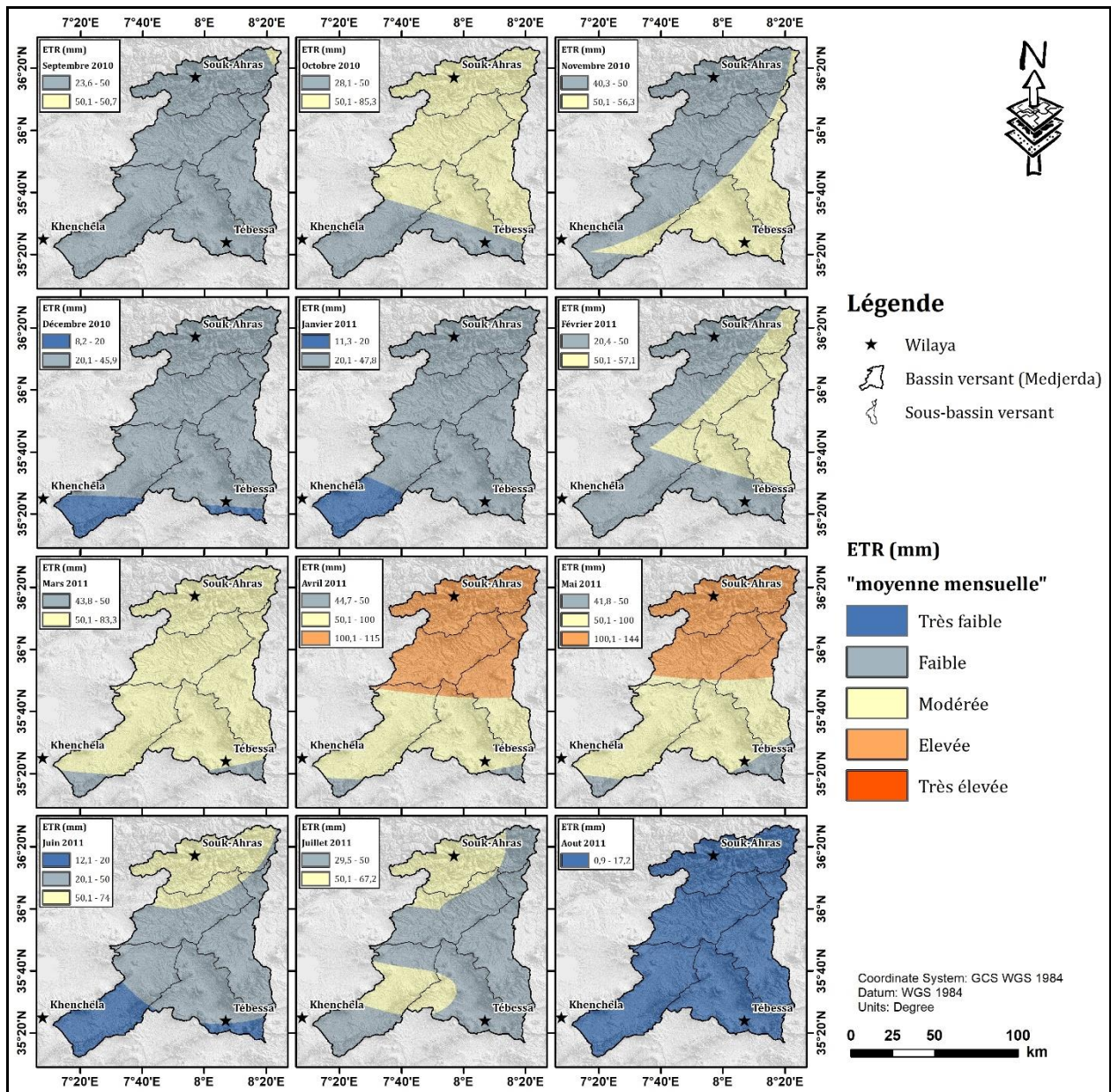


Figure 40. Variation spatio-temporelle mensuelle de l'évapotranspiration potentielle (ETR) pour l'année (2000-2001).

Dans le détail, nous remarquons qu'au cours de l'année 2001 (Fig. 40), l'ETR augmente progressivement du mois de février jusqu'au mois de mai pour atteindre sa valeur maximale de 101 mm pour ce mois (mai). Cette hausse s'observe principalement au niveau de la partie aval du (SBV-12-01), dans les zones montagneuses, au niveau des forêts et les terres cultivées. En revanche, sur une période de sept mois, septembre, novembre, décembre, janvier, juin, juillet et août, les valeurs de l'ETR, sont faibles allant jusqu'à varier entre 0 et 1 mm au mois de juillet.

Cette variation spatio-temporelle montre de manière détaillée les fluctuations mensuelles de l'ETR dans cette région.



Les variations de l'ETR, pour l'année 2011 (Fig. 41), montrent une alternance entre les valeurs de l'ETR, ainsi les mois de décembre et de janvier se caractérisent par des valeurs relativement basses d'ETR, oscillant entre (8,2 et 47,8 mm) attribuables aux conditions climatiques hivernales. Au printemps, c'est-à-dire du mois de mars au mois de mai, il y a une augmentation progressive de l'ETR, culminant en mai (144 mm). Cette augmentation est associée à la période de croissance végétale maximale et à des conditions météorologiques plus chaudes. Durant la saison estivale, c'est-à-dire les mois de juin, juillet et août, on a une baisse de l'ETR, atteignant parfois des valeurs plus faibles avec une valeur minimale de (0,9 mm) enregistrée au mois d'août, cette diminution peut s'expliquer par les effets conjugués de la faible disponibilité d'eau et de fortes

températures au cours de cette période de l'année. Au mois de septembre, l'ETR reste toujours faible avec une légère augmentation, indiquant une transition vers l'automne. Notons que l'ETR, reste relativement basses pendant tout l'automne.

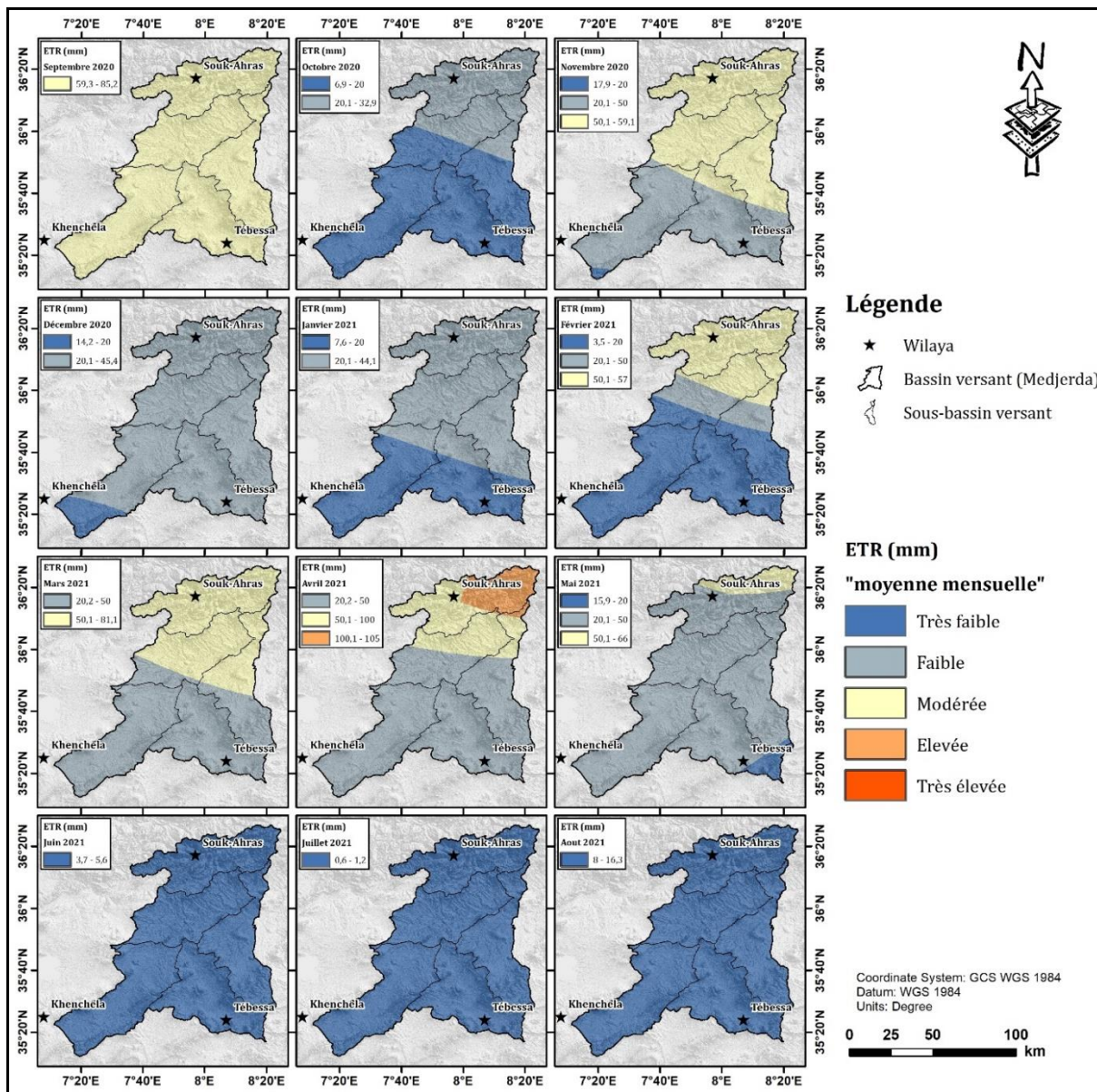


Figure 42. Variation spatio-temporelle mensuelle de l'évapotranspiration réelle (ETR) pour l'année (2020-2021).

En observant les variations de l'ETR en 2021 (Fig. 42), il ressort que l'ETR augmente progressivement du mois de février jusqu'au mois de mai, atteignant une valeur maximale de 105 mm au mois d'avril, principalement dans la partie aval du (SBV-12-01), dans les zones montagneuses. En revanche, durant sept mois, octobre, décembre, janvier, février, juin, juillet et août la partie amont du (SBV-12-02) présente des valeurs d'ETR faibles à très faibles. Les mois de juin et juillet, indiquent une ETR, faible allant de 3,7 et 5,6 mm pour le mois de juin et de 0,6 à 1,2 mm pour le mois de juillet. Cette variation spatio-temporelle montre les fluctuations mensuelles de l'ETR dans cette région au cours de l'année 2021.

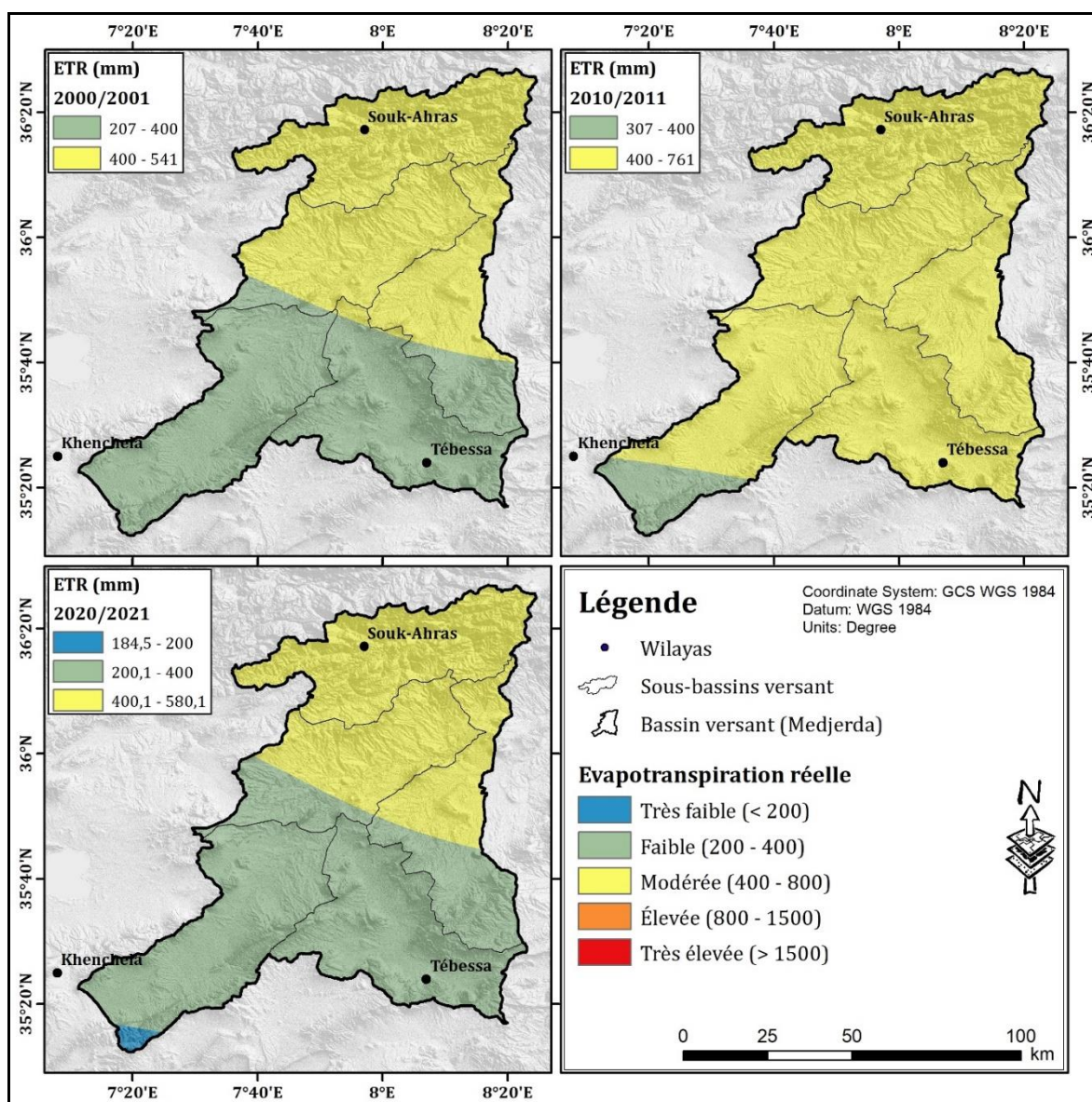


Figure 43. Variation spatio-temporelle annuelle de l'évapotranspiration potentielle (ETR).

L'examen de la figure 43 suivante, (fait ressortir une faible variabilité des valeurs de l'ETR au cours des trois années hydrologiques (2000-2001, 2010-2011, 2020-2021). Les deux premières années montrent deux classes d'ETR, la première dite classe de l'ETR faible à modérée (oscillant entre 207 et 541 mm pour l'année (2000-2001) et entre (307 et 761 mm) pour l'année (2010-2011). Par contre la troisième année (2020-2021) se distingue par les classes variantes entre (184 et 580 mm), la valeur la plus faible de 184 mm, est enregistrée en amont du SBV-12-02.

L'année 2011, se caractérise par une valeur d'ETR particulièrement élevée, comprises entre 307 et 761 mm et couvrant pratiquement toute la surface du bassin versant de la Medjerda. Cette variation spatio-temporelle de l'ETR est due à la variation du relief qui se fait du sud au nord et à la variation de la précipitation.

La variation du relief, observée du sud au nord, influence les valeurs de l'ETR et ceci en raison des différences d'altitude et des caractéristiques topographiques. Les zones amont, ont des

altitudes plus élevées, ce qui explique les valeurs d'ETR plus faibles en raison de températures plus fraîches induisant une transpiration réduite des plantes.

Lors des deux premières années, l'ETR, se caractérise par des valeurs faibles à modérées et sont probablement associées à des précipitations relativement modérées, tandis que l'année 2011, est marquée par des valeurs d'ETR élevées, accompagnées par des précipitations plus abondantes. On peut donc déduire, que les valeurs d'ETR observée au cours des trois années, résultent de la combinaison des facteurs, tels que la topographie, les précipitations, les températures, le couvert végétal, et la réserve d'eau stocker dans le sol, contribuant à la dynamique spatio-temporelle de l'évapotranspiration dans le bassin versant de la Medjerda.

3.2.5. Ruissellement :

En hydrologie, le ruissellement désigne la fraction des précipitations qui s'écoule à la surface du sol. Il résulte de la pluie, de la fonte de la neige et ou l'eau d'irrigation qui s'écoule directement sur la surface du sol, rejoignant un cours d'eau ou un réseau hydrique. Aussi les caractéristiques du sol (la texture et l'excès de saturation), conditionnent l'écoulement de surface, il est également influencé entre autres par le degré et la direction de la pente. Le bassin versant de la Medjerda, se caractérise par une hétérogénéité du relief et du sol ainsi il devient difficile de définir les facteurs favorisant le ruissellement de l'eau.

Nous avons généré la cartographie spatio-temporelle mensuelle du ruissèlement (Fig.44), en utilisant l'équation de Tixeront-Berkaloff et l'outil statistique (Raster calculator) dans le logiciel Arc Gis. La cartographie du ruissellement établie pour les trois années (2000-2001, 2010-2011, 2020-2021) indique un écoulement superficiel relativement faible dans l'ensemble des sous-bassins pour les deux années (2000-2001) et (2020-2021). Les valeurs varient respectivement entre 7,5 à 22,2 mm pour l'année 2000-2001 et entre 6,6 à 22,5 mm 2020-2021, montrant un faible ruissellement. Pour l'année (2010-2011), par contre la carte montre un ruissellement considéré comme faible à modéré, avec des valeurs sont comprises entre 11,1 et 33,2 mm.

L'intensité du ruissellement est conditionnée par l'intensité de précipitations, et par la forme de la pente.

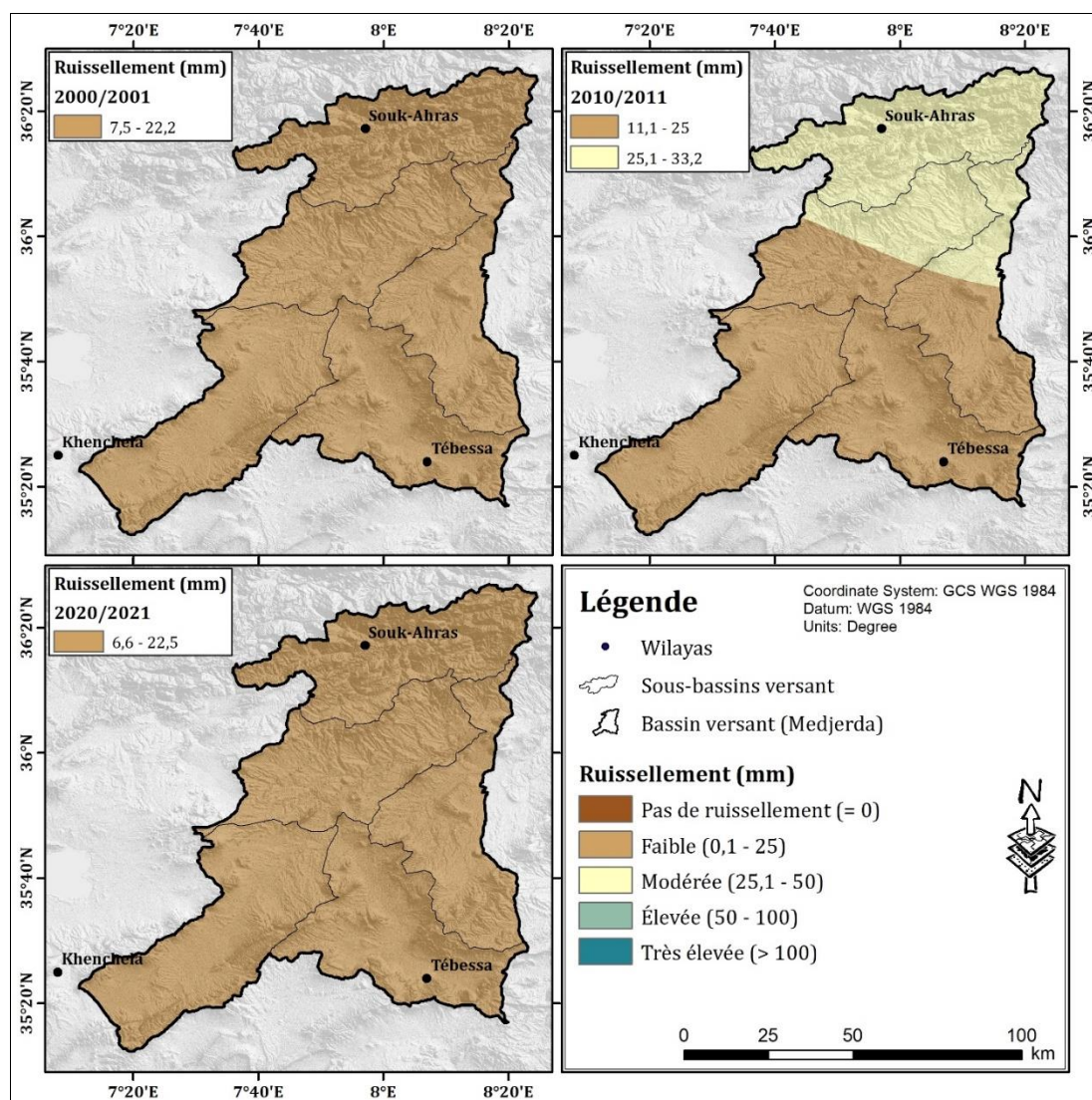


Figure 44. Variation spatio-temporelle annuelle du ruissellement en 2020-2021

3.2.6. Réserve facilement utilisable (RFU) :

La réserve facilement utilisable (RFU) correspond à la quantité d'eau stockée dans le sol qu'une plante peut l'extraire sans affecter significativement sa production, son niveau étant influencé par la profondeur du sol et le système racinaire des plantes. Autrement, C'est l'eau disponible dans le sol et que les plantes peuvent l'exploiter aisément grâce à leur tension osmotique, sans nécessiter de restriction de l'évapotranspiration réelle (ETR) (Lambert, 1996).

Selon de nombreuses observations, Thornthwaite a formulé les conclusions suivantes :

La réserve utile dépend de la nature du sol, variant de 100 mm d'eau par mètre de profondeur pour les sables et à 300 mm pour les argiles.

En fonction de la profondeur des racines, qui est déterminée par le type de végétation, une tranche plus ou moins épaisse du sol est impliquée : de 50 cm à 1 m pour les plantes cultivées et de 2 m ou plus pour une forêt. Pour évaluer cette dernière, il suffit de cumuler mois après mois les différences (P-ETP), à partir du premier mois où les précipitations sont inférieures à l'évaporation potentielle.

Thornthwaite a facilité la lecture de la réserve d'eau restant disponible dans le sol, en prenant en compte la capacité du sol et l'accumulation des déficits mensuels en eau.

On peut exprimer cela comme suit :

$$R_i = RU * e^{(-\text{cumul des ETP}-P/RU)}$$

Où :

- R_i : représente la réserve d'eau dans le sol au temps i .
- RU représente la réserve utile.

Pour un calcul itératif mois après mois, on peut aussi écrire :

$$R_i = R_{i-1} * e^{(-D/RU)}$$

Où :

- D : exprime la différence entre ETP et P pour le mois i , et
- R_{i-1} : représente la réserve du mois précédent.

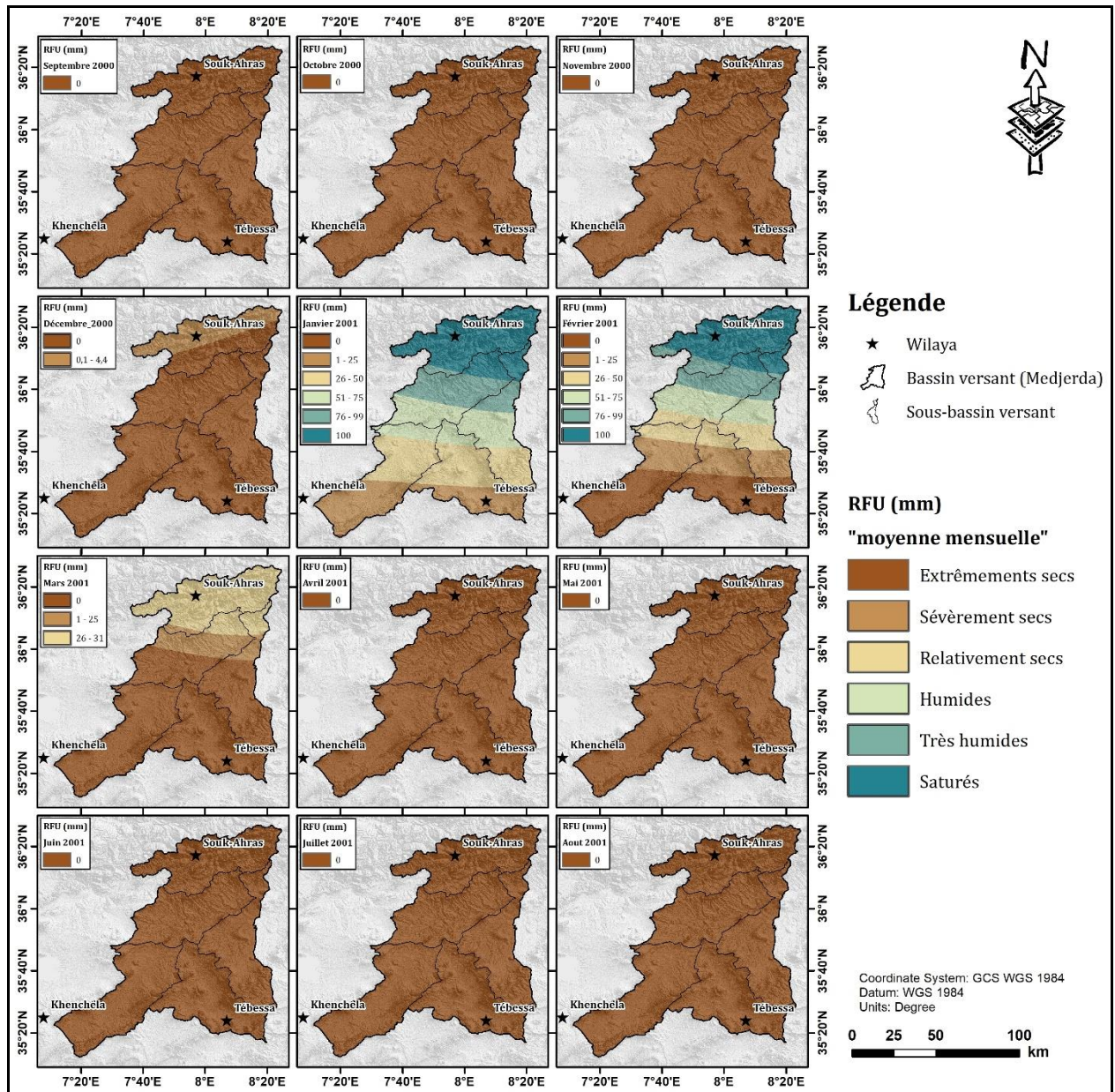


Figure 45. Variation spatio-temporelle mensuelle du RFU pour l'année (2000-2001).

L'analyse des variations spatiales du (RFU) mois par mois pour l'année hydrologique (2000-2001) (Fig. 45), montre que les mois septembre, octobre, novembre, avril, mai, juin, juillet, août, se caractérisent par une RFU égale à zéro et ceci sur la quasi-totalité du bassin versant.

Les mois de décembre, se caractérise par une RFU allant de 0,1 à 4,4 mm. Notons que les valeurs maximales sont atteintes au début de l'hiver, au mois de janvier et de février, allant de 0 à 100 mm. Cette valeur maximale de RFU (100 mm) est enregistrée sur presque la totalité du SBV-12-01. Cependant et à partir du mois de janvier, les valeurs de RFU, diminuent progressivement, jusqu'à atteindre des valeurs comprises entre 0 et 31 mm au mois de mars. En observant les valeurs de RFU, au cours du mois de mars, on constate les trois catégories suivantes de RFU, la valeur zéro indique l'absence de stock, avec une variation entre 1-25, la

saison est considérée comme sévèrement sèche, et quand la RFU, est comprise entre 26-31mm, on parle alors d'une période relativement sèche

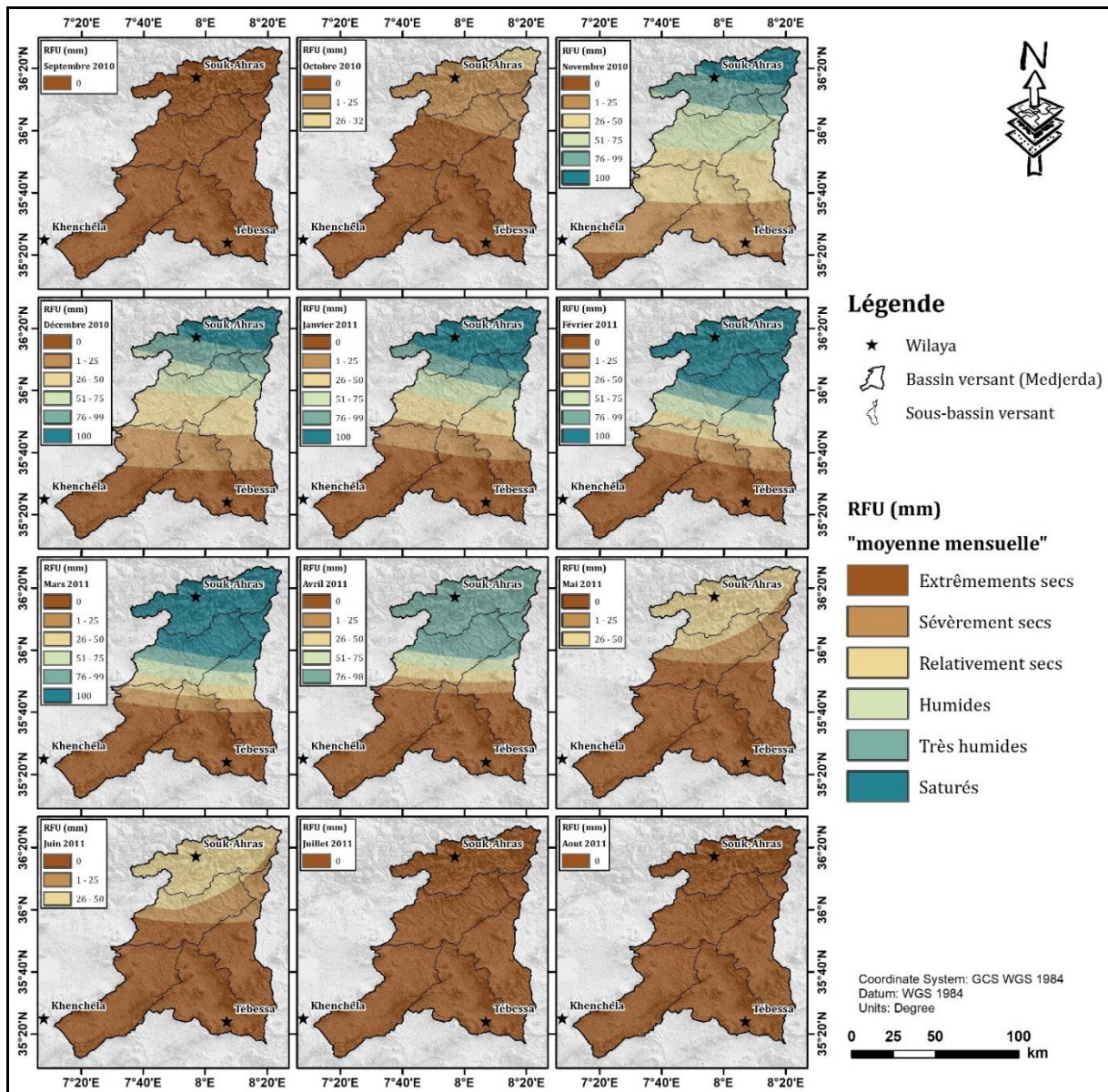


Figure 46. Variation spatio-temporelle mensuelle du RFU pour l'année (2010-2011).

Concernant l'année (2010-2011), (Fig. 46), on note des variations spatio-temporelles significatives par rapport à l'année 2000-2001. Au mois d'octobre, on a une légère augmentation du RFU, allant de 0 et 32 mm. Cette augmentation est le produit des faibles précipitations enregistrées mais la sécheresse persiste pendant cette partie de l'année. Au cours de la période allant du mois de novembre jusqu'au mois d'avril, on remarque que la RFU, atteint 100 mm, particulièrement au niveau de la partie septentrionale du bassin versant de la Medjerda, s'étendant sur l'intégralité du SBV-12-01 et touche également de petites portions des SBV-12-04 et SBV-12-05. Ces mois caractérisent un hiver plus humide augmentant la RFU mais au-delà du mois d'avril, la tendance s'inverse, on observe une diminution progressive du RFU. Au cours des mois de mai et de juin, la RFU oscille entre 0 et 50 mm, indiquant un retour vers des conditions

plus sèches. Cette transition vers des mois plus secs perturbe la RFU et la disponibilité des ressources.

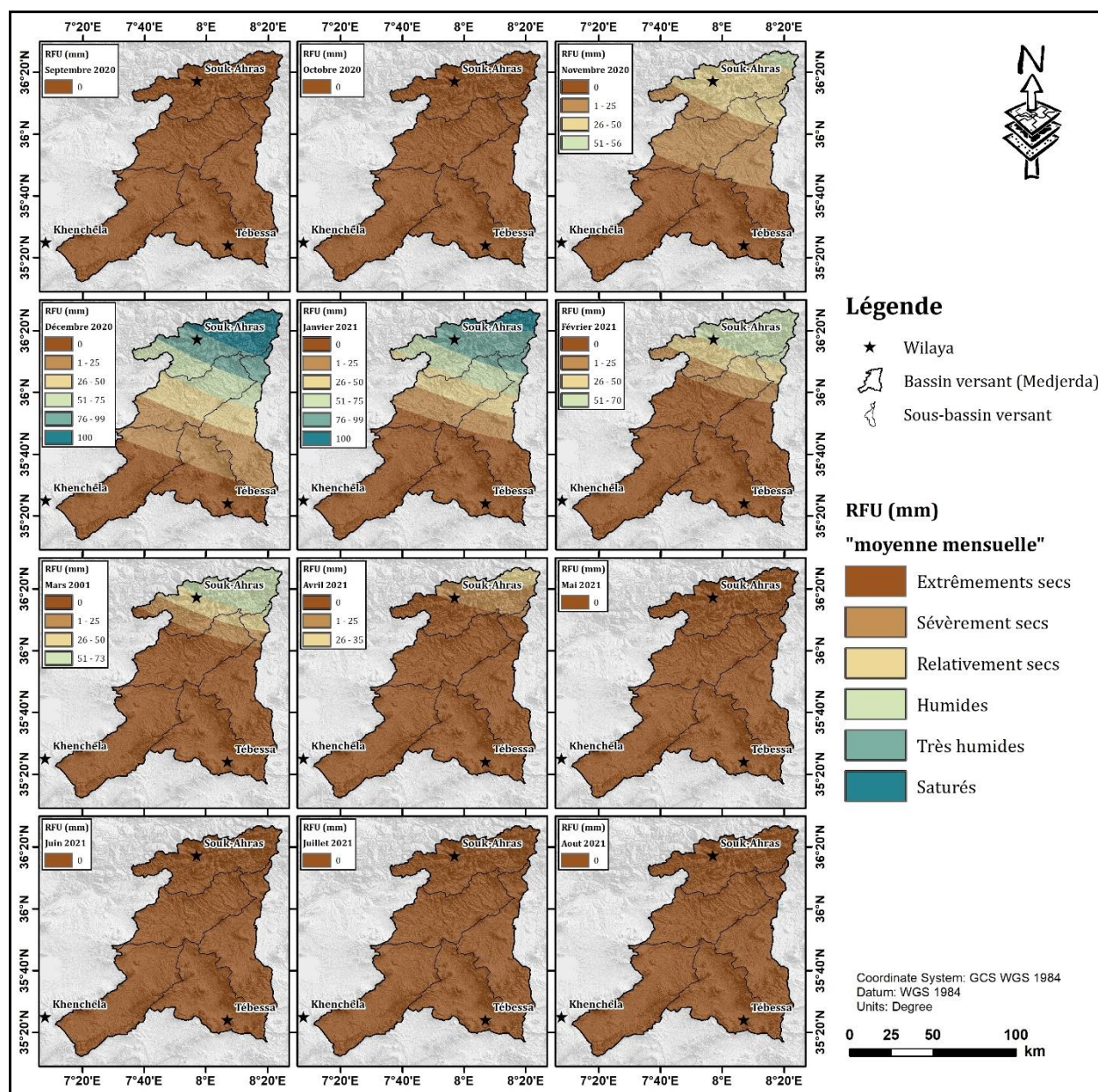


Figure 47. Variation spatio-temporelle mensuelle du RFU pour l'année (2020-2021).

