



RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Echahid Cheikh Larbi Tébessi Tébessa

Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie

Département des Sciences de la Terre et de l'Univers

Laboratoire Eau et Environnement

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de DOCTORAT (LMD)

Spécialité : Hydrogéologie

*Apport des données hydroclimatologiques et hydrogéologiques à la
quantification des réserves en eau dans un bassin transfrontalier ; cas du
grand bassin versant de Safsaf, région de Tébessa (N.E Algérien)*

Par

RAMDANI Rayene Sirine

Directeur de thèse : FEHDI Chemseddine

Professeur, Université de Tébessa

Co-Directeur de thèse : RAHAL Omar

MCA, Université de Oum El Bouaghi

Devant le jury

Président : BOUBAYA Djamel

Professeur, Université de Tébessa

Examineur : GHRIEB Lassaad

Professeur, Université de Guelma

Examineur : BAALI Fethi

Professeur, Université de Tébessa

Examineur : DJEBNOUNE brahim

MCA, Université de Tébessa

Année universitaire : 2025-2026

Soutenue publiquement le 07/07/2026



Résumé

Cette thèse, réalisée dans le cadre du projet international PRIMA AG-WAMED, propose une approche intégrée pour évaluer et gérer les ressources en eau du bassin transfrontalier de Safsaf N.E Algérien. En combinant modélisation hydrogéologique (Visual MODFLOW Flex), modélisation hydrogéochimique (PHREEQC), télédétection et SIG, l'étude révèle plusieurs résultats majeurs.

La nappe miocène a subi un abaissement piézométrique critique de 55 m entre 2001 et 2024, principalement attribuable à la surexploitation. Les projections montrent que le maintien des pompages actuels entraînerait un abaissement supplémentaire de 5 à 10 m, tandis qu'une recharge artificielle via les carrières abandonnées pourrait induire une remontée de 21 à 54 m. Les analyses hydrogéochimiques identifient les eaux de l'Oued Goussa comme les plus compatibles pour cette opération.

L'étude intègre également une évaluation de la vulnérabilité aux crues éclair dans le bassin d'El Malabiod et caractérise l'impact de l'urbanisation dans le bassin de Safsaf à l'aide d'indices multispectraux. La corrélation entre la baisse piézométrique et la subsidence détectée par InSAR confirme l'origine anthropique de ces phénomènes.

Cette recherche démontre qu'une gestion durable exige une approche multidimensionnelle combinant recharge artificielle ciblée, limitation des prélèvements, conservation des zones de recharge et aménagement résilient, dans le cadre d'une gestion transfrontalière coordonnée.

Mots clés : El Malabiod, gestion durable des eaux, Safsaf El Ouesra, modélisation hydrogéologique, PhreeqC, AHP-SIG, subsidence (INSAR)

Abstract

This thesis, conducted under the international PRIMA AG-WAMED project, presents an integrated approach to assess and manage water resources in the transboundary Safsaf basin of Northeastern Algeria. By combining hydrogeological modeling (Visual MODFLOW Flex), hydrogeochemical modeling (PHREEQC), remote sensing, and GIS, the study yields several key findings.

The Miocene aquifer has undergone a critical water-level decline of 55 meters between 2001 and 2024, primarily due to over-pumping. Projections show that maintaining current extraction rates would lead to a further drop of 5 to 10 meters. In contrast, artificial recharge using abandoned quarries could raise water levels by 21 to 54 meters. Hydrogeochemical analysis identified the waters of the Oued Goussa as the most suitable source for this recharge due to their chemical compatibility.

The research also integrated an assessment of flash flood vulnerability in the El Malabiod basin and used multispectral indices to characterize the impact of urbanization in the Safsaf basin. The correlation between the groundwater decline and land subsidence measured by InSAR confirms a human-caused origin for these phenomena.

This work demonstrates that sustainable management requires a multidimensional strategy. This includes targeted artificial recharge, pumping restrictions, conservation of recharge areas, and resilient land-use planning, all implemented through coordinated transboundary governance.

Keywords: El Malabiod, Sustainable Water Management, Safsaf El Ouesra, Hydrogeological Modeling, PhreeqC, AHP-GIS, Subsidence (InSAR)

ملخص

تمت هذه الدراسة في إطار المشروع الدولي PRIMA AG-WAMED ، وتهدف إلى اعتماد نهج متكامل لتقييم وإدارة الموارد المائية في حوض صفصاف العابر للحدود في شمال شرق الجزائر. من خلال الجمع بين النمذجة الهيدروجيولوجية (Visual MODFLOW Flex) ، والنمذجة الهيدروجيوكيماوية (PHREEQC) ، والاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية، كشفت الدراسة عن عدة نتائج هامة.

لقد شهدت طبقة المياه الجوفية انخفاضًا بيزومتريًا حادًا بمقدار 55 مترًا بين عامي 2001 و2024، يُعزى أساسًا إلى الاستغلال المفرط. وتُظهر التوقعات أن استمرار معدلات الضخ الحالية سيؤدي إلى انخفاض إضافي بمقدار 5 إلى 10 أمتار، في حين أن إعادة التغذية الاصطناعية عبر المحاجر المهجورة قد يُحدث ارتفاعًا بمقدار 21 إلى 54 مترًا. وتحدد التحليلات الهيدروجيوكيماوية مياه وادي القوصى كأفضل مصدر لهذه العملية.

كما شملت الدراسة تقييمًا للهِشاشة تجاه الفيضانات المفاجئة في حوض الماء الأبيض، وتوصيف تأثير التحضر في حوض صفصاف باستخدام المؤشرات متعددة الأطياف. وتؤكد العلاقة بين الانخفاض البيزومتري والانهدام الأرضي المكتشف عبر InSAR أن هذه الظواهر ذات أصل بشري.

تُظهر هذه الدراسة أن الإدارة المستدامة تتطلب نهجًا متعدد الأبعاد يجمع بين إعادة التغذية الاصطناعية المستهدفة، والحد من الضخ، والحفاظ على مناطق إعادة التغذية، والتخطيط العمراني المرن، ضمن إطار إدارة عابرة للحدود ومنسقة.

الكلمات المفتاحية: الماء الأبيض، إدارة مستدامة للمياه، صفصاف –الوسرة، النمذجة الهيدروجيولوجية، PhreeqC ، AHP-نظم المعلومات الجغرافية، الانهدام الأرضي (InSAR)

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Dieu, source de toute sagesse et de toute force, qui m'a accompagné et soutenu tout au long de ce parcours doctoral. Sa guidance a été la lumière qui a éclairé mes réflexions et mes recherches.

Je souhaite remercier respectueusement le Professeur ***Fehdi Chemseddine***, mon directeur de thèse, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant d'encadrer ces travaux. Son expertise, sa rigueur scientifique et ses conseils éclairés ont été d'une valeur inestimable dans la réalisation de ce travail.

*J'*exprime ma reconnaissance aux membres du jury, ***Baali Fethi, Boubaya Djamel, Ghrieb Lasaad***, et ***Djebnoune Brahim*** pour avoir accepté d'évaluer cette thèse et d'honorer cette soutenance par leur présence.

*J'*exprime toute ma gratitude à ***Hamaidia Hacene***, laborantin des laboratoires pédagogiques de l'Université Echahid Cheikh Larbi Tébessi de Tébessa, pour son accompagnement constant, son soutien technique et sa collaboration bienveillante durant cette étude.

*J'*exprime ma sincère gratitude à mon ami et collègue ***Hamla Mohamed Ramzi***, chargé des études techniques à l'Agence des Bassins Hydrographiques Tébessa, pour son appui technique et son aide précieuse durant la réalisation de ce travail.

À mes merveilleuses collègues et amies, ***Gueraidia Nour El Houda***, docteure en géologie de l'ingénieur et Géotechnique, et ***Gueraidia Saïda***, je tiens à exprimer ma profonde gratitude pour leur soutien constant, leur fidélité, leur amitié sincère et les échanges scientifiques et humains qui ont rendu cette aventure de recherche si enrichissante et mémorable.

Enfin, je garde une pensée particulière pour ***mes parents, mes sœurs, mon frère*** et ma petite nièce ***Eline*** dont le soutien indéfectible et les sacrifices ont été le pilier qui m'a permis de mener à bien ce projet exigeant.

Dr Rayene Sirine RAMDANI

إهداء



مهما كتبت من كلمات لن أجد أصدق من قوله تعالى: «يرفع الله الذين آمنوا منكم والذين أوتوا العلم درجات». فالحمد لله حمداً كثيراً طيباً مباركاً فيه، والحمد لله الذي تتم بنعمته الصالحات.

ها قد انطوت صفحة من صفحات حياتي، صفحة زرعنا فيها الجد والاجتهاد والتعب لنحصد التفوق والنجاح. أهدي ثمرة هذا النجاح إلى من قال الله تعالى فيهما: «وقضى ربك ألا تعبدوا إلا إياه وبالوالدين إحساناً».

إلى قدوتي الأولى، ومعنى الحب والحنان، إلى من كان دعاؤها سر نجاحي وحنانها بلسم جراحي، إلى من أرشدتني ورافقتني في كل مشاوير حياتي ولا تزال تفعل حتى اليوم، أمي الحبيبة، اللهم احفظها وارزقها العفو والعافية.

وإلى من أحمل اسمه بكل فخر واعتزاز، إلى صاحب السيرة العطرة والفكر المستنير، إلى من شجعني على المثابرة طوال حياتي، أبي الغالي، طاب بك العمر يا سيد الرجال، وطبت لي عمراً يا من كنت دائماً سندي وعزوتي.

Table des matières

1	Situation géographique	20
2	Géomorphologie, sol et végétation	21
2.1	Géomorphologie	21
2.2	Sols	23
2.3	Végétation.....	24
3	Aperçu sur le climat de l'Algérie.....	24
3.1	Aperçu sur le climat de la région d'étude.....	25
4	Ressources et besoins en eau de consommation	25
4.1	Ressources en eau de surface.....	25
4.2	Ressources en eau souterraine	26
4.3	Besoins en eau et population	27
5	Hydrographie	28
5.1	Structure du réseau hydrographique	28
5.2	Variations saisonnières des écoulements	29
5.2.1	Périodes de crues	29
5.2.2	Période d'étiage.....	30
5.2.3	Variations intermédiaires.....	30
6	Environnement humain et socio-économique.....	31
6.1	Environnement humain.....	31
6.2	Environnement socio-économique	32
6.2.1	Activités agricoles	32
6.2.2	Ressources minières	35
	Conclusion.....	35
1	Introduction générale	38
2	CONTEXTE GEOLOGIQUE	38
2.1	Stratigraphie.....	38
2.1.1	Les dépôts quaternaires	38
2.1.2	Formations miocènes.....	39
2.1.3	Formations éocènes	39
2.1.4	Formations crétacées	38
2.1.5	Formations triasiques	41
2.2	Tectonique.....	42
	Conclusion.....	43
3	CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE	44

3.1	Etudes hydrogéologiques dans la région d'étude	44
3.2	Structure géologique et hydrogéologique du système.....	44
3.2.1	Aquifères en milieu poreux	44
3.2.2	Aquifères en milieu fissuré	45
3.3	Comportement hydrodynamique des eaux souterraines.....	46
3.3.1	Piézométrie.....	46
	Conclusion.....	54
1	Introduction générale	56
2	Températures.....	57
2.1	Températures moyennes mensuelles.....	57
3	Les précipitations	59
3.1	Précipitations interannuelles.....	59
3.2	Précipitations mensuelles	59
4	La neige.....	62
5	Graphique ombrothermique selon Gaussen	63
6	Les Vents.....	63
7	Humidité relative de l'air	64
8	Type de climat.....	65
8.1	Calcul de l'indice d'aridité de DE MARTONE (1923).....	65
9	Evaluation du bilan hydrique	66
9.1	Analyse quantitative des paramètres du bilan hydrique	67
9.1.1	Evapotranspiration	67
9.1.2	Estimation quantitative de l'évapotranspiration potentielle (ETP).....	67
9.1.3	Calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR)	68
9.1.4	Quantification du ruissellement (R).....	70
9.1.5	Calcul de l'infiltration	70
9.1.6	Quantification de la réserve facilement utilisable (RFU).....	69
10	Evaluation du bilan hydrologique	72
	Conclusion.....	75
11	Hydrologie.....	75
11.1	Introduction	75
11.2	Caractérisation morphométrique du bassin versant.....	76
11.3	Calcul de l'indice de compacité de Gravelius (Kc).....	76
11.4	Rectangle équivalent en hydrologie	77
11.4.1	Formule de la longueur du rectangle équivalent	77

11.4.2	Formule de la largeur du rectangle équivalent	77
11.5	Caractérisation morphométrique du réseau hydrographique.....	78
11.6	Les indices de pente dans l'étude du bassin versant.....	78
11.6.1	Pente moyenne (Im)	79
11.6.2	Indice de pente global (Ig) du bassin versant	79
11.6.3	La dénivelée spécifique	78
11.6.4	Densité de drainage	79
11.7	Courbe hypsométrique.....	79
11.8	Temps de concentration (Tc)	83
11.9	Vitesse d'écoulement de l'eau dans le bassin versant	84
11.10	Rapport d'allongement.....	85
	Conclusion.....	86
1	Présentation générale de la démarche méthodologique	88
2	Modélisation hydrogéologique à l'aide de VISUAL MODFLOW Flex.....	90
2.1	Présentation de VISUAL MODFLOW Flex.....	89
2.2	Démarche adoptée	93
2.2.1	Conception du modèle conceptuel et numérique	93
2.2.2	Calibration et validation du modèle	93
2.2.3	Simulation et exploitation du modèle.....	93
2.3	Données utilisées	94
2.4	Limitations et Considérations Générales de VISUAL MODFLOW Flex	94
3	Analyse de la subsidence par interférométrie radar (InSAR)	95
3.1	Justification de l'approche InSAR.....	95
3.2	Aperçu général de la télédétection.....	95
3.3	Éléments essentiels de la télédétection	96
3.4	Les satellites au service de l'observation terrestre	97
3.5	Le radar interférométrique et ses usages	97
3.6	Les satellites à radar à synthèse d'ouverture (SAR)	97
3.7	Méthode InSAR et mesure de la déformation du sol.....	98
3.8	Données utilisées et prétraitement	99
3.9	Traitement et interprétation des résultats.....	100
3.10	Interprétation d'un interférogramme radar	100
3.10.1	Amplitude du déplacement.....	100
3.10.2	Vecteur de déplacement.....	100

3.10.3	Caractéristiques des images SLC générées et des paires Sentinel-1 utilisées pour l'interférométrie	99
3.11	Description des outils logiciels mis en œuvre	102
3.11.1	Logiciel SNAP	102
4	Modélisation hydrogéochimique à l'aide du PHREEQC	102
4.1	Le potentiel de PHREEQC en modélisation géochimique.....	103
4.2	Méthodologie analytique	103
5	Modélisation hydrologique des risques d'inondation : Approche SIG-AHP et analyse morphométrique appliquée au bassin d'El Malabiod	104
5.1	Cartographie de la susceptibilité aux inondations par SIG.....	106
5.2	Cartographie du risque inondation avec les SIG	107
5.3	Processus analytique hiérarchique (AHP)	107
6	Évaluation des aléas naturels par télédétection dans le bassin versant de Safsaf (Nord-Est algérien).....	108
6.1	Démarche méthodologique.....	108
6.1.1	Extraction des données.....	109
6.1.2	Étapes de traitement des données Landsat 8	109
1	Modélisation hydrogéologique à l'aide de VISUAL MODFLOW Flex.....	113
1.1	Discretisation du modèle aquifère	113
1.2	Géométrie de l'aquifère	114
1.3	Conditions aux limites	116
1.4	Conditions initiales de charge hydraulique.....	117
1.5	Calage en Régime permanent	118
1.6	Calage en Régime transitoire.....	119
1.7	Evaluation de la piézométrie simulée et validation du modèle hydrogéologique ...	120
2	Analyse de la subsidence par interférométrie radar (InSAR)	127
3	Modélisation hydrogéochimique (PHREEQC) pour valider la compatibilité d'un mélange des eaux avec la recharge de l'aquifère	131
3.1	Introduction	131
3.2	Faciès chimique des eaux selon les études antérieures.....	132
3.3	Analyse et interprétation des données	134
3.4	Interprétation et analyse des résultats	136
3.4.1	Minéralisation (Conductivité Électrique).....	136
3.4.2	Évolution Chimique	136
4	Synthèse sur la faisabilité de la recharge par mélange des eaux.....	137

5	Modélisation hydrologique des risques d'inondation : Approche SIG-AHP et analyse morphométrique appliquée au bassin d'El Malabiod	137
5.1	Facteurs de susceptibilité aux inondations dans le bassin d'El Malabiod	137
5.1.1	Densité de drainage	138
5.1.2	Pente	138
5.1.3	Élévation.....	139
5.1.4	Texture du sol	140
5.1.5	Occupation du sol	141
5.2	Processus analytique hiérarchique (AHP)	142
5.2.1	Matrice de comparaison par paires.....	142
5.2.2	Matrice de comparaison par paires normalisée	143
5.2.3	Vecteur de priorité	143
5.2.4	Vérification de cohérence.....	143
5.3	Pondération des facteurs de susceptibilité aux inondations.....	141
6	Évaluation de la susceptibilité aux aléas naturels basée sur la télédétection dans le bassin versant de Safsaf, nord-est de l'Algérie	147
6.1	Résultats des indices spectraux.....	147
	Conclusion générale	156
	Perspectives et recommandations.....	158
	References.....	160
	Annexes	164

Liste des figures

Figure 1: carte de la situation géographique de la zone d'étude.	20
Figure 2: Situation géographique du bassin versant de Safsaf.	21
Figure 3: carte du MNA (Modèle numérique d'altitude) du bassin versant de Safsaf.	23
Figure 4: carte des sols du bassin versant de Safsaf.	24
Figure 5: Carte de classification climatique de Köppen–Geiger (1980-2016).	25
Figure 6: carte des ressources en eau de surface, barrage de safsaf.	27
Figure 7: Relation entre population et besoins en eau dans la région d'El Malabiod, (DSA 2024).	28
Figure 8: Réseau hydrographique de la zone d'étude.	29
Figure 9: Histogramme des apports moyens mensuels à la station de Tébessa (1998-2013).	30
Figure 10: Croissance démographique dans la région d'El Malabiod de 2013 à 2024 et projections jusqu'en 2050, (DSA 2024).	32
Figure 11: Types de cultures et modes d'irrigation dans le bassin d'El Malabiod (DSA, 2024).	33
Figure 12 : Évolution de la superficie irriguée et besoins en eau prévus (El Malabiod), (DSA 2024).	33
Figure 13: Superficie irriguée et besoins en eau par type de culture (El Malabiod), (DSA 2024).	34
Figure 14: Évolution des zones irriguées par les eaux souterraines et les puits de surface (2016-2022), (DSA, 2024).	34
Figure 15: coupes géologiques de la zone d'étude (d'après DUROZOY, 1984 in Rouabhia, 2006). ...	39
Figure 16: Esquisse géologique du bassin versant de Safsaf extrait de la carte de Tébessa à échelle 1/25000 (Ramdani, 2025).	41
Figure 17: Carte du système de failles (UGF-BRNO 1971), (in Djebari 2011).	43
Figure 18: Structuration géologique et hydrogéologique du système aquifère de la plaine d'El Malabiod (in Rouabhia, 2006).	46
Figure 19: Carte de localisation des points d'observation de l'aquifère Miocène.	47
Figure 20: Carte piézométrique de l'aquifère en Mars 2024, (Ramdani, 2024).	48
Figure 21: Cartographie piézométrique du mois de mars 2001 (Rouabhia, 2006).	49
Figure 22: Niveaux piézométriques mesurés en septembre 2003 (Rouabhia, 2006).	50
Figure 23: Cartographie piézométrique Octobre 2002 (Rouabhia, 2006).	50
Figure 24: Piézométrie Septembre 2009 (Djebari, 2011).	49
Figure 25: Configuration piézométrique de l'aquifère (Mars 2004), (Rouabhia, 2006).	49
Figure 26: Représentation cartographique des hauteurs piézométriques Novembre 2015 et Mai 2016 (Samoun, 2021).	52
Figure 27: Cartographie des limites de l'aquifère du bassin d'El Malabiod.	53
Figure 28: Cartographie du rabattement (2001-2024).	53
Figure 29: Carte schématique des zones bioclimatiques de l'Est algérien (Côte, 1998 in Gueraidia, 2023).	57
Figure 30: Évolution des moyennes mensuelles des températures à la station de Tébessa (1972-2023).	58
Figure 31: Analyse de la variabilité interannuelle des températures (1972-2023).	58
Figure 32: Evolution des précipitations interannuelles à la station d'El Malabiod (2000-2023).	60
Figure 33: Variabilité interannuelle des précipitations à la station de Safsaf (1998-2014).	60
Figure 34: Répartition des précipitations moyennes mensuelles à la station de Safsaf (1998-2014)...	59
Figure 35: Variation des précipitations moyennes mensuelles à la station d'El Malabiod (2000-2023).	59
Figure 36: Occurrence de la neige sur la plaine d'El Malabiod (Rouabhia, 2006).	62
Figure 37: Graphique ombrothermique pour la région d'étude.	63
Figure 38: Variation mensuelle de l'humidité relative de l'air à la station de Tébessa (1998-2021). ...	65