L'année hydrologique (2020-2021), comporte trois épisodes :

- le premier s'étale sur six mois et englobe septembre, octobre, mai, juin, juillet et août, durant cette période la RFU est égale à 0 sur tout le bassin versant.
- le second, porte deux mois à savoir décembre et janvier, dans ce cas on note cinq classes de RFU, variant spatialement de 0 à 100 mm. Cette valeur maximale (100 mm), est dans presque la totalité du SBV-12-01, tandis que les valeurs faibles ou nulles sont relevées au niveau des SBV-12-02, SBV-12-03, SBV-12-05. Au-delà du mois de janvier, on constate une diminution progressive du RFU au cours des mois de février, de mars et d'avril. Les valeurs varient entre (0-70) pour le mois de février, (0-73mm) pour le mois de mars, et de (0-35mm) pour le mois

d'avril. Cette variation dépend étroitement de la diminution de la pluviométrie et des conditions climatiques qui prévalent après le mois de janvier. Il est important de noter que cette diminution du RFU entraîne une réduction de la saturation du sol en eau au cours des mois.

L'analyse des cartes se rapportant aux trois années hydrologiques, considérées amène aux constatations suivantes :

- les valeurs maximales du RFU sont observées au début de l'hiver, précisément au mois de janvier et de février, correspondant au pic des précipitations,
- les valeurs maximales sont localisées dans le SBV-12-01, caractérisé par des sols insaturés et un substratum relativement imperméable. En revanche, les sols calcaires, caractérisés par une texture grossière et une densité significative de linéaments, entraînent des RFU faibles à moyennes, comme observé sur la totalité du bassin versant.

Au cours des trois années hydrologiques examinées, on note une sécheresse particulièrement durant la saison estivale, pouvant aller du mois de mai et persistant durant les mois de juin, juillet, août et septembre, cette période se caractérise par une RFU de zéro (0) sur l'ensemble du bassin versant. Ceci démontre que les températures sont élevées et les précipitations très faibles, voire insignifiantes. Dans ces conditions climatiques défavorables, il y a une répercussion négative sur les ressources. Par ailleurs les températures élevées intensifient l'évaporation, tandis que le manque de précipitations ne permet pas une recharge adéquate des réserves hydriques. Ainsi, cette période de sécheresse prolongée, nous amène à penser à prendre des mesures adaptatives pour faire face aux variations des conditions climatiques.

L'évolution du RFU se résume comme suit :

1. Au début du mois d'octobre, la RFU présente peut-être soit égale à zéro cas des années 2000-2001 et 2020-2021, de ce fait, il y a un prolongement de la saison estivale, confirmée par l'année hydrologique (2010-2011), par contre on note une légère augmentation allant de 0 et 32 mm, due à une reprise modeste des précipitations. Ces dernières sont faibles laissant place à la persistance de la saison estivale.
2. Du mois de novembre jusqu' au mois d'avril, la période est considérée comme étant une période Humide, elle se caractérise par un RFU, atteignant parfois 100 mm, donc des conditions plus humides, favorables à la recharge des réserves d'eau dans le sol. Ainsi un hiver pluvieux contribue à l'augmentation de la RFU.
3. Au-delà du mois d'Avril, la tendance s'inverse et va dans le sens d'une diminution progressive du RFU. Durant l'année (2010-2011), au cours des mois de mai et juin, sont enregistrées des RFU variant entre 0 et 50 mm, tandis que pour les années (2000-2001, 2020-2021), la RFU enregistrée est de zéro mettant en évidence des périodes sèches. De ce fait le changement de saison vers l'été, se traduit par une diminution voire une absence des précipitations.

En conclusion, on déduit que la variation mensuelle du RFU, constitue un indice de l'évolution mensuelle, saisonnière et annuelle des paramètres climatiques (précipitations, les températures et l'évaporation qu'elle soit potentielle ou réelle), ces paramètres impactent la disponibilité de l'eau dans le sol et le sous-sol.

3.2.7. L'excédent (surplus d'eau) et le déficit hydrique :

Un excédent (surplus) d'eau représente l'accumulation positive résultant de la différence entre les précipitations et l'évaporation potentielle sur une période donnée. Correspond à la quantité d'eau dans le sol, susceptible de contribuer à un écoulement souterrain, favorisant ainsi l'augmentation du niveau des nappes aquifères, ou de se manifester en surface sous forme d'écoulement vers les rivières. L'excédent hydrique, ou surplus d'eau, se réfère à la situation dans laquelle la disponibilité en eau excède les besoins immédiats de la végétation, du sol et d'autres composants de l'environnement. Cela se produit généralement après des périodes de fortes précipitations ou en raison de conditions hydrologiques favorables. Lorsque le sol atteint sa saturation en eau, le surplus se définit comme la disparité entre les précipitations et l'évaporation.

En revanche, si le sol n'est pas saturé, ce qui est fréquent à la fin d'une période sèche, l'excédent des précipitations par rapport à l'évaporation est initialement utilisé pour reconstituer la réserve d'eau du sol jusqu'à son plein. Tout excès subséquent constitue alors le surplus, destiné à contribuer à l'écoulement, que ce soit sous forme d'écoulement souterrain ou de surface.

En revanche, le déficit agricole se produit lorsque les besoins en eau des cultures et des plantes excèdent l'approvisionnement en eau disponible dans le sol. Cela peut résulter d'une insuffisance de précipitations, d'une évaporation élevée due à des températures élevées, ou d'une combinaison de ces facteurs. Le déficit peut entraîner un stress hydrique pour les cultures, compromettre leur croissance, réduire les rendements et, dans les cas graves, conduire à la dégradation des sols.

L'analyse des variations mensuelles de l'excédent pour l'année hydrologique 2000-2001 (Fig. 48), montre d'une manière générale un bilan hydrique déficitaire, cependant les mois de janvier et de février illustrant la saison hivernale et indiquent un excédent élevé à modéré avec des valeurs maximales de 59 mm au mois de janvier, et des valeurs oscillant entre 0,1 et 18 mm pour le mois de février.

La période allant du mois de mars jusqu'au mois de novembre, se caractérise par une sécheresse confirmée par le déficit observé à l'échelle du bassin versant

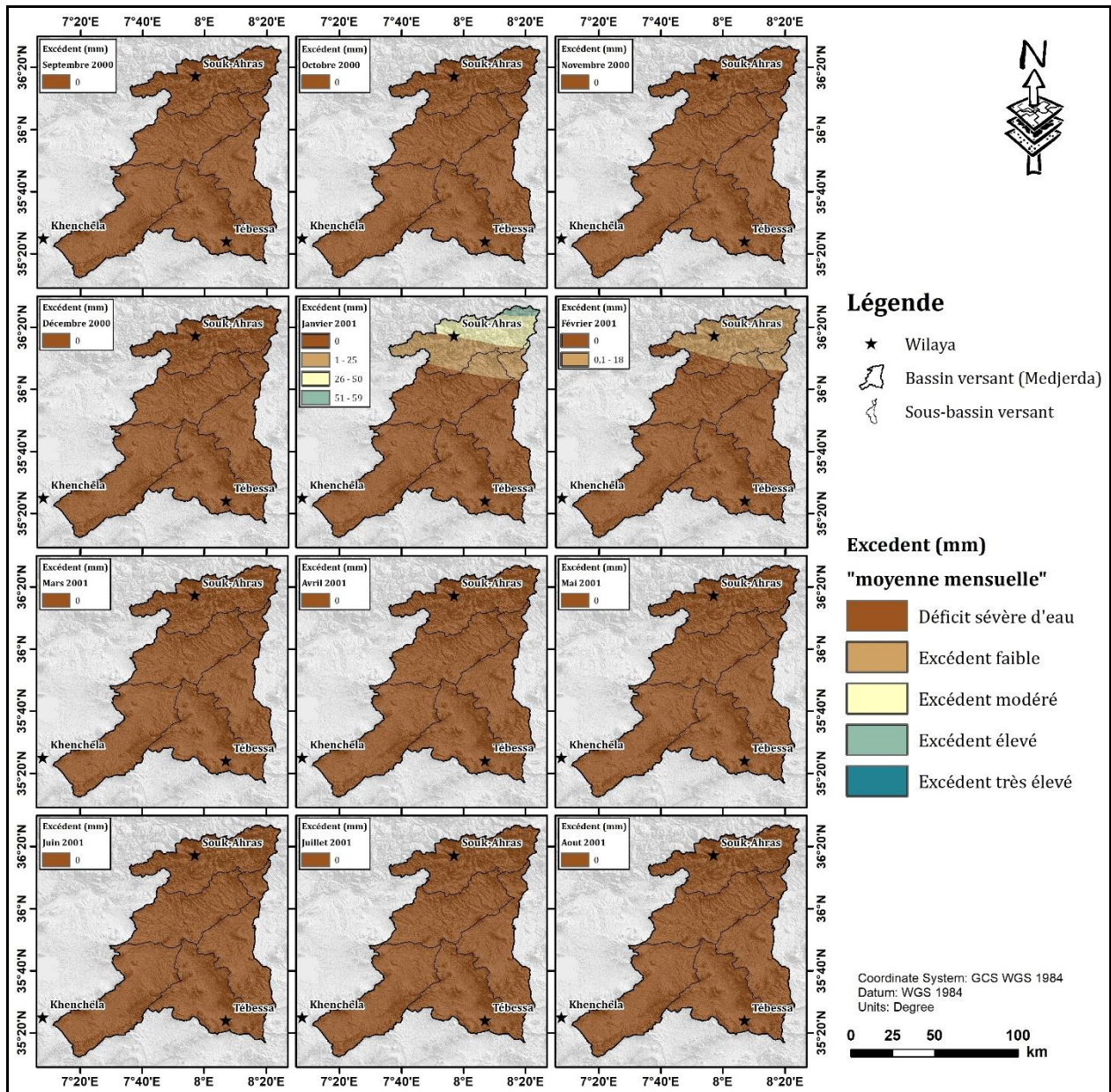


Figure 48. Variation spatio-temporelle mensuelle de l'excédent pour l'année (2000-2001).

L'année hydrologique 2010-2011, indique un excédent, ce dernier augmente dès le mois de décembre pour atteindre son maximum au mois de février. Les valeurs les plus importantes de l'excédent varient entre 76 et 93 mm, au niveau de la partie aval du SBV-12-01. En examinant la variation de l'excédent selon une direction nord-sud, on note une diminution progressive de l'excédent passant à une classe modérée de 26 à 50 mm enregistrée au mois de février au niveau de la partie sud du SBV-12-01. Cette diminution se poursuit pour atteindre un niveau sévère au niveau de la moitié des SBV-12-04 et SBV-12-05, ainsi que la totalité des SBV-12-02 et SBV-12-01. Le mois de mars, caractérisé par un excédent faible oscillant entre 1 et 24 mm, on observe un déficit sévère qui prédomine pendant les mois d'avril, de mai, de juin, de juillet, d'août, de septembre et d'octobre. Cette évolution souligne la dynamique complexe de l'excédent et du déficit au fil des mois au cours de l'année 2010-2011.

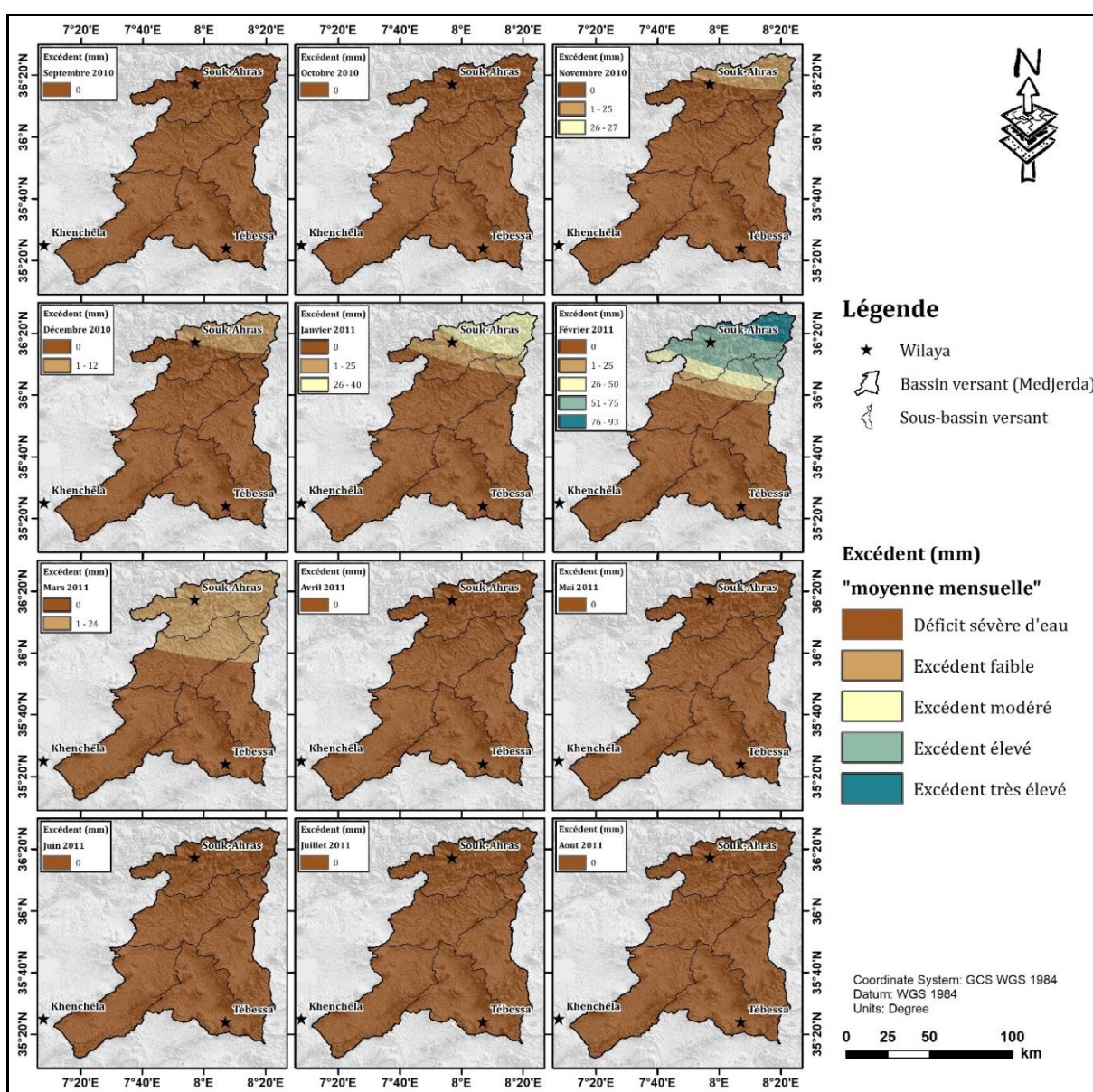


Figure 49. Variation spatio-temporelle mensuelle de l'excédent pour l'année (2010-2011).

L'analyse de l'évolution l'année hydrologique 2020-2021 (Fig.48), montre un bilan hydrique déficitaire, exception faite pour les deux mois de décembre et de janvier. Au cours de ces deux mois, l'excédent est considéré modéré comme les valeurs maximales enregistrées au mois de décembre sont de 42 mm, pour le mois de janvier l'excédent est faible ne dépassant pas 3 mm. Entre le mois de février et jusqu'au mois de novembre, cette période est considérée comme une saison sèche, le déficit hydrique s'étale sur la totalité du bassin de la Medjerda.

Nous constatons qu'au cours des trois années hydrologiques, que l'excédent d'eau dans le sol est tantôt hivernal et tantôt estival. Cette évolution reste influencée principalement par les variations saisonnières des conditions climatiques. Durant les mois d'hiver, les précipitations sont importantes et les températures basses réduisant l'évapotranspiration, l'excédent d'eau peut atteindre des niveaux très élevés. Au fur et à mesure de la transition vers le printemps, l'augmentation de la température conduit à une augmentation de l'évapotranspiration, entraînant ainsi une diminution progressive de l'excédent. Cependant au printemps, on a un équilibre entre l'excédent et le déficit. En été, le déficit l'emporte sur l'excédent. La transition vers l'automne, on assiste à une reprise de l'excédent si les précipitations tombent en quantité.

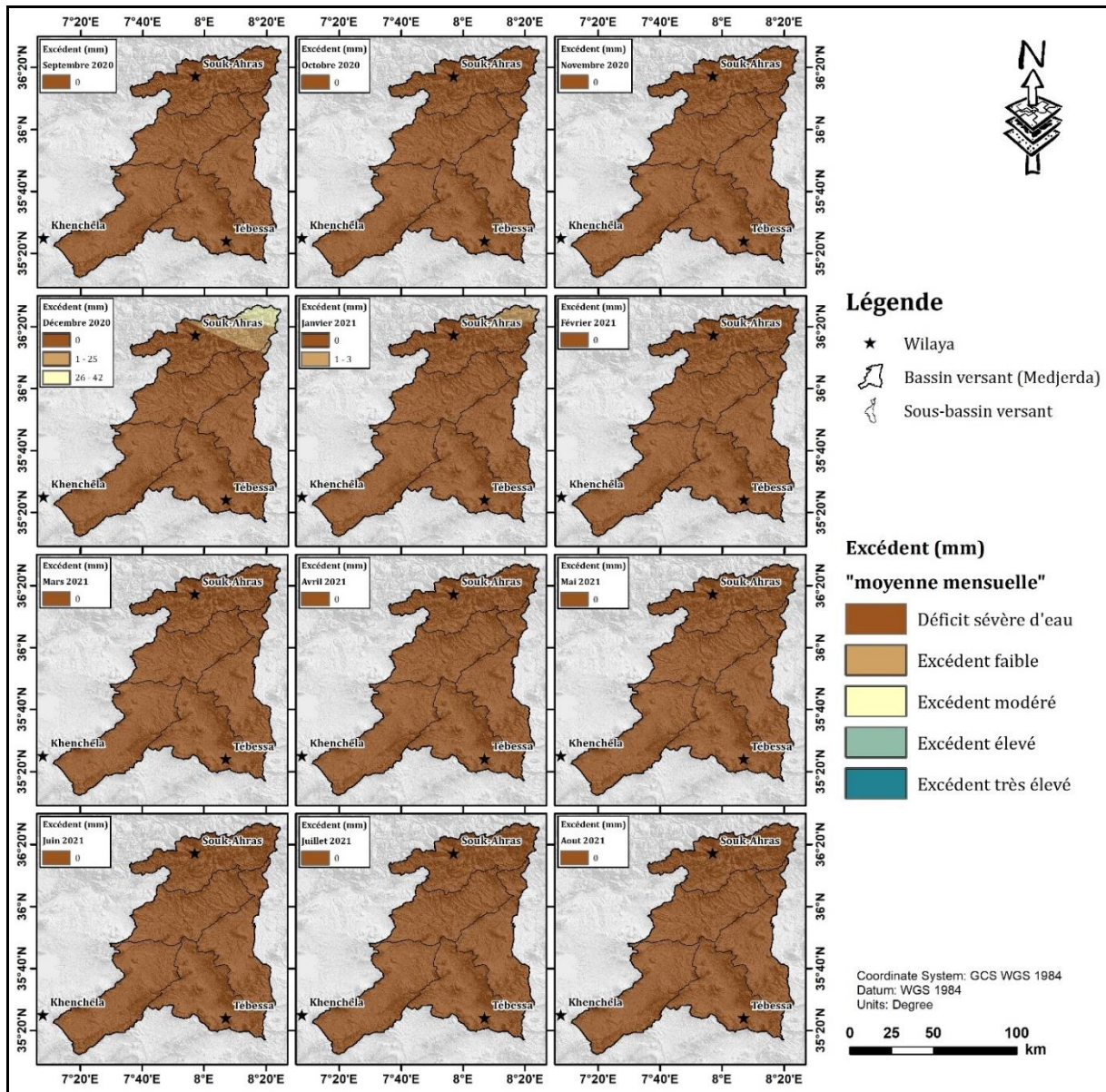


Figure 50. Variation spatio-temporelle mensuelle de l'excédent pour l'année (2020-2021).

3.2.8. Infiltration :

Désigne le mouvement de l'eau à travers les couches supérieures non saturées du sol, entraînant son écoulement dans le sol et sa percolation vers le sous-sol sous l'influence de la gravité et de la pression. Plus spécifiquement, la percolation implique une infiltration profonde dans le sol en direction de la nappe phréatique.

L'observation de la figure 51, suivante montre l'infiltration des eaux dans le bassin versant de la Medjerda. Les valeurs obtenues sont calculées à partir de l'équation du bilan hydrique et sur la base de leurs composants calculés et cartographiés. Les résultats de la cartographie, correspondent aux résultats obtenus préalablement pour les autres

paramètres.

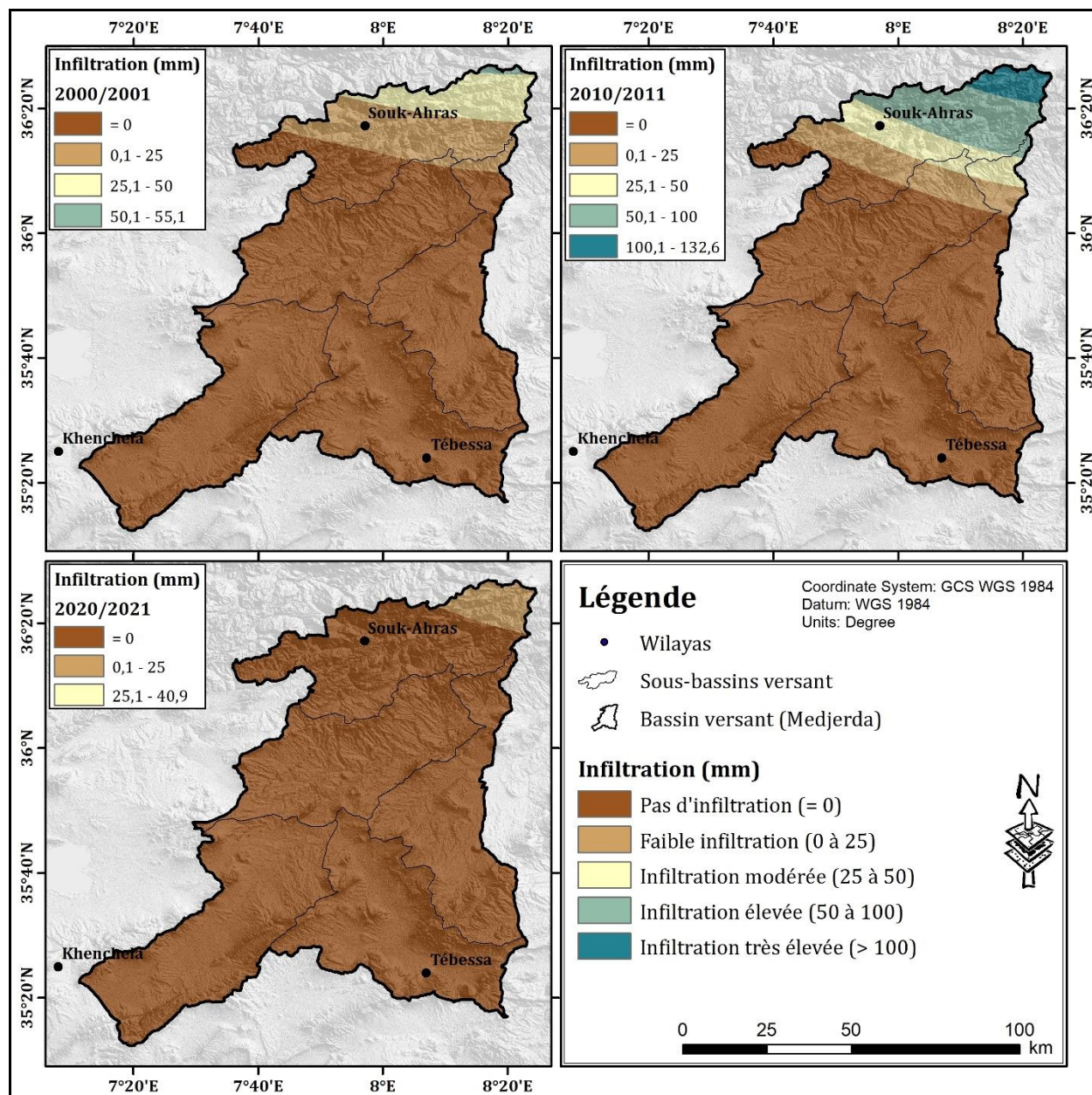


Figure 51. Variation spatiale annuelle de l'infiltration.

L'analyse des variations spatio-temporelles de l'infiltration dans le bassin de la Medjerda au cours des années hydrologiques (2000-2001, 2010-2011, 2020-2021) met en évidence des dynamiques hydrologiques influencées par de divers facteurs.

En 2000-2001, on note quatre classes d'infiltration distinctes. La classe zéro (0), montre une absence d'infiltration, couvrant la partie amont, la partie sud du SBV-12-01 et présente dans l'ensemble des autres sous-bassins. La classe dite élevée allant de 50.1 à 55.5, se localise dans la partie aval indiquant une recharge significative, attribuable à des précipitations élevées dans cette zone. En allant vers le sud, il y a diminution progressive de l'infiltration, allant jusqu'à atteindre la valeur de zéro (0), cas de la partie sud du SBV-12-01 et sur l'ensemble du bassin.

En 2010-2011, les cinq classes, se concentrent dans la moitié nord du SBV-12-01.

En 2020-2021, l'infiltration nulle prédomine dans l'ensemble du bassin, avec une petite portion faible dans la partie nord du SBV-12-01, mettant en évidence une sécheresse, dans ce cas les précipitations sont limitées. Ces résultats soulignent l'importance des variations saisonnières et annuelles des précipitations, de la topographie du terrain, et de la nature du sol dans la cartographie spatiale de l'infiltration. Une compréhension approfondie de ces facteurs est cruciale pour une gestion efficace des ressources en eau dans le bassin de la Medjerda.

4. Conclusion :

Notre approche vise à générer une cartographie de la dynamique spatiale des paramètres bioclimatique et du bilan hydrique pour trois cycles, basée sur la variabilité des précipitations, et des températures enregistrées aux stations météorologiques.

Après l'analyse et la cartographie spatiale mensuelle et annuelles des paramètres bioclimatiques et du bilan hydrique dans les sous-bassins versants de la Medjerda, en utilisant la méthode de Thornthwaite et d'autres formules tels que Texeron-Berkaloff, plusieurs observations ont été émergé :

La zone d'étude est caractérisée par un climat semi-aride à aride englobant deux saisons distinctes. La première, humide, s'étend du début de novembre au début d'avril, marquée par une pluviosité significative et des températures faibles. La seconde sèche s'étalant de la fin du mai jusqu'au début d'octobre.

Au cours des cycles examinés le cycle relatif à l'année hydrologique (2010-2011), montre des précipitations annuelles maximales atteignant 923 mm, c'est le cas du SBV-12-01. Tandis que, les températures élevées sont enregistrées au cours de la saison estivale de juin à septembre avec un maximum atteignant 30°C au mois d'août.

L'évapotranspiration potentielle dépasse les quantités de précipitations au cours des mois de mai et octobre de mai à octobre, caractérisée par une valeur maximale de 144 mm relatif au mois de mai 2011.

Le bilan hydrique, montre un déficit au cours de la période allant du mois de mars jusqu'au mois d'octobre, influencé par le manque de précipitations, entraînant un accroissement de l'évapotranspiration produit par la hausse des températures. Durant la période pluvieuse donc humide, le bilan hydrique devient positif, d'où un excédent, atteignant son maximum au cours des mois de janvier et de février. Au-delà, commence la diminution jusqu'à sa disparition indiquant la fin de l'hiver.

La reconstitution de la réserve facilement utilisable (RFU), reste tributaire du taux de précipitations. Elle commence à augmenter à partir du mois d'octobre pour l'année 2010, au mois de novembre pour l'année 2020 et au mois de décembre au cours de l'année 2000. Le

maximum (100 mm) est atteint au mois de janvier et de février, ce maximum se maintient jusqu'au mois d'avril. Ensuite la RFU décroît à partir du mois de mai, l'épuisement total à lieu au mois de juin. Indiquant le début du déficit agricole qui s'étale jusqu'à la fin du mois d'Octobre dans l'ensemble des sous-bassins versants.

Dans notre cas, les valeurs de la RFU, de l'excédent et de l'infiltration les plus importants ont été enregistrées au cours de l'année hydrologique (2010-2011), cela résulte de la pluviométrie importante enregistrée au cours de cette année. Par ailleurs la période allant de 2011 à 2020, est caractérisée par une baisse sensible des précipitations, se traduisant par un déséquilibre du bilan hydrique. C'est aussi le cas de la variation de l'infiltration efficace.

Les méthodes employées peuvent d'être généralisées et adaptées selon les conditions climatiques, topographiques ... à d'autres régions, et avec d'autres problématiques.



Chapitre IV

Cartographie du potentiel des eaux souterraines



Chapitre IV. Cartographie du potentiel des eaux souterraines

1. Introduction

La disponibilité des eaux souterraines en quantité suffisante et en qualité acceptable, conditionne tout projet de développement d'une nation. Ces eaux restent utilisables dans tous les domaines de vie de tous les jours, tel que l'approvisionnement en eau potable, l'irrigation agricole et le développement industriel. Afin de concevoir des projets de développement on doit d'abord assurer une sécurité de l'eau dans la région cible.

La zone d'étude est située en région Méditerranéenne, zone à climat et géologie très contrastée influençant les possibilités aquifères environnant. Par ailleurs la croissance démographique accélère la demande en eau et entraîne une surexploitation des nappes.

Comme remarqué dans le chapitre précédent, d'autres paramètres tel que la lithologie, la géologie, le système de drainage, le type de sol, les caractéristiques des linéaments, la géomorphologie, la topographie, la pente, le climat local, ... agissent sur les variations du potentiel hydrique et la délimitation des zones potentielles d'eaux souterraines dans la région.

Pour réaliser notre travail, nous avons opté pour une méthode multicritères dite (MCDM), qui est sélective. Pour rappel, les techniques MCDM ont été introduites dans des études antérieures pour la cartographie du potentiel des eaux souterraines (Solomon & Quiel, 2003).

Ces techniques comprennent :

- la technique du rapport de fréquence (FR),
- la technique du facteur de certitude (CF),
- la technique des éléments de preuve (WOE),
- la Technique de Dempster-Shafer (DS),
- l'utilisation d'indices de logique floue, l'utilisation de facteurs multi-influenceurs (MIF),
- la méthode du processus de hiérarchie analytique (AHP) et la méthode du processus de hiérarchie analytique floue (Fuzzy-AHP).

L'efficacité de ces techniques dépend des données scientifiques disponibles. De plus, les approches MCDM se révèlent moins chronophages et plus économiques par rapport aux méthodes classiques telles que les tests de forages, les études stratigraphiques et les analyses des caractéristiques hydrauliques. Bien que ces méthodes classiques soient efficaces et fiables, elles sont extrêmement coûteuses et prennent beaucoup de temps (Todd, 1980).

L'approche AHP-floue, peut être utilisée pour cartographier le potentiel des eaux souterraines (Srivastava & Bhattacharya, 2006). Cependant, cette technique n'a pas été testée en Algérie.

Pour rappel, le bassin hydrographique transfrontalier e la Medjerda (MRB) occupe une partie

du nord-est Algérien et est situé dans une zone située au nord-ouest de la Tunisie, il s'étale sur une superficie active de 23 700 km².

Ce bassin, est une zone agricole, l'agriculture, représente 40 à 70 % du produit intérieur brut des pays MRB (FAO, 2018). A l'instar de tout le pays, se pose les problèmes relatifs à la forte croissance démographique, au développement agricole et aux activités industrielles de ce fait le bassin subit une pression croissante sur les ressources en eau. Afin de gérer efficacement cette ressource, il est impératif d'évaluer les potentialités en eaux souterraines dans le BVM. Les études réalisées à l'échelle mondiale ont utilisé les données de productivités des puits d'eaux souterraines mesurées sur terrain, ainsi que de la courbe des caractéristiques de fonctionnement (ROC), y compris notre étude sur le SBV de la Medjerda (Bouklab et al., 2022). Pour le présent travail, nous avons opté pour une autre méthode basée sur les données des résultats de la cartographie du bilan hydrique et du SIG en construisant une matrice validée par l'indice de Kappa. L'objectif est de développer des stratégies d'évaluation d'impact et de gestion durable des ressources en eaux souterraines, assurant ainsi le maintien des caractéristiques quantitatives et qualitatives de ces ressources précieuses. Dans cette partie, on aborde les facteurs conditionnant, présente la création de la carte finale du potentiel des eaux souterraines, et propose en conclusion des orientations générales pour l'élaboration de stratégies visant une meilleure gestion des ressources en eaux souterraines et des facteurs associés.

2. Matériels et méthodes :

Pour cartographier le potentiel en eaux souterraines, nous avons suivi la méthode de Youcef Razandi et al. (2015), cette dernière se base sur les trois étapes suivantes (fig.52) :

a-préparation de la base de données (couches thématiques sous format raster) pour les différents facteurs influençant le potentiel en eaux souterraines. Une base de données environnementale SIG a été construite à partir de sources de données locales et publiques disponibles. Les données collectées et traitées pour sept facteurs thématiques sont :

- le potentiel en eaux souterraines, à savoir (1)
- le type de sol, (2),
- la géologie et la lithologie, (3),
- les précipitations, (4),
- la pente, (5),
- la densité des linéaments, (6),
- l'utilisation des terres /la couverture végétale, et la densité de drainage (7).

Le Tableau suivant N°26, décrit les sources de tous les facteurs sélectionnés.

Tableau 26. Sources de données pour la mise en œuvre du modèle GWP.

Facteurs	Sources
Sol	La carte des sols de l'Algérie, collectée auprès du Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural (MADR)
Géologie	Cartes géologiques de l'Algérie à une échelle de 1/250 000, collectées auprès de l'Agence Nationale des Ressources en Eau (ANRH 2008)
Précipitation	Données mensuelles de précipitations moyennes, collectées auprès des stations météorologiques de la région de Souk Ahras (1990-2019)
Pente	Données topographiques, collectées à partir de la mission de topographie radar de la NASA (SRTM) avec une résolution de 30 m
Densité de Linéaments	-Images satellites Landsat 8- OLI (résolution de 30 m), téléchargées depuis le site web du United States Geological Survey (USGS 2021). -Cartes géologiques de l'Algérie à une échelle de 1/250 000, collectées auprès de l'Agence Nationale des Ressources en Eau (ANRH 2008)
Occupation du sol	-Images satellites Landsat 8-OLI (résolution de 30 m), téléchargées depuis le site web du United States Geological Survey (USGS 2021). -Images Google Earth haute résolution (2021).
Densité de drainage	Extraite des images SRTM à partir le réseau hydrographique

b- L'analyse de la relation entre les facteurs influençant le stockage des eaux souterraines, à partir d'une méthode multicritère (MCDM) basée sur l'AHP flou, a été mise en place pour déterminer les poids des différents facteurs influençant le potentiel en eaux souterraines. Ces poids déterminés sont intégrés dans un modèle SIG pour cartographier le potentiel en eaux souterraines.

c- La validation de la carte du potentiel en utilisant les données des résultats de la cartographie du bilan hydrique. Pour valider la carte des potentiels les données de l'infiltration spatiale ont été utilisées. Une matrice a été établie, et l'indice de Kappa a été calculé pour valider la matrice et la carte du potentiel en eaux souterraines.

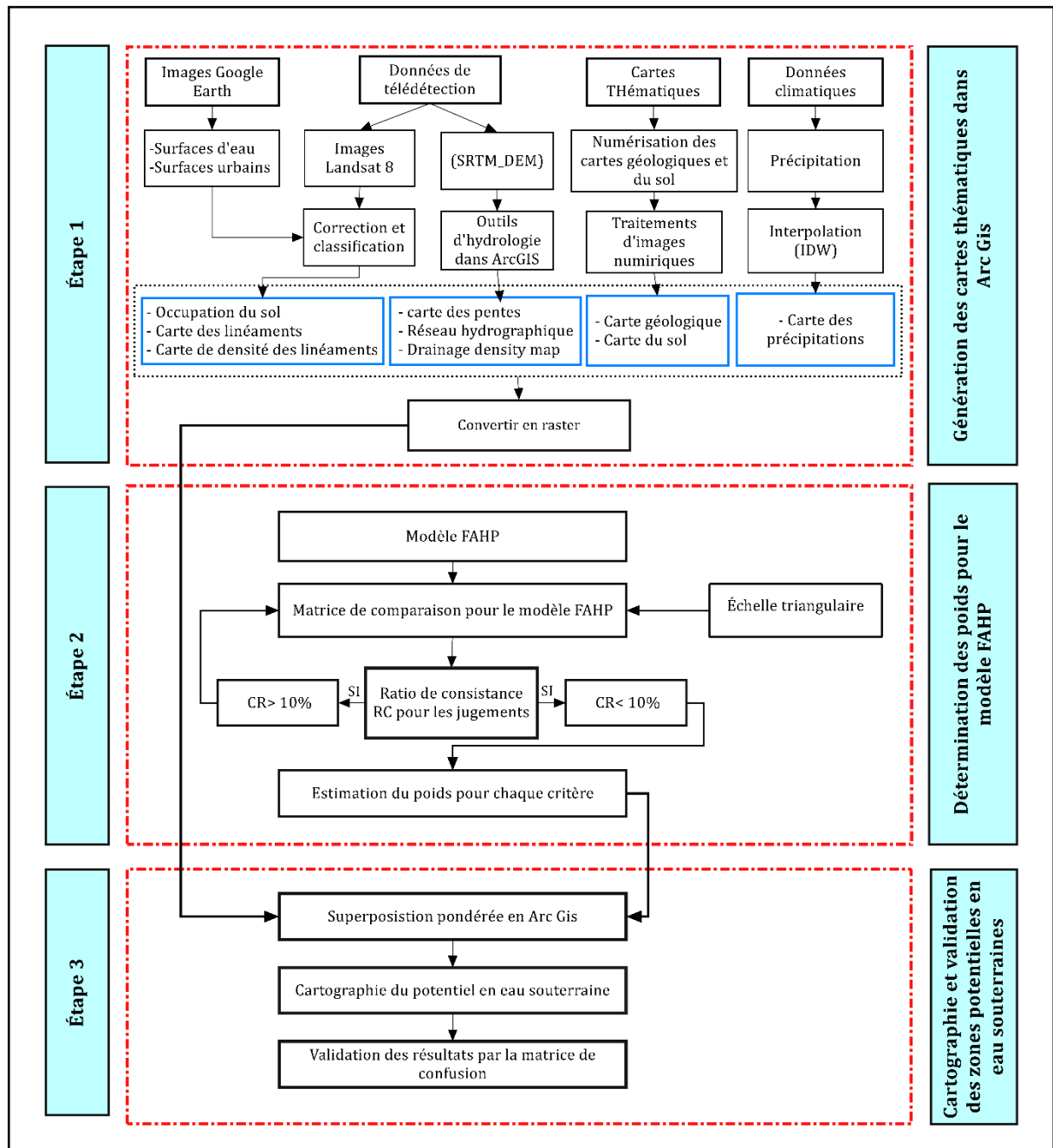


Figure 52. Organigramme de la méthodologie

2.1. Préparation des données :

Le Tableau 26, montre les sources de données et les méthodes de traitement utilisées pour chaque facteur. La carte des sols a été acquise auprès du ministère de l'Agriculture et du Développement rural de l'Algérie (MADR), puis soumise à la numérisation, à la rectification, à la rasterisation et à la reclassification. Un total de sept types de sols a été pris en compte. La carte lithologique, provenant de la carte géologique de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) en Algérie à une échelle de 1/250 000, a été convertie de PDF en images, numérisée et rasterisée à l'aide d'ArcGIS 10.8. Les données mensuelles de précipitations ont été collectées à partir de six stations de pluie situées dans la zone d'étude, gérées par le service

météorologique de Souk Ahras et des autres wilayas limitrophes. Ces données mensuelles ont été agrégées pour obtenir des données de précipitations annuelles moyennes de 1991 à 2020. La méthode d'interpolation par distance inverse dans ArcGIS 10.8 a été utilisée pour créer une carte de précipitations. Les images SRTM du portail de données Earth Explorer de l'USGS ont facilité l'extraction des données de pente et du réseau hydrographique pour la zone d'étude. La carte de densité de drainage a ensuite été dérivée de la carte du réseau hydrographique traitée. La carte d'occupation du sol a été construite à l'aide d'images satellites Landsat 8 obtenues sur le site Web de l'United States Geological Survey (USGS). Après l'amélioration du contraste, les corrections radiométriques et atmosphériques, une classification supervisée avec des échantillons d'entraînement a été réalisée pour délimiter les différentes classes d'occupation du sol. Le traitement des images Landsat 8 a été effectué dans le logiciel ENVI 5.3. Utilisant les mêmes images Landsat 8, la carte des linéaments a été générée. Conformément à (Yassaghi, 2006; Mogaji et al., 2011), les linéaments extraits des images satellites peuvent inclure des éléments de surface non géologiques tels que des routes, des câbles électriques, des limites de forêts et des zones agricoles. Pour éliminer ces éléments, une comparaison des linéaments a été effectuée par rapport aux éléments observés dans des images haute résolution de Google Earth. La carte finale des linéaments a été obtenue en fusionnant les lignes extraites des images satellites (Landsat 8) avec les linéaments de la carte géologique. La carte de densité de linéaments a été produite en traitant directement la carte de linéaments avec l'option de densité de lignes dans ArcGIS. Toutes les données spatiales ont été converties en un format raster d'une résolution de 30 m et géoréférencées dans le système de coordonnées WGS 1984 UTM zone 32.

2.2. La méthode Fuzzy AHP

Cette méthode présente certains avantages tels que la facilité de calcul et garantit une solution unique (Emrouznejad and William, 2017). Afin de vérifier l'efficacité de la méthode de la moyenne géométrique et des nombres flous triangulaires, nous avons intégré la dernière étape de la méthode AHP (calcul de l'indice de cohérence) pour prouver l'existence d'un degré élevé de précision et de cohérence lors de la réalisation de comparaisons par paires entre les différents facteurs influençant le potentiel en eaux souterraines. Le fuzzy-AHP peut être résumé en quatre étapes (Fig. 53).

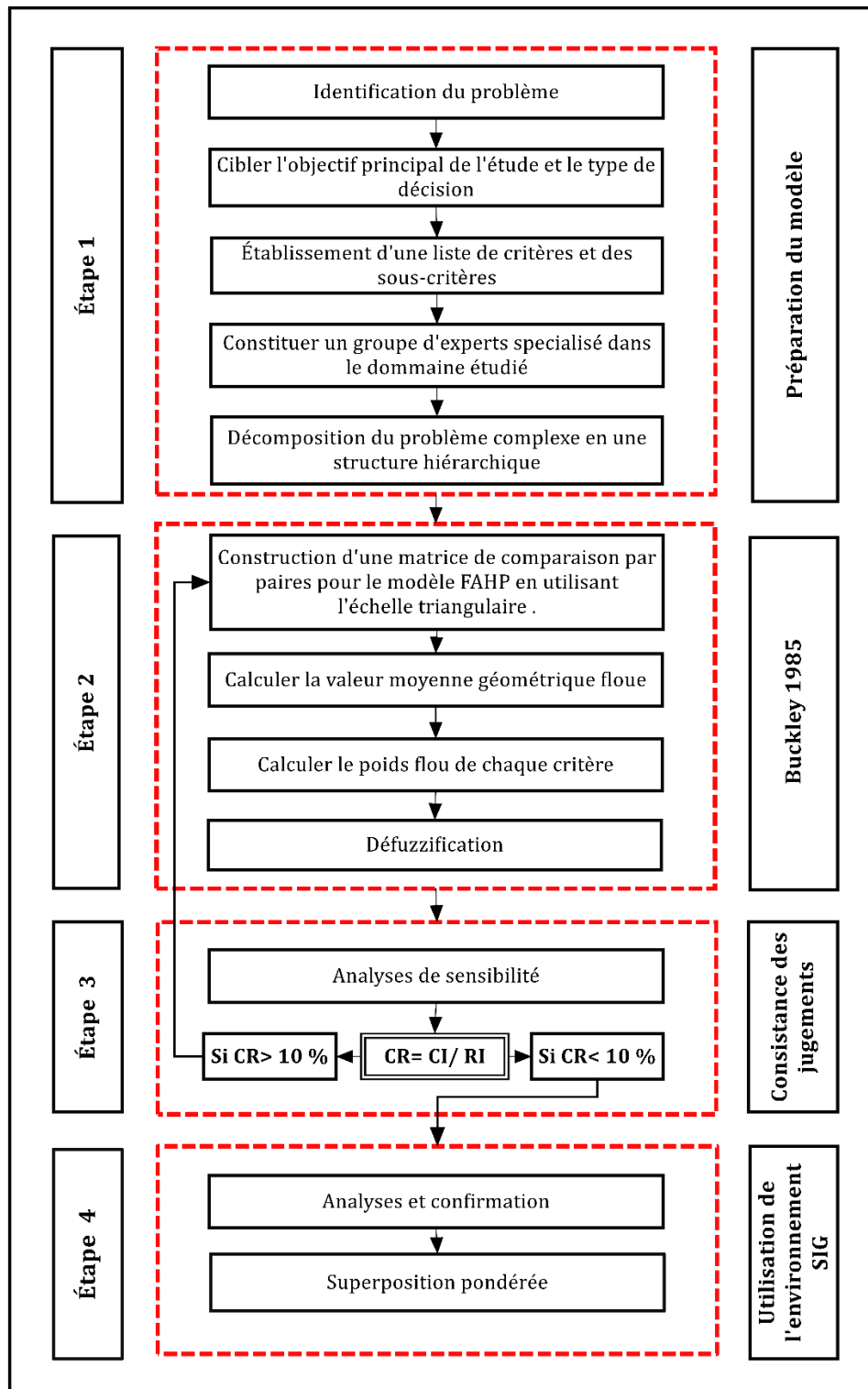


Figure 53. Structure de la méthode FAHP.

2.2.1. Établissement de la matrice floue de comparaison par paires :

Dans le cas du présent bassin versant, le potentiel en eaux souterraines est influencé par sept facteurs environnementaux. L'importance de chaque facteur est évaluée par la méthode fuzzy-AHP. Dans cette approche, chaque facteur est comparé à tous les autres facteurs à l'aide de nombres flous triangulaires (NFT) et de variables linguistiques correspondantes pour représenter le degré d'importance des jugements.

Les clés utilisées dans cette comparaison sont données dans le Tableau 27. Des matrices de comparaison ont été formées entre les facteurs sélectionnés ainsi qu'entre leurs classes pour déterminer l'étendue de leur influence sur le potentiel en eaux souterraines. Pour obtenir moins d'incertitude et des résultats précis, il est nécessaire d'assurer la cohérence entre les différents jugements d'experts. Pour garantir cette cohérence, chaque expert a donc reçu un rapport détaillé, comprenant une description du problème, ainsi que les facteurs qui y contribuent. En fin de compte, la prise de décision et la réalisation des matrices ont nécessité la collaboration collective des experts afin que chacun puisse expliquer et défendre ses choix pour réduire le degré d'incertitude et obtenir des résultats très précis et cohérents (Bouklab et al., 2022).

La matrice de comparaison par paires $\tilde{D} = [\tilde{a}_{ij}]$ est élaborée comme suit :

$$\tilde{D} = \begin{bmatrix} (1,1,1) & \tilde{a}_{12} & \dots & \tilde{a}_{1n} \\ \tilde{a}_{21} & (1,1,1) & \dots & \tilde{a}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{a}_{n1} & \tilde{a}_{n2} & \dots & (1,1,1) \end{bmatrix}$$

Tel que : $\tilde{a}_{ij} \otimes \tilde{a}_{ij} \approx 1$ and $\tilde{a}_{ij} \cong \frac{w_i}{w_j}, i, j = 1, 2, \dots, n$.

Tableau 27. Variables linguistiques pour la comparaison par paire.

Variables linguistiques	Nombres triangulaires flous	Nombres triangulaires réciproques flous	Explication
Importance égale	(1,1,1)	(1,1,1)	Influence égale de deux critères sur l'objectif
Importance modérée	(2,3,4)	(1/4,1/3,1/2)	Le jugement favorise légèrement l'influence d'un facteur sur un autre.
Importance forte	(4,5,6)	(1/6,1/5,1/4)	Le jugement favorise fortement l'influence d'un facteur sur un autre.
Importance très forte	(6,7,8)	(1/8,1/7,1/6)	Le jugement favorise très fortement l'influence d'un facteur sur un autre.
Importance Extrême	(9,9,9)	(1/9,1/9,1/9)	Un facteur extrêmement important par rapport à un autre.
Valeurs intermédiaires	(3,4,5) (5,6,7) (7,8,9)	(1/5,1/4,1/3) (1/7,1/6,1/5) (1/9,1/8,1/7)	Comparaison exacte entre deux facteurs.

Généralement, seuls les entiers (1, 1, 1), (2, 3, 4), (4, 5, 6), (6, 7, 8), et (9, 9, 9) sont utilisés pour exprimer le degré de comparaison. Selon Van Laarhoven et Pedrycz (1983), les valeurs

intermédiaires (1, 2, 3), (5, 6, 7), et (7, 8, 9) peuvent être sélectionnées dans le cas où des comparaisons plus détaillées sont nécessaires.

- Calculer la moyenne floue pour chaque critère

La valeur moyenne géométrique floue r pour chaque critère i est calculée comme suit :

$$\tilde{r}_i = (\tilde{a}_{i1} \otimes \tilde{a}_{i2} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{in})^{1/n} \text{ [Eq. 2]}$$

- Calcul de la pondération floue pour chaque critère.

Le poids flou \tilde{w}_i pour chaque critère i est calculé comme suit :

$$\tilde{w}_i = \tilde{r}_i \otimes (\tilde{r}_1 + \tilde{r}_2 + \dots + \tilde{r}_n)^{-1} \text{ [Eq. 3]}$$

- Calculer le poids flou pour chaque critère

Le poids flou \tilde{w}_i pour chaque critère i est calculé comme suit :

$$\tilde{w}_i = \tilde{r}_i \otimes (\tilde{r}_1 + \tilde{r}_2 + \dots + \tilde{r}_n)^{-1} \text{ [Eq. 4]}$$

$$\text{Tel que : } \tilde{r}_k = (l_k, m_k, u_k) \text{ and } (\tilde{r}_k)^{-1} = (1/u_k, 1/m_k, 1/l_k).$$

- Défuzzification des poids flous

Les poids flous $\tilde{w}_i = (l_i, m_i, u_i)$ sont défuzzifiés par la méthode du centre de la zone comme suit (Buckley, 1985; Tzeng & Huang, 2011) :

$$\tilde{w}_i = \frac{l_i + m_i + u_i}{3} \text{ [Eq. 4]}$$

- Cohérence des jugements :

Déterminer la priorité de chacun de ces sept facteurs conditionnant les eaux souterraines à l'aide de jugements subjectifs peut entraîner une incertitude en raison de l'incohérence entre les jugements. Il est donc nécessaire de vérifier le degré de cohérence en calculant le rapport CR (Thomas L. Saaty, 2004). Ce rapport est calculé comme suit :

$$CR = \frac{IC}{RI} \text{ [Eq. 5]}$$

Où IC représente l'indice de cohérence calculé par :

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \text{ [Eq. 6]}$$

Où λ_{\max} est la plus grande valeur propre de la matrice de comparaison et n , le nombre de critères comparés. RI est appelé indice de ratio aléatoire. Sa valeur est donnée en fonction du nombre de critères n (Tableau 3).

Tableau 3. Indice aléatoire d'incohérence (RI) pour différentes valeurs de n (Saaty, 1980).

Tableau 28. Indice aléatoire d'incohérence (RI) pour différentes valeurs de n (Saaty, 1980).

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35	1.40	1.45	1.49

Selon Saaty (1980), le rapport CR doit être inférieur à 10%. Si la valeur de CR < 10%, l'incohérence est négligeable et le jugement subjectif est acceptable. Cependant, si la valeur de CR > 10%, les jugements de la matrice de comparaison doivent être soigneusement vérifiés, et une nouvelle comparaison doit être établie.

2.2.2. Combinaison des méthodes MCDM avec le système d'information géographique SIG

- Pondération et classification des critères

La détermination des poids des sept facteurs choisis pour évaluer le potentiel des eaux souterraines dépend des résultats des matrices de comparaison (Gumma & Pavelic, 2013). La classification de chaque facteur est basée sur le calcul du poids de ses sous-classes, car l'influence et l'importance des sous-classes varient d'une classe à l'autre.

Le poids de chaque classe a également été calculé en utilisant des matrices de comparaison entre elles. Le classement de chaque classe est donné en fonction du poids obtenu à partir du degré de leur influence sur le potentiel des eaux souterraines (Shaban et al., 2006), en utilisant une échelle d'importance de 1 à 9, où la valeur 9 représente une importance maximale pour la recharge des eaux souterraines, tandis que la valeur 1 représente la plus faible importance. Toutes les comparaisons entre les facteurs et ces classes ont été faites sur la base des résultats des experts.

- Indice du potentiel en eau souterraine (GWPI)

La technique de combinaison linéaire pondérée (WLC) (Malczewski, 2000) a été utilisée pour calculer l'indice du potentiel des eaux souterraines, en utilisant les différentes couches thématiques, le poids standard de chaque facteur et le rang de chaque classe comme suit :

$$GWPI = \sum_{t=1}^m (Wt \times X_f) \quad [\text{Eq. 7}]$$

Où, (Wt) représente le poids de chaque facteur conditionnant les eaux souterraines ; (X_f) représente le rang de chaque classe pour chaque facteur ; (m) représente le nombre total de facteurs. L'équation finale du potentiel des eaux souterraines pour notre cas est donnée par la formule suivante :

$$GWPI = Pd_w Pd_r + G_w G_r + Rf_w Rf_r + S_w S_r + Dl_w Dl_r + Lu/c_w L(u/c)_r + Dd_w Dd_r \quad [\text{Eq.8}]$$

Où (Pd) représente les types de sols ; (G) la géologie ; (Rf) les précipitations ; (S) la pente ; (DI) la densité des linéaments ; (L(u/c)) l'utilisation des terres/la couverture végétale ; (Dd) la densité de drainage ; (w) le poids de chaque facteur ; et (r) le rang de chaque classe.

2.3. Validation des résultats

La validation des résultats est l'une des processus très importantes dans la plupart des domaines scientifiques car elle ajoute une importance scientifique et une plus grande confiance aux résultats (Chung & Fabbri, 2004; Rahmati et al., 2015). Dans notre cas, nous utilisons les données issues des résultats du troisième chapitre, portant sur la cartographie du bilan hydrique, afin d'évaluer la validité du modèle GWP.

Cette matrice représente la relation entre les différentes classes du potentiel identifiées par le modèle FAHP et les valeurs d'infiltration du sol à l'échelle spatiale. Dans notre cas, l'utilisation de cette matrice de confusion nous a permis d'évaluer la précision de la classification des zones potentielles en eau souterraine effectuée par le modèle FAHP.

Enfin, l'indice de Kappa fournit une mesure globale de la performance sur tous les seuils de classification possibles. Il mesure la discrimination, c'est-à-dire la capacité du modèle à classer correctement les zones de fort et de faible potentiel. Plus sa valeur augmente, plus la probabilité que les résultats de la classification soient corrects. Si sa valeur est inférieure à 50, cela signifie que tous les résultats de la classification sont modérés.

3. Résultats et discussions

3.1. Analyses de facteurs sélectionnés

3.1.1. La pente

Les poids et le classement du facteur de pente ont été établis sur la base de leur influence perçue sur l'infiltration et la recharge des eaux souterraines. La classe de pente très élevée (>25 %) a reçu un poids très faible (0,03) et donc un rang très bas (1). Cela indique que cette classe est défavorable à l'infiltration et favorise le ruissellement en surface. La valeur de rang la plus élevée (9) a été attribuée aux classes de pente faible qui permettent une importante infiltration des eaux souterraines et un faible ruissellement. Elle influence la vitesse, la direction et l'infiltration des eaux. La variation spatiale de la pente est à l'origine de la différence des eaux infiltrées et par conséquent la recharge des réservoirs d'eau souterraine. En nous basant sur une étude géo-pédologique réalisée par l'Agence nationale des ressources en eau (ANRH 2009) sur la zone d'étude, la carte de pente montre cinq classes, allant de la très faible à très forte, comme donné dans la répartition suivante :

- 0 – 6 % (très faible),
- 6 – 12 % (faible),

- 12 – 18 % (modérée),
- 18 – 25 % (élevée)
- > 25 % (très élevée).

La carte des pentes (Fig.52), conduit aux constatations suivantes, les zones caractérisées par des pentes très faibles allant de 0–6 % couvrent 3 691,37 km², soit 47,40 % de la superficie totale du bassin versant. On suppose que cette classe est propice à l'infiltration, d'où un réel potentiel pour le développement agricole (ANRH 2009). C'est le cas des plaines de Taoura, Mdaorouch, Mellegue et de Meskiana au niveau de la zone d'étude. Les pentes supérieures très élevées (>25 %), occupent environ de 736,7 km², soit 9,46 % de la surface totale et correspondent aux complexes montagneux entourant la zone d'étude. Ces zones sont souvent recouvertes de massifs forestiers.

Tableau 29. Matrice de comparaison et valeurs de pondération pour la pente.

La pente (%)	A	B	C	D	E	Poids normalisé
A	(1,11)	(2,3,4)	(4,5,6)	(6,7,8)	(9,9,9)	0,497
B	(1/4,1/3, 1/2)	(1,1,1)	(2,3,4)	(6,7,8)	(6,7,8)	0,281
C	(1/6,1/5,1/4)	(1/4,1/3,1/2)	(1,1,1)	(2,3,4)	(4,5,6)	0,130
D	(1/8,1/7,1/6)	(1/8,1/7,1/6)	(1/4,1/3,1/2)	(1,1,1)	(2,3,4)	0,060
E	(1/9,1/9 1/9)	(1/8,1/7,1/6)	(1/6,1/5,1/4)	(1/4,1/3,1/2)	(1,1,1)	0,033
A (0-6), B (6-12), C (12-18), D (18-25), E (>25)						

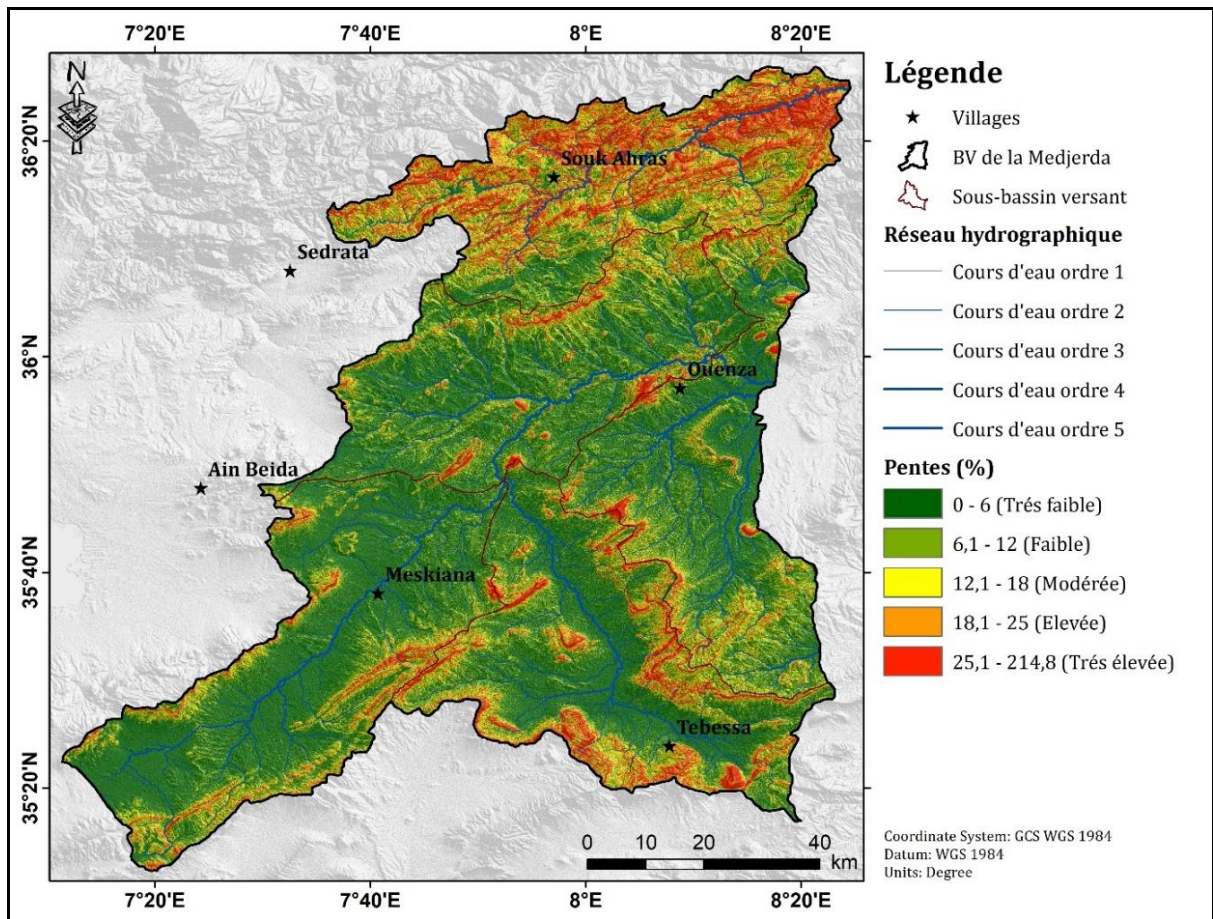


Figure 54. Carte des pentes.

3.1.2. Densité de drainage « Dd »

La densité de drainage, correspond au rapport de la longueur totale des cours d'eau L d'un bassin versant à la superficie totale (A) du même bassin : $Dd = (\sum L)/A$, exprimé en km/km^2 . La carte de densité de drainage (Fig. 53), montre cinq catégories : 0–0,34 (très faible), 0,34–0,68 (faible), 0,69–0,98 (modérée), 0,99–1,30 (élevée), et 1,31–2,34 (très élevée).

Près de 50 % de la superficie totale présente une très bonne densité de drainage.

Tableau 30. Matrice de comparaison et valeurs de pondération pour la pente.

Densité de drainage	A	B	C	D	E	Poids normalisé
A	(1,1,1)	(2,3,4)	(4,5,6)	(6,7,8)	(9,9,9)	0,50
B	(1/3,1/2,1)	(1,1,1)	(2,3,4)	(4,5,6)	(6,7,8)	0,26
C	(1/6,1/5,1/4)	(1/4,1/3,1/2)	(1,1,1)	(2,3,4)	(4,5,6)	0,13
D	(1/8,1/7,1/6)	(1/6,1/5,1/4)	(1/4,1/3,1/2)	(1,1,1)	(2,3,4)	0,06
E	(1/9,1/9,1/9)	(1/8,1/7,1/6)	(1/6,1/5,1/4)	(1/3,1/2,1)	(1,1,1)	0,03
A : (0-0.34), B : (0.34-0.68), C : (0.68-0.98), D : (0.98-1.30), E : (1.30-2.28)						

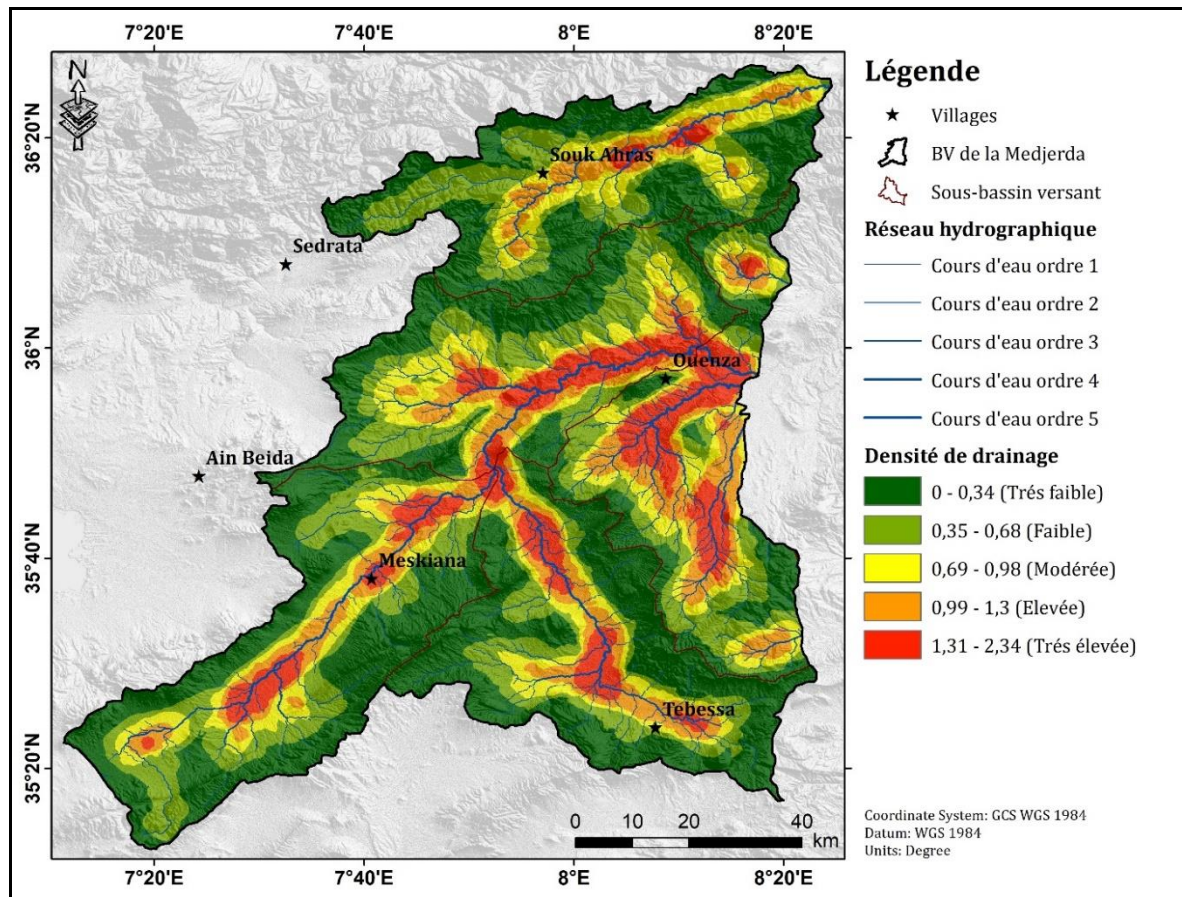


Figure 55. Carte de densité de drainage.

3.1.3. Lithologie

L'analyse de la carte correspondant à la lithologie finale (Fig. 56), montre la présence de formations géologiques très contrastées et très complexes allant du Trias les plus anciennes au quaternaire le plus récent caractérisé les formations alluviales. Après avoir analysé les caractéristiques pétro-physiques des formations géologiques, il a été attribué les poids suivants :

- les alluvions récentes du quaternaire, le poids le plus élevé (0,39) en raison de leur grande efficacité dans le stockage et le passage des eaux souterraines,
- les éboulis de pente (0,24) qui se caractérise par de grands pores augmentant la vitesse de la circulation de l'eau.
- les grès et les calcaires ont des poids moyens (respectivement 0,19 et 0,12).

Les autres formations géologiques ont des poids faibles, cela étant dû à leur faible contribution à la recharge et au remplissage des réservoirs d'eau souterraine.

Tableau 31. Matrice de comparaison et valeurs de pondération pour la pente.