Figure 39: Abaque de classification climatique selon l'indice d'aridité annuel de De Martonne (1923).	66
Figure 40: Délimitation spatiale de la zone d'étude.	77
Figure 41: carte du réseau hydrographique du bassin versant de Safsaf.	78
Figure 42: courbe hypsométrique du bassin versant de Safsaf.	82
Figure 43: Enchaînement des principales étapes de la méthode du modèle.	92
Figure 44: Schéma des composantes d'un système de télédétection (BRAINKART. Elements of Remote Sensing).	96
Figure 45: Satellite SAR sentinel-1 utilisé dans la technique InSAR (ESA, ATG medialab).	98
Figure 46: Mécanisme de fonctionnement de l'InSAR (Gueraidia.N, 2023).	99
Figure 47: Organigramme de la méthodologie basée sur les indices spectraux.	111
Figure 48: Grille numérique et représentation 3D de l'aquifère étudié.	114
Figure 49: Altitudes du toit de l'aquifère miocène.	115
Figure 50: Altitudes du mur de l'aquifère miocène.	116
Figure 51: Carte piézométrique du système aquifère d'El Malabiod en 2001.	118
Figure 52: Reconstitution de la piézométrie en régime permanent (Mars 2001).	119
Figure 53: Reconstitution de la piézométrie en régime transitoire (Mars 2024).	120
Figure 54: Diagramme de corrélation entre les niveaux piézométriques simulés et observés.	121
Figure 55: Simulation des dynamiques piézométriques induites par une exploitation soutenue en conditions de recharge nulles (2024-2034).	123
Figure 56: simulation hydrogéologique sans pompage avec une recharge de 10 mm/an – prévu à l'horizon 2034.	124
Figure 57: Ancienne carrière de sable de T'noukla (Rouabhia, 2006).	125
Figure 58: carrières de sable abandonnée dans la région d'El Malabiod.	126
Figure 59: effet de la recharge artificielle (2024-2034).	127
Figure 60: Carte des déplacements de l'aquifère miocène (2014-2015), résultat InSAR.	128
Figure 61: Carte des déplacements de l'aquifère du Miocène (2024-2025), résultat InSAR.	129
Figure 62: Image Google Earth (2010), zones irriguées limitées avant l'intensification agricole.	130
Figure 63: Image Google Earth (2024), extension marquée des zones irriguées.	130
Figure 64: Carte de rabattement de l'aquifère miocène entre 2001 et 2024.	131
Figure 65: Représentation des analyses chimiques des eaux souterraines selon le diagramme Schoeller-Berkaloff/Bassin d'El Malabiod (Djebari, 2011).	133
Figure 66: Représentation des analyses chimiques des eaux de surfaces selon le diagramme de Schoeller-Berkaloff/Bassin d'El Malabiod (Djebari, 2011).	134
Figure 67: Concentrations molaires des ions dans les eaux et leurs mélanges.	135
Figure 68: Carte de la densité de drainage du bassin versant d'El Malabiod.	138
Figure 69: Carte des pentes du bassin d'El Malabiod.	139
Figure 70: Carte altimétrique du bassin versant d'El Malabiod.	140
Figure 71: Carte de la texture du sol du bassin versant d'El Malabiod.	141
Figure 72: Carte de l'utilisation des sols et de la couverture végétale du bassin versant d'El Malabiod.	142
Figure 73: Carte de susceptibilité aux inondations du bassin versant d'El Malabiod par la méthode AHP.	146
Figure 74: Carte du NDVI du bassin versant de Safsaf.	148
Figure 75: Carte du NDVBI du bassin versant de Safsaf.	150
Figure 76: Carte du NDWI du bassin versant de Safsaf.	151
Figure 77: Carte du MNDWI du bassin versant de Safsaf.	152
Figure 78: MNDWI et localisation des points d'eau souterraine.	153

Figure 79: Carte du SAVI du bassin versant de Safsaf.....	154
Figure 80: Carte du NBR du bassin versant de Safsaf.	155

Liste des tableaux

Tableau 1: Tendances des températures moyennes mensuelles à la station de Tébessa (1972-2018).....	56
Tableau 2: Données des stations pluviométriques utilisées pour l'analyse du régime pluviométrique.	57
Tableau 3: Vitesse moyenne du vent enregistrée à la station de Tébessa entre 2000 et 2020. 62	
Tableau 4: Humidité relative de l'air à la station de Tébessa entre 1998 et 2021.....	62
Tableau 5: Valeurs de l'ETP calculées selon Thornthwaite.	66
Tableau 6: Application de la méthode Thornthwaite au bilan hydrologique de la station d'El Malabiod (2000-2023).....	70
Tableau 7: Bilan hydrologique de la station d'El Malabiod selon la méthode de Thornthwaite (2009-2010).....	70
Tableau 8: Application de la méthode de Thornthwaite au bilan hydrologique de la station d'El Malabiod (2021-2022).....	71
Tableau 9: Estimation du bilan hydrologique à Safsaf (1998-2014) à l'aide de la méthode de Thornthwaite.	72
Tableau 10: Analyse hydrologique de l'année la plus sèche (2012–2013) à Safsaf selon la méthode de Thornthwaite.	72
Tableau 11: Classification des reliefs selon l'indice de pente global (ORSTOM) (Zaoui, 2022).	78
Tableau 12: Echelle d'interprétation généralisée de la densité de drainage.....	79
Tableau 13: Proportion des surfaces élémentaires dans l'ensemble du bassin versant.....	81
Tableau 14: Synthèse des principaux paramètres du bassin versant de Safsaf.	83
Tableau 15: Spécifications des images SLC issues du capteur Sentinel-1 SAR.....	99
Tableau 16: Bandes spectrales Landsat 8 (Gueraidia et al., 2024).....	110
Tableau 17: Formules pour les indices spectraux.	111
Tableau 18: Concordance entre les niveaux piézométriques observés et calculés.....	122
Tableau 19: Résultats des Simulations de Mélange (Eaux Souterraines / Eaux de Surface). 135	
Tableau 20: Matrice de comparaison par paires des critères contribuant aux inondations. ..	142
Tableau 21: Matrice de comparaison par paires normalisée des critères contribuant aux inondations.	143
Tableau 22: Vecteur de priorité des critères contribuant à la susceptibilité aux inondations. 143	
Tableau 23: Pondérations finales des facteurs.	146

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Les régions semi-arides du Nord-Est algérien sont confrontées à une pression croissante sur les ressources en eau, exacerbée par la variabilité climatique, l'augmentation des besoins agricoles et l'exploitation intensive des nappes souterraines. Dans ce contexte, les bassins transfrontaliers revêtent une importance stratégique particulière, car ils nécessitent une compréhension approfondie du fonctionnement hydrologique et hydrogéologique afin de garantir une gestion durable et concertée des ressources disponibles. Le bassin versant de Safsaf, situé dans la région de Tébessa et partagé en partie avec la frontière tunisienne, constitue un exemple typique où la complexité géologique, l'hétérogénéité des aquifères et l'intensification des usages rendent indispensable une approche scientifique intégrée pour la quantification fiable des réserves en eau.

La problématique centrale de cette thèse repose sur la nécessité d'évaluer, de manière rigoureuse et pluridisciplinaire, le potentiel hydrique du bassin versant de Safsaf, en mobilisant aussi bien les données hydroclimatologiques que les informations hydrogéologiques et géochimiques. L'objectif principal est de contribuer à une meilleure compréhension du fonctionnement du système aquifère, de son évolution dans le temps sous l'effet des pressions naturelles et anthropiques, et d'identifier les facteurs déterminants qui influencent la disponibilité et la qualité des eaux souterraines.

L'intérêt scientifique et pratique de cette recherche réside dans la combinaison de plusieurs approches complémentaires permettant d'appréhender de façon globale le comportement du bassin : l'analyse des conditions hydroclimatiques influençant l'alimentation et la recharge de l'aquifère ; l'étude géologique et hydrogéologique permettant de préciser les structures de stockage et d'écoulement ; l'utilisation d'outils numériques et de données spatiales pour mieux comprendre la dynamique du système ; et enfin, la mise en évidence des effets de la pression anthropique sur la ressource. Une telle démarche intégrée est essentielle pour proposer des stratégies de gestion adaptées au contexte semi-aride et transfrontalier du bassin de Safsaf.

Cette thèse est structurée en cinq chapitres complémentaires.

- **Contexte physiographique et socio-économique de la région d'étude** : description du climat, de la géomorphologie, de l'occupation du sol et des usages de l'eau, ainsi que des enjeux socio-économiques locaux.
- **Contexte géologique et hydrogéologique** : présentation de la stratigraphie, des formations aquifères, des structures tectoniques et des caractéristiques hydrodynamiques du bassin.

INTRODUCTION GENERALE

- **Hydro-climatologie** : analyse des séries climatiques et hydrologiques (précipitations, températures, évapotranspiration) et estimation des paramètres influençant la recharge et l'équilibre hydrique.
- **Matériels et méthodes** : description synthétique des données, des outils et des méthodes mobilisés (modélisation hydrogéologique, analyses géochimiques, télédétection, SIG, modélisation des risques, etc.).
- **Résultats et discussions** : présentation des principaux résultats, interprétation des dynamiques spatio-temporelles des ressources en eau, discussion critique des incertitudes et implications pour la gestion durable du bassin.
- **Perspectives et recommandations** : mise en évidence des pistes d'approfondissement scientifique et formulation de recommandations pratiques visant à optimiser la gestion et la préservation du système hydrique.

En combinant analyses hydroclimatologiques, investigations géologiques et hydrogéologiques, méthodes de télédétection et modélisation numérique, cette étude ambitionne de contribuer à une meilleure quantification des réserves en eau et d'offrir des éléments scientifiques solides en appui aux décisions locales et transfrontalières pour la gestion durable des ressources hydriques en milieu semi-aride

***Contexte physiographique et socio-économique
de la région d'étude***

1 Situation géographique

La région de Safsaf El Ouesra est une commune située dans la wilaya de Tébessa, dans le Nord de l'Algérie. Cette commune couvrant une superficie de 549.38 Km² et un périmètre de 137.27 Km est délimitée au Nord par El Malabiod, à l'est par la frontière avec la Tunisie, au Sud par Bir El Ater et à l'ouest par El Ogla Melha (Fig.1). La commune de Safsaf El Ouesra est desservie par un réseau routier reliant les principales villes de la région, notamment Tébessa, Souk Ahras et Annaba. Une ligne de chemin de fer électrifiée à voie unique assure également le transport du minerai de phosphate depuis la mine de Djebel Onk jusqu'à Annaba, où il est traité.