Lt	A	B	C	D	E	F	G	H	I	Pn
A	(1,1,1)	(4,5,6)	(4,5,6)	(5,6,7)	(6,7,8)	(7,8,9)	(9,9,9)	(6,7,8)	(6,7,8)	0,397
B	(1/6, 1/5,1/4)	(1,1,1)	(2,3,4)	(4,5,6)	(6,7,8)	(6,7,8)	(6,7,8)	(6,7,8)	(6,7,8)	0,248
C	(1/5,1/5,1/4)	(1/4,1/3,1/2)	(1,1,1)	(4,5,6)	(5,6,7)	(6,7,8)	(9,9,9)	(7,8,9)	(4,5,6)	0,193
D	(1/7,1/6,1/5)	(1/6,1/5,1/4)	(1/6,1/5,1/4)	(1,1,1)	(4,5,6)	(6,7,8)	(7,8,9)	(6,7,8)	(6,7,8)	0,124
E	(1/8,1/7,1/6)	(1/8,1/7,1/6)	(1/7,1/6,1/5)	(1/6,1/5,1/4)	(1,1,1)	(4,5,6)	(4,5,6)	(1/4,1/4,1/2)	(1/4,1/3,1/2)	0,038
F	(1/9,1/8,1/7)	(1/8,1/7,1/6)	(1/8,1/7,1/6)	(1/8,1/7,1/6)	(1/6,1/5,1/4)	(1,1,1)	(456)	(1/4,1/3,1/2)	(1/4,1/3,1/2)	0,025
G	(1/9,1/9,1/9)	(1/8,1/7,1/6)	(1/9,1/9,1/9)	(1/9,1/8,1/7)	(1/6,1/5,1/4)	(1/6,1/5,1/4)	(1,1,1)	(1/7,1/6,1/5)	(1/7,1/6,1/5)	0,014
H	(1/8,1/7,1/6)	(1/8,1/7,1/6)	(1/9,1/8,1/7)	(1/8,1/7,1/6)	(2,3,4)	(2,3,4)	(5,6,7)	(1,1,1)	(1,2,3)	0,052
I	(1/8,1/7,1/6)	(1/8,1/7,1/6)	(1/6,1/5,1/4)	(2,3,4)	(2,3,4)	(5,6,7)	(5,6,7)	(1/3,1/2,1)	(1,1,1)	0,073

A : Alluvions récentes, B : Éboulis de pente, C : Grès, D : Calcaire, E : Marnes, F : Filons, G : Argiles, H : Couche numidienne, I : Gypse

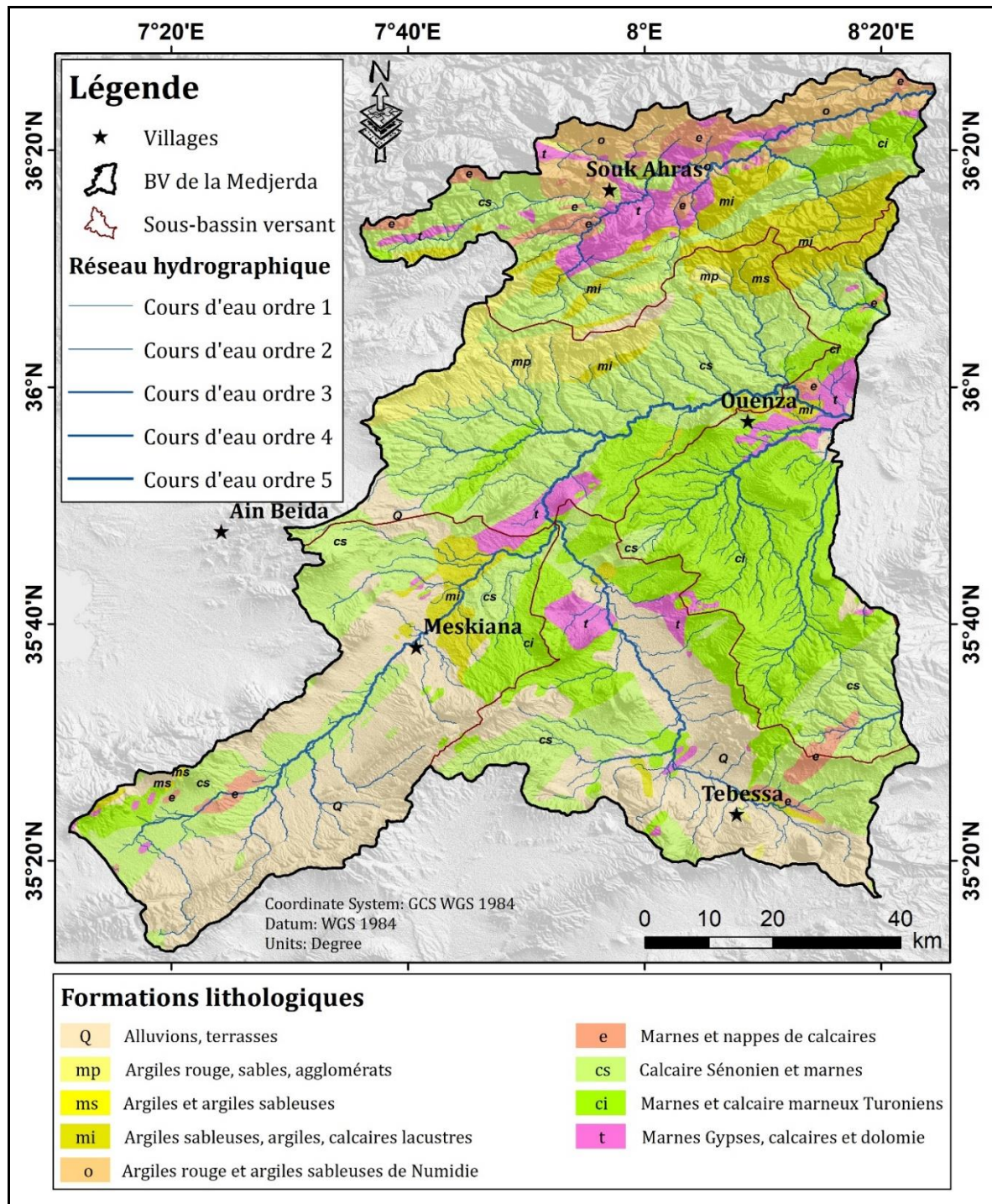


Figure 56. Carte lithologique du bassin versant de la Medjerda.

3.1.4. Densité de linéaments

La densité de linéaments désigne tous les alignements structuraux linéaires qui sont marqués sur les cartes géologiques ou topographiques. La carte de densité de linéaments (Fig. 55) montre cinq (5) classes, allant de très faible à très élevée avec des intervalles égaux. Les zones de très haute densité de fractures sont présentes au niveau de toutes les zones de captage qui sont situées au niveau des sous-bassins de la Medjerda (SBV-12-01), Mellegue amont (SBV-

12-04) et aval (SBV-12-05). Les zones de faible densité de linéaments sont présentes au niveau du sous-bassin de Meskiana (SBV-12-02) et se caractérisent par un faible poids (0,03).

Tableau 32. Matrice de comparaison et valeurs de pondération pour la précipitation.

Densité de linéaments	A	B	C	D	E	Poids normalisé
A	(1,1,1)	(1/4,1/3,1/2)	(1/6,1/5,1/4)	(1/8,1/7,1/6)	(1/8,1/7,1/6)	0,03
B	(2,3,4)	(1,1,1)	(1/4,1/3,1/2)	(1/6,1/5,1/4)	(1/8,1/7,1/6)	0,06
C	(4,5,6)	(2,3,4)	(1,1,1)	(1/4,1/3,1/2)	(1/4,1/3,1/2)	0,13
D	(6,7,8)	(4,5,6)	(2,3,4)	(1,1,1)	(2,3,4)	0,26
E	(6,7,8)	(6,7,8)	(2,3,4)	(1/4,1/3,1/2)	(1,1,1)	0,50

A : (0-0.48), B : (0.49-0.97), C : (0.98-1.50), D : (1.51-1.90), E : (1.91-2.38)

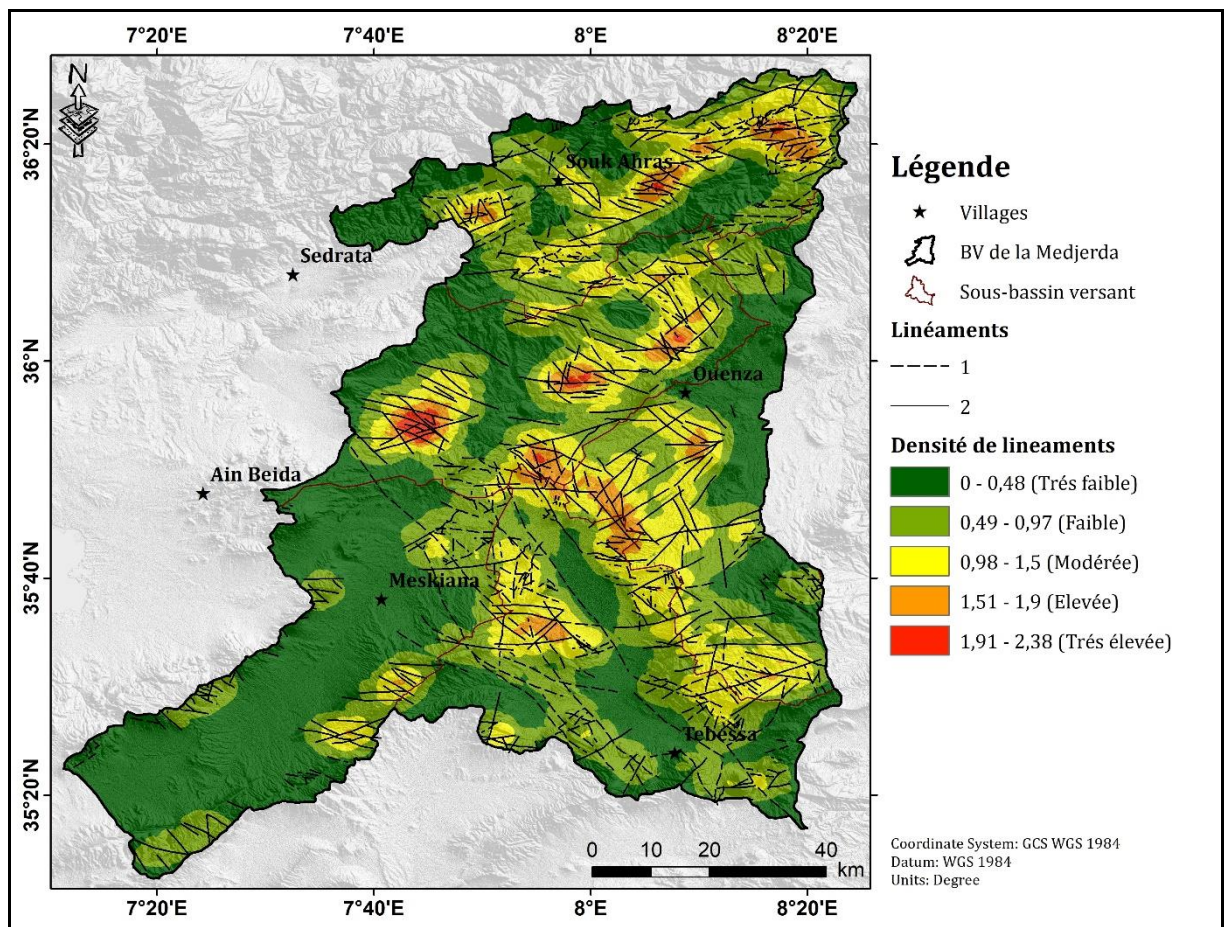


Figure 57. Carte de densité de linéaments.

3.1.5. La précipitation

L'observation de la carte des précipitations (Fig. 58), montre les cinq (05), classes suivantes :

- (1) avec une précipitation allant de 427 à 450 mm/an,
- (2) avec une précipitation allant de 451 à 500 mm/an,
- (3) avec une précipitation allant de 501 à 550 mm/an,
- (4) avec une précipitation allant de 551 à 600 mm/an

-(5) avec une précipitation allant de 601 à 650 mm/an.

Les précipitations moyennes annuelles au cours des trente dernières années (1991–2020) pour l'ensemble de la région sont de 600 mm/an. Les faibles précipitations sont enregistrées au niveau des parties sud et centre du sous-bassin de Meskiana (SBV-12-02) et du Chabro (SBV-12-03). Les zones Nord-est et Nord-ouest du sous-bassin de la Medjerda (SBV-12-01) reçoivent des précipitations plus abondantes, d'environ 650 mm/an. Un poids de 0,387 a été attribué au facteur des précipitations, illustrant ainsi son importance pour estimation du potentiel en eau souterraine.

Tableau 33. Matrice de comparaison et valeurs de pondération pour la précipitation.

Précipitation (mm)	A	B	C	D	E	Poids normalisé
A	(1,1,1)	(1/4,1/3,1/2)	(1/6,1/5,1/4)	(1/8, 1/7, 1/6)	(1/9,1/9,1/9)	0,033
B	(2,3,4)	(1,1,1)	(1/4, 1/3,1/2)	(1/6,1/5,1/4)	(1/8,1/7,1/6)	0,065
C	(4,5,6)	(2,3,4)	(1,1,1)	(1/4 ,1/3,1/2)	(1/6, 1/5,1/4)	0,132
D	(6,7,8)	(4,5,6)	(2,3,4)	(1,1, 1)	(1/4,1/3,1/2)	0,267
E	(9,9,9)	(6,7,8)	(4,5,6)	(2,3,4)	(1,1,1)	0,503

A (<560), B (560 -590), C (590-610), D (610-630), E (>630)

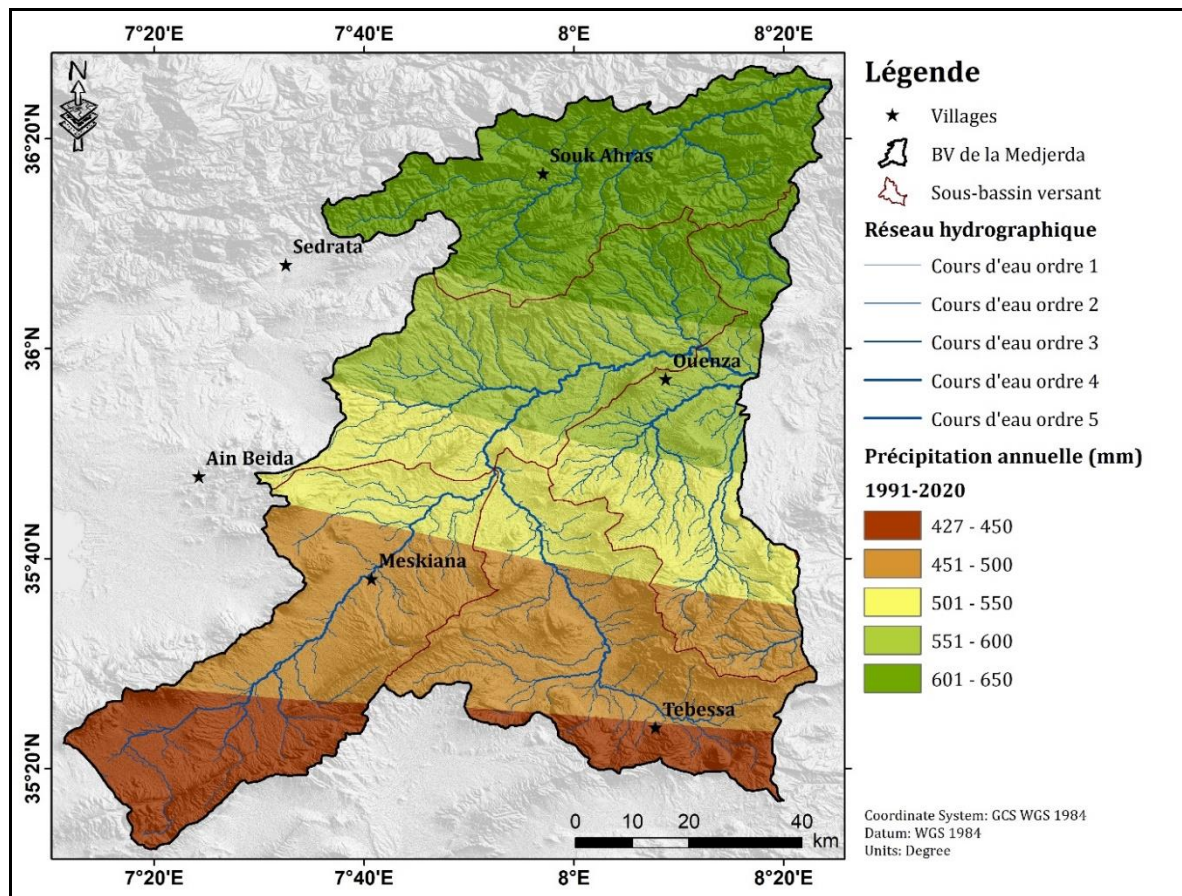


Figure 58. Carte des précipitations.

3.1.6. Occupation du sol

La carte (fig.59), relative au sol et à la couverture végétale montre les cinq classes suivantes :

- le sol, nu occupe 5 108,56 km² soit 65,60 %, correspond à plus que la moitié de la zone d'étude,
- les zones agricoles, occupent environ 1 634,55 km² soit 23 km².
- les forêts, occupent 10,36%,
- les zones urbaines occupent 2,80%,
- les surfaces d'eau avec 0,23%.

Le classement des classes LU/LC dans la carte du PES a été défini comme suit :

- les poids les plus élevés ont été attribués aux zones agricoles (0,53) et aux forêts (0,26) car elles favorisent l'infiltration et ralentissent l'écoulement en surface. Les zones urbaines ont un faible poids (0,04), car elles sont considérées comme un obstacle direct à l'infiltration des précipitations et empêchent ainsi la recharge des réservoirs d'eau souterraine (Mandal et al., 2016).

Tableau 34. Matrice de comparaison et valeurs de pondération pour l'occupation du sol.

Occupation du sol	A	B	C	D	E	Poids normalisé
A	(1,1,1)	(1/8,1/7,1/6)	(1/6,1/5,1/4)	(1/8,1/7,1/6)	(1,1,1)	0,034
B	(6,7,8)	(1,1,1)	(4,5,6)	(1/6,1/5,1/4)	(6,7,8)	0,322
C	(4,5,6)	(1/6,1/5,1/4)	(1,1,1)	(1/8,1/7,1/6)	(6,7,8)	0,133
D	(6,7,8)	(4,5,6)	(6,7,8)	(1,1,1)	(6,7,8)	0,482
E	(1,1,1)	(1/8,1/7,1/6)	(1/8,1/7,1/6)	(1/8,1/7,1/6)	(1,1,1)	0,029
A : Surfaces urbains, B : Foret, C :sol nu, D : surfaces agricoles, E : surfaces d'eau						

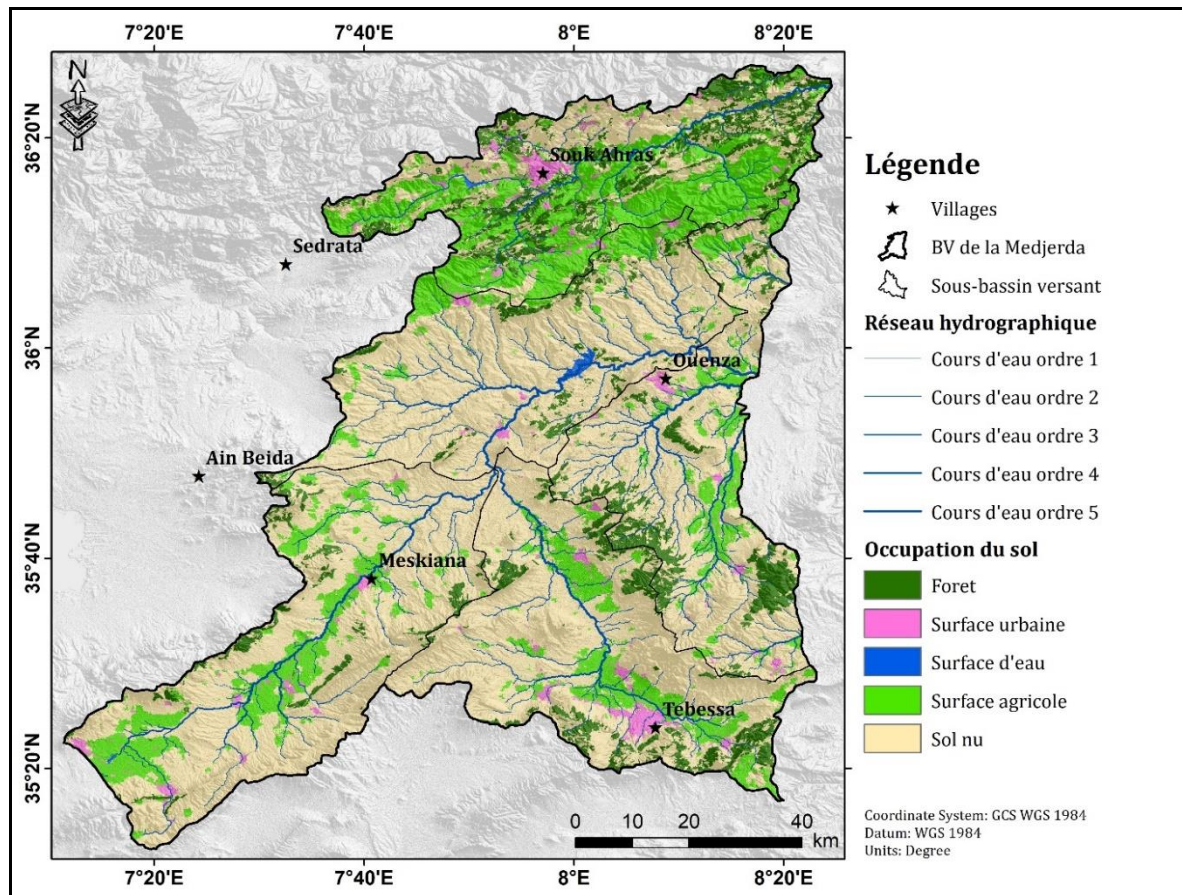


Figure 59. Carte d'occupation du sol.

3.1.7. Le sol

L'observation de la carte (Fig. 57) a permis l'identification de huit (08) classes à savoir :

-le sol calcique dominant, occupe (3 311,70 km², soit environ 42,52%), c'est presque la totalité du bassin versant.

-le sol calcaire humifère avec 2 932,22 km² soit 19,11%, occupe une partie importante, présent sur presque la totalité du SBV-12-01, précisément au niveau de la partie Sud-est de Souk Ahras, Merahna, et les communes voisines.

-les sols alluvions basiques occupent 938,67 km², soit 12,05 %, couvrent la partie sud au niveau des SBV12-02, et SBV 03, 05.

Les autres sols, comme les sols salins solonchak (sk), les sols de marais (m), les sols podzoliques (pq), les sols insaturés (i), et la roche mère (rm), sont présents mais occupent des surfaces petites. La surface occupée par chaque type de sols est de l'ordre de 5% et moins. À titre indicatif la roche mère, occupe 304,49 km², soit 3,9 %, le sol insaturé occupe 181,21 km², soit 2,3 %, le sol podzolique occupe 60,13 km², soit 0,8 %, le sol salin solonchak occupe 34,25 km², soit 0,43 % et enfin le sol de marais occupe 24,55 km², soit 0,31 % de la surface totale du bassin versant.

La comparaison, entre ces 7 classes de sol permis de calculer le poids de chaque classe en fonction du taux d'infiltration de chaque type de sol (Kumar et al., 2016).

Le sol non saturé a un poids élevé (0,35) en synergie avec son degré d'infiltration efficace, tandis que le solonchak a un poids faible de 0,035, indiquant un faible taux d'infiltration en raison de la texture très fine du sol solonchak (Legros, 2007).

Notons que les sols calcaires et calciques, en particulier, peuvent influencer les processus d'infiltration et la qualité de l'eau, tandis que les sols alluviaux basiques peuvent jouer un rôle clé dans la recharge des nappes phréatiques.

Tableau 35. Matrice de comparaison et valeurs de pondération pour l'occupation du sol.

Sols	A	B	C	D	E	F	G	Poids normalisé
A	(1,1,1)	(4,5,6)	(4,5,6)	(2,3,4)	(2,3,4)	(6,7,8)	(6,7,8)	0,353
B	(1/6,1/5,1/4)	(1,1,1)	(2,3,4)	(1/6,1/5,1/4)	(1/6,1/7,1/8)	(4,5,6)	(4,5,6)	0,083
C	(1/6,1/5,1/4)	(1/4,1/3,1/2)	(1,1,1)	(1/6,1/5,1/4)	(1/6,1/5,1/4)	(2,3,4)	(2,3,4)	0,056
D	(1/4,1/3,1/2)	(4,5,6)	(4,5,6)	(1,1,1)	(1/4,1/3,1/2)	(4,5,6)	(4,5,6)	0,176
E	(1/4,1/3,1/2)	(8,7,6)	(4,5,6)	(2,3,4)	(1,1,1)	(6,7,8)	(6,7,8)	0,271
F	(1/8,1/7,1/6)	(1/6,1/5,1/4)	(1/4,1/3,1/2)	(1/6,1/5,1/4)	(1/8,1/7,1/6)	(1,1,1)	(1/4,1/3,1/2)	0,026
G	(1/8,1/7,1/6)	(1/6,1/5,1/4)	(1/4,1/3,1/2)	(1/6,1/5,1/4)	(1/8,1/7,1/6)	(2,3,4)	(1,1,1)	0,035

A : Sols non saturés, B : Sols podzoliques, C : Roches mères, D : Sols calcaires, E : Sols calcaires, F : Solonetz, G : Solontchak

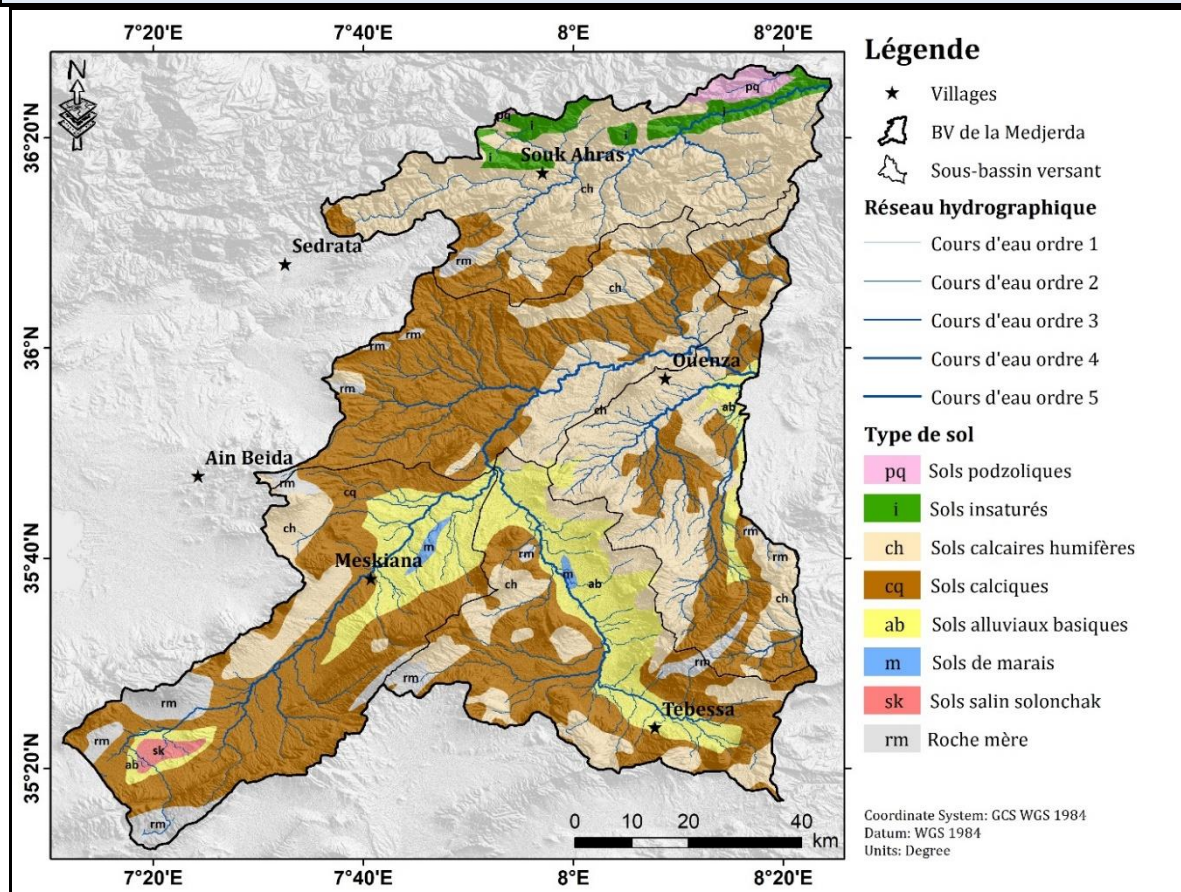


Figure 60. Carte des sols.

3.2. Implémentation de la méthode FAHP

Les valeurs de classement et de pondération des sous-classes au sein des facteurs, ainsi que les poids normalisés des facteurs pour le modèle FAHP, sont donnés dans le tableau 36 :

Tableau 36. Classement et valeurs de pondération des différents facteurs conditionnant le potentiel en eau souterraine.

Facteurs	Poids normalisés	Classes	Poids (FAHP)	Rang
Sol	0.12	Sol insaturée	0.353	7
		Sols alluviaux basiques	0.083	4
		Sols podzoliques	0.056	3
		Sols calciques	0.176	5
		Sols calcaires	0.271	6
		Sols salin Solontchak	0.026	1
		Sols de marais	0.035	2
Pente	0.084	Classe 1 (0-6)	0.497	9
		Classe 2 (6-12)	0.281	6
		Classe 3(12-18)	0.130	4
		Classe 4(18-25)	0.060	3
		Classe 5(>25)	0.033	1
Précipitation	0.32	Class 1 (<560)	0.035	1
		Classe 2 (560 -590)	0.255	2
		Classe 3 (590-610)	0.117	3
		Classe 4 (610-630)	0.453	4
		Classe 5 (>630)	0.139	5
Occupation du sol	0.089	Surfaces urbains	0.04	2
		Forêt	0.26	6
		Sols nus	0.12	4
		Surfaces agricoles	0.53	9
		Surfaces d'eau	0.29	1
Densité de Drainage	0.05	Classe 1(0-0,34)	0.471	9
		Classe 2 (0,34-0,68)	0.301	6
		Classe 3 (0,68-0,98)	0.134	4
		Classe 4 (0,98-1,30)	0.058	3
		Classe 5 (1,30-2,28)	0.036	1
Densité de Linéaments	0.19	Classe 1 (0-0,08)	0.037	3
		Classe 2 (0,08-0,24)	0.069	4
		Classe 3 (0,24-0,40)	0.158	5
		Classe 4 (0,40-0,65)	0.433	7
		Classe 5(>0,65)	0.303	9
Géologie	0.13	Les alluvions	0.397	9
		Les éboulis de pente	0.248	7
		Grès	0.193	5
		Calcaires	0.124	4
		Marnes	0.038	3
		Filons	0.025	2
		Argiles	0.014	1
		Couches numidiens	0.052	2
		Gypses	0.073	3

Le poids normalisé pondère tous les facteurs qui ont une influence sur le potentiel en eau souterraine. La pondération floue AHP représente le poids des sous-classes de chaque facteur. Elle représente l'importance de chaque sous-classe des principaux facteurs à l'aide d'une échelle de 1 à 9. Les valeurs de 5 à 9 donnent les classes de grande importance qui favorisent l'infiltration, la recharge des eaux souterraines et le stockage, tandis que les valeurs de 1 à 5 sont attribuées aux classes de faible à modérée importance et jouent donc un rôle défavorable dans la recharge des eaux souterraines.

Les résultats du Tableau 36, montrent que les précipitations sont le principal facteur contribuant au potentiel en eau souterraine d'où la valeur du poids reçu de 0.32. Après les précipitations la densité de linéaments (0,191), qui joue un rôle très important dans l'augmentation de la capacité d'infiltration et l'accélération de la vitesse d'écoulement des eaux souterraines. Le type de sol (0,12) est considéré comme le troisième facteur. Pour ce facteur, la classe de type de sol non saturé perméable reçoit un poids élevé (0,35) car ces types de sol influencent fortement le processus de recharge des réservoirs souterrains. En revanche, la classe de type de sol salin imperméable reçoit le poids le plus faible (0,02). En effet, les sols salins sont peu structurés et sont souvent caractérisés par une faible capacité d'infiltration. La géologie (0,13) est considérée comme le quatrième facteur le plus important pour le potentiel en eau souterraine, comme observé dans des études précédentes (Hussein et al., 2017) . L'utilisation des terres et la couverture végétale (0,089) ne sont que modérément importantes pour le potentiel en eau souterraine dans notre bassin versant. La pondération des sous-classes pour ce facteur est logique, avec l'attribution d'un faible poids aux surfaces urbaines, représentant un obstacle à l'infiltration. Les résultats montrent que la densité de drainage est un paramètre de peu d'importance par rapport aux autres facteurs, avec un poids de 0,05.

Tableau 37. Matrice de comparaison et valeurs de pondération pour tous les critères.

Critères	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	Poids normalisé
(1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1/4,1/3,1/2)	(2,3,4)	(1,1,1)	(1,1,1)	(2,3,4)	0,131
(2)	(1,11)	(1,1,1)	(1/4,1/3,1/2)	(1,1,1)	(1/4,1/3,1/2)	(2,3,4)	(2,3,4)	0,114
(3)	(2, 3,4)	(2,3,4)	(1,1,1)	(4,5,6)	(4,5,6)	(4,5,6)	(4,5,6)	0,387
(4)	(1/4,1/3,1/2)	(1/4,1/3,1/2)	(1/6,1/5,1/4)	(1,1,1)	(1/4,1/3,1/2)	(1,1,1)	(2,3,4)	0,078
(5)	(2,3,4)	(1,1,1)	(1/4,1/3,1/2)	(2,3,4)	(1,1,1)	(2,3,4)	(2,3,4)	0,168
(6)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1/4,1/3,1/2)	(1/4,1/3,1/2)	(1/4,1/3,1/2)	(1,1,1)	(2,3,4)	0,078
(7)	(1/4,1/3,1/2)	(1/4,1/3,1/2)	(1/4,1/3,1/2)	(1/4,1/3,1/2)	(1/4,1/3,1/2)	(1/4,1/3,1/2)	(1,1,1)	0,044

(1) : Sols, (2) : Géologie, (3) : précipitation, (4) : la pente, (5) : Densité de linéaments, (6) : occupation du sol, (7) : densité de drainage

3.3. Zones de potentiel en eau souterraine

La carte finale du potentiel en eau souterraine (Fig.61), montre trois catégories de zones à potentiel en eau souterraine différentes comme suit : faible, modérée, élevé.

La superficie occupée par la zone considérée à faible potentiel est présente dans tous les sous-bassins, elle est de 4 161,87 km², notons que 1 821,26 km², sont situés dans le SBV-12-02, soit 99.71 % de sa superficie totale.

Tableau 38. Répartition des classes du potentiel en eau souterraine dans les sous-bassins.

Classes	Surface (SBV-12-01)		Surface (SBV-12-02)		Surface (SBV-12-03)		Surface (SBV-12-04)		Surface (SBV-12-05)	
	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%
Faible	5,82	0,39	1821,26	99,71	1554,07	97,86	779,54	52,24	1018,99	73,94
Modérée	1047,73	69,94	5,23	0,29	33,92	2,14	616,90	41,34	320,96	23,29
Élevée	444,46	29,67	0,00	0,00	0,00	0,00	95,69	6,41	38,09	2,76
Total	1498,01	100,00	1826,49	100,00	1587,99	100,00	1492,13	100,00	1378,04	100,00

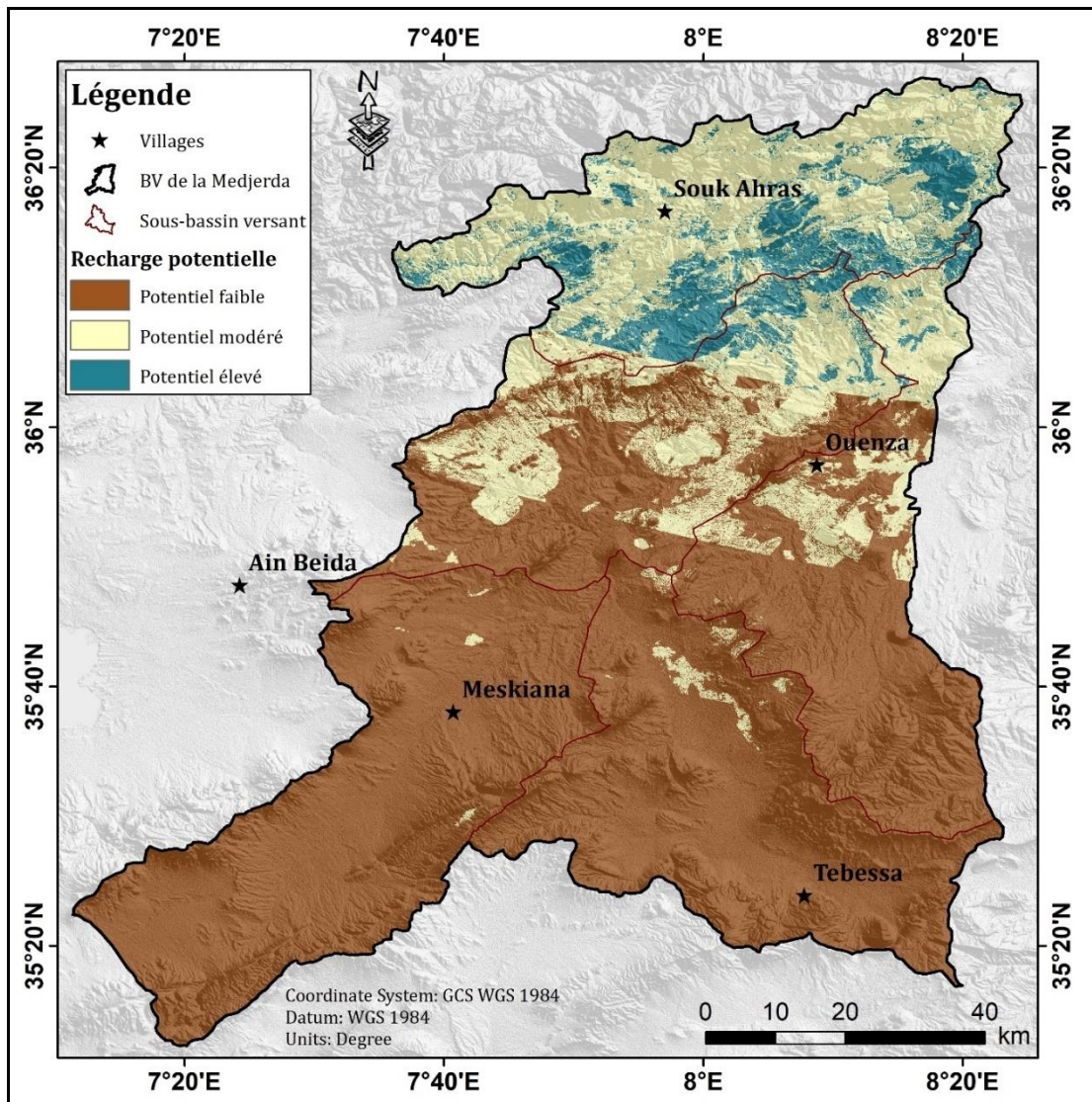


Figure 61. Carte du potentiel en eau souterraine.

La zone à potentiel modéré couvre une superficie d'environ 2 024,74 km² mais la surface la plus importante 1 047,73 km², se situe dans le SBV-12-01 et correspond à 69.94 % de la superficie totale de ce sous bassin. La zone de potentiel élevé, occupe une superficie de 608,21 km², soit 07,81 % de la superficie totale de la zone d'étude.

Les surfaces à fort potentiel en eau souterraine sont de 444,46 km² et de 95,69 km², sont principalement situées dans les (SBV-12-01, SBV-12-04) et correspondent à environ de 29.67 % et 06,41 % de leurs superficies spécifiques.

La carte du potentiel confirme les résultats obtenus dans le second chapitre, allant dans le sens que le SBV-12-01 est le plus approprié à la recharge et au stockage des eaux souterraines. Il est en synergie avec les résultats du troisième dans lequel on a démontré que les fortes valeurs de précipitations et de l'infiltration, sont les deux principaux facteurs responsables de la recharge des eaux souterraines.

L'analyse du SBV-12-01, met en évidence les deux classes modérée et élevée, caractérisant les plaines alluviales et les zones à densité de linéaments particulièrement élevée. Les zones de fort potentiel sont situées dans la partie Sud-est du (SBV-12-01), et sont à faible pente et ont un sol calcaire favorisant l'infiltration (Bouklab et al., 2022). Ces formations calcaires contiennent souvent des aquifères de plus grande extension.

La zone allant de M'Daourouch jusqu'aux frontières tunisiennes, se caractérise par des systèmes aquifères dispersés. Les zones urbaines et les zones triasiques riches en gypse et en sel, occupant le centre de la wilaya de Souk Ahras, sont considérées comme ayant un potentiel modéré en eau souterraine malgré leur faible degré d'infiltration, cela est due essentiellement aux teneurs élevées de précipitation qui caractérisent cette zone.

Le massif montagneux de la commune d'Ouled Moumen, au Nord-est de la wilaya de Souk Ahras, situé à 1100 mètres d'altitude, est considéré comme une zone de fort potentiel. Géologiquement, cette région est marquée par les calcaires du Turonien, favorisant l'infiltration d'une quantité importante d'eau à travers les fissures existantes. Les zones à fort potentiel, sont contenues dans des formations calcaires fissurées expliquant leur pérennité induite par une densité élevée de linéaments (Bouklab et al., 2022). Le Quaternaire des hautes plaines, constitués par des alluvions perméables et à faible pente sont souvent recouverts par croûte calcaire favorisant un écoulement significatif. Les pentes constituées de gros blocs ou fragments rocheux, présents au nord de la wilaya de Souk Ahras cas de la ville d'Ouled Driss, jouent également un rôle majeur dans la percolation de l'eau à travers les fissures vers les eaux souterraines. La région de Taoura, située à environ 20 km au Sud-est du SBV-12-01, appartient à la zone de potentiel élevé. Elle se caractérise par deux types d'aquifères :

- le premier contenu dans les calcaires fissurés et poreux du Campanien et du Maastrichtien, présentant une teneur en eau plus élevée ;
- le second contenu dans les argiles et les marnes du Plio-Quaternaire.

En conclusion, la variation spatiale du potentiel en eau souterraine dans le SBV-12-01 est fortement influencée par la structure géologique et la présence de fissures permettant une infiltration et un écoulement important d'eau souterraine. Les précipitations constituent la principale source de recharge des aquifères.

Le potentiel en eau souterraine du SBV-12-02, varie de faible à modéré. La classe faible la plus représentative, couvre 1 821.26 km² soit 99,71% de sa superficie totale, et est répartie sur presque l'intégralité de son territoire. En revanche, la classe modérée ne représente que 5,23 km² soit 0,29% de la superficie du sous-bassin. Celle de potentiel élevé représente zéro (0 %) et caractérise presque la totalité du SBV-12-02, dominé par les formations du pliocène

continental de très faible densité de fracturation. Ces mêmes classes se retrouvent dans le SBV-12-03, partageant ses limites avec le SBV-12-02 et à caractéristiques similaires.

Les SBV-12-04 et SBV-12-05, situés au Nord-est, montrent une diversité substantielle dans la disponibilité des ressources en eau souterraines. La catégorie faible occupe respectivement 7 79,54 km² et 1 018,99 km², soit 52,24 % et 73,94 %. Les zones à potentiel modéré couvrent respectivement des superficies de 616,90 km² et de 320,96 km², soit 41,34 et 23,29 %. Cette distribution spatiale, montre des zones où la recharge en eau souterraine est potentiellement faible est induite par la pédologie locale caractérisée par des sols calciques à faible porosité effective limitant l'infiltration des eaux de surface.

La classe du potentiel élevée, s'étend sur 95.69 Km² (6.41%) c'est-à-dire une faible portion du SBV-12-04, pour le SBV-12-05, elle occupe 38,09 km², représentant 2,76 % de sa superficie totale. Ces surfaces présentant un potentiel élevé indiquent des conditions hydrogéologiques relativement favorables à la recharge et au stockage de l'eau souterraine assurant ainsi sa disponibilité dans le futur. La cartographie réalisée montre l'hétérogénéité de la disponibilité des ressources en eau souterraine sous l'effet de plusieurs facteurs. Elle offre une base essentielle pour élaborer des stratégies de gestion efficaces dans cette région cruciale.

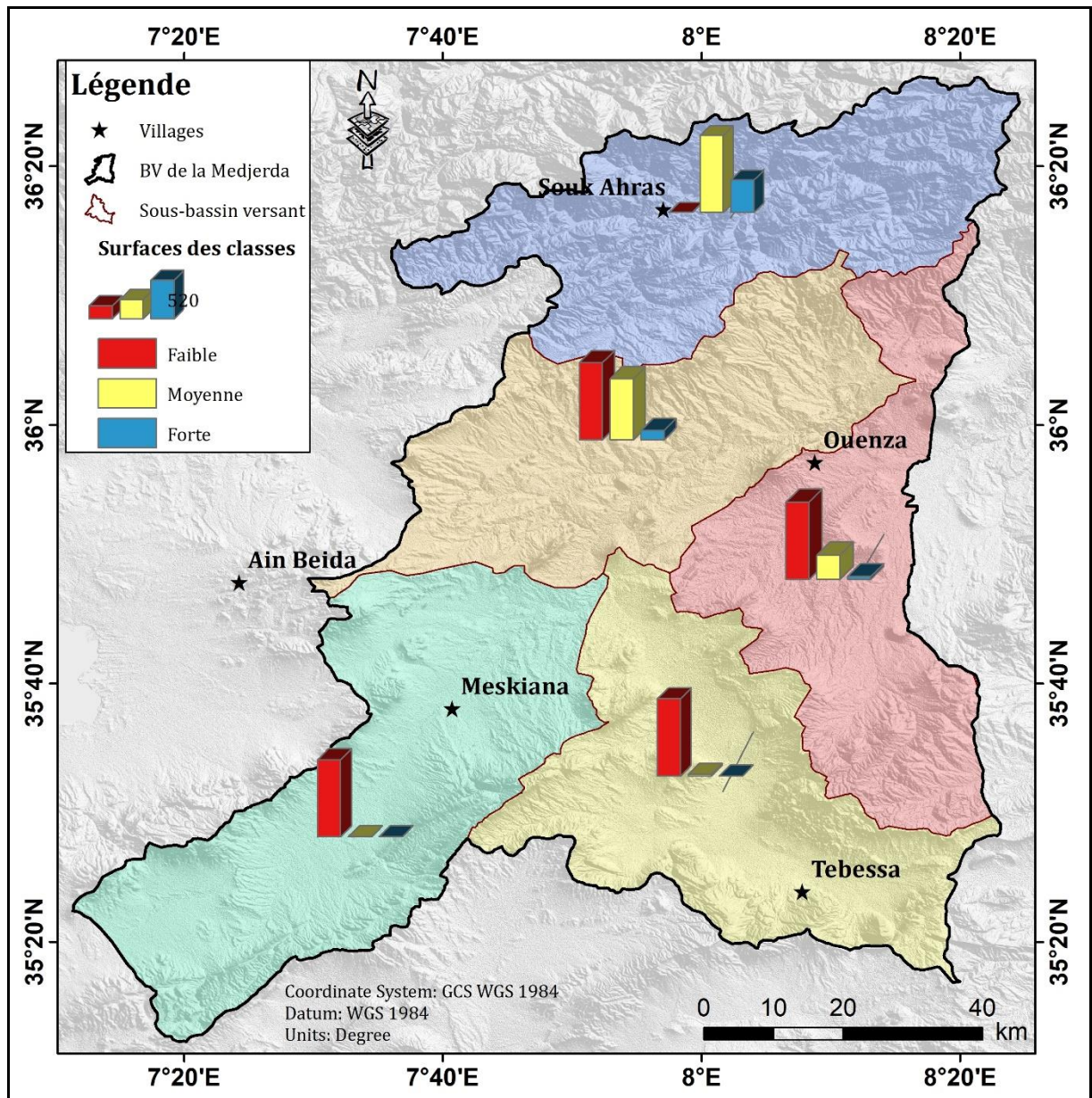


Figure 62. Surfaces des différentes classes du potentiel en eau souterraine.

3.4. Validation

La validation de la carte du potentiel en eau souterraine a été réalisée en analysant la répartition de l'infiltration dans le sous-bassin de la Medjerda. Un ensemble de 110 points a été identifié et comparé à la carte du potentiel établie à l'aide du modèle FAHP. Soixante-quatorze (74) points localisés dans des zones de faible potentiel, caractérisées par des surfaces urbaines et un sol salin imperméable, présentant une plage d'infiltration variant entre 0 et 25 mm. Vingt-neuf (29) points, caractérisés par une infiltration comprise entre 25 et 50 mm, se trouvent dans des zones caractérisées par un potentiel modéré en eau souterraine. Cette classe englobe 26 % de la superficie totale du bassin et est située dans des formations sédimentaires semi-perméables, comprenant des formations de grès, de sable ou de carbonate.

Tableau 39. Validation des résultats de la classification du modèle FAHP par la matrice de confusion.

Classe		Infiltration				Précision de l'utilisateur
		Faible	Modérée	Élevée	Total	
Potentiel en eau souterraine	Faible	74	0	0	74	1,00
	Modérée	12	9	8	29	0,31
	Élevée	0	4	3	7	0,43
	Total	86	13	11	110	0,00
Précision du producteur		0,86	0,69	0,27	0,00	0,78

Kappa	0,50
--------------	-------------

Sept (7), points indiquent une infiltration élevée allant de 50 à 100 mm, ils se situent dans les zones considérées comme ayant un fort potentiel. Ce sont les dépôts alluviaux de la vallée de la Medjerda et des formations calcaires à forte densité de linéaments. Notons que l'infiltration élevée ou basse va probablement influencer le potentiel en eau souterraine. En observant le précédent tableau, nous remarquons que quatre (04) points appartiennent à la classe d'infiltration élevée sont situées dans la partie modérée, et sont influencés par la géologie locale.

Après analyse de la répartition de 110 points d'infiltration, une carte (fig.63), a été réalisé. Elle indique une corrélation significative entre les valeurs de l'infiltration et la classe de faible potentiel, cette précision est de l'ordre de presque 100%.

Cependant, il y a la faible corrélation, entre les valeurs modérées de l'infiltration et la classe modérée du potentiel, de ce fait sur les vingt-neuf (29), points, douze (12) d'entre eux appartiennent à la classe faible, et les neuf (09) autres caractérisent la classe modérée en synergie avec la classification. Huit (8) points se situent dans la classe élevée, avec une précision de 31%. La troisième et la dernière classe caractérisée par un potentiel élevé, montre que sur les sept (7) points indiquant une infiltration élevée, trois (3) se situent dans la classe élevée et les quatre (4) restant appartiennent à la classe modérée, avec une précision d'utilisateur (valeurs d'infiltrations) de 43% correspondant avec 27% de la précision du producteur. La corrélation entre la précision d'utilisateur et celle du producteur révèle une précision globale de 78%, indiquant une fiabilité acceptable dans la prédiction de la matrice de confusion. En outre, l'indice de Kappa a signalé une précision de 50% soulignant un accord modéré entre la classification du modèle FAHP e celle de l'infiltration.

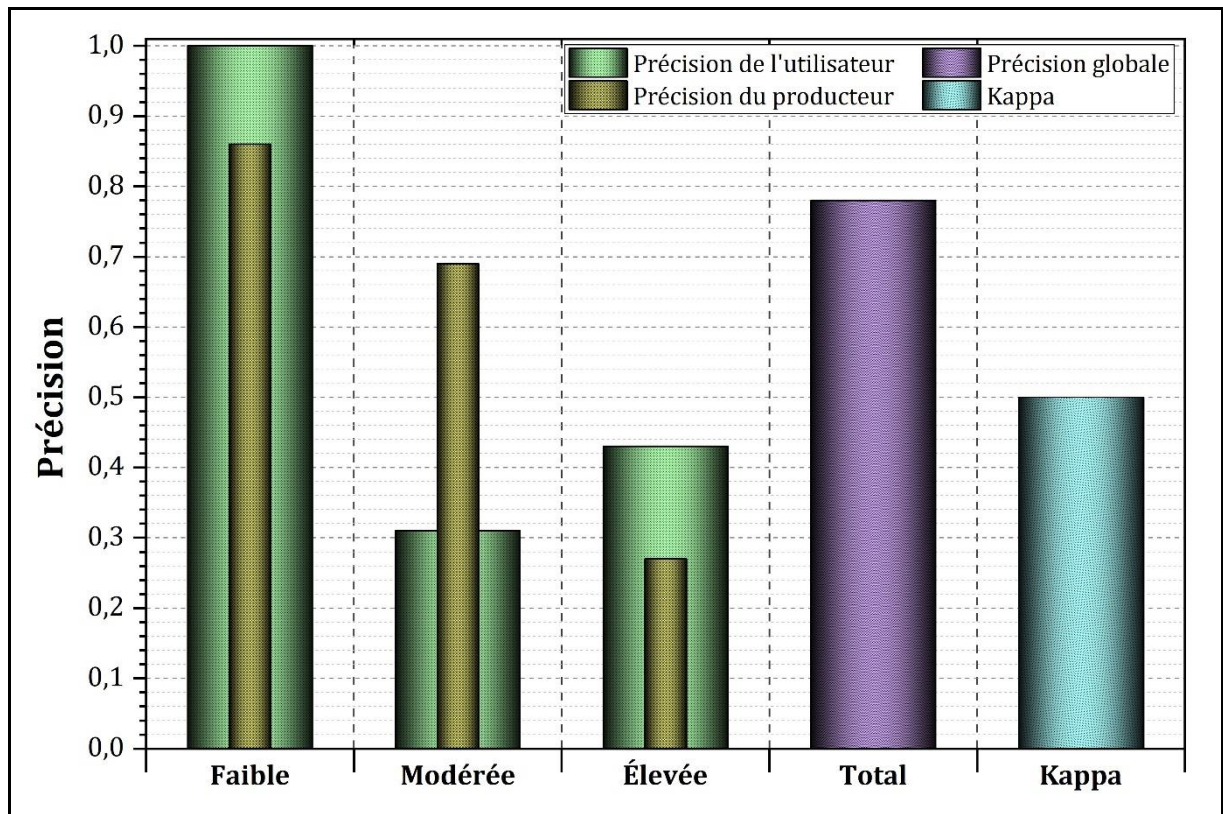


Figure 63. Carte de validation de la classification du potentiel en eau souterraine.

4. Conclusion

Dans cette étude, la cartographie du potentiel en eau souterraine (GWP) a été élaborée pour le bassin versant de la Medjerda situé dans le Nord-est de l'Algérie. L'utilisation d'un modèle de superposition pondérée a permis de cartographier le potentiel en eau souterraine en se basant sur sept facteurs dominants, à savoir le sol, la géologie, les précipitations, la pente, l'occupation du sol, la densité des linéaments, et la densité du drainage.

La méthode FAHP a été appliquée pour calculer le poids de chaque facteur et de leurs classes dans le modèle de GWP, en se basant sur les jugements d'experts. Les experts ont jugé que les précipitations étaient le facteur dominant déterminant la recharge en eau souterraine et donc le potentiel en eau souterraine. Par conséquent, le classement suivant des facteurs de contrôle a été obtenu : densité des linéaments (0,168), sol (0,131), géologie (0,11), pente et couverture du sol (0,078), et densité du drainage (0,044). Le rapport de cohérence (CR) a été calculé pour vérifier la cohérence entre les jugements d'experts et a été considéré comme acceptable (0,68). Les valeurs du GWP calculé ont été reclassées en trois classes : faible (66,51 %), modéré (26 %) et élevé (7,49 %). Les zones à fort GWP sont situées dans des formations alluviales et calcaires, présentant une densité élevée de linéaments, permettant une recharge significative et une circulation rapide des quantités d'eau infiltrée. De plus, un effet notable des surfaces à faible pente et du type de sol a été observé sur la carte. Les zones de faible potentiel se situent dans des zones à forte pente, des zones urbaines et des formations

triasiques riches en gypse. Enfin, la carte du GWP a été validée en utilisant des données de l'infiltration du bassin de la Medjerda à l'aide de la matrice de confusion. La précision globale de la matrice (0,78) a été considérée comme bonne. La carte du potentiel établie est considérée comme un outil important pour concevoir des stratégies de gestion des eaux souterraines dans le bassin versant de la Medjerda. Elle pourrait contribuer de manière significative à la protection de la qualité de l'eau souterraine. Étant donné que les zones à fort potentiel sont caractérisées par une infiltration élevée, une densité élevée de linéaments et une faible pente, cela entraîne une infiltration significative de polluants associés à divers processus. En particulier l'utilisation intensive de pesticides dans les zones agricoles, ainsi que l'implantation de sites d'enfouissement en amont des zones de recharge et des cours d'eau, provoque la contamination des aquifères alluviaux peu profonds par des déchets toxiques, dangereux ou domestiques. Compte tenu de ces considérations, on peut conclure que, sur la base de cette étude, les gestionnaires des ressources hydriques et de l'environnement comprennent qu'il est nécessaire de surveiller l'utilisation des éléments chimiques, ainsi que de développer un site de décharge contrôlé pour protéger les eaux souterraines. Cela vise à assurer un approvisionnement durable en eau potable et à préserver la santé des populations locales dans ces zones.

Estimation qualitative des eaux souterraines

Partie III

Chapitre 05 : Étude hydro chimique des eaux souterraines dans le BV de la Medjerda

Cartographie de la qualité physico-chimique et de la salinité des eaux souterraines sous l'influence géologique et climatique.



Chapitre V

*Étude hydro chimique des
eaux souterraines dans le BV
de la Medjerda*



Chapitre V : Étude hydrochimique des eaux souterraines dans le bassin versant de la Medjerda

1. Introduction

La dégradation de la qualité des eaux compromet le développement du pays. Cette dégradation est liée à l'interférence de plusieurs facteurs tel que la géologie locale (Trias), les rejets des eaux usées, l'activité anthropique liée à l'industrie, l'urbanisation tout azimut, l'agriculture par le biais des engrais...Ceci donne lieu à deux formes de pollutions dites minérale (naturelle) et organique (anthropique). Par ailleurs, au cours des dernières années les variations climatiques, se sont caractérisés par une baisse des précipitations et un accroissement de la température, accentuant le manque d'eau, compromettant l'avenir hydrique de certains pays.

Dans le détail, nous remarquons que la région d'étude se caractérise par une géologie très complexe et très diversifiée, marquée par une grande hétérogénéité des différentes formations lithologiques riches en triasiques salifères, formations gypseuses très affectées par la tectonique (failles), se localisant généralement autour des formations triasiques favorisant un écoulement important traduisant une dégradation de la qualité des eaux par dissolution de ces formations salifères.

Les résultats des analyses hydrochimiques, réalisés par nos soins et le SIG, ont été utilisés pour réaliser une cartographie spatiale de la qualité physico-chimiques et de la salinité des eaux souterraines dans le bassin versant transfrontalier de la Medjerda. Par ailleurs, la cartographie SIG de la qualité des eaux souterraines permettra d'identifier les zones sensibles, caractérisées par une faible qualité d'eau, facilitant ainsi l'élaboration d'un plan de préservation spécifique à ces zones.

L'évaluation, portera également sur l'analyse de l'aptitude des eaux souterraines pour l'utilisation pour l'irrigation et ceci en fonction de l'indice d'irrigation de Riverside.

La qualité des eaux souterraines sera également étudiée pour la potabilité des eaux et l'évaluation du risque sanitaire.

2. Collecte de données et analyses hydrochimiques

Les prélèvements ont été effectués sur vingt-huit (28) puits et forages, répartis sur les cinq (5) sous bassins versants (fig.62). Les paramètres physiques ont été mesurés in situ à l'aide d'un multi paramètres de marque **Hana**, elles ont porté sur la température, la conductivité électrique CE, le pH et l'oxygène dissous. Les cations (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) ont été dosé par photométrie à flamme, tandis que les anions (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-), ont été déterminé par spectrophotométrie, et le (NO_3^-) par la colorimétrie.

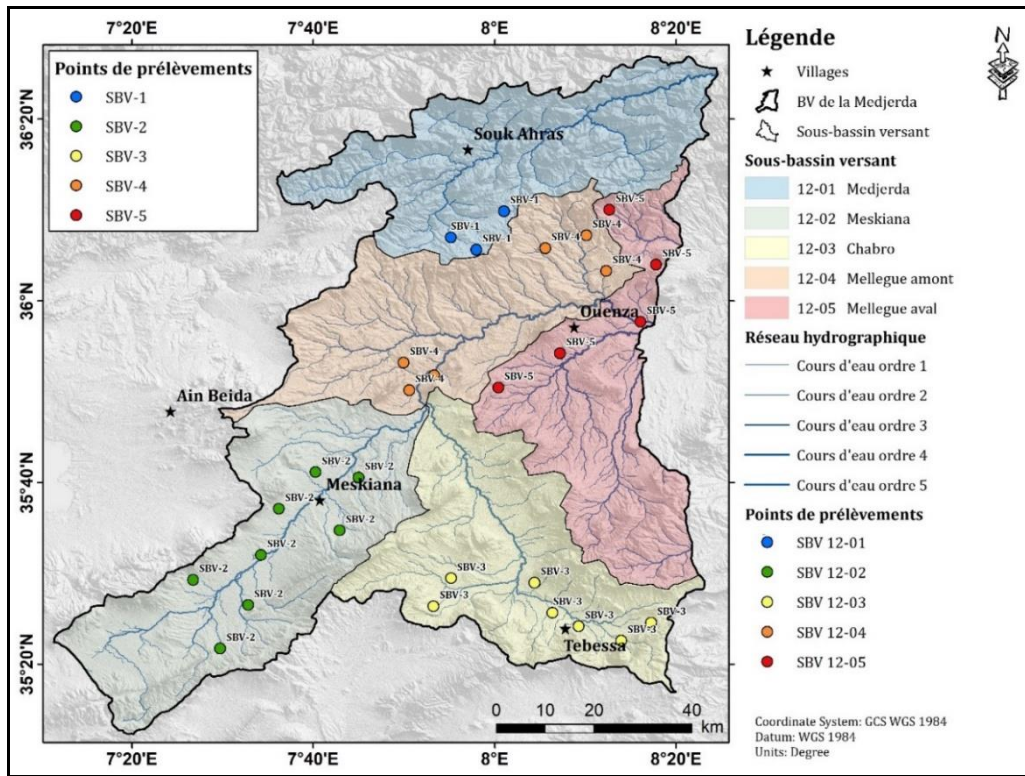


Figure 64. Répartition géographique des points de prélèvements dans les sous-bassins.

3. Analyses des paramètres physico-chimiques

- Statistique élémentaire :

Le tableau suivant récapitule, l'analyse statistique des éléments mesurés et ou déterminés. Nous allons donner un aperçu sur l'ensemble des sous bassins. On remarque que le pH constant toujours proche de la neutralité,

- la conductivité n'est pas très élevée, elle ne dépasse pas les 2500 $\mu\text{s}/\text{cm}$,
- les concentrations en éléments majeurs n'indiquent des teneurs élevées.

Les résultats de l'analyse statistique des paramètres physiques, à savoir le pH et la conductivité électrique, sont présentés en détail dans le tableau ci-dessous. Cette analyse a porté sur l'ensemble de 28 échantillons qui ont été mesurés au cours de la campagne de décembre 2022.

Tableau 40. Résultats des analyses physico-chimiques des eaux souterraines dans le bassin de la Medjerda.

SBV 12-01	pH	CE	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃	SO ₄	Cl	NO ₃
Moy	7.03	1373.33	181.33	26.67	86.01	2.91	513.67	90.07	153.60	25.48
Min	6.71	776.00	129.20	10.03	23.82	1.97	349.00	47.11	42.51	21.95
Max	7.32	1870.00	225.00	37.79	144.20	3.40	677.00	120.90	248.50	27.43
Ecartype	0.31	553.90	48.46	14.68	60.29	0.81	164.00	38.36	103.95	3.06
SBV 12-02	pH	CE	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃	SO ₄	Cl	NO ₃
Moy	7.40	2307.25	248.23	31.60	217.47	11.43	206.54	421.29	396.30	43.28
Min	7.00	840.00	97.00	13.84	43.03	2.26	134.40	111.00	55.79	31.75

Max	8.20	4256.00	667.30	64.16	351.40	18.46	242.90	1073.00	783.50	79.05
Ecartype	0.56	1014.49	177.21	18.04	109.10	5.73	37.01	283.45	227.79	18.14
SBV 12-03	pH	CE	Ca²⁺	Mg²⁺	Na⁺	K⁺	HCO₃⁻	SO₄⁻	Cl⁻	NO₃⁻
Moy	8.00	1838.14	171.08	109.33	77.23	5.32	507.00	302.90	203.41	41.86
Min	7.77	1222.00	145.89	29.17	57.75	1.81	193.00	221.00	145.98	22.20
Max	8.19	2952.00	227.65	261.59	112.30	8.18	1194.00	411.10	443.96	75.20
Ecartype	0.16	692.48	29.90	98.14	17.92	2.65	385.26	75.61	107.57	19.75
SBV 12-04	pH	CE	Ca²⁺	Mg²⁺	Na⁺	K⁺	HCO₃⁻	SO₄⁻	Cl⁻	NO₃⁻
Moy	7.91	1860.50	198.29	91.20	87.06	12.87	369.45	357.18	250.90	23.58
Min	6.90	980.00	81.26	12.53	18.42	0.97	236.50	153.70	51.30	8.96
Max	9.53	4592.00	581.10	241.70	238.60	30.29	491.30	1124.00	835.70	50.46
Ecartype	1.13	1364.02	189.73	81.54	78.94	11.01	82.32	378.18	290.27	14.76
SBV 12-05	pH	CE	Ca²⁺	Mg²⁺	Na⁺	K⁺	HCO₃⁻	SO₄⁻	Cl⁻	NO₃⁻
Moy	7.63	2582.00	211.75	92.80	236.15	16.76	350.58	666.48	327.88	13.18
Min	7.00	996.00	74.36	23.53	45.87	3.64	244.70	153.30	105.10	7.01
Max	9.42	4508.00	367.80	175.30	543.00	28.52	426.50	1449.00	719.10	22.25
Ecartype	1.05	1695.26	125.93	59.15	235.58	9.80	83.10	629.27	258.23	5.99
BV 12 (Medjerda)	pH	CE	Ca²⁺	Mg²⁺	Na⁺	K⁺	HCO₃⁻	SO₄⁻	Cl⁻	NO₃⁻
Moy	7.54	2052.34	206.06	72.73	146.26	10.29	369.38	387.46	282.75	31.83
Min	6.71	776.00	74.36	10.03	18.42	0.97	134.40	47.11	42.51	7.01
Max	9.53	4592.00	667.30	261.59	543.00	30.29	1194.00	1449.00	835.70	79.05
Ecartype	0.77	1123.47	133.42	70.98	132.55	8.15	225.55	359.46	220.05	18.82

3.1. Les paramètres physiques

3.1.1. La conductivité électrique (CE)

Dans le détail, nous remarquons :

-la classe, dont la conductivité oscille entre 776 et 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mesurée et observée pour les puits SW1-1, SW2-3, SW4-12, SW5-6, localisés respectivement au niveau des sous-bassins (SBV-12-01, 12-02, 12-04, 12-05).

-la classe, dont la minéralisation oscille entre 1001 et 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, c'est le cas de la majorité des puits (SW-1-3, SW-1-4) situés dans le SBV-12-01, les puits (SW2-1, SW2-6, SW2-8, SW2-11, SW2-12, SW2-15), dans le SBV-12-02, les puits (SW3-1-2-4-5-6-7), caractérisant le SBV-12-03, les puits (SW4-1-2-3-4), cas du SBV-12-04, le puits (SW5-1-4), situé au niveau du SBV -12-05. Enfin,

-la classe dont la conductivité va de 3001 à 4592 $\mu\text{S}/\text{cm}$, seulement quatre (04) puits appartenant aux SBV-12-02, SBV-12-04 et SBV-12-05.

Les variations de la conductivité électrique (CE), montrent une diversité spatiale de la minéralisation dans la zone d'étude.

Les valeurs élevées de conductivité électrique (CE), expliquent la salinité des eaux souterraines dans la nappe de Mellegue amont, aval, ainsi que de la nappe de Meskiana. Cette

salinité peut être attribuée aux conditions climatiques arides favorisant une forte évaporation avec précipitation des sels dans le sol enrichissant les eaux souterraines par percolation des eaux de surfaces.

La conductivité, allant de 1001 et 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, indique une salinité moyenne (modérée) sur l'ensemble du bassin versant. Cependant certains puits présentent une salinité faible (Inférieure à 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Cette répartition spatiale de valeurs de la conductivité montre l'impact du sol et de la lithologie sur la variation de la qualité de l'eau au sein du bassin. Un autre facteur, la profondeur du point d'eau exploité (puits, forage), peut également influencer la minéralisation, en effet, les eaux des puits à faible profondeur, sont plus minéralisées, la conductivité électrique dépasse 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les forages de plus de cinquante (50) mètres de profondeur, présentent des conductivités de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au plus.

Cette répartition on montre que les échanges eaux-sols sont plus importants en surface qu'en profondeur liée à l'absence de l'oxygène en profondeur.

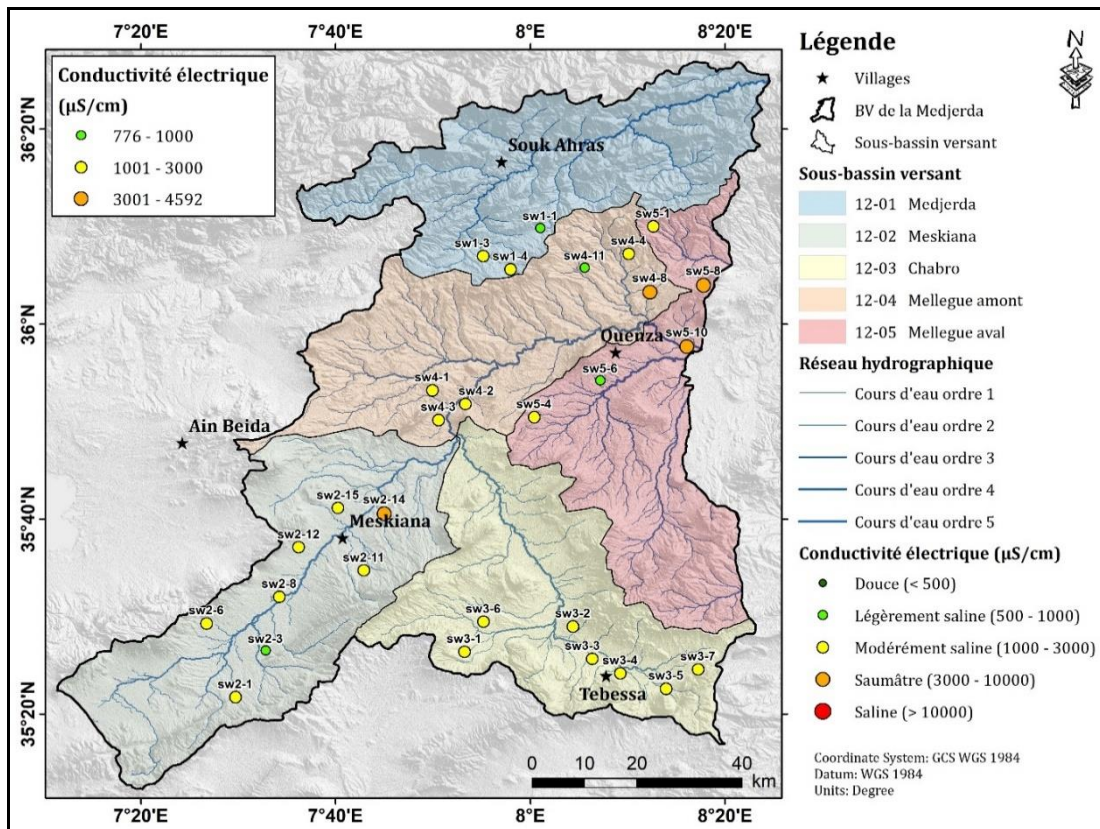


Figure 65. Variation spatiale de la conductivité électrique (CE) dans le BV de la Medjerda.