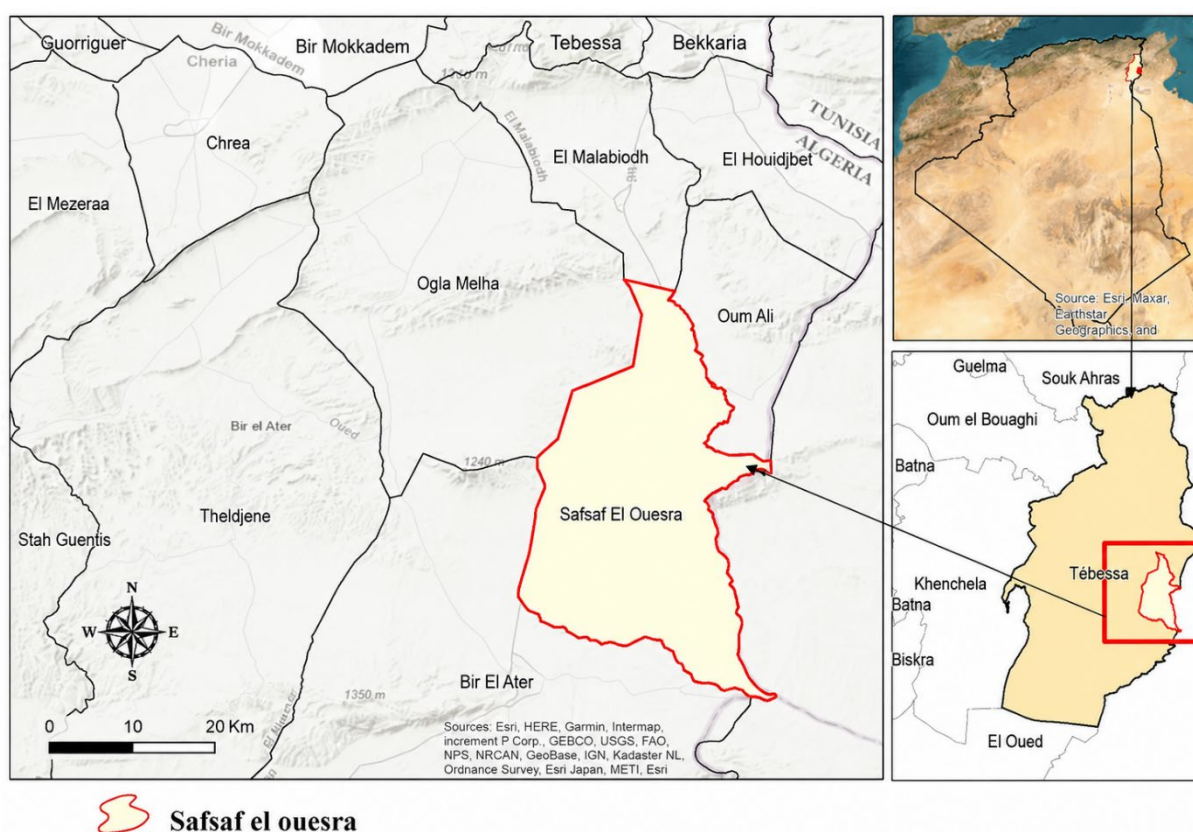


Figure 1: carte de la situation géographique de la zone d'étude (Ramdani, 2025).

Le bassin versant de safsaf couvre une superficie de 1197 Km² et un périmètre de 195 Km, fait partie du grand bassin versant de Chott Melghigh, limité au nord par le sous bassin versant d'El

Malabiod et s'étend sur plusieurs communes, notamment El Ogla Melha, El Malabiod, El Houidjbet, Oum Ali et Safsaf El Ouesra (Fig.2).

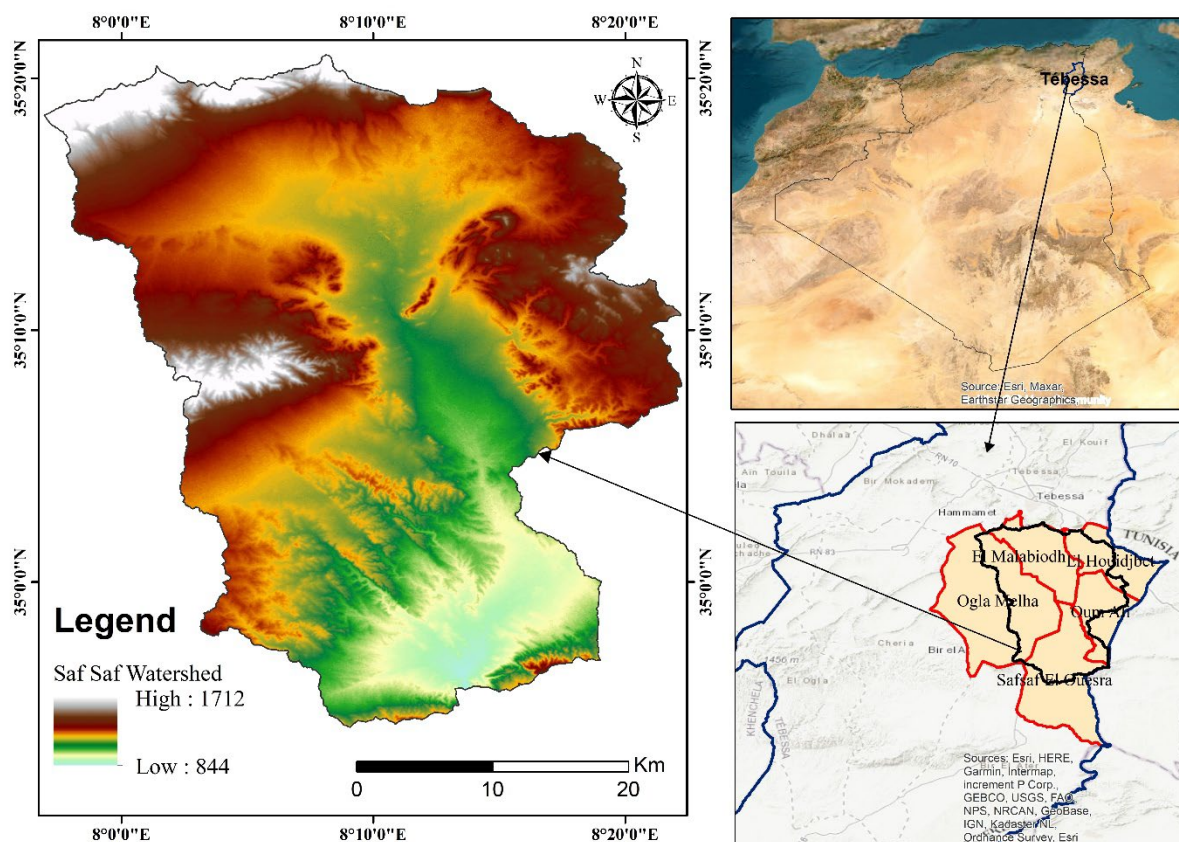


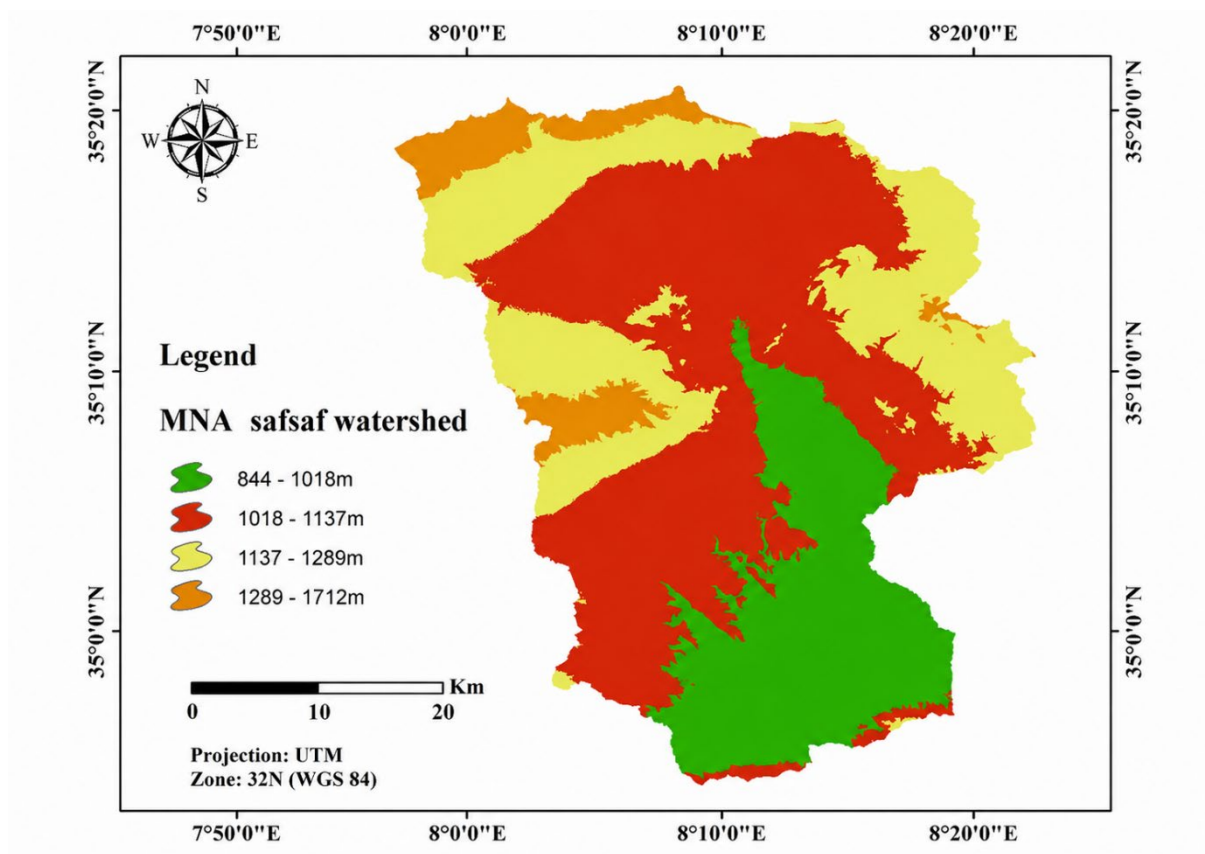
Figure 2: Situation géographique du bassin versant de Safsaf (Ramdani, 2025).

2 Géomorphologie, sol et végétation

2.1 Géomorphologie

La géomorphologie du bassin versant étudié reflète une diversité remarquable qui résulte de l'interaction entre les processus géologiques, climatiques et hydrologiques. Le bassin fait partie intégrante du bassin versant du Chott Melghigh, caractérisé par une tectonique cassante prédominante, témoignant de l'histoire géologique complexe de la région. Cette configuration tectonique a donné lieu à des formes de relief variées, allant des plaines aux montagnes. Les bordures de la plaine sont entourées de nombreuses montagnes aux altitudes variées, parmi lesquelles l'anticlinal de Djebel Bottna, situé au sud du bassin, atteint une altitude de 1645 m, l'anticlinal de Djebel Foua au sud-ouest et l'anticlinal de Djebel Boudjelal. Ces montagnes jouent un rôle important dans la structuration du paysage, influençant les écoulements de

surface et la recharge des nappes phréatiques. Elles sont recouvertes d'une végétation dense composée de broussailles et de pins, qui contribue à la protection des sols contre l'érosion et à la préservation de la biodiversité locale. Sur ce plateau, les interfluves (zones élevées) séparent les thalwegs (zones basses) où l'eau s'accumule. Les villages sont souvent construits sur les interfluves, tandis que les puits traditionnels et puisards se trouvent dans les thalwegs. Le relief de la zone d'étude est illustré par un modèle numérique d'altitude (MNA), acquis en format Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) et mis à disposition par une plateforme en ligne américaine (Fig.3). Le MNA a une résolution de 30m. L'analyse du MNA du bassin versant de Safsaf (Fig.3) révèle un relief relativement uniforme, avec des altitudes comprises entre 844 m et 1712 m. Les zones les plus dominantes se situent entre 844 m et 1018 m et entre 1018 m et 1137 m, couvrant la majorité du bassin versant. Cependant, cette uniformité est perturbée par des zones plus élevées, particulièrement au sud, où les altitudes dépassent 1289 m, marquées par des reliefs plus accentués. Cette homogénéité du relief contribue à la stagnation des eaux, entraînant leur infiltration ou leur évapotranspiration, en fonction de la perméabilité du sol et de l'intensité des processus d'évaporation.