3.1.2. La dureté de l'eau

Représente un indicateur de la minéralisation des eaux, due uniquement aux ions de calcium et magnésium. Les résultats obtenus ont permis la réalisation de la carte (figure 64), cette dernière indique que les points présentent une dureté très élevée, supérieure à 35 °F. Cette dureté est principalement due à la dissolution des formations calcaires riches en calcium et en magnésium présent dans l'ensemble du BV de la Medjerda.

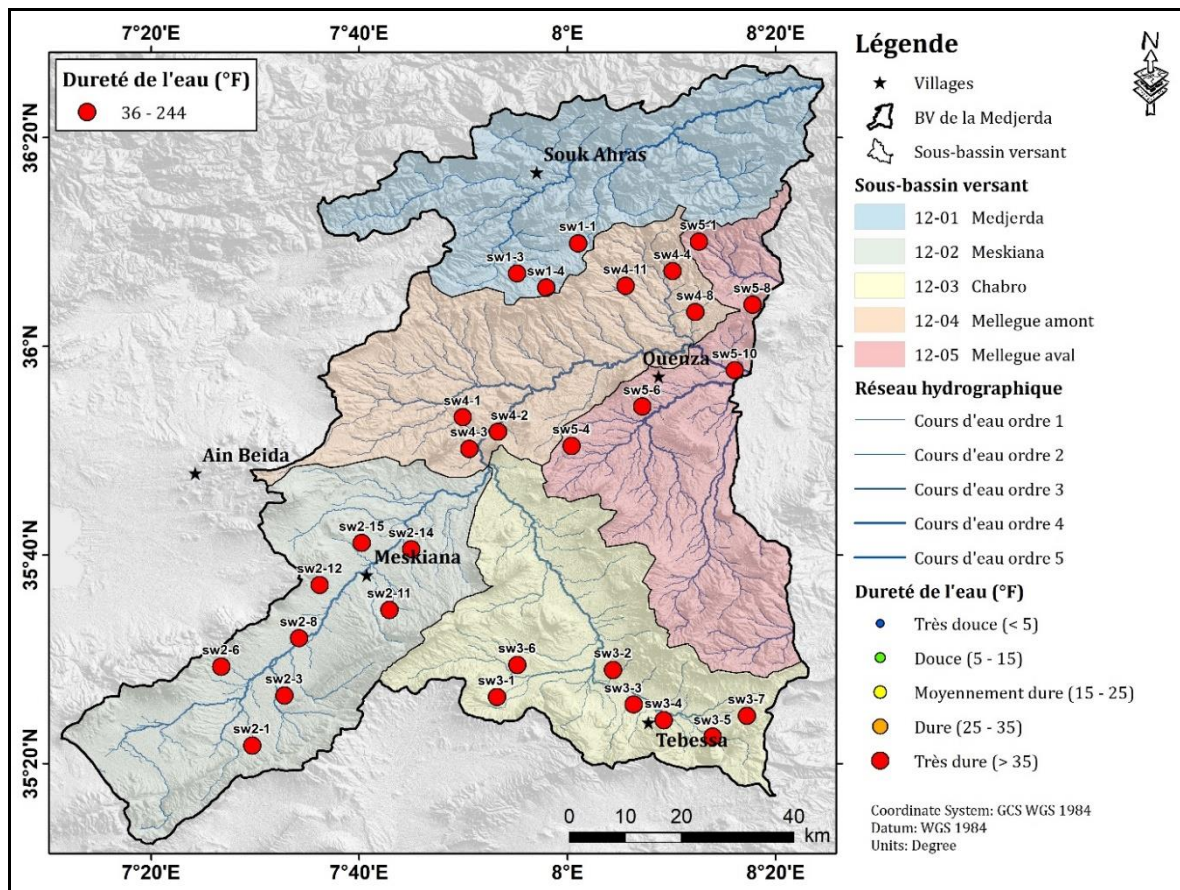


Figure 66. Variation spatiale de la dureté dans le BV de la Medjerda.

3.1.3. TDS (Total des Solides dessous en eau)

Le Total des Solides Dissous (TDS), caractérise la minéralisation des eaux.

La TDS remplace la conductivité quand elle n'est pas mesurée. $TDS = Ca + Mg + Na + K + Cl + SO_4 + HCO_3$. Les valeurs calculées de la TDS, vont de 454 à 3 274 mg/l, aussi la carte relative à TDS, réalisée (fig.67), quatre classes se répartissant comme suit :

- la première classe concerne la TDS dont les valeurs oscillent entre 300 et 600 mg/l, (couleur vert clair sur la carte), caractérisée par les trois points (SW-1-1, SW-2-3, SW-5-6), se trouvant dans les SBV-12-01, SBV 12-02 et le SBV 12-05).
- Nous avons mis la couleur jaune pour illustrer la TDS dont les valeurs oscillent entre 601 et 900, ces valeurs caractérisent six points, situés majoritairement dans le SBV-12-04.
- la couleur orange, caractérise la TDS, dont les valeurs calculées vont de 900 à 1200 mg/l, dix points appartiennent à cette classe.
- la quatrième classe (points rouges sur la carte), dans cette classe la TDS est élevée élevées dépassant 1200 mg/l, dix points caractérisent cette classe notons que cinq d'entre eux se localisent dans le SBV-12-02.

Cette observation, montre une variation de la TDS au niveau du bassin versant. Cette variation spatiale est en symbiose avec les concentrations des éléments chimiques. Elle est

également liée aux caractéristiques des différentes formations lithologiques présents dans la zone d'étude.

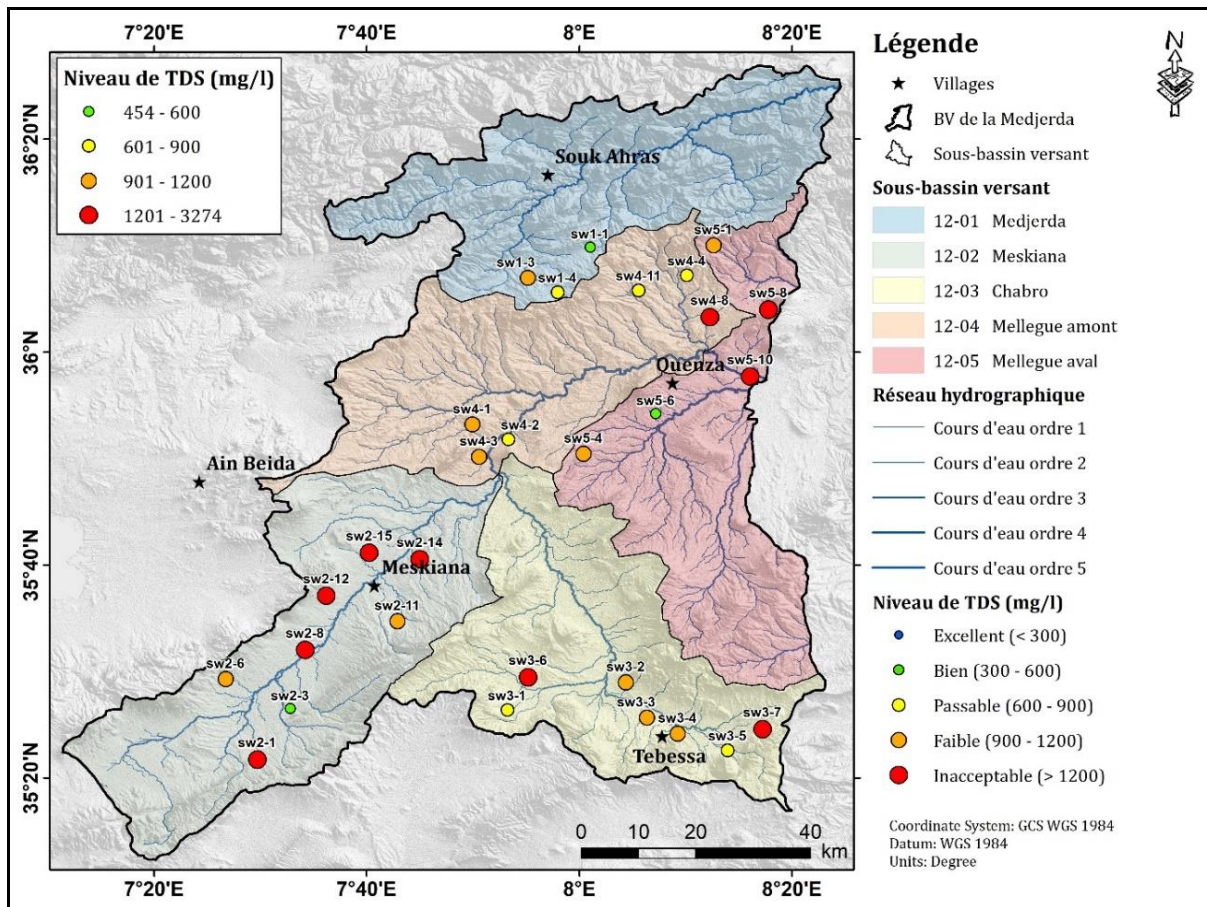


Figure 67. Variation spatiale de la TDS dans le BV de la Medjerda.

3.2. Variations des cations

3.2.1. Le calcium (Ca^{2+}) et le magnésium (Mg^{2+})

Ces deux éléments appartiennent au groupe des alcalino-terreux. Ils sont présents dans toutes les eaux, sous la forme d'ions Ca^{2+} et Mg^{2+} . Leur origine naturelle est associée aux types de roches ou de formations lithologiques, aux minéraux qui les constituent, et aux types des sols traversés. Le calcium se trouve dissous principalement dans les sols calciques ou des roches naturelles riches en minéraux calciques, tels que les amphiboles, les feldspaths, les pyroxènes, l'aragonite et les minéraux argileux. Par exemple, les précipitations acides peuvent accélérer la perte de calcium dans le sol. Quant au magnésium, il est présent dans des minéraux tels que les pyroxènes, les amphiboles, la magnétite, l'olivine et les minéraux argileux. On le trouve principalement dans les eaux souterraines en raison de sa formation comme sous-produit de l'altération des roches contenant des minéraux ferromagnésiens.

L'OMS, recommande pour la potabilité des eaux des concentrations en calcium de l'ordre de 75 mg/l et 50 mg/l pour le magnésium.

Les concentrations en calcium et en magnésium, avoisinant 206.06mg/l, pour le premier et 72.73mg/l pour le deuxième. Dix-huit puits montrent une domination du calcium, particulièrement au niveau des SBV-12-01, points (SW-1-1, 3, 4) pour le SBV-12-02, points (SW-2-3, 6, 11, 12, 14, 15), le SBV-12-03, pour les points (SW-3-1, 2, 3, 4, 5). Les concentrations observées seraient liées aux échanges qui se produisent entre l'eau et la roche. Le **magnésium** domine au niveau de quelques puits du SBV-12-04 (point 5), au niveau du SBV-12-03, on les puits (W-3-6, et 3-7). Le magnésium accompagne le calcium lors de sa dissolution.

3.2.2. Le sodium et le potassium

Appartiennent à la classe des Alcalins. Ils sont présents dans l'eau, sous forme d'ions Na^+ et K^+ . Pour l'eau de boisson et selon OMS, les concentrations tolérées sont de 200 mg/l pour le sodium et 12 mg/l pour le potassium. Les concentrations de Na^+ et K^+ , déterminées, varient d'un SBV à un autre, cependant le sodium domine dans les eaux souterraines. Les eaux riches en sodium caractérisent le SBV-12-02 cas des deux puits (SW-2-1, SW-2-8), les concentrations sont de 292,9 et 351,4 mg/l. C'est aussi le cas du SBV-12-05 où les deux (SW-5-8 et SW-5-10), présentant des concentrations élevées de 438,1 et 543 mg/l. En ce qui concerne l'élément potassium (K^+), reste faible avec une concentration maximale de 15 mg/l, a été déterminé au niveau des SBV-12-04 et SBV-12-05. La distribution spatiale du sodium et du potassium est représentée sur la Figure 68.

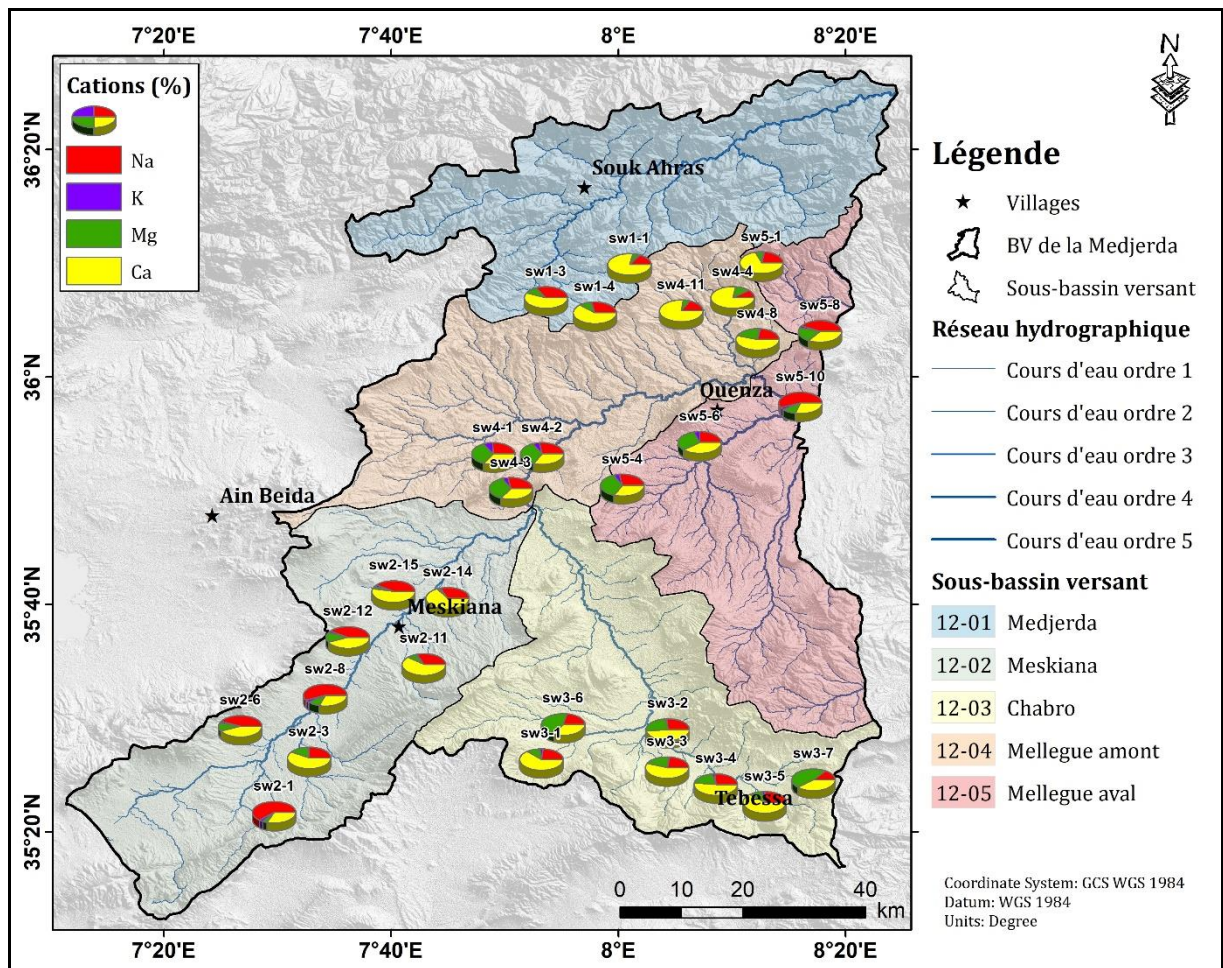


Figure 68. Variation spatiale des cations dans les eaux souterraines du BV de la Medjerda.

3.3. Variations des anions

3.3.1. Bicarbonates (HCO_3^-)

Les analyses réalisées montrent que les concentrations en bicarbonates des forages varient entre 134,40 mg/l et 1 194,00 mg/l. Les fortes concentrations indiquent un réservoir riche en calcaire.

La distribution spatiale (fig. 69), montre que les concentrations varient d'un SBV à l'autre. 571,97, 110,95, 844,03 mg/l pour les puits (SW-1-1, 3, 4) appartenant au SBV-12-01. Pour le puits (SW-2-3) situé au niveau du SBV-12-02 la concentration est de 398,09 mg/l. Les puits (SW-3-2, 6, 7) présents dans le SBV-12-03 affichent des concentrations de 691,61, 195,68, 147,34 mg/l respectivement. 805,18, 565,25, 640,97, 387,6, et 600,9 mg/l pour les puits (SW-4-1,2,3,4,11) situés dans le SBV-12-04, les puits (SW-5-1, 4,6) appartenant au SBV-12-05 donnent les concentrations suivantes 675,55, 640,97, 401,04 mg/l. Les teneurs enregistrées témoignent de l'extension et de la géologie de l'aquifère. De ce fait la dissolution des formations calcaires affleurant presque la totalité du bassin. Les concentrations dépassent la limite seuil de l'OMS (200 mg/l) établie pour la potabilité.

3.3.2. Le chlorure (Cl^-)

Dans une eau potable, les concentrations en chlorures s'échelonnent selon les limites suivantes :

- la qualité optimale (< 250 mg/l),
- les limites admissibles (250 à 1000 mg/l)
- non adaptée (> 1000 mg/l).

Les résultats des analyses effectuées par nos soins indiquent (fig.67) qu'environ 80% des puits du bassin versant (BV) de la Medjerda présentent une concentration élevée en chlorure dépassant 100 mg/l. C'est le cas des puits (SW-2-1, 6, 8, 11, 12, 14, 15) appartenant au SBV-12-02 affichant les concentrations (142,67, 784,42, 159,45, 537,33, 107,35, 115,87 mg/l) respectivement. Les puits (SW-4-4,8) situés dans le SBV-12-04 présentent des concentrations élevées (443,12, et 235,72 respectivement), le puits (SW-5-10) présent dans le SBV-12-05 a une valeur de 20,283 mg/l. La valeur minimale des chlorures est de 22,1 mg/l, déterminée au niveau du puits (SW-1-14), la valeur maximale est de 835,70mg/l, déterminée au niveau du puits (SW-12-04). La présence des chlorures dans ces eaux est liée au contraste des formations géologiques affleurant dans la région. Parmi ces origines on note la dissolution des formations gypsifères ou salifères du Trias.

3.3.3. Sulfate (SO₄²⁻)

Il est nécessaire d'évaluer la concentration en sulfate dans les eaux souterraines naturelles avant qu'elles ne puissent être utilisées à des fins de consommation humaine. Selon l'OMS (2011), la concentration maximale autorisée en ions de sulfate dans l'eau potable est de 250 mg/l. Les valeurs de sulfate dans les eaux souterraines du BV de la Medjerda varient de 47,11 à 1449.00 mg/l. Les faibles valeurs se trouvent dans le SBV-12-01 représentées par les points (SW-1-1, 3, 4), tandis que, plusieurs points sont caractérisés par des valeurs très élevées, notamment, (SW-2-11, 12, 14, 15) dans le SBV-12-02, (SW-3-1, 3, 4, 5) dans le SBV-12-03, l'amont du SBV-12-04 est représenté par deux valeurs très élevées telles que, (SW-4-4, 8), et enfin, le SBV-12-05, représenté par les deux points (SW-5-8, 10). Parmi tous les échantillons d'eau souterraine, (SW-5-8) présentait la concentration de sulfate la plus élevée (1449 mg/l), tandis que (SW-1-1) avait la plus basse (47,11 mg/l). Ces fortes concentrations dans la majorité des échantillons peuvent être d'origine anthropique, liées à l'utilisation d'engrais chimiques sulfatés. D'autre part, elles peuvent être associées à la dissolution des formations gypseuses du Cénomaniens qui affleurent à la bordure sud de l'aquifère. D'un point de vue de potabilité, l'examen a révélé que tous les échantillons dépassent les limites prescrites par l'OMS pour l'eau potable, à l'exception des points situés dans le SBV -12-01.

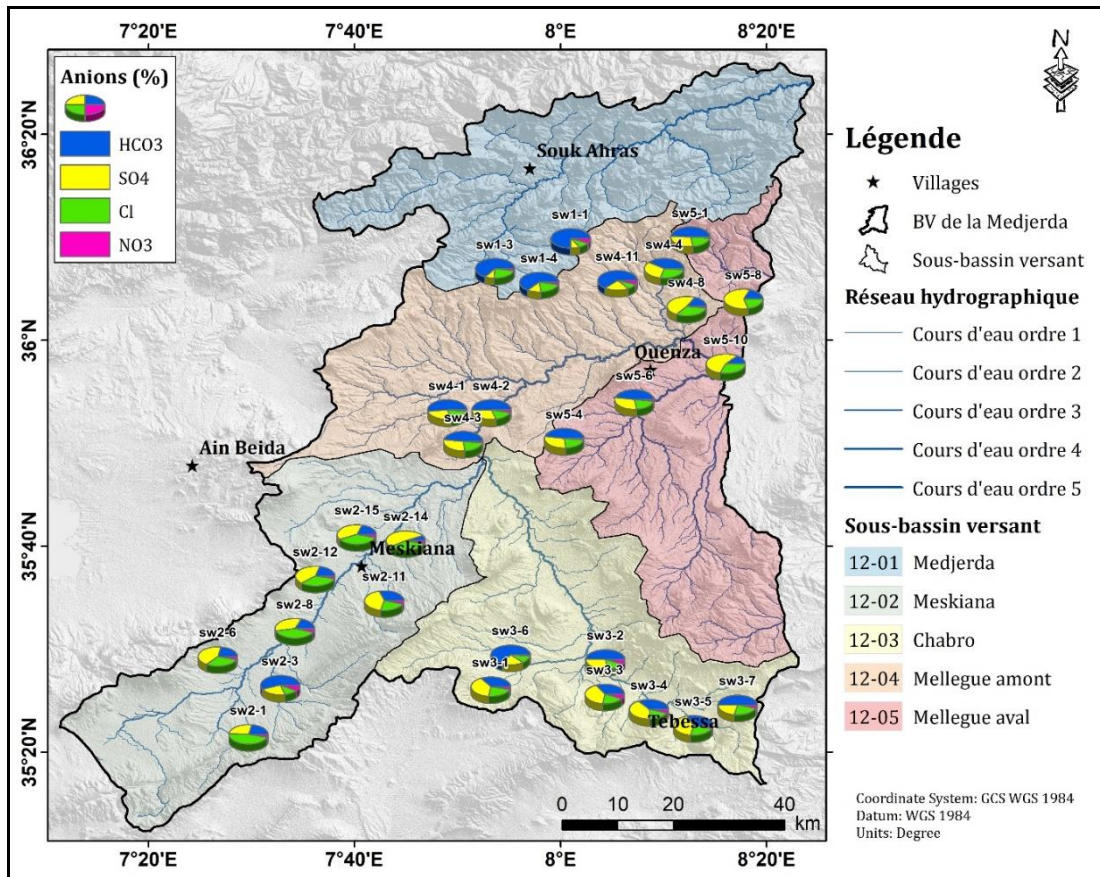


Figure 69. Variation spatiale des anions dans les eaux souterraines du BV de la Medjerda.

3.3.4. Nitrate (NO₃⁻)

Selon l’OMS (2011), La concentration maximale acceptable de nitrate dans l'eau potable est de 50 mg/l. Les échantillons analysés indiquent des concentrations en nitrate acceptables allant de 7.01 à 79.05 .mg/l. Les puits situés au niveau du SBV-12-05, présentent les concentrations les plus faibles 7.01 mg/l. Cependant les puits appartenant aux SBV-12-02 et SBV-12-03 ont des concentrations très élevées de 79,05 mg/l et de 75,20.

4. Qualité des eaux :

4.1. Apport du Diagramme de Piper

L’observation du diagramme de piper (Fig.70), montre plusieurs familles d’eau. Les eaux analysées se répartissent dans les trois (3) losanges suivants :

- la famille des eaux chlorurée et (ou) sulfatée, calcique et (ou) magnésienne,
- la famille des eaux bicarbonatée calcique et (ou) magnésienne,
- la famille des eaux chlorurée sodique et (ou) potassique et sulfatée sodique.

L’observation du diagramme montre que la majorité des eaux des puits analysés, se situe dans les deux premiers pôles. Ainsi nous pouvons dire que les eaux sont soit chlorurées ou sulfatées ou bicarbonatées. On retrouve la même variation pour les cations, ces derniers sont soit riches en calcium et magnésium soit riche en sodium potassium. Cette répartition est probablement liée à la géologie de la zone d’emplacement des puits.

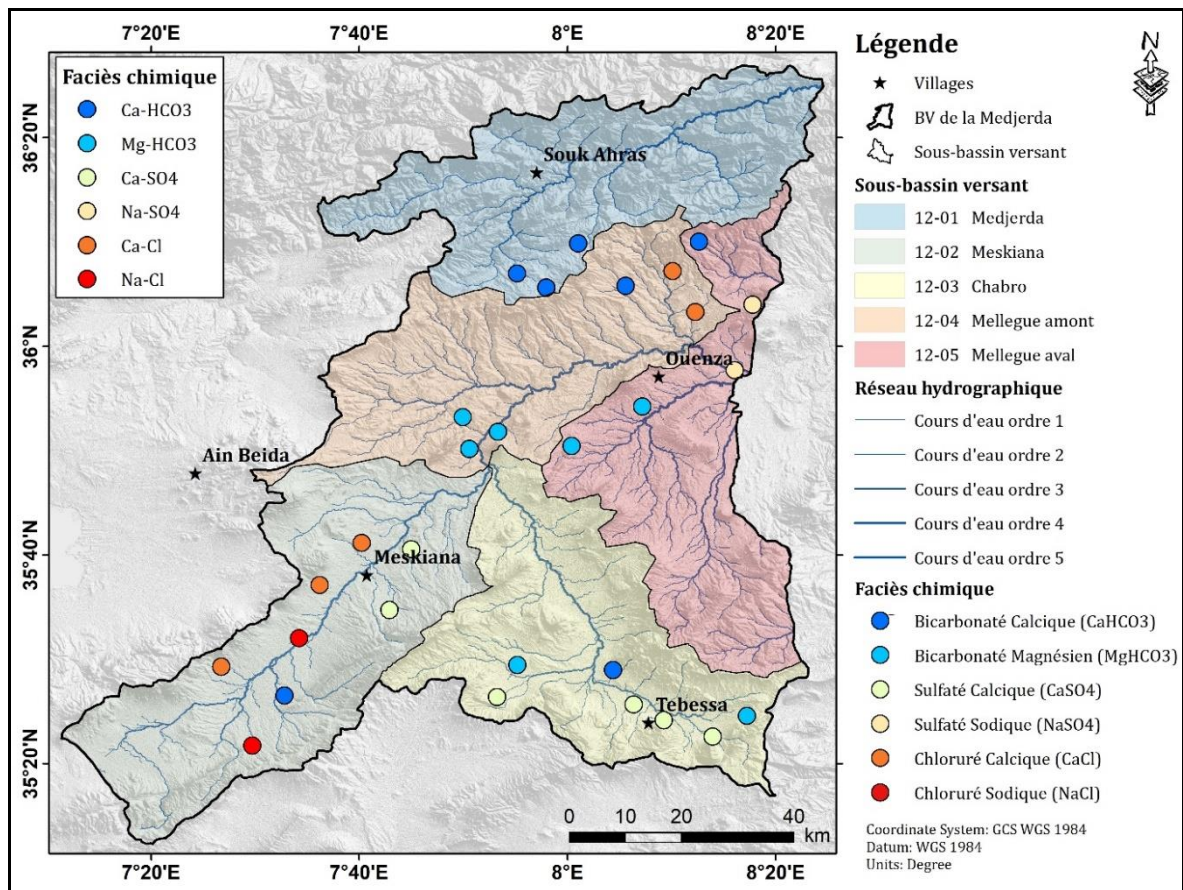


Figure 71. Faciès chimiques des eaux souterraines dans le bassin versant de la Medjerda.

Dans le détail, nous remarquons une variation de la qualité des eaux et ceci d'un sous bassin versant vers un autre.

- le faciès dominant est bicarbonaté calcique (Ca-HCO₃), caractérisant sept puits, présents respectivement au niveau des SBV-12-03, 04, 05,
- le faciès bicarbonaté magnésien (Mg -HCO₃), caractérisant six puits, cas des SBV-12-03, 04, 05.
- le faciès (Ca-So₄) dominé dans 6 points répartis dans les SBV-12-02, 03, le faciès (Na-SO₄), représentés par deux points beiges dans le SBV-12-05, 5 autres points représentés par la couleur rouge clair caractérisés par le faciès (Ca-Cl) situés dans la plaine du SBV-12-02 et l'amont du SBV-12-04. Le dernier faciès (Na-Cl) représenté par deux points rouge foncé localisés dans le SBV-12-02.

La diversité des faciès chimiques déterminés reste liée aux formations géologiques traversées par les eaux. Les échanges entre l'eau et la roche sont souvent à l'origine des faciès déterminés. La présence du sodium ou du calcium dans les eaux peut être liée à la roche traversée ou à l'échange de base pouvant se produire entre l'eau et la roche dans ce cas la roche récupère le calcium de l'eau et enrichie cette dernière en sodium.

5. Origines des faciès chimiques déterminés :

La qualité des eaux ainsi déterminée, peut avoir plusieurs origines. Parmi les paramètres pouvant influencer la composition chimique des eaux, on note :

- les formations géologiques traversées par les eaux : La géologie et l'eau peuvent avoir une relation de cause à effet, mise en évidence par l'indice d'échange et l'indice de saturation. Ces deux éléments montrent l'impact des formations géologiques sur l'acquisition du chimisme des eaux.
- le climat : Le climat par les variations saisonnières accentue la dilution ou l'évaporation donnant la composition chimique observée.
- la profondeur du niveau statique des puits : L'emplacement du niveau statique facilite les échanges entre les eaux de surface et les eaux profondes accélérant le processus de minéralisation des eaux.

Nous allons donner un aperçu de ces paramètres sur la qualité des eaux.

5.1. L'Indice d'Échange de Base (IEB)

L'indice d'échange de base est donné par la formule mathématique suivante :

$$IEB = \frac{rCl^- - r(Na^+ + K^+)}{rCl^-}$$

Cet indice offre une indication sur le sens des échanges ioniques entre l'eau et les formations géologiques environnantes.

Les interprétations de l'IEB sont les suivantes :

- (IEB = 0) : Aucun échange ionique.
- (IEB < 0) : Échanges où Ca^{2+} et Mg^{2+} sont substitués par Na^+ et K^+ .
- (IEB > 0) : Échanges où Na^+ et K^+ sont substitués par Ca^{2+} et Mg^{2+} .

Tableau 41: Résultats de l'IEB dans les eaux souterraines de la Medjerda.

Nom du bassin	Point d'eau	IEB	Résultats	Interprétations de l'IEB
SBV-1201	sw1-1	0,094	IEB > 0	Échanges où Na^+ et K^+ sont substitués par Ca^{2+} et Mg^{2+}
	sw1-3	0,093	IEB > 0	
	sw1-4	0,164	IEB > 0	
SBV-1202	sw2-1	0,079	IEB > 0	Échanges où Na^+ et K^+ sont substitués par Ca^{2+} et Mg^{2+}
	sw2-3	-0,226	IEB < 0	Échanges où Ca^{2+} et Mg^{2+} sont substitués par Na^+ et K^+
	sw2-6	-0,014	IEB < 0	Échanges où Ca^{2+} et Mg^{2+} sont substitués par Na^+ et K^+
	sw2-8	0,012	IEB > 0	Échanges où Na^+ et K^+ sont substitués par Ca^{2+} et Mg^{2+} .
	sw2-11	0,125	IEB > 0	
	sw2-12	0,14	IEB > 0	
	sw2-14	0,312	IEB > 0	

	sw2-15	0,128	IEB > 0	
SBV-1203	sw3-1	0,344	IEB > 0	Échanges où Na ⁺ et K ⁺ sont substitués par Ca ²⁺ et Mg ²⁺
	sw3-2	0,166	IEB > 0	
	sw3-3	0,364	IEB > 0	
	sw3-4	0,179	IEB > 0	
	sw3-5	0,313	IEB > 0	
	sw3-6	0,039	IEB > 0	
	sw3-7	0,741	IEB > 0	
SBV-12-04	sw4-1	0,11	IEB > 0	Échanges où Na ⁺ et K ⁺ sont substitués par Ca ²⁺ et Mg ²⁺
	sw4-2	-0,033	IEB < 0	Échanges où Ca ²⁺ et Mg ²⁺ sont substitués par Na ⁺ et K ⁺
	sw4-3	0,166	IEB > 0	Échanges où Na ⁺ et K ⁺ sont substitués par Ca ²⁺ et Mg ²⁺
	sw4-4	0,814	IEB > 0	
	sw4-8	0,546	IEB > 0	
	sw4-11	0,029	IEB > 0	
SBV1205	sw5-1	0,376	IEB > 0	Échanges où Na ⁺ et K ⁺ sont substitués par Ca ²⁺ et Mg ²⁺
	sw5-4	0,17	IEB > 0	
	sw5-6	0,232	IEB > 0	
	sw5-8	-0,506	IEB < 0	Échanges où Ca ²⁺ et Mg ²⁺ sont substitués par Na ⁺ et K ⁺
	sw5-10	-0,2	IEB < 0	

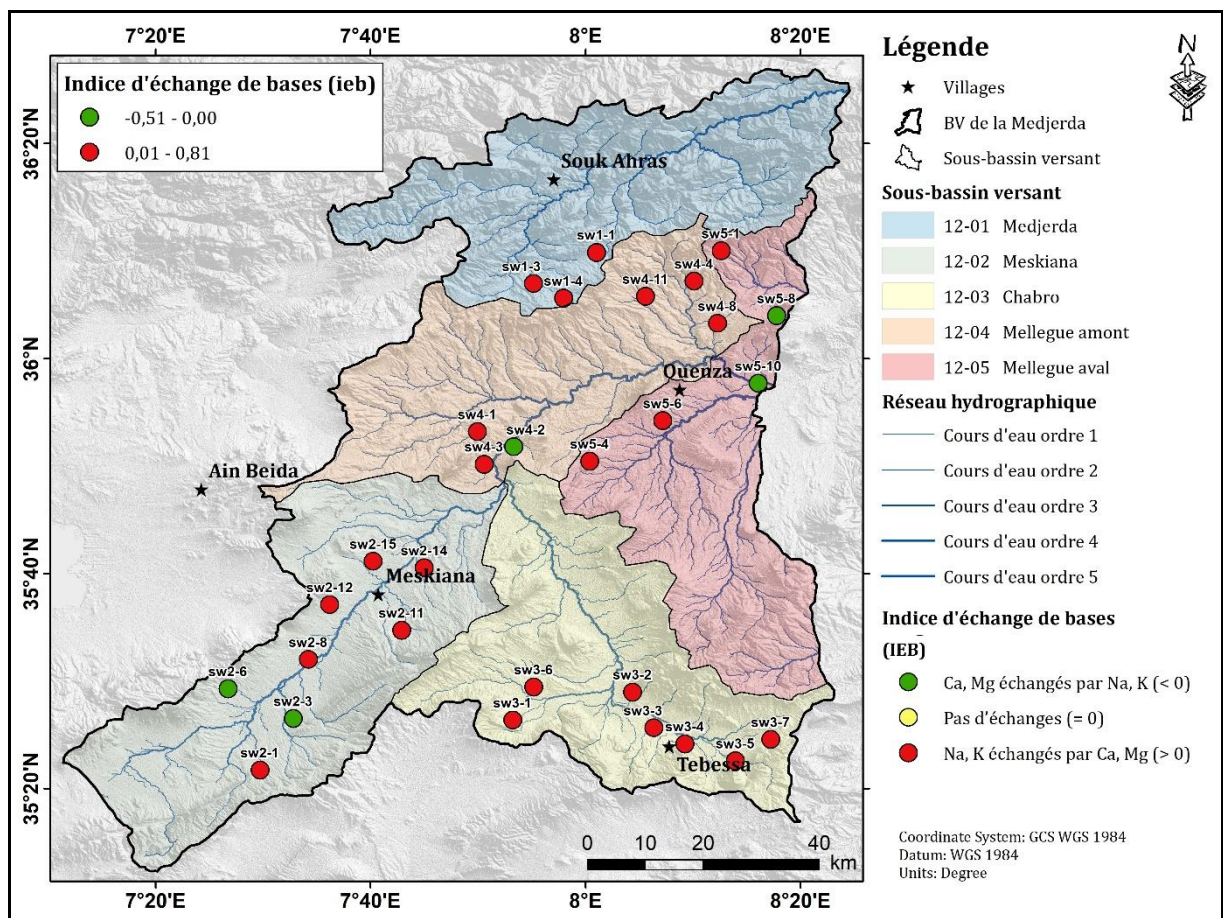


Figure 72. L'Indice d'Échange de Base dans les eaux souterraines du BV de la Medjerda.

L'analyse des résultats obtenus montre que l'IEB, présente des valeurs positives dans la majorité des eaux souterraines du BV de la Medjerda, indiquant un échange entre la roche et l'eau, cette dernière s'enrichit en sodium provenant de la roche et donne des eaux sodiques. Ce cas d'échange est présent au niveau de vingt-quatre (24) puits, ceci est indiqué sur la carte (Fig.72) avec la couleur rouge. Notons que cinq (05) puits, dont la couleur est indiquée en vert montrent les IEB négatifs et caractérisent les SBV-12-02, SBV-12-04 et SBV-12-05 au niveau des puits (SW2-3, 6), (SW4-2) et (SW5-8, 10). Cette variation est liée à la géologie locale composant les aquifères.

5.2. Apport de la thermodynamique

Dans les aquifères à géologie contrastée, il est souvent difficile de définir les éléments à l'origine de la minéralisation des eaux. De ce fait le recours à la thermodynamique devient obligatoire.

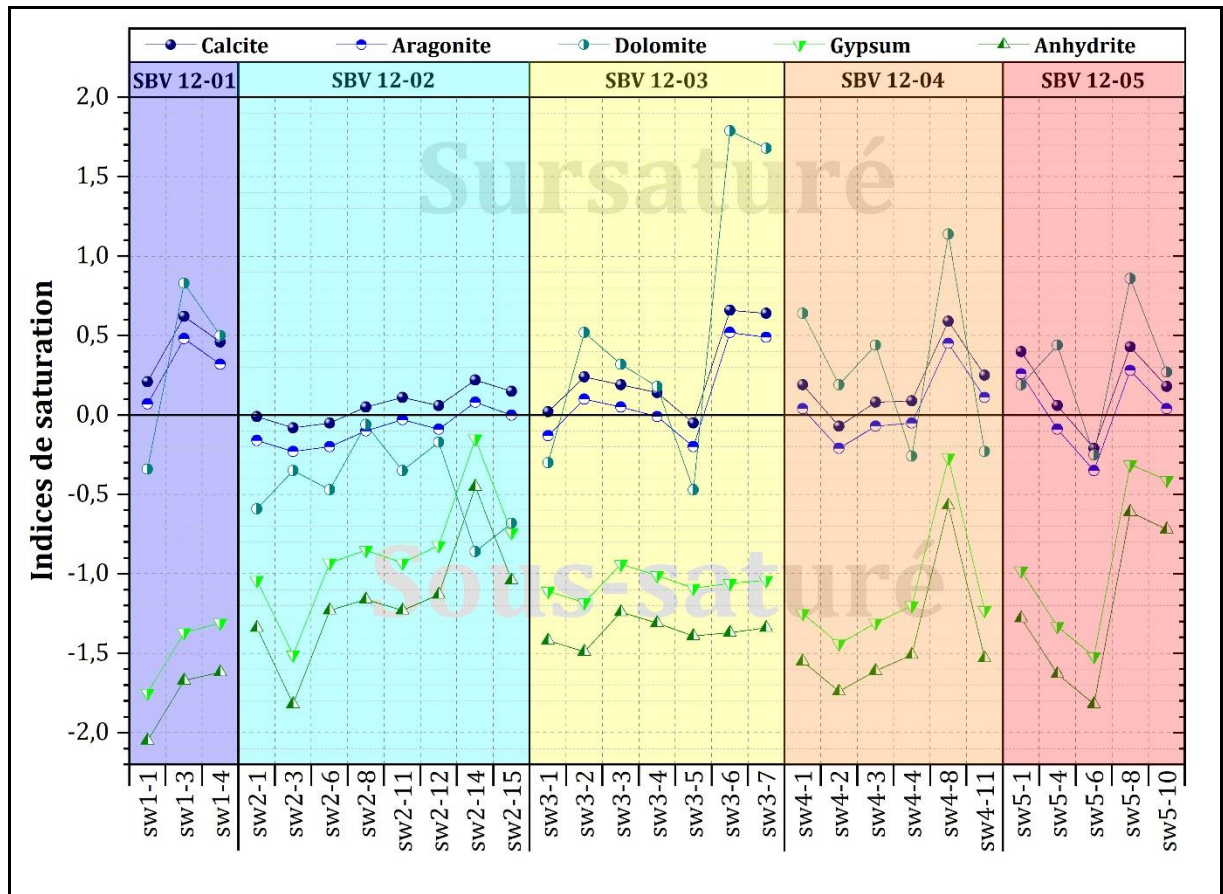


Figure 73. Variation spatiale des indices de saturation.

L'analyse réalisée montre la présence des minéraux suivants (calcite, aragonite, dolomite, gypse, anhydrite) ces derniers se répartissent comme suit :

Minéraux indiquant une sursaturation (SI > 0) : calcite et dolomite

Minéraux indiquant une sous saturation (SI < 0) : gypse et anhydrite.

L'observation des résultats obtenus montrent un risque d'augmentation de la calcite et de la dolomite dans l'eau par précipitation par contre le gypse et l'anhydrite, le risque de dissolution est présent. Ceci démontre une compétition entre les formations évaporitiques et les formations carbonatées, expliquant les variations de la composition chimique des eaux.

5.3. Confirmation de l'origine de la minéralisation par le diagramme de Gibbs

Le diagramme de Gibbs (Fig.74), montre que l'évaporation n'influence pas la composition chimique des eaux et confirme les échanges eau-roche démontré par les échanges de base. Cette tendance indique que la majorité des puits se situent à des profondeurs où les échanges avec l'atmosphère sont rares, c'est le cas des puits se localisant au niveau du domaine de l'évaporation appartenant aux SBV-12-02 et SBV-12-05 qui présentent une minéralisation hétéroclite, influencée à la fois par les processus d'interaction eau-roche et par les phénomènes d'évaporation.

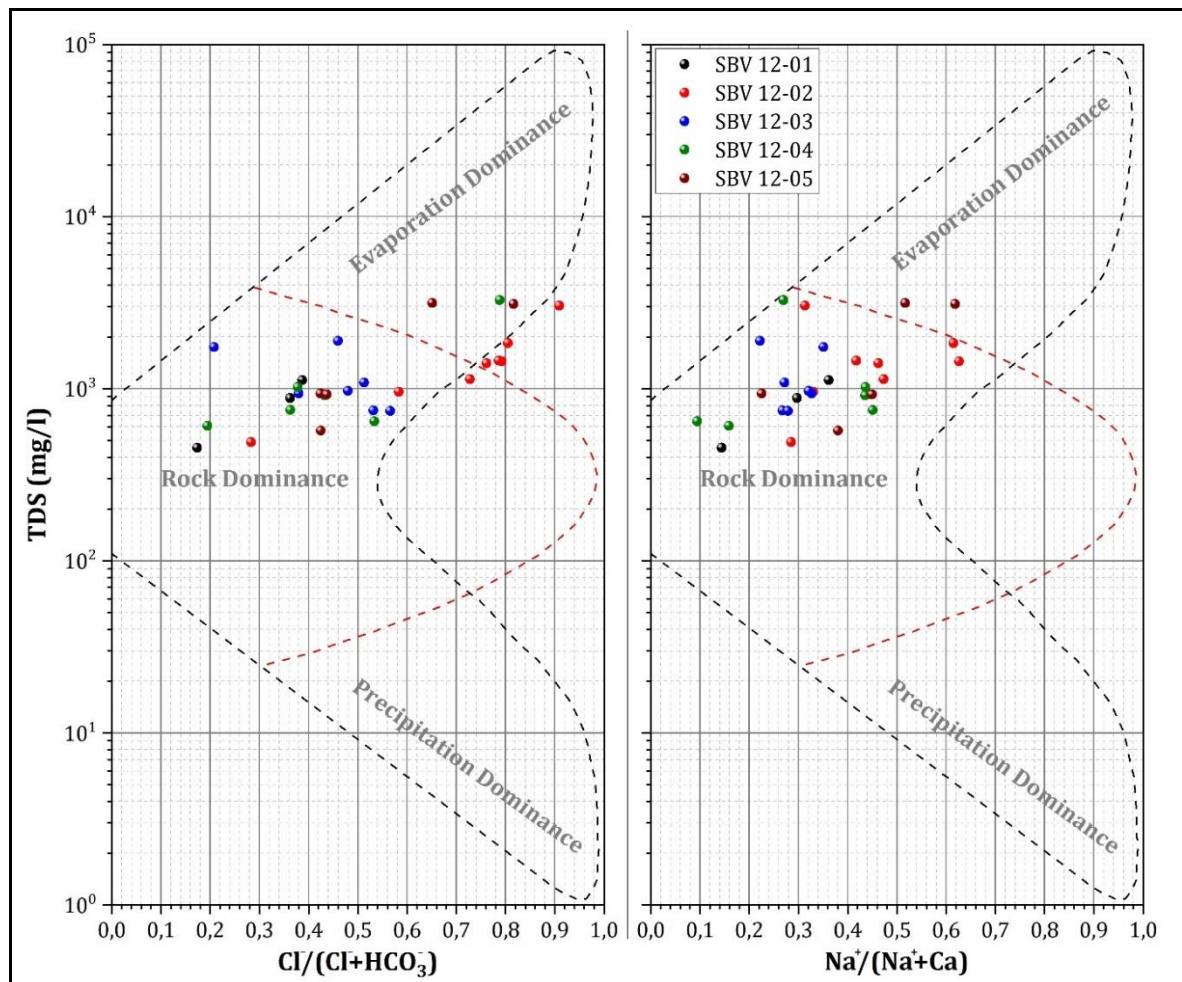


Figure 74. Diagrammes de Gibbs pour les processus hydrogéochimiques des anions et des cations.

5.4. Confirmation à partir du Diagramme de Chadha

Le diagramme de Chadha, est une version simplifiée du diagramme de Piper et le diagramme étendu de Durov. Il met en évidence quatre principaux champs géochimiques. Appliqué aux

eaux du bassin versant de Medjerda (Fig.75), on note une dispersion des échantillons d'eau souterraine, avec une majorité dans le quadrant du domaine du Ca-Mg-HCO₃⁻, avec quelques puits situés dans le domaine de Ca-Mg-Cl-SO₄. Ceci met en évidence une domination des alcalino-terreux (Ca²⁺ et Mg²⁺) vis-à-vis des alcalins (Na⁺ et K⁺), la présence des alcalino-terreux s'accompagne des acides forts (Cl⁻ et SO₄²⁻), par contre les alcalins sont accompagnés par les anions acides faibles (CO₃⁻ et HCO₃⁻). Notons que les deux puits (SW-2-1) et (SW-2-8), se localisent dans le domaine (Na-K-Cl-SO₄), traduisant la domination des ions (Na, Cl, SO₄). Cette répartition confirme l'existence de plusieurs origines distinctes pour les types d'eau tel que démontré. Notons la présence d'autres types d'eau de moindre importance mais figurant sur le diagramme de Chadha (fig.75), expliquant la présence de certains faciès.

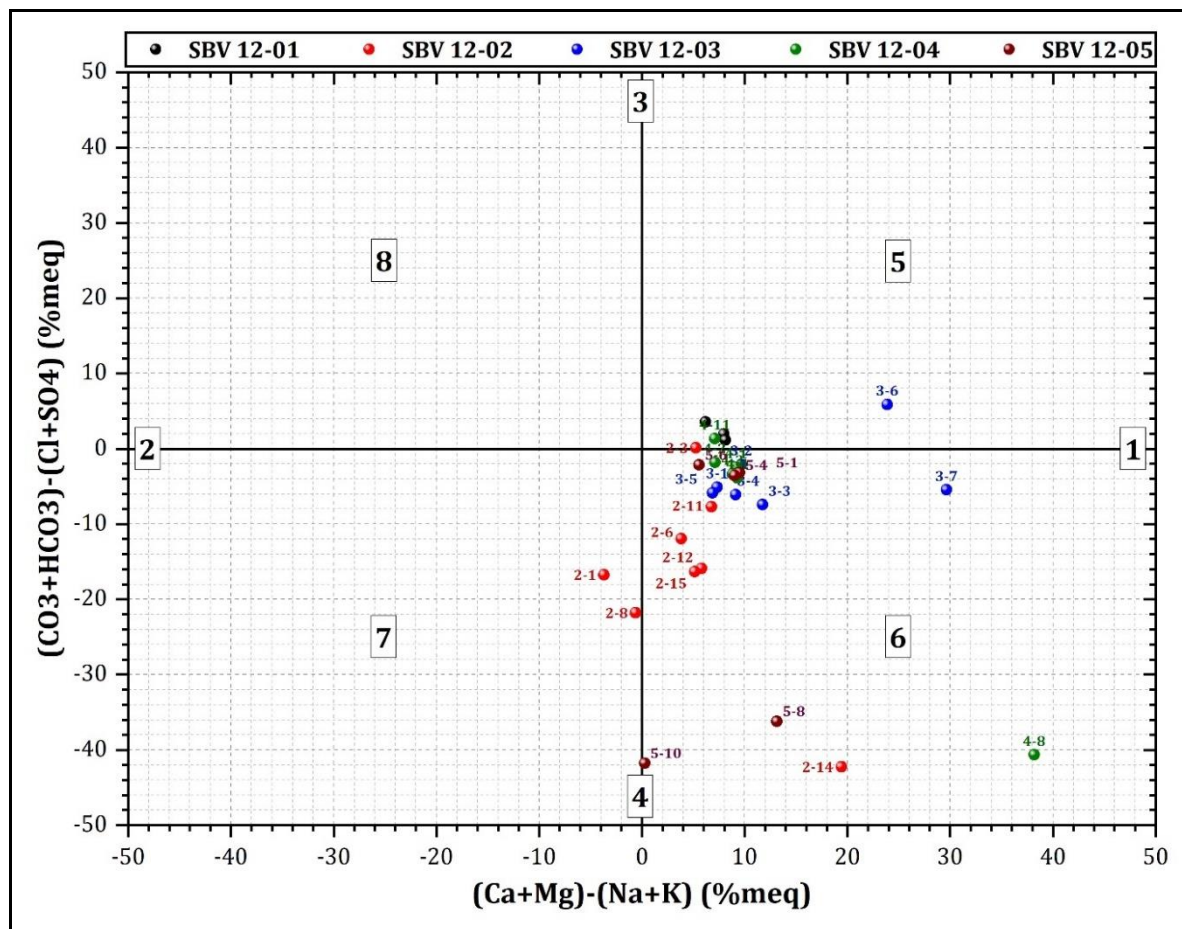


Figure 75. Diagramme de Chadha pour les eaux souterraines du bassin versant de la Medjerda.

6. Aptitude des eaux du bassin versant de la Medjerda à l'irrigation :

Pour réaliser notre travail, nous avons pris en considération les résultats issus des analyses des eaux. En premier, nous avons utilisé le diagramme de Richards, ce dernier combine le SAR et la conductivité des eaux. Le SAR est donné par la formule suivante :

$$\text{SAR} : \text{Na}^+ / (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} / 2)^{1/2}$$

Les classes déterminées à partir de combinaison SAR = f(conductivité), montrent la susceptibilité et les précautions quant à l'utilisation des eaux à des fins d'irrigation

6.1. Risque de salinité

La salinité des eaux, en excès peut compromettre l'irrigation et entraîner une imperméabilisation du sol, en effet si les eaux sont riches en sodium, ce dernier se dépose à la surface du sol et empêche le passage de l'eau de ce fait la plante n'est plus irriguée et meurt par asphyxie. Pour éviter de telles situations, on doit procéder régulièrement au contrôle de la salinité des eaux. Au niveau du bassin versant de la Medjerda, la conductivité des eaux, varie entre 776 à 4592 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec une conductivité moyenne de 2052.34 $\mu\text{S}/\text{cm}$, comme indiqué sur la figure 74 suivante.

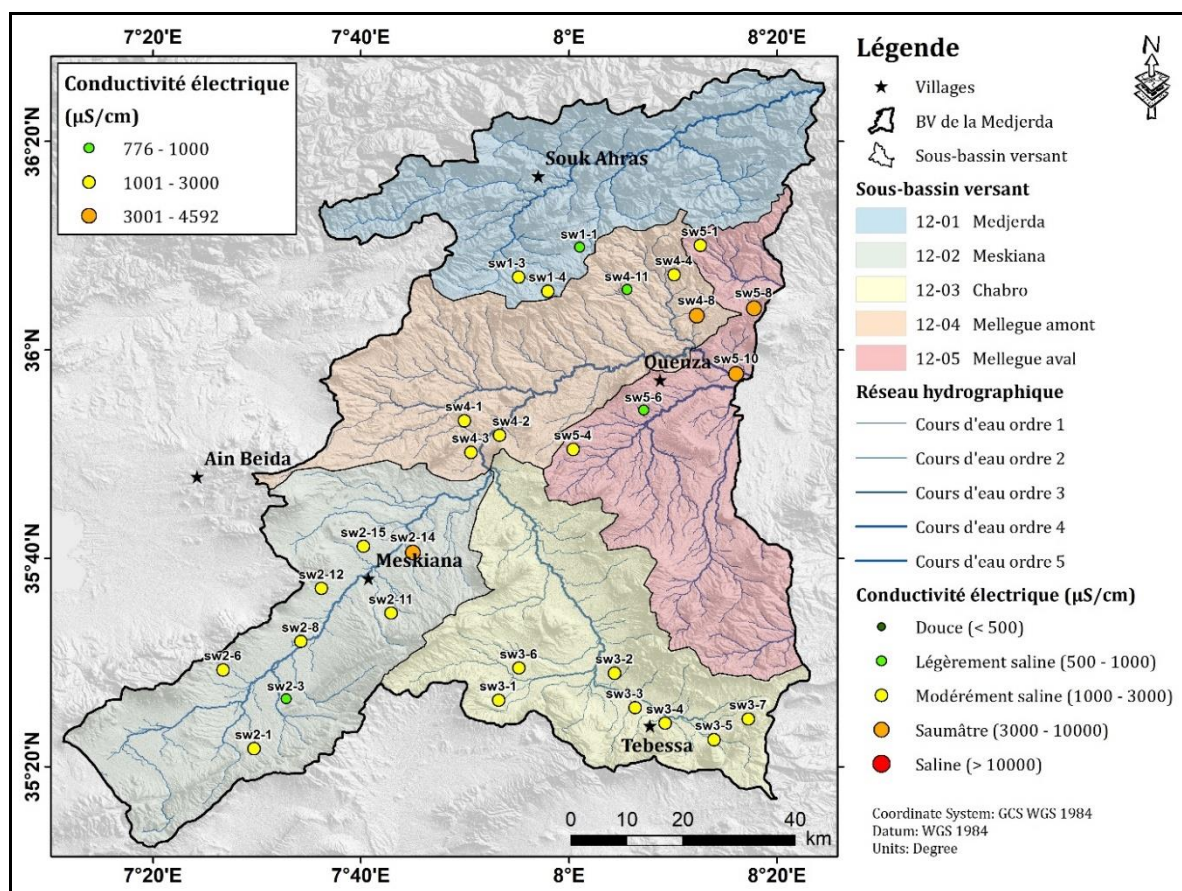


Figure 76. Variation de la salinité eaux souterraines du BV de la Medjerda.

L'observation de la carte (Fig.76), montre une variation de la conductivité au niveau des sous bassins versants. Dans le détail, les conductivités les plus élevées, indiquant des eaux saumâtres variant entre (3000 et 10000 $\mu\text{S}/\text{cm}$), caractérisent les puits situés dans la zone nord du SBV-12-05 (SW-5-8, 10) et deux autres puits situés dans le SBV-12-02 (SW-2-14) et SBV-12-04 (SW-4-8). À travers la carte réalisée, nous pouvons dire que les eaux du bassin versant de la Medjerda, conviennent à l'irrigation sans risque de sodisation.

6.2. Application du Diagramme de Richards

Le diagramme de Richards basé sur la combinaison de la conductivité électrique et du SAR. La figure 77, montre que les eaux des puits analysés se répartissent dans les classes suivantes : C3-S1, C4-S1 et C4-S2, cette classification, dans le détail on note :

- (C3 et S1) : En général, eau convenant à l'irrigation de cultures tolérantes au sel (risque moyen de salinité avec un faible risque de sodium et d'alcalinité),
- (C4 et S1) : En général, eau fortement minéralisée pouvant convenir à l'irrigation (risque élevé de salinité avec un faible risque d'alcalinité), et
- (C4 et S2) : de certaines espèces bien tolérantes au sel et sur des sols bien drainés et lessivés

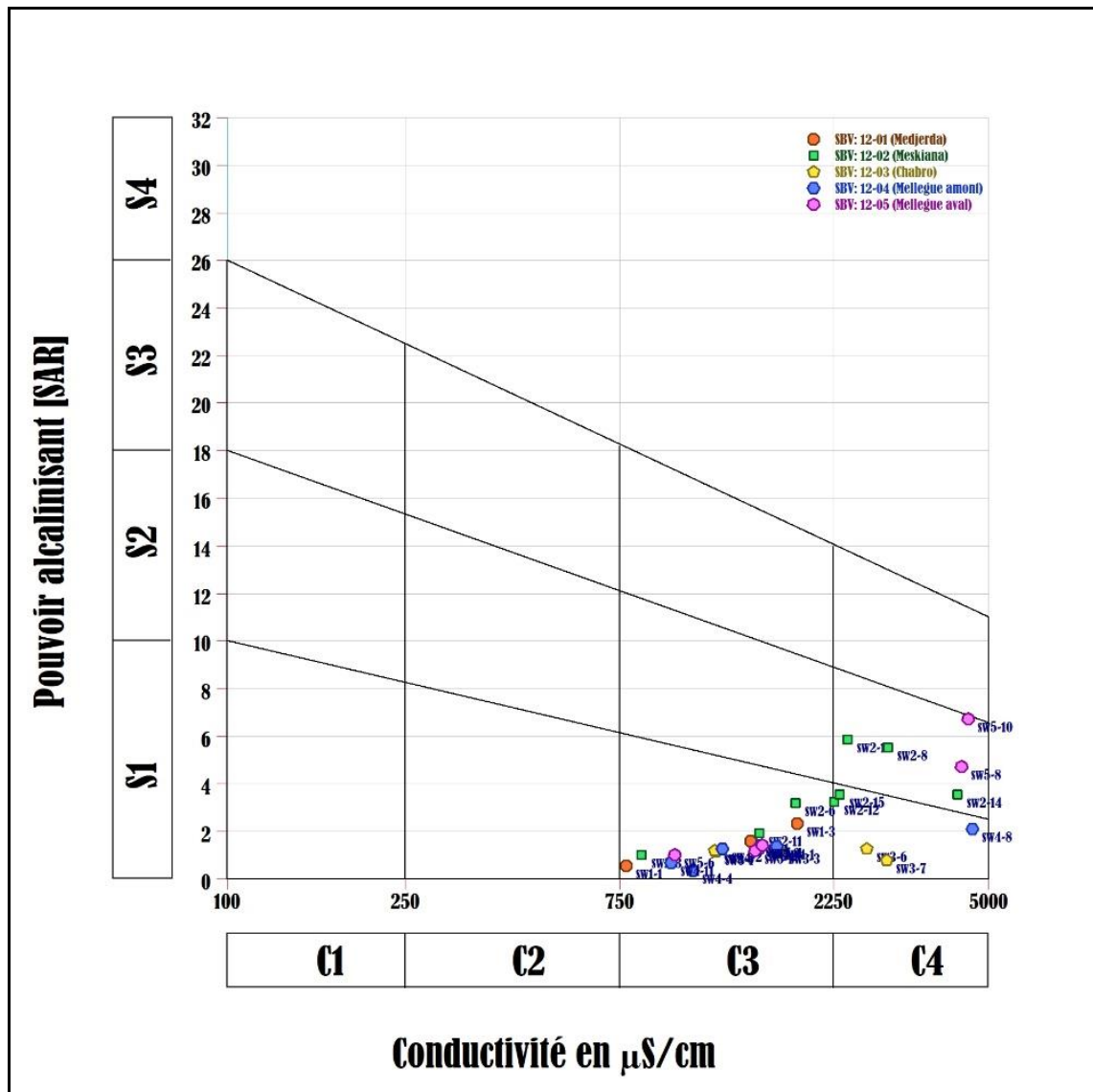


Figure 77. Diagramme de Richards (SAR) des eaux souterraines dans le bassin versant de la Medjerda.

L'analyse du diagramme de Richards (Figure ci-dessus) nous a permis de déduire que tous les échantillons d'eau souterraine analysés, appartiennent à la troisième et quatrième classe dont le risque de salinisation est moyen à fort. Cela correspond à la troisième et quatrième

catégorie de classifications, ou les valeurs de conductivité se situent dans la plage (750–2250) et (2250–5000) ($\mu\text{S}/\text{cm}$). Ces résultats indiquent que la plupart des échantillons conviennent à des fins d'irrigation.

En se basant sur la classification de l'eau d'irrigation basée sur la méthode SAR (pouvoir alcalinisant), on peut déduire que tous les échantillons d'eau de la zone d'étude appartiennent à la première et la deuxième classe dont le risque de SAR est faible à moyen, révélant les trois catégories suivantes :

- (C3 et S1) : (risque moyen de salinité avec un faible risque de sodium et d'alcalinité),
- (C4 et S1) : (risque élevé de salinité avec un faible risque d'alcalinité), et
- (C4 et S1) : (risque élevé de salinité avec un moyen risque d'alcalinité) respectivement.

Il ressort de cette classification que dans l'ensemble, les eaux sont d'une qualité admissible pour l'irrigation.

6.3. Risque de sodium

L'évaluation du risque de sodium repose sur le rapport d'adsorption de sodium (SAR), un indicateur essentiel dans le contexte de l'irrigation. Le SAR est déterminé en comparant les concentrations de Na^+ à celles de Ca^{2+} et Mg^{2+} (Zhou et al., 2020). Cet indice est crucial pour évaluer la quantité de sodium dans l'eau d'irrigation et son impact potentiel sur le sol. En effet, le sodium peut être absorbé par les surfaces du sol, influençant ainsi la perméabilité du sol. Le pourcentage de sodium (%Na) constitue un indicateur précieux pour évaluer le risque potentiel de dommages causés par le sodium à la structure du sol.

Cinq catégories de la qualité de l'eau d'irrigation en fonction de l'évolution du %Na dans le sol sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau 42. Classification de la qualité de l'eau d'irrigation en fonction du pourcentage de sodium (%Na) et de la conductivité électrique (CE) (Wilcox, 1955).

Numéro de la classe	(%Na)	Classe d'eau
01	<20	Excellente
02	20–40	Bonne
03	40–60	Utilisable
04	60–80	Douteuse
05	>80	Inadaptée

Une analyse a été menée pour évaluer la pertinence de l'eau pour l'irrigation en tenant compte de la relation entre le rapport EC et le %Na, comme illustré dans la figure ci-dessous. Ainsi, pour une irrigation agricole à long terme, l'eau est considérée comme appropriée si sa teneur

(1950) et Nwanosike al. (2019), l'indice de perméabilité est un critère basé sur la solubilité du sel et la réaction se produisant dans la solution du sol par échange de cations pour estimer la qualité des eaux d'irrigation. Il est donné par la formule suivante :

$$PI = Na^+ + \left[\frac{(HCO_3^-)^{1/2}}{(Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^{2+})} * 100 \right]$$

L'indice de perméabilité est classé dans trois catégories comme mentionné dans le tableau suivant :

Tableau 43. Catégories de l'indice de perméabilité de l'eau.

Numéro de la classe	IP (%)	Classe d'eau
01	IP >75%	Excellente
02	25 % < IP < 75 %	Bonne
03	IP <25%	Mauvaise

L'analyse de l'indice de perméabilité des échantillons dans le bassin versant de la Medjerda, montre que l'ensemble des eaux souterraines étaient d'une qualité excellente pour l'irrigation. Ces résultats indiquent que l'impact de l'eau d'irrigation sur les propriétés du sol est globalement limité. Néanmoins, il est toujours préconisé de surveiller les effets à long terme de l'irrigation avec les eaux souterraines et de surface sur la perméabilité des sols dans la zone d'étude (Y. Wang et al., 2023).

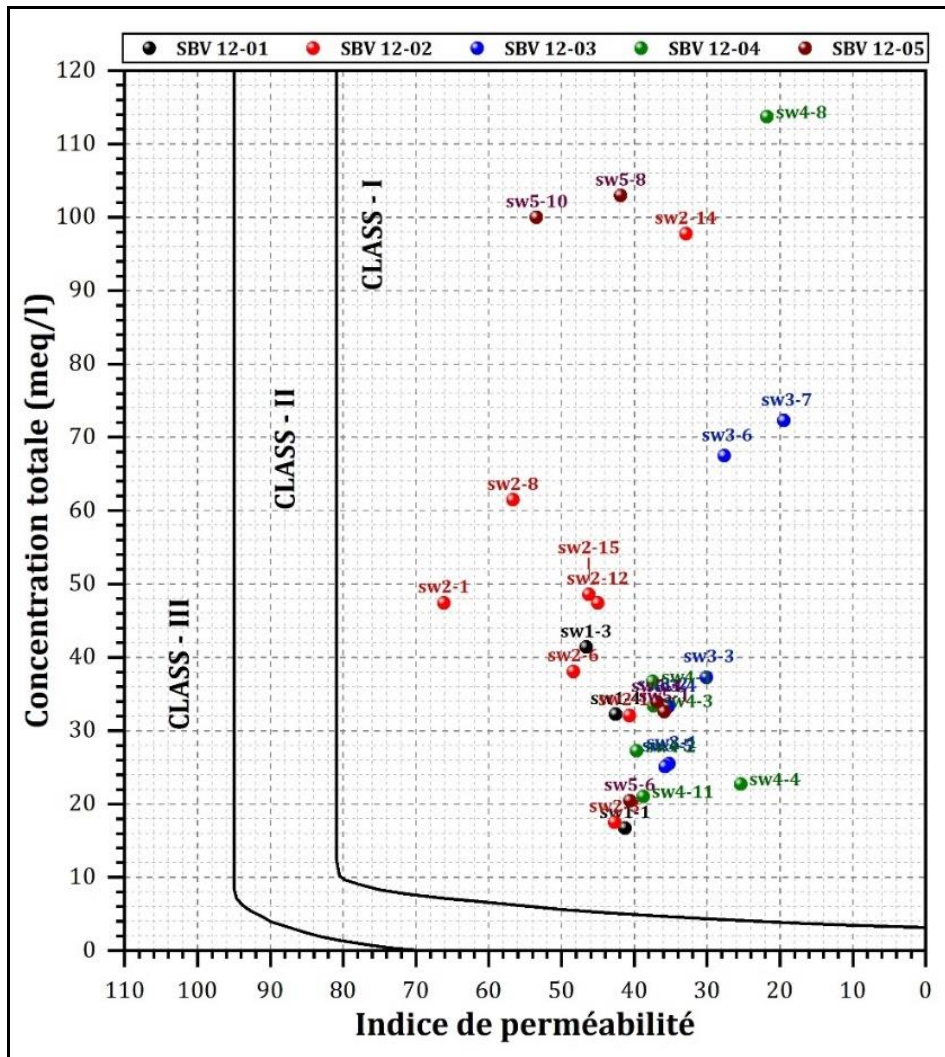


Figure 79. Indice de perméabilité.

8. Conclusion :

L'analyse qualitative spatiale des eaux souterraines dans le bassin versant de la Medjerda révèle une diversité de la qualité des eaux entre les différentes nappes. En ce qui concerne leur utilisation pour la consommation humaine, certains points, notamment les forages captant l'aquifère calcaire profond de Taoura, sont pertinents pour l'alimentation en eau potable. La classification de la qualité des eaux d'irrigation en fonction de la conductivité électrique (CE) et du rapport de sodium adsorbé (SAR) indique qu'elles sont adaptées à l'utilisation dans le secteur agricole, présentant un risque faible à moyen pour le sol et les plantes.

En conclusion, quelle que soit la destination envisagée pour les eaux souterraines des nappes situées dans le bassin versant de la Medjerda, des précautions de vérifications préalables sont impératives avant leur utilisation.



Conclusion générale



Conclusion générale et perspectives

L'objectif principal de cette étude était de formuler des stratégies de gestion quantitative et qualitative de l'eau à l'échelle locale et régionale, adaptées aux changements climatiques, et aux caractéristiques spécifiques (géographiques, hydrologiques, hydrogéologiques, et géologiques) permettant de maintenir les différentes fonctions écosystémiques du bassin versant de la Medjerda. Pour atteindre cet objectif, l'utilisation de Systèmes d'Information Géographique (SIG) a été privilégiée, permettant la visualisation, l'identification et la cartographie des ressources en eau souterraine, en tant qu'outils efficaces d'aide à la décision dans la gestion et la protection des ressources en eau, en particulier dans un contexte de variabilité climatique. Cette approche s'est appuyée sur l'utilisation de la télédétection, de l'analyse multicritère, notamment le processus de l'analyse hiérarchique floue, elle a également impliqué l'utilisation de diverses données, telles que les données climatiques, satellitaires (images Landsat, Modèle Numérique de Terrain (MNT)), données géologiques, hydrogéologiques, et l'extraction du réseau hydrographique. À partir de ces données, cinq chapitres détaillés, fiables, et bien connectés ont été élaborés en fonction des problématiques traitées et des objectifs ciblés.