2.2 Sols

Les sols du bassin versant présentent une distribution relativement homogène, dominée par les types Clay, Clay Loam, Loam et Sandy Loam. Ces sols se répartissent selon des conditions topographiques et hydrologiques distinctes. On trouve des sols argileux (Clay) principalement dans les plaines et les zones basses, où la rétention d'eau est importante. Les sols limoneux-argileux (Clay Loam) et les limons (Loam) occupent des zones de plateaux et reliefs modérés, offrant une meilleure perméabilité et favorisant une diversité végétale. Enfin, les limons sableux (Sandy Loam) sont souvent observés sur les reliefs plus élevés ou dans les zones sujettes à l'érosion (Fig.4).

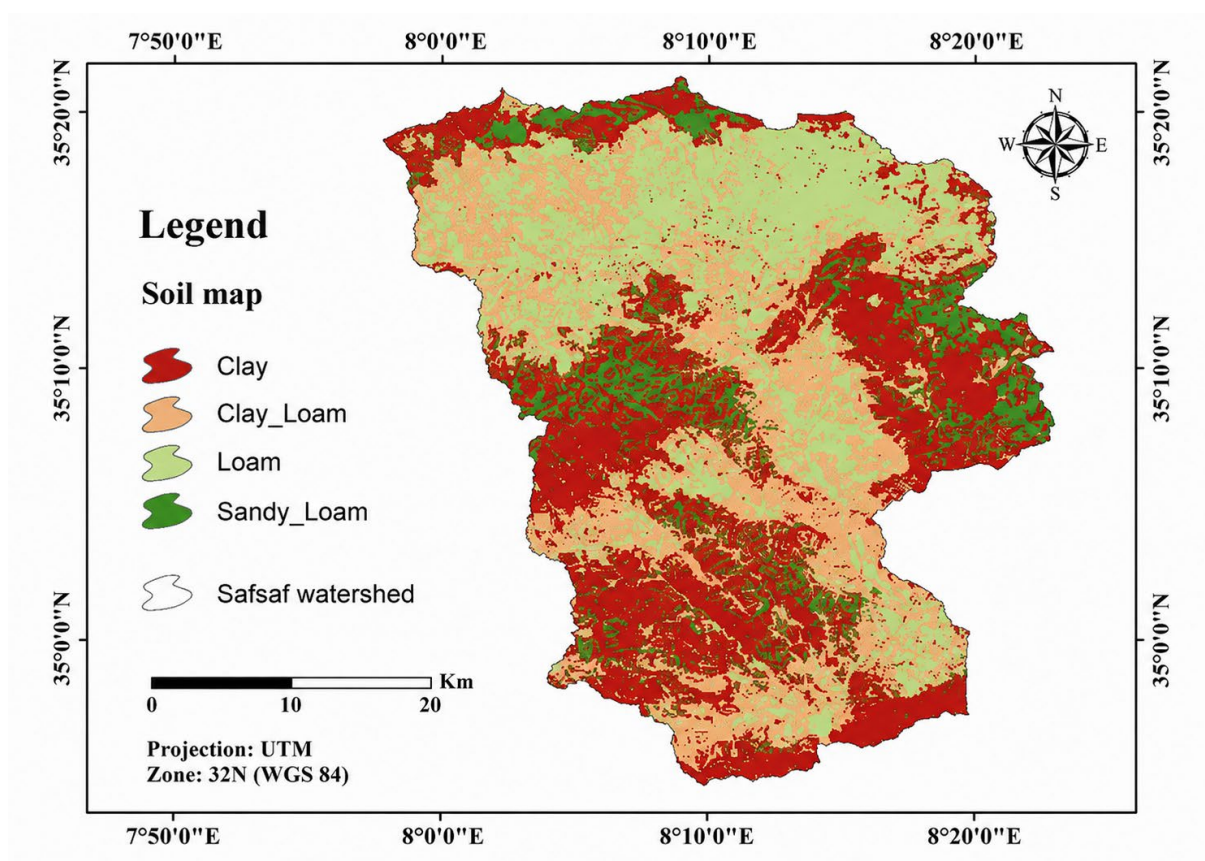


Figure 4: carte des sols du bassin versant de Safsaf (Ramdani, 2025).

2.3 Végétation

La région de Safsaf El Ouesra est dominée par une couverture végétale composée principalement de forêts, de pins d'Alpes qui s'étendent sur les rares hauts glacis de la zone, ainsi que de broussailles.

3 Aperçu sur le climat de l'Algérie

L'Algérie présente un climat majoritairement méditerranéen, caractérisé par des étés chauds et secs ainsi que des hivers humides (Rhissa, 2017). Toutefois, cette description globale cache une grande variété de climats locaux, influencés par la géographie et le relief du pays. Au nord, la proximité de la Méditerranée atténue les variations climatiques, offrant des étés chauds et des hivers plutôt doux. En revanche, au sud, le climat saharien domine, marqué par des températures élevées et des fluctuations importantes. Ces deux systèmes climatiques créent de forts contrastes thermiques, avec des variations saisonnières marquées et des distorsions des isothermes. De plus, les chaînes de l'Atlas tellien et saharien, qui traversent le pays d'ouest en

est, modifient davantage le climat. Ces reliefs provoquent un refroidissement de l'air et augmentent les précipitations, souvent au détriment des régions plus arides du sud. Cette complexité climatique joue un rôle déterminant dans la diversité des zones agricoles du pays.

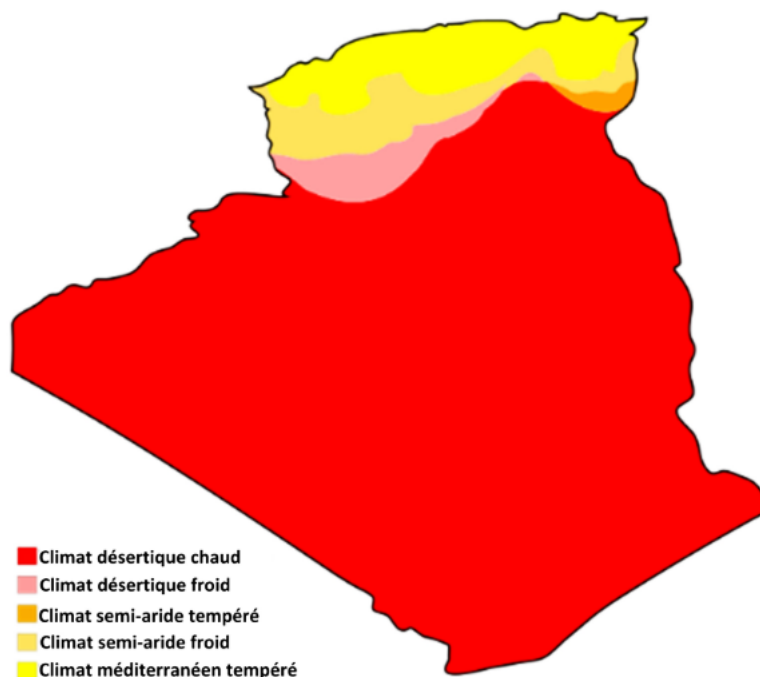


Figure 5: Carte de classification climatique de Köppen–Geiger (1980-2016).

3.1 Aperçu sur le climat de la région d'étude

La région d'étude présente un climat continental à tendance semi-aride, marqué par une alternance de deux saisons bien définies (Soufi, 2015). La saison humide, s'étendant de décembre à avril, se distingue par des précipitations modérées et des températures relativement basses. En revanche, les mois de juillet et août enregistrent les températures les plus élevées, caractérisant la saison chaude.

4 Ressources et besoins en eau de consommation

4.1 Ressources en eau de surface

Dans la région d'étude, les ressources en eau de surface sont représentées principalement par le barrage de Safsaf. Ce dernier constitue une infrastructure clé pour la gestion des eaux de surface, s'inscrivant dans le cadre du développement agricole et de l'alimentation en eau des

habitants de Safsaf et de Bir El Ater. En plus de son rôle dans l'approvisionnement en eau, il assure également la régularisation du débit du cours d'eau pendant les périodes de basses eaux, permettant ainsi de maintenir une disponibilité en eau stable tout au long de l'année. L'aménagement crée une retenue de 18 hm³ de capacité et assure une fourniture annuelle moyenne de 5,8 hm³, dont 2,8 hm³ pour la fourniture en eau potable et 3 hm³ pour l'irrigation (Soufi, 2015). Il représente un atout majeur pour la gestion des ressources hydriques dans la région, tout en mettant en lumière la nécessité de développer d'autres infrastructures pour répondre à la demande croissante en eau (Fig.6).

4.2 Ressources en eau souterraine

Le système aquifère de la plaine d'El Malabiod, principalement représenté par deux nappes phréatiques distinctes. Ces nappes sont essentielles pour l'approvisionnement en eau de la zone, en particulier pour les activités agricoles et domestiques. La première nappe se caractérise par un aquifère constitué de formations alluviales récentes (argiles remaniées avec du sable et des cailloutis (Rouabhia, 2006)). La seconde nappe, située à une profondeur différente, est associée à des formations miocène grès, sables et graviers (Rouabhia, 2006), avec une dynamique d'écoulement influencée par les conditions climatiques et géologiques de la région. Une analyse détaillée de ces nappes permet de mieux comprendre les capacités de recharge et de gestion durable des ressources en eau souterraine dans cette zone. La nappe miocène représente la principale réserve en eau de la région. Depuis 1970, les services de l'hydraulique de la wilaya se sont largement intéressés à son exploitation, comme en témoigne la série de forages réalisés dans la plaine.

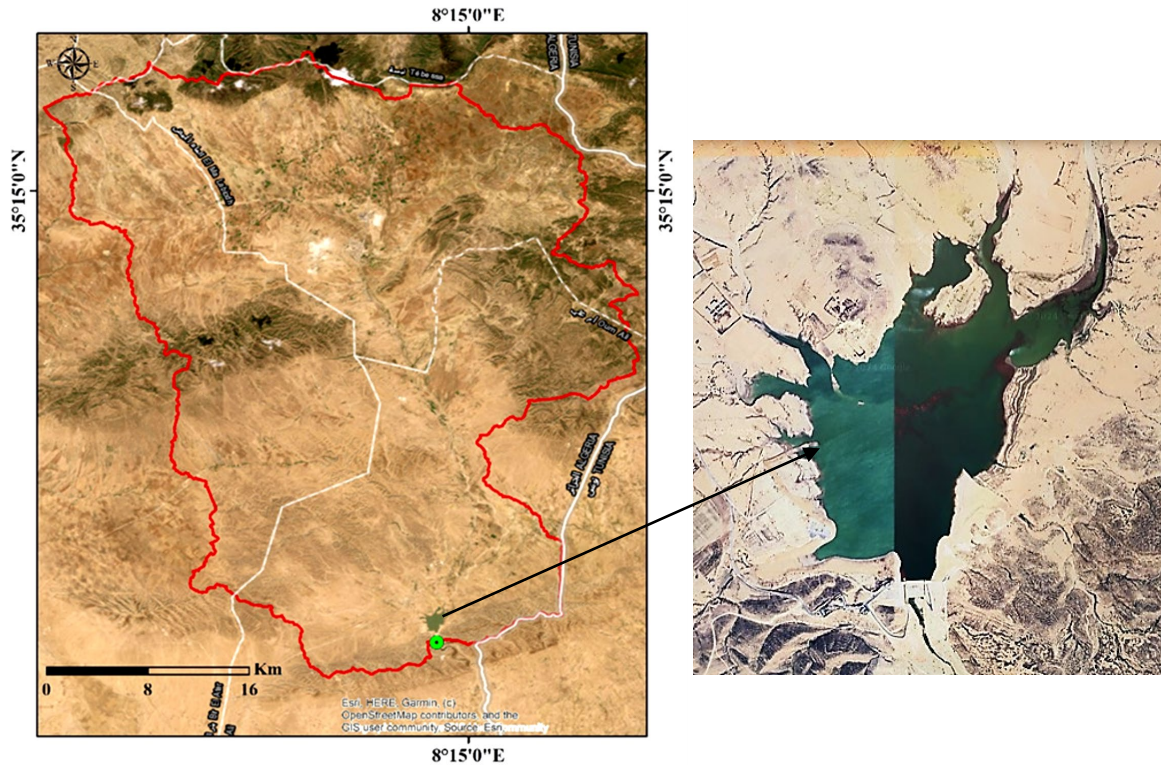


Figure 6 : carte des ressources en eau de surface, barrage de Safsaf (Ramdani, 2025).