Pour atteindre ces objectifs, plusieurs techniques ont été mises en œuvre, notamment la méthode d'interpolation spatiale (IDW) des différentes données disponibles, les prétraitements et la classification des images satellitaires, l'extraction et la hiérarchisation du réseau hydrographique, la délimitation de la zone d'étude et des sous-bassins qui les composent, etc. Ainsi, au-delà du premier chapitre qui décrit la zone d'étude, les cinq autres chapitres ont été réalisés pour garantir une gestion optimale des ressources en eau souterraine dans le bassin versant de la Medjerda.

Extraction du réseau hydrographique, délimitation de la zone d'étude, analyse morphométrique et priorisation des sous-bassins :

Le bassin versant de la Medjerda, répertorié sous le numéro 12 par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH), s'étend dans la partie Sud-Est de la région hydrographique constantinoise. Il se subdivise en cinq sous-bassins, couvrant une superficie totale de 7787,72 km², soit 17,69 % de la surface totale. Chacun de ces sous-bassins présente des configurations hydrographiques distinctes, fortement influencées par des facteurs tels que le climat, la topographie, l'hydrologie, la pédologie et la géologie. Chaque sous-bassin est drainé par un réseau hydrographique organisé autour d'un cours d'eau principal et de ses affluents, contribuant ainsi au drainage global du bassin. Le réseau hydrographique de la Medjerda se distingue par la présence de cinq cours d'eau principaux, dont deux sont caractérisés par un débit fort et par l'ordre 5 (Mellegue amont et Mellegue aval). Le cours d'eau du Mellegue sert de point de convergence pour les deux autres cours d'eau qui drainent les sous-bassins de Meskiana (SBV-

12-02) et de Chabro (SBV-12-03), englobant ainsi la partie sud de la région de Tébessa. Le deuxième cours d'eau de la Medjerda prend sa source dans les monts de la Medjerda, au niveau de la commune de Khemissa, puis il s'oriente vers le nord-est, en traversant la région entière de Souk Ahras, pour ensuite atteindre son embouchure aux limites du territoire tunisien. Les drains majeurs du réseau hydrographique sont généralement d'ordres 4 ou 5, jouant un rôle crucial dans la configuration et la fonctionnalité du bassin versant. L'analyse approfondie du réseau hydrographique met en évidence les principaux cours d'eau contribuant au potentiel hydrique immédiatement exploitable, tels que les oueds Medjerda, Chabro, Meskiana et Mellegue.

Les différents paramètres morphométriques d'un bassin représentent les meilleurs indices des formations géologiques et structurales, de la géomorphologie, de la topographie, et du climat. La morphométrie joue un rôle important dans plusieurs domaines, notamment le choix de nouveaux sites pour divers secteurs éventuels tels que la construction des zones urbaines et des usines au niveau du bassin, le choix des meilleures surfaces agricoles, ainsi que l'implantation de nouveaux forages et la construction de nouveaux barrages. Elle joue un rôle primordial dans la planification du contrôle et des précotions pour faire face les catastrophes naturelles imprévisibles comme les inondations et l'érosion. Réaliser une étude morphométrique d'une région sans intégrer la technique de priorisation vis-à-vis d'un objectif ou d'un problème quelconque contribue à diminuer la valeur du travail. Dans le présent chapitre, nous avons élaboré une méthode de priorisation basée sur une étude morphométrique bien détaillée et spatiale pour identifier le sous-bassin le plus propice à la recharge et au stockage des eaux souterraines dans la région hydrographique de la Medjerda.

La variation spatiale du rapport de bifurcation en fonction de l'augmentation des ordres des affluents indique une dissection complexe de la croute géologique superficielle favorisant une densité de drainage élevée et une propension aux écoulements superficiels. En revanche, les zones caractérisées par de faibles valeurs de (R_b) signalent également une densité d'écoulement superficiel réduite. De plus, les changements réguliers du rapport de longueur des cours d'eau suggèrent des stades avancés du développement géomorphique dans le bassin de la Medjerda.

L'analyse détaillée de cette partie conclut que les paramètres morphométriques du drainage et de la topographie ont le potentiel de révéler le comportement hydrologique et hydrogéologique de tout bassin fluvial. En d'autres termes, la morphométrie du drainage a la capacité suffisante de différencier les zones morphoclimatiques du monde grâce à ses valeurs différentes. La télédétection et les SIG peuvent être efficacement utilisés pour accéder aux caractéristiques morphométriques du drainage, ouvrant ainsi la voie à une planification hydrologique et hydrogéologique adaptée de ces zones. Les résultats de cette méthode de priorisation révèlent que Le (SBV) de la Medjerda, représentatif d'un climat humide à semi-aride, abrite un système

forestier dense, est caractérisé également par des activités humaines significatives manifestés par l'agriculture, l'arboriculture et l'industrie. Ce bassin présente un réseau de cours d'eau important, associé à un débit d'eau conséquent et un écoulement à une vitesse variant en fonction de la topographie, de la densité de couverture végétale, ainsi que des différentes failles géologiques présentes, indiquant sa susceptibilité à avoir un potentiel fort des eaux souterraines.

Cartographie de la dynamique spatio-temporelle des paramètres climatiques, bioclimatiques et du bilan hydrique dans le bassin versant de la Medjerda

Pour mieux cerner la variabilité spatio-temporelle hydro-climatique, nous avons adopté une approche cartographique. Les indices bioclimatiques et les paramètres du bilan hydrique tels que la précipitation, l'évapotranspiration potentielle (ETP), l'évapotranspiration réelle (ETR), l'excédent, le ruissellement, le réserve facilement utilisable (RFU) et l'infiltration ont été cartographiés à l'échelle du bassin pour trois années distinctes. Cette démarche nous a permis de suivre l'évolution climatique à l'échelle mensuelle, saisonnière et annuelle. Les résultats obtenus confirment la dynamique spatio-temporelle des variables hydro-climatiques dans cette région aride. Ainsi, une baisse effective de la pluviométrie du bassin versant de la Medjerda est constatée durant la saison estivale pour les trois années sélectionnées, de même pour la température, on remarque une diminution de la température pendant la saison hivernale au cours des trois années. Spatialement, le phénomène s'est beaucoup plus accentué dans le nord et le centre que dans le sud du bassin. Cette variation spatiale des différents paramètres à l'échelle mensuelle et annuelle met en évidence la régionalisation climatique des stations du bassin, attestant de deux zones homogènes opposées. Les stations situées dans le nord-est au niveau de la région de Souk Ahras sont caractérisées par le régime climatique méditerranéen. En revanche, celles du sud du bassin versant de la Medjerda au niveau de la région de Tébessa correspondent au régime climatique sec. Étant donné que le bilan hydrique est en relation directe avec la précipitation, on peut donc déduire que la dynamique spatiale et temporelle du bilan hydrique est similaire à l'évolution des précipitations dans chaque zone. L'augmentation des hauteurs pluviométriques moyennes annuelles en 2010 confirme globalement la période humide et les valeurs élevées de l'infiltration.

En ce qui concerne les niveaux moyens de l'évapotranspiration potentielle (ETP) dans le bassin versant de la Medjerda, ils se révèlent assez élevés, surtout dans la partie sud du bassin, bien que leur variabilité soit significative à la fois dans le temps et dans l'espace. Cette variabilité temporelle est influencée par plusieurs paramètres. Le pic estival est directement lié aux températures élevées, à une exposition prolongée au soleil et à des records de rayonnement global. En revanche, le minimum hivernal est associé à la fréquence des conditions météorologiques perturbées dans la région. Cependant, la variation spatiale de l'ETP est

attribuée à l'influence de la topographie caractérisée par un relief accidenté. Les valeurs de l'évapotranspiration réelle (ETR) se maintiennent à des niveaux relativement élevés, exhibant une distribution spatiale inverse de l'ETP, en corrélation avec les caractéristiques de l'occupation du sol dans la région. Quant à l'évolution spatio-temporelle de l'ETR, elle s'explique non seulement par les facteurs climatiques et leurs impacts sur le développement de la couverture végétale, mais également par le statut de la réserve utile. En effet, cette réserve n'est pratiquement disponible qu'en hiver (mois de décembre, janvier, février, mars), et au-delà, sa quantité diminue progressivement en fonction de la diminution des précipitations jusqu'à s'épuiser presque totalement en été. En conclusion, la dynamique spatio-temporelle du bilan hydrique est cohérente avec les résultats de l'analyse morphométrique et topographique, ainsi qu'avec la carte de priorisation des sous-bassins. L'aspect essentiel ici, qui marque l'originalité de ce travail, est l'intégration de la carte de priorisation dans les études de la climatologie et de la cartographie des potentialités en eau souterraine. Cependant, la carte finale de l'infiltration a été utilisée comme un outil de validation de la cartographie du potentiel des eaux souterraines. Nous n'avons toutefois pas pu confronter nos résultats à des mesures de terrain issues d'expérimentations, comme c'est souvent le cas dans la phase de validation d'un modèle. Cette étape pourra peut-être être abordée dans la continuité de ce projet bilatéral à l'avenir.

Cartographie du potentiel en eaux souterraines dans le bassin versant de la Medjerda :

Dans le but d'identifier les secteurs présentant un potentiel aquifère dans le bassin versant de la Medjerda, cette partie d'étude a mis en place un modèle intégrant les données de l'analyse multicritère au sein d'un Système d'Information Géographique (SIG), en utilisant le processus de l'analyse hiérarchique floue basé sur l'échelle triangulaire. Sept critères, ont été sélectionnés à savoir, la géologie, le sol, la précipitation, la pente, la densité de drainage, la densité de linéaments, ont été modélisés au sein d'un Système d'Information géographique (GIS), afin d'identifier les zones présentant un potentiel aquifère dans ce bassin versant. La carte résultante met en lumière une variabilité spatiale des secteurs à potentiel aquifère, varie d'un sous-bassin à l'autre. Trois catégories ont été identifiées et réparties dans les sous-bassins, avec une échelle allant de « faible » à « élevée ». Le SBV-12-01 de la Medjerda est identifié comme très susceptible à la recharge et au stockage des eaux souterraines, la classe modérée étant la plus représentative avec 1047,73 km², soit environ 69,94% de sa superficie globale, suivie par la classe élevée 444,46 km², représentant environ de 29,67 %. Ces deux classes importantes englobent la quasi-totalité du SBV-12-01, tandis que la classe « faible » est la moins représentative, couvrant seulement 5,82 km² soit 0,39 % de la superficie totale. Les deux sous-bassins (SBV-12-04, 05) sont classés respectivement deuxième et troisième selon leur degré d'importance en termes de potentiel en eau souterraine.

Cette carte revêt une importance particulière en mettant l'accent sur les zones vulnérables à une exploitation irrationnelle. De plus, elle offre la possibilité d'optimiser la sélection des sites pour l'implantation de nouveaux forages dans cette région aride, présentant un risque de sécheresse et d'une pénurie des ressources en eaux souterraines. Les deux sous-bassins de Meskiana et de Chabro (SBV-12-02, 12-03), situés dans le sud du bassin de la Medjerda sont caractérisés par un potentiel faible. Cette classification met en évidence le degré d'influence de la précipitation sur la cartographie du potentiel en eau souterraine.

Étude hydrochimique des eaux souterraines dans le BV de la Medjerda

L'objectif de cette partie est d'évaluer l'évolution spatiale de la qualité des ressources en eaux souterraines dans le bassin versant de la Medjerda, en mettant particulièrement l'accent sur la problématique de la salinité. L'analyse se concentre sur l'influence de la variabilité climatique de l'amont vers l'aval du bassin et du nord vers le sud, ainsi que sur l'influence de la géologie caractérisée par la présence des formations triasiques jusqu'au Quaternaire.

D'un point de vue hydrogéochimique, les eaux des nappes souterraines situées dans les différents sous-bassins de la Medjerda présentent une évolution presque similaire malgré leurs différences d'âge. On observe une transition du faciès bicarbonaté calcique (pour les eaux de pluie) au faciès bicarbonaté calcique et magnésien (pour les eaux de puits), et enfin au faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien pour les eaux de forages. Les eaux issues des puits présentent une forte minéralisation due aux ions bicarbonates, tandis que celles des nappes profondes affichent une faible minéralisation dominée par les ions calcium. La minéralisation générale des eaux est influencée par les processus d'interaction entre l'eau et la roche. Dans l'ensemble, les eaux des nappes profondes provenant des forages sont de bonne qualité du point de vue physico-chimique, respectant les normes de l'OMS.

En ce qui concerne la qualité des eaux d'irrigation, l'évaluation de la qualité des eaux souterraines utilisées en irrigation dans les différents sous-bassins est nécessaire vue les problèmes que vit la région comme la sécheresse et la non disponibilité des eaux superficielles ainsi que la forte demande en eau résultant des activités agricoles. L'analyse de tous les paramètres caractérisant la salinité, pendant la période d'échantillonnage, a permis d'évaluer la qualité de ces eaux par des méthodes classiques. Cette évaluation a révélé que les eaux sont d'une salinité modérée à élevée, touchant presque la totalité du bassin, avec le SBV-12-05 caractérisé par une salinité saumâtre. Néanmoins, elle demeure modérée pour la plupart des points d'eau dans le bassin. Cette salinité est influencée par divers facteurs tels que : la lithologie complexe et hétérogène composée principalement de formations gypsifères et d'évaporites riches en Cl, Na, SO₄, et Ca²⁺, ainsi que d'argiles marneuses. Les conditions climatiques semi-arides caractérisées par une pluviométrie importante en saison hivernale provoquent la dissolution des

évaporites et des calcaires bordant les nappes ; par ailleurs, les fortes températures estivales contribuent à une évapotranspiration importante, entraînant une augmentation de la salinité. Selon la classification de l'eau d'irrigation basée sur la méthode SAR, les eaux souterraines appartiennent à la première et la deuxième classe dont le risque de SAR est faible à moyen présentant un faible danger d'alcalinisation et pourraient être utilisées en irrigation. Il ressort de cette classification que dans l'ensemble, les eaux sont d'une qualité admissible pour l'irrigation. En conclusion, quelle que soit l'utilisation envisagée pour les eaux souterraines des nappes du bassin versant de la Medjerda, des vérifications préalables sont impératives pour garantir leur adéquation.



Références bibliographiques



Références bibliographiques

- Aadil Hamid, R. A. H. (2013). Application of morphometric analysis for geo-hydrological studies using geo-spatial technology –a case study of vishav drainage basin. *journal of waste water treatment & analysis*, 04(03). <https://doi.org/10.4172/2157-7587.1000157>
- Abdulkareem, J. H. (n.d.). Long-Term hydrologic impact assessment of non-point source pollution measured through Land Use / Land Cover (LULC) changes in a tropical complex catchment .*Earth Systems and Environment, March*. <https://doi.org/10.1007/s41748-018-0042-1>
- Abdulkareem, J. H., Pradhan, B., Nor, W., Sulaiman, A., & Rohaizah, N. (2018). Quantification of runoff as influenced by morphometric characteristics in a rural complex catchment. *Earth Systems and Environment*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s41748-018-0043-0>
- ABH (2013) Présentation de la région Constantinois–Seybousse-Mellegue en général, et le bassin de la Seybousse en particulier.
- Adnan, M. S. G., Dewan, A., Zannat, K. E., & Abdullah, A. Y. M. (2019). The use of watershed geomorphic data in flash flood susceptibility zoning: a case study of the Karnaphuli and Sangu river basins of Bangladesh. *Natural Hazards*, 99(1), 425–448. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03749-3>
- Aggoun B., (1993) : Étude hydrogéologique de la région de Terreguelt en vue de l'alimentation en eau potable de la ville de Sedrata. Mémoire d'Ingénieur I.S.T. Université de Annaba.
- Altaf, S., Meraj, G., & Romshoo, S. A. (2014). Morphometry and land cover based multi-criteria analysis for assessing the soil erosion susceptibility of the western Himalayan watershed. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186(12), 8391–8412. <https://doi.org/10.1007/s10661-014-4012-2>
- ANRH (2009) Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.
- Aouadi & Zeghadnia S., (1990) : Approche hydrogéologique de la plaine de Sedrata-Tiffech et estimation approximative des ressources et réserves en eau souterraine. Mémoire d'Ingénieur I. S. T. Université de Annaba.
- Arabameri, A., Tiefenbacher, J. P., Blaschke, T., Pradhan, B., & Bui, D. T. (2020). Morphometric analysis for soil erosion susceptibility mapping using novel gis-based ensemble model. *Remote Sensing*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/rs12050874>
- Asfaw, D., & Workineh, G. (2019). Quantitative analysis of morphometry on Ribb and Gumara watersheds: Implications for soil and water conservation. *International Soil and Water Conservation Research*, 7(2), 150–157. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.02.003>
- Bahir, M., Jalal, M., Mennani, A., & Laftouhi, N. (2001). Potentialites hydrogéologiques du synclinal de Kourimat (bassin d'Essaouira, Maroc). *Estudios Geologicos*, 57(1–2), 47–52.
- Bali, R., Agarwal, K. K., Ali, S. N., Rastogi, S. K., & Krishna, K. (2012). Drainage morphometry of Himalayan Glacio-fluvial basin, India: Hydrologic and neotectonic implications. *Environmental Earth Sciences*, 66(4), 1163–1174.

<https://doi.org/10.1007/s12665-011-1324-1>

- Belloula M., (2008): Modélisation des écoulements et perspectives de prévention contre les risques d'inondation dans quelques bassins de la Medjerda (Confins Algéro-Tunisiens). 168P.
- Benchetrit Maurice. Les sols d'Algérie. In : Revue de géographie alpine, tome 44, n°4, 1956. pp. 749-761.
- Bisht, S., Chaudhry, S., Sharma, S., & Soni, S. (2018). Assessment of flash flood vulnerability zonation through Geospatial technique in high altitude Himalayan watershed, Himachal Pradesh India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 12, 35–47.
- Bouklab, M., Bougherira, N., Djabri, L., Vanclooster, M., & Kadir, M. (2022). Fuzzy analytical hierarchy process for groundwater potential mapping in a Mediterranean catchment: the case of the Medjerda catchment in northeast Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(19), 1–21. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10714-1>
- Bousnoubra H., (2002) : Ressources en eaux des régions de Skikda, Annaba, El Tarf, Guelma, Souk-Ahras (N-E Algérie) (Évaluation, gestion et perspective ; Vulnérabilité et protection), Thèse de doctorat d'état, 159p.
- Brahim, B., Larbi, B., Abdallah, D., & Driss, S. (2016). Utilisation Du Sig Dans L'analyse Morphométrique Et La Prioritisation Des Sous-Bassins Versants De Oued Inaouene (Nord-Est Du Maroc). *European Scientific Journal*, ESJ, 12(6), 266. <https://doi.org/10.19044/esj.2016.v12n6p266>
- Buckley, J. J. (1985). Fuzzy hierarchical analysis. *Fuzzy Sets and Systems*, 17(3), 233–247. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(85\)90090-9](https://doi.org/10.1016/0165-0114(85)90090-9)
- Bureau, F. M. (2011). *Page i*. i–i. <https://doi.org/10.1109/isqed.2008.4479675>
- Castillo, V., Segovia, A. D., & Alonso, S. G. (1988). Quantitative study of fluvial landscapes. Case study in Madrid, Spain. *Landscape and Urban Planning*, 16(1–2), 201–217.
- Chang, K. (2014). An Introduction to Geographic Information Systems. In *Libraries*. <https://doi.org/10.1201/b12440-10>
- Chung, C.-J. F., & Fabbri, A. G. (2004). Quaternary codes and biphasic sequences from Z8-codes. *Problemy Peredachi Informatsii*, 40(2), 50–62. <https://doi.org/10.1023/B>
- Cocody, 2013. Conception d'outils d'aide à la décision pour la gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de variabilité climatique : Application à la sélection des zones à potentialité aquifère et moins vulnérables à la pollution du bassin du N'Zi. 212p.
- David L (1956) Étude géologique des monts de la haute Medjerda. Dissertation, Paris
- Derradji, T. (2023). Régionalisation et cartographie des précipitations et des indices de sécheresse dans les bassins versants du Nord-Est algérien. 126p.
- De Fulvio, S. et Olori, L. Definitions and classification of naturally soft and naturally hard waters. Chemical and physical characteristics of the water in some member states of the European community. Dans: Hardness of drinking water and public health. Proceedings of the European Scientific Colloquium, Luxembourg, 1975. R. Amavis, W.J. Hunter et

- J.G.P.M. Smeets (dir. de publ.). Pergamon for the Commission of the European Communities, New York, NY. p. 95 (1976).
- Djaba hichem. (2010). Ressources en eau et perspectives de gestion intégrée dans le bassin versant de la Medjerda (Souk Ahras, nord-est d'Algérie). 140p.
- DJIDEL. (2008). Pollution minérale et organique des eaux de la nappe superficielle de la cuvette de Ouargla (Sahara septentrional, Algérie). 165p.
- Dünkeloh, A., & Jacobeit, J. (2003). Circulation dynamics of Mediterranean precipitation variability 1948-98. *International Journal of Climatology*, 23(15), 1843–1866. <https://doi.org/10.1002/joc.973>
- DURAND J. H. (1953). Étude géologique, hydrogéologique et pédologique des croûtes en Algérie.
- Emrouznejad and William. (2017). Fuzzy Analytic Hierarchy Process. 431p.
- FAO. (2018). FAO publications catalogue 2021, 114. <https://doi.org/10.4060/cb4402>
- Friane F., (2000) : Ressources et approvisionnement en eau dans la région de Souk Ahras (Essai de synthèse). Mémoire d'Ingénieur en hydrogéologie. Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie. 82p.
- Ghachi A., (1986) : Hydrologie et utilisation de la ressource en eau en Algérie : le bassin de la Seybouse. Thèse de doctorat 3ème cycle. Ed. De l'OPU. Alger, N°2-2-1910. 508p.
- Ghosh, M., & Gope, D. (2022). Hydro - morphometric characterization and prioritization of sub - watersheds for land and water resource management using fuzzy analytical hierarchical process (FAHP): a case study of upper Rihand watershed of Chhattisgarh State , India. *Applied Water Science, February 2021*. <https://doi.org/10.1007/s13201-020-01340-x>
- Guasmi, I. (2004). Dégradation de la Qualité de l'eau Dans le Bassin Versant de l'Oued Medjerda (Souk-Ahras), Thèse de Magister de l'Université de Batna, Algérie
- Guasmi I. (2009). Pollution des eaux et pouvoir auto-épurateur de l'Oued Medjerda (Nord-est Algérien). 204.
- Gumma, M. K., & Pavelic, P. (2013). Mapping of groundwater potential zones across Ghana using remote sensing, geographic information systems, and spatial modeling. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185(4), 3561–3579. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2810-y>
- Hadley, R. and Schumm, S. (1961) Sediment Sources and Drainage Basin Characteristics in Upper Cheyenne River Basin. US Geological Survey Water-Supply Paper 1531-B, Washington DC, 198.
- Hojati, M., & Mokarram, M. (2016). Determination of a topographic wetness index using high resolution digital elevation models. *European Journal of Geography*, 7(4), 41–52.
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins, hydrophysical approach to quantitative morphology. *Nihon Ringakkai Shi/Journal of the Japanese Forestry Society*, 37(12), 555–558. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56)
- Hussein, A.-A., Govindu, V., & Nigusse, A. G. M. (2017). Evaluation of groundwater potential

- using geospatial techniques. *Applied Water Science*, 7(5), 2447–2461. <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0433-0>
- Joji, V. S., Nair, A. S. K., & Baiju, K. V. (2013). Drainage basin delineation and quantitative analysis of Panamaram watershed of Kabani river basin, Kerala using remote sensing and GIS. *Journal of the Geological Society of India*, 82(4), 368–378. <https://doi.org/10.1007/s12594-013-0164-x>
- Jothimani, M., Abebe, A., & Berhanu, G. (2022). Application of Remote Sensing, GIS, and Drainage Morphometric Analysis in Groundwater potential Assessment for sustainable development in Iyenda River Catchment, Konso Zone, Rift Valley, Southern Ethiopia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 982(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/982/1/012032>
- Kim, J. C., & Jung, K. (2015). Fractal Tree Analysis of Drainage Patterns. *Water Resources Management*, 29(4), 1217–1230. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0869-7>
- Kumar Dubey, S. (2015). Morphometric Analysis of the Banas River Basin Using the Geographical Information System, Rajasthan, India. *Hydrology*, 3(5), 47. <https://doi.org/10.11648/j.hyd.20150305.11>
- LAMBERT R., 1996. Géographie du cycle de l'eau. Presses Univ. Du Mirail, Toulouse, 439 p.
- MADR, 2018. Rapport technique de l'irrigation.
- Magesh, N. S., & Chandrasekar, N. (2012). GIS model-based morphometric evaluation of Tamiraparani subbasin, Tirunelveli district, Tamil Nadu, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(1), 131–141. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0742-z>
- Magesh, N. S., Chandrasekar, N., & Soundranayagam, J. P. (2011). Morphometric evaluation of Papanasam and Manimuthar watersheds, parts of Western Ghats, Tirunelveli district, Tamil Nadu, India: A GIS approach. *Environmental Earth Sciences*, 64(2), 373–381. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0860-4>
- Mahala, A. (2020). The significance of morphometric analysis to understand the hydrological and morphological characteristics in two different morpho-climatic settings. *Applied Water Science*, 10(1), 1–16. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1118-2>
- Malczewski, J. (2000). GIS and Multicriteria Decision Analysis. *The Journal of the Operational Research Society*, 51(2), 247. <https://doi.org/10.2307/254268>
- Mandal, U., Sahoo, S., Munusamy, S. B., Dhar, A., Panda, S. N., Kar, A., & Mishra, P. K. (2016). Delineation of Groundwater Potential Zones of Coastal Groundwater Basin Using Multi-Criteria Decision Making Technique. *Water Resources Management*, 30(12), 4293–4310. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1421-8>
- Marowka, A. (2018). On parallel software engineering education using python. *Education and Information Technologies*, 23(1), 357–372. <https://doi.org/10.1007/s10639-017-9607-0>
- MELTON, M. A. (1958). Drainage structure of morphometric properties of systemes and their controlling agents 1 moisture to plants is an element of a precipitation factor 442–460.
- Mogaji, K. A., Aboyeji, O. S., & Omosuyi, G. O. (2011). Mapping of lineaments for groundwater targeting in the basement complex region of Ondo State, Nigeria, using remote

- sensing and geographic information system (GIS) techniques. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, 3(7), 150–160. <http://www.academicjournals.org/ijwree>
- MR, R., C, B., & Achyuthan, H. (2019). Quantitative analysis of the drainage and morphometric characteristics of the Palar River basin, Southern Peninsular India; using bad calculator (bearing azimuth and drainage) and GIS. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 3(4), 295–307. <https://doi.org/10.1080/24749508.2018.1563750>
- Mustafa, A. S., Ahmed, U. I., & Naeem, N. O. (2016). Drainage Basin Morphometric Analysis of Galagu Valley. *Journal of Applied and Industrial Sciences*, 4(1), 6–12.
- Obeidat, M., Awawdeh, M., & Al-Hantouli, F. (2021). Morphometric analysis and prioritisation of watersheds for flood risk management in Wadi Easal Basin (WEB), Jordan, using geospatial technologies. *Journal of Flood Risk Management*, 14(2), 1–19. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12711>
- Odiji, C. A., Aderoju, O. M., Eta, J. B., Shehu, I., Mai-Bukar, A., & Onuoha, H. (2021). Morphometric analysis and prioritization of upper Benue River watershed, Northern Nigeria. *Applied Water Science*, 11(2), 1–28. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01364-x>
- P. Nikhil Raj, P., & A. Azeez, P. (2012). Morphometric Analysis of a Tropical Medium River System: A Case from Bharathapuzha River Southern India. *Open Journal of Modern Hydrology*, 02(04), 91–98. <https://doi.org/10.4236/ojmh.2012.24011>
- Piper, A. M. (1944). 914 Transactions American Geophysical Union, 914–928.
- Pophare, A. M., & Balpande, U. S. (2014). Morphometric analysis of Suketi river basin, Himachal Himalaya, India. *Journal of Earth System Science*, 123(7), 1501–1515. <https://doi.org/10.1007/s12040-014-0487-z>
- Rahmati, O., Nazari Samani, A., Mahdavi, M., Pourghasemi, H. R., & Zeinivand, H. (2015). Groundwater potential mapping at Kurdistan region of Iran using analytic hierarchy process and GIS. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(9), 7059–7071. <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1668-4>
- Rahmati, O., Samadi, M., Shahabi, H., Azareh, A., Rafiei-Sardooi, E., Alilou, H., Melesse, A. M., Pradhan, B., Chapi, K., & Shirzadi, A. (2019a). SWPT: An automated GIS-based tool for prioritization of sub-watersheds based on morphometric and topo-hydrological factors. *Geoscience Frontiers*, 10(6), 2167–2175. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.03.009>
- Rahmati, O., Samadi, M., Shahabi, H., Azareh, A., Rafiei-Sardooi, E., Alilou, H., Melesse, A. M., Pradhan, B., Chapi, K., & Shirzadi, A. (2019b). SWPT: An automated GIS-based tool for prioritization of sub-watersheds based on morphometric and topo-hydrological factors. *Geoscience Frontiers*, 10(6), 2167–2175. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.03.009>
- Rai, P. K., Mohan, K., Mishra, S., Ahmad, A., & Mishra, V. N. (2017). A GIS-based approach in drainage morphometric analysis of Kanhar River Basin, India. *Applied Water Science*, 7(1), 217–232. <https://doi.org/10.1007/s13201-014-0238-y>
- Razandi Y, Pourghasemi HR, Neisani NS, Rahmati O (2015) Application of analytical hierarchy process, frequency ratio, and certainty factor models for groundwater potential mapping using GIS. *Earth Sci Informatics* 8:867–883. <https://doi.org/10.1007/s12145-015-0220-8>

- E.A. Resmi, P. Murugavel, Gurnule Dinesh, B. Balaji, P.P. Leena, Varghese Mercy, Nair Sathy, Chowdhuri Subharthi, Tiwari Yogesh, Karipot Anandakumar, Thara V. Prabha. (2019). Observed diurnal and intraseasonal variations in boundary layer winds over Ganges valley, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Volume 188, Pages 11-25, ISSN 1364-6826, <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.03.012>.
- River, J., Kanti, T., & Sunil, H. (2018). Prioritization of sub - watersheds for soil erosion based on morphometric attributes using fuzzy AHP and compound. *Environment, Development and Sustainability*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s10668-018-0247-3>
- Saaty, Thomas L. (2004). Decision making — the Analytic Hierarchy and Network Processes (AHP/ANP). *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 13(1), 1–35. <https://doi.org/10.1007/s11518-006-0151-5>
- Saha, S., Das, J., & Mandal, T. (2022). Investigation of the watershed hydro-morphologic characteristics through the morphometric analysis: A study on Rayeng basin in Darjeeling Himalaya. *Environmental Challenges*, 7(January), 100463. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100463>
- Samal, D. R., Gedam, S. S., & Nagarajan, R. (2015). GIS based drainage morphometry and its influence on hydrology in parts of Western Ghats region, Maharashtra, India. *Geocarto International*, 30(7), 755–778. <https://doi.org/10.1080/10106049.2014.978903>
- Sawyer, C.N. et McCarty, P.L. Chemistry for sanitary engineers. 2e edition. McGraw-Hill Series in Sanitary Science and Water Resources Engineering, McGraw-Hill, Toronto (1967).
- Schumm, S. A. (1956). Geological Society of America Bulletin, evolution of drainage systems and slopes in Badlands at Perth Amboy New Jersey. *Bulletin of the Geological Society of America*, 67(5), 597–646. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1956\)67](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67)
- Shaban, A., Khawlie, M., & Abdallah, C. (2006). Use of remote sensing and GIS to determine recharge potential zones: The case of Occidental Lebanon. *Hydrogeology Journal*, 14(4), 433–443. <https://doi.org/10.1007/s10040-005-0437-6>
- Smith, K. (1950) Standards for Grading Textures of Erosional Topography. *American Journal of Science*, 248, 655-668. <http://dx.doi.org/10.2475/ajs.248.9.655>
- Solomon, S., & Quiel, F. (2003). Integration of remote sensing and GIS for groundwater assessment in Eritrea. In *Geoinformation for European-Wide Integration* (Issue April).
- Srivastava, P. K., & Bhattacharya, A. K. (2006). Groundwater assessment through an integrated approach using remote sensing, GIS and resistivity techniques: A case study from a hard rock terrain. *International Journal of Remote Sensing*, 27(20), 4599–4620. <https://doi.org/10.1080/01431160600554983>
- Strahler, A. (1957). Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology, *Transactions of the American Geophysical Union*. *Transactions, American Geophysical Union*, 38(6), 913–920.
- Strahler, A. (1964) Quantitative Geomorphology of Drainage Basins and Channel Networks. In: Chow, V., Ed., *Handbook of Applied Hydrology*, McGraw Hill, New York, 439-476.

- Thornthwaite, C. W. (1948). An Approach Toward a Rational. *Geographical Review*, 38(1), 55–94.
- Todd, E. C. D. (1978). Foodborne disease in Canada-1975 annual summary. *Journal of food protection*, 41(11), 910-918.
- Toubal A. W., (1993) : Étude du forage T1 dans le synclinal de Taoura. Mémoire d'Ingénieur I.S.T Université Badji-Mokhtar, Annaba.
- Tzeng, G.-H., & Huang, J.-J. (2011). *Title: Multiple Attribute Decision Making Methods and applications.*
- Umrikar, B. N. (2017). Morphometric analysis of Andhale watershed, Taluka Mulshi, District Pune, India. *Applied Water Science*, 7(5), 2231–2243. <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0390-7>
- Van Laarhoven and Pedrycz. (1983). Delft University. *Fuzzy Sets and Systems*, 11, 229–241.
- Villa J., (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, 665p.
- Wang, Y., Li, R., Wu, X., Yan, Y., Wei, C., Luo, M., Xiao, Y., & Zhang, Y. (2023). Evaluation of Groundwater Quality for Drinking and Irrigation Purposes Using GIS-Based IWQI, EWQI and HHR Model. *Water (Switzerland)*, 15(12). <https://doi.org/10.3390/w15122233>
- WHO. (2011). Water quality for drinking: WHO guidelines. *Encyclopedia of Earth Sciences Series*, 876–883. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4410-6_184
- Wilcox, L. V. (1955). *Classification and Use of Irrigation Waters. Department of Agriculture*, https://www.ars.usda.gov/arsuserfiles/20360500/pdf_pubs/P0192.pdf
- Yassaghi, A. (2006). Integration of Landsat imagery interpretation and geomagnetic data on verification of deep-seated transverse fault lineaments in SE Zagros, Iran. *International Journal of Remote Sensing*, 27(20), 4529–4544. <https://doi.org/10.1080/01431160600661283>
- Zhai, X., Zhang, Y., Zhang, Y., Guo, L., & Liu, R. (2021). Simulating flash flood hydrographs and behavior metrics across China: Implications for flash flood management. *Science of the Total Environment*, 763, 142977. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142977>
- Zhou, Y., Li, P., Xue, L., Dong, Z., & Li, D. (2020). Solute geochemistry and groundwater quality for drinking and irrigation purposes: a case study in Xinle City, North China. *Chemie Der Erde*, 80(4), 125609. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2020.125609>