4.3 Besoins en eau et population

L'analyse de la relation entre la croissance démographique et les besoins en eau constitue une étape essentielle pour une gestion durable de l'eau. Dans le cadre de cette étude, un histogramme a été élaboré afin de visualiser l'évolution parallèle de la population et des besoins en eau dans la région d'El Malabiod sur une période donnée (2013 à 2025). Cette représentation graphique (Fig. 7) permet de mettre en évidence l'impact de la dynamique démographique sur la demande en eau, et de souligner les enjeux liés à la gestion rationnelle des ressources hydriques face à une pression croissante. À travers cette approche comparative, il devient possible d'anticiper les déficits potentiels et de proposer des stratégies adaptées pour répondre aux besoins futurs de la population.

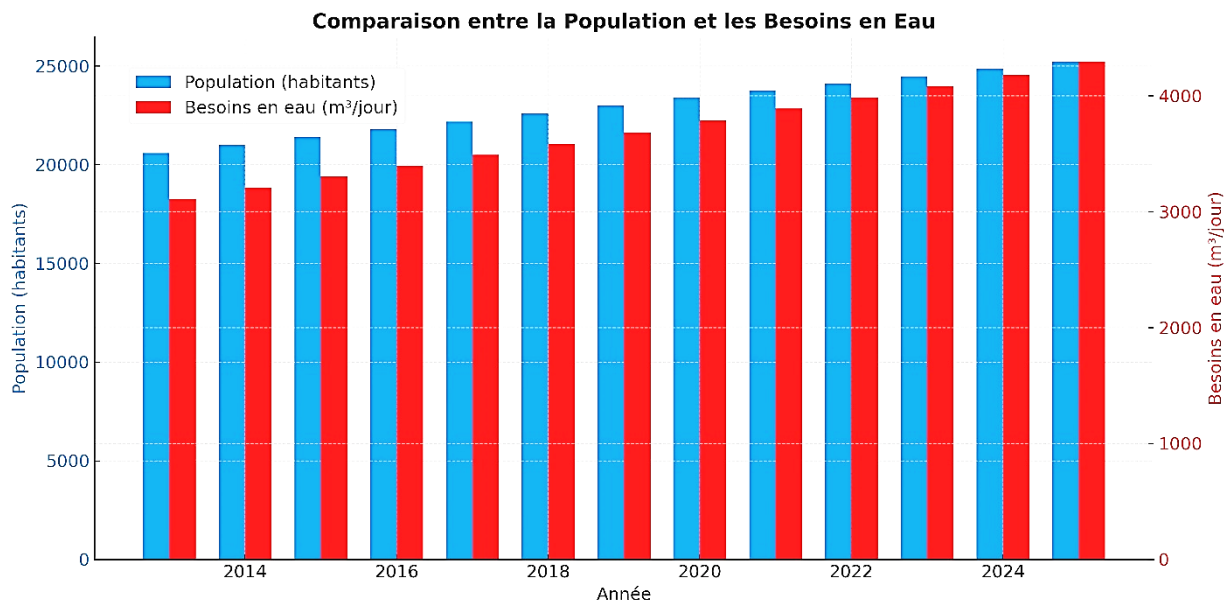


Figure 7: Relation entre population et besoins en eau dans la région d'El Malabiod, (DSA 2024).

5 Hydrographie

5.1 Structure du réseau hydrographique

Dans l'ensemble, le réseau hydrographique de la zone d'étude présente un aspect dendritique, typique des terrains homogènes, avec une disposition influencée par la topographie et les caractéristiques géologiques locales (Fig.8). Le drainage de la région s'effectue principalement selon deux grandes directions : vers le Sud et vers le Nord. La moitié méridionale est drainée vers le Sud, en direction des frontières algéro-tunisiennes, avec des cours d'eau principaux tels que oued Safsaf. La partie septentrionale, quant à elle, est drainée vers le Nord, alimentant le sous bassin versant d'El Malabiod avec des rivières tributaires telles que El Goussa, Znad et El Malassoued . Ces deux directions principales témoignent d'une organisation hydrographique qui reflète la dynamique de surface et les processus d'écoulement influencés par les conditions hydrogéologiques de la région.

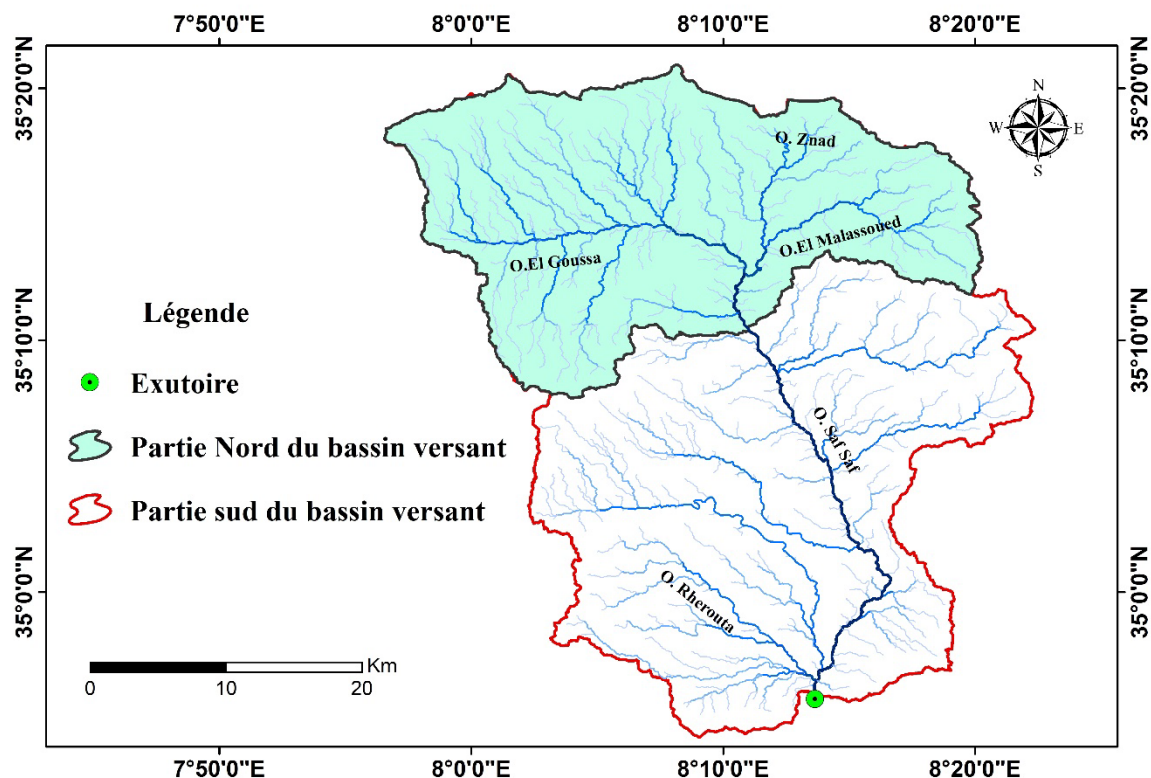


Figure 8: Réseau hydrographique de la zone d'étude (Ramdani, 2025).

5.2 Variations saisonnières des écoulements

La variation saisonnière des écoulements a été analysée à partir des débits mesurés à la station située à Tébessa. L'analyse de l'histogramme des débits met en lumière les caractéristiques hydrologiques suivantes :

5.2.1 Périodes de crues

- Crue principale (juin) : Une crue majeure a été enregistrée au mois de juin, avec un débit maximal atteignant environ 20 hm³, témoignant d'une période d'écoulement intense.
- Crue secondaire (septembre) : Une deuxième crue, de moindre ampleur mais significative, est observée en septembre, avec un débit excédant 15 hm³.

5.2.2 Période d'été

La période d'été s'étend de décembre à avril, caractérisée par des débits faibles, généralement inférieurs à 5 hm³. Cette phase reflète la saison sèche, marquée par une diminution notable des apports hydriques.

5.2.3 Variations intermédiaires

Les mois de mai, juillet et août montrent des augmentations modérées des débits, oscillant entre 5 et 10 hm³. Ces variations traduisent une reprise partielle des écoulements, possiblement liée à des précipitations sporadiques ou à la fonte progressive des eaux accumulées.

Ce diagramme révèle une dynamique hydrologique fortement saisonnière, influencée par les fluctuations climatiques et hydrologiques propres à la région étudiée. Les cycles de crues et d'été traduisent l'impact combiné des précipitations, de l'évaporation, et potentiellement des régulations anthropiques ou naturelles des écoulements. Ce type de comportement saisonnier souligne l'importance d'une gestion adaptée des ressources en eau dans ce contexte hydrologique spécifique.

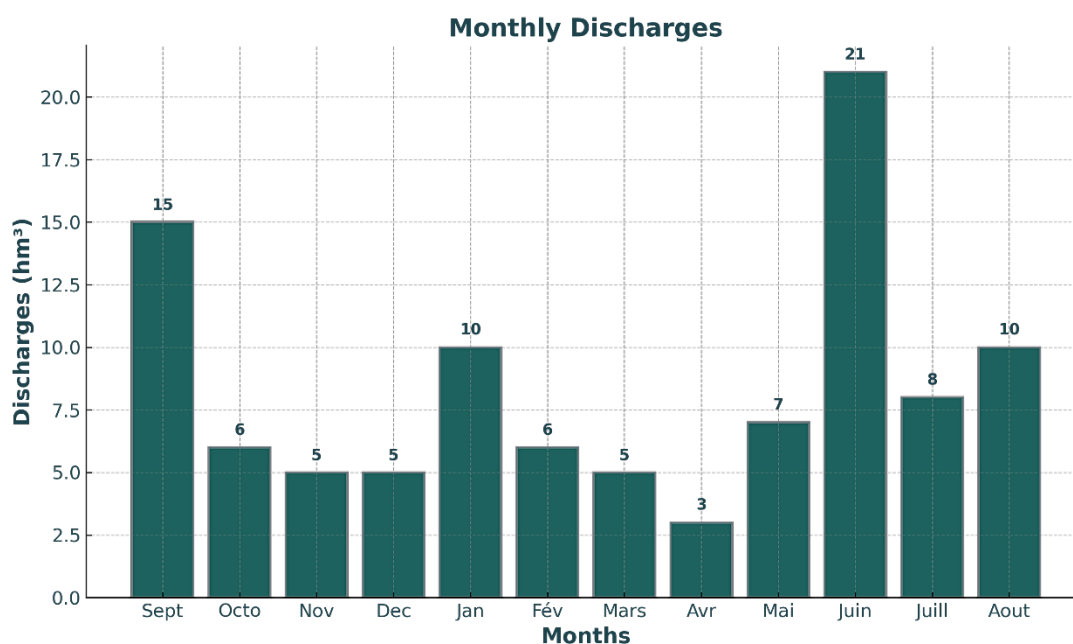


Figure 9: Histogramme des apports moyens mensuels à la station de Tébessa (1998-2013) (Ramdani, 2025).

6 Environnement humain et socio-économique

L'influence anthropique sur le réseau hydrographique de la région de Safsaf-El Ouessra est principalement due à la présence du barrage de Safsaf-El Ouessra. Cet aménagement joue un rôle clé dans la régulation des débits du cours d'eau, assurant ainsi un approvisionnement en eau pour l'irrigation et l'alimentation en eau potable des populations locales. Toutefois, il modifie le régime hydrologique naturel de la rivière, influençant la recharge des nappes souterraines et l'équilibre écologique de la zone. De plus, la stagnation de l'eau en amont du barrage peut favoriser la prolifération de certaines maladies hydriques, posant ainsi des enjeux sanitaires pour les riverains.

6.1 Environnement humain

La région de Safsaf El Ouessra, située dans la wilaya de Tébessa et traditionnellement habitée par les populations chaouies des Aurès, connaît une croissance démographique régulière depuis 2013. La population est passée de 20 578 habitants en 2013 à 22 186 en 2017, puis 23 406 en 2020 et 24 844 en 2024. Les projections indiquent une poursuite de cette dynamique, avec 26 767 habitants attendus en 2030 et près de 32 657 habitants en 2050, soit une augmentation d'environ 58 % par rapport à 2024 (Fig. 10). Cette croissance soutenue s'accompagne d'une hausse des besoins en eau potable, qui sont passés de 3 112 m³/j en 2013 à 3 489 m³/j en 2017. Elle s'explique par plusieurs facteurs, notamment les migrations internes depuis les zones rurales fragilisées par les aléas climatiques, ainsi que le développement économique local. Bien que la population demeure majoritairement rurale et dépendante de l'agriculture et de l'élevage, l'amélioration progressive des infrastructures hydrauliques en particulier le barrage de Safsaf El Ouessra pourrait favoriser une dynamique socio-économique plus forte et attirer de nouveaux habitants. Cette évolution démographique impose toutefois des défis croissants en matière de gestion durable des ressources naturelles, notamment de l'eau potable, déjà soumise à une pression importante.

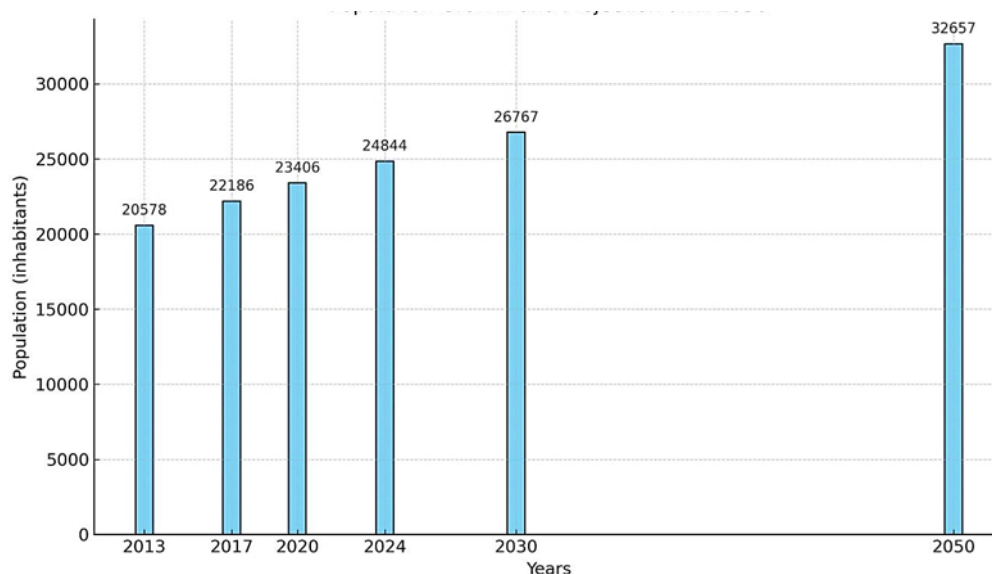


Figure 10: Croissance démographique dans la région d'El Malabiod de 2013 à 2024 et projections jusqu'en 2050, (DSA 2024).

6.2 Environnement socio-économique

6.2.1 Activités agricoles

Dans la région d'étude, l'agriculture constitue l'activité économique principale, avec plusieurs cultures majeures telles que les céréales (blé), les vergers de pommiers et les cultures maraîchères comme la pomme de terre. Les superficies exploitées atteignent 9 ha pour le blé, 10 ha pour la pomme de terre et 2 ha pour les vergers de pommiers âgés de trois ans (Fig. 12). Chaque culture présente des besoins hydriques spécifiques : 250 à 480 mm/ha par cycle pour le blé irrigué par aspersion, 400 à 500 mm/ha pour la pomme de terre utilisant la même technique, et environ 220 mm/ha pour les vergers, avec des rendements respectifs de 35 qx/ha, 300 qx/ha et 30 qx/ha. L'irrigation repose essentiellement sur les eaux souterraines prélevées par des puits, car les ressources de surface sont insuffisantes en raison des faibles précipitations et de la forte variabilité hydrologique. L'expansion des superficies cultivées et l'intensification des pratiques agricoles accentuent davantage cette dépendance aux aquifères. Ainsi, la pression croissante sur les ressources en eau rend indispensable une gestion hydrique efficace et l'exploration de nouvelles ressources, tant en quantité qu'en qualité, afin de soutenir durablement les besoins agricoles de la région d'El Malabiod.



Figure 11: Types de cultures et modes d'irrigation dans le bassin d'El Malabiod (DSA, 2024).

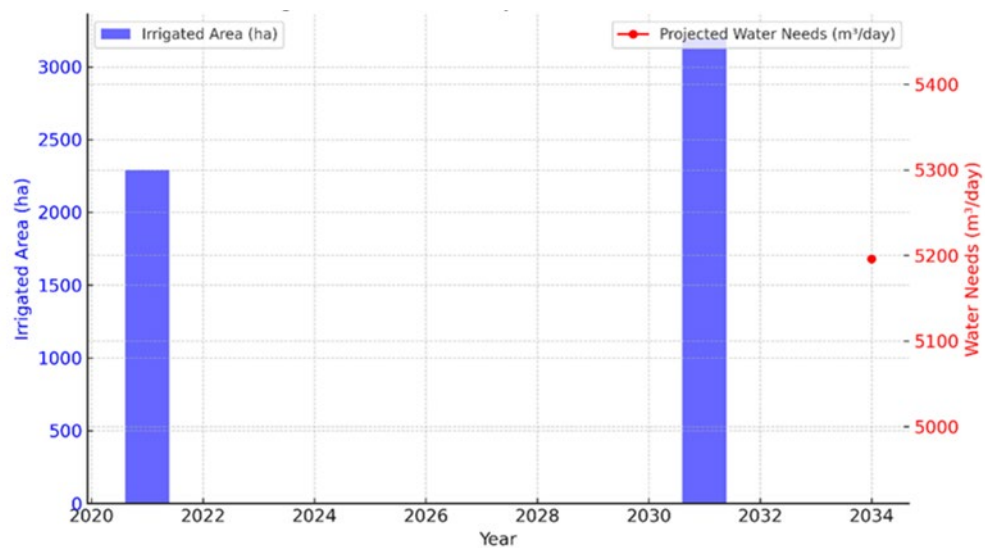


Figure 12 : Évolution de la superficie irriguée et besoins en eau prévus (El Malabiod), (DSA 2024).

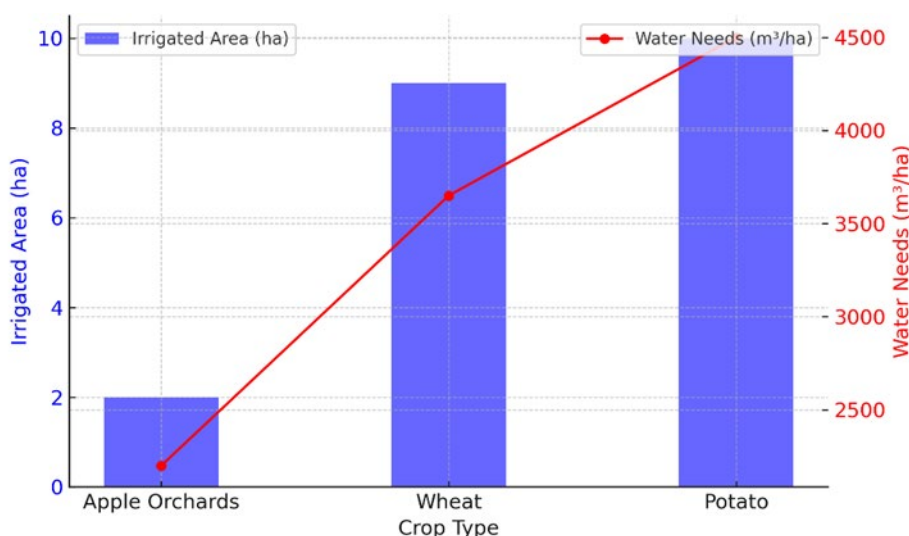


Figure 13: Superficie irriguée et besoins en eau par type de culture (El Malabiod), (DSA 2024).

L'analyse de l'histogramme (Fig. 14) révèle une évolution significative des modes d'irrigation entre 2016 et 2022. On observe un recours massif et croissant aux eaux souterraines, avec une superficie irriguée passant de 24 400 à 31 780 hectares. Cette tendance contraste avec l'irrigation par les eaux de surface, qui, après un pic en 2019, régresse nettement en 2022, indiquant une pression accrue sur les ressources de surface, possiblement due à leur raréfaction.

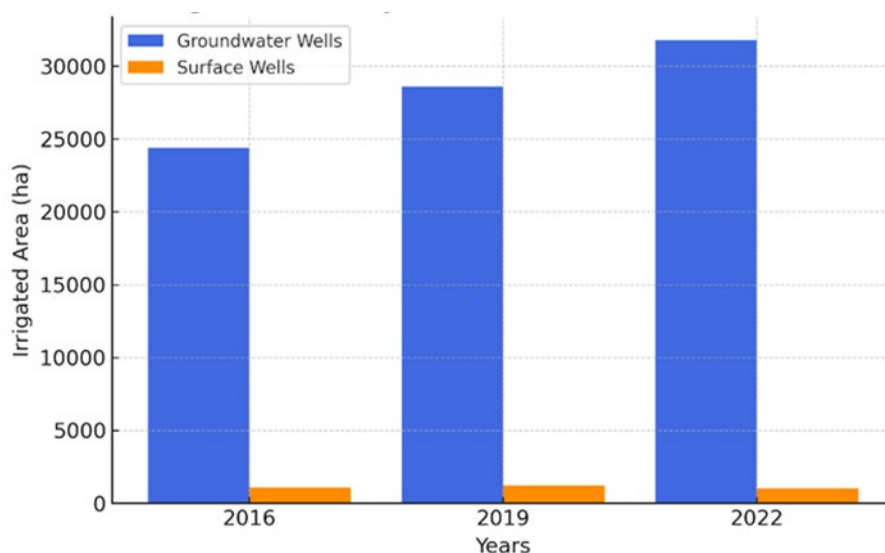


Figure 14: Évolution des zones irriguées par les eaux souterraines et les puits de surface (2016-2022), (DSA, 2024).

6.2.2 Ressources minières

L'économie de la région, historiquement fondée sur l'agriculture et un pastoralisme intensif (zone de parcours et de transhumance jusqu'aux années 90), a connu une transformation majeure avec l'émergence d'une puissante industrie lourde. Cette transition économique, initiée par l'État au début des années 1990, est directement liée à l'exploitation des riches ressources minières du sous-sol.

Le bassin minier de Tébessa, l'un des plus importants d'Algérie, fournit les matières premières essentielles à ces industries. Cette dynamique est incarnée par des acteurs industriels majeurs, dont le plus emblématique est la Société des Ciments de Tébessa (S.C.T). Filiale à 100% du groupe public GICA, cette entreprise a été créée en novembre 1998 suite au projet d'El Malabiod. Son implantation, avec son siège social, sa cimenterie et son unité commerciale situés à Tébessa, illustre l'ancrage territorial de cette industrie. Aux côtés de la S.C.T, d'autres industries comme la verrerie SOVEST et l'usine de tubes roulés ANABIB complètent ce paysage industriel, toutes dépendantes des ressources locales : le calcaire et les marnes pour le ciment, le sable siliceux pour le verre, et le minerai de fer pour la métallurgie.

Cette activité minière et industrielle, couplée à l'expansion agricole, génère une pression croissante sur la ressource en eau, un enjeu crucial dans cette région.

La plaine d'El Malabiod est également un carrefour stratégique, traversé par d'importants axes routiers nord-sud (Tébessa-El Oued) et nord-sud-est (vers la Tunisie). Par ailleurs, la région possède un riche patrimoine archéologique, avec des sites néolithiques dits escargotières témoins d'anciens lacs et de conditions biogéographiques passées très différentes.

Conclusion

Ce chapitre a permis de caractériser le cadre physiographique et socio-économique de la région d'étude, mettant en lumière les particularités et les enjeux du bassin versant de Safsaf. La zone se distingue par :

- Une configuration géomorphologique diversifiée, marquée par des reliefs contrastés entre plaines alluviales et massifs montagneux, influençant directement les écoulements hydriques et la répartition des sols.
- Un climat semi-aride aux précipitations saisonnières, générant une hydrologie intermittente avec des périodes de crue (juin et septembre) et d'étiage prononcé (décembre à avril).

CONTEXTE PHYSIOGRAPHIQUE ET SOCIO-ECONOMIQUE DE LA REGION D'ETUDE

- Des ressources en eau structurées mais sous tension, entre les eaux de surface régulées par le barrage de Safsaf et les nappes phréatiques de la plaine d'El Malabiod, soumises à une demande croissante.
- Une dynamique socio-économique en mutation, où les activités agricoles historiques côtoient désormais une industrie lourde (cimenterie, verrerie, métallurgie), elle-même tributaire des ressources minières locales.

Contexte géologique et hydrogéologique

1 Introduction générale

Il est possible de comprendre la répartition et l'évolution de l'espace grâce à la géologie. Il donne des données fondamentales sur la structure et les propriétés des réservoirs naturels et éclaire leurs interactions avec l'environnement.

D'après les études géologiques régionales menées par différents chercheurs, le bassin en question fait partie des formations autochtones du Nord-Atlas. Il se caractérise par une dominance de calcaires datant du Crétacé supérieur, délimitant trois reliefs bien marqués : Dj Boudjellel, Dj Foua et Dj Bottna. Marquées par leur relief imposant, ces chaînes calcaires reflètent l'influence des processus tectoniques ainsi que leur durabilité face à l'érosion.

Les terrains du bassin, en dehors des reliefs principaux, présentent des couches subtilement inclinées, reflétant une faible activité tectonique. Cette configuration favorise la formation d'aquifères dans les calcaires, grâce aux fractures et aux processus de dissolution qui renforcent leur perméabilité.

7 CONTEXTE GEOLOGIQUE

7.1 Stratigraphie

La région de Safsaf El Ouesra présente une stratigraphie complexe, témoin de l'évolution géologique marquée par des cycles de sédimentation continentale et marine, alternant avec des épisodes tectoniques et érosifs. Les principales unités stratigraphiques, de la plus récente à la plus ancienne, sont les suivantes :

7.1.1 Les dépôts quaternaires

Ces formations recouvrent une large partie des plaines et des lits des oueds.

2.1.1.1 Dépôts alluviaux récents : Composés d'argiles, de limons, de sables, et de graviers. Ces matériaux, d'origine détritique, proviennent de l'érosion des formations plus anciennes.

2.1.1.2 Terrasses alluviales : Elles se retrouvent à différents niveaux, formées de sables grossiers et de graviers transportés par les cours d'eau pendant les périodes d'activité fluviale intense (Soufi, 2015, modifié).

CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

7.1.2 Formations miocènes

Le Miocène est une unité clé dans la région, marquée par une alternance de dépôts marins et continentaux.

2.1.2.1 Pontien : Constitués de sables fins et grossiers, associés à des grès silicifiés et des argiles brunes.

2.1.2.2 Vindobonien : Marnes rouges et vertes, d'une épaisseur variante entre 40 et 50 m, témoignant de conditions marines peu profondes.

2.1.2.3 Burdigalien : Caractérisé par des grès blancs grossiers, épais de 30 à 40 m, probablement déposés dans un environnement littoral.

7.1.3 Formations éocènes

Les affleurements éocènes sont limités mais distinctifs, composés de calcaires marneux gris-bleuâtres. Ces calcaires présentent parfois des rognons siliceux, vestiges d'une diagenèse sous des conditions marines modérées (Soufi, 2015, modifié).

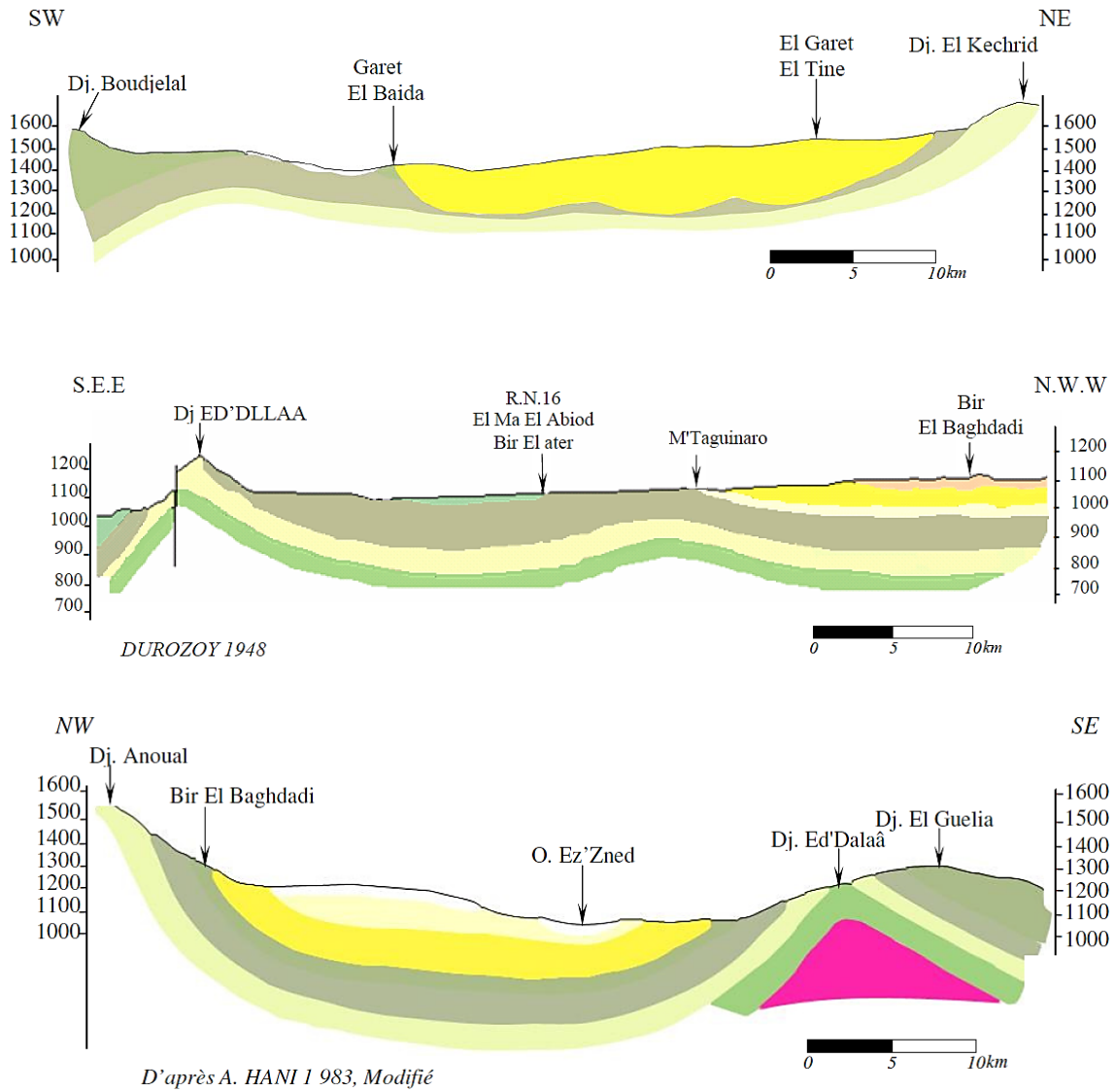
7.1.4 Formations crétacées

7.1.4.1 Crétacé supérieur

2.1.4.1.1 Maestrichtien : Dominé par des calcaires crayeux riches en silex, souvent affectés par de légères ondulations tectoniques. Les cassures des calcaires révèlent des dendrites de manganèse, typiques de cette formation.

2.1.4.1.2 Emschérien : Principalement composé de marnes fossilifères, parfois intercalées de bancs lumachelleux et gypsifères (Soufi, 2015, modifié).

CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE



- : **VONDOBONIEN** (Argiles sous faible couverture alluviale, Argiles rouges, Argiles bariolées)
- : **BURDIGALIEN** (Grès sous faible couverture alluviale, Poudings siliceux, Grès blancs, brun ferrugineux).
- : **MAESTRICHTIEN - CAMPANIEN SUPÉRIEUR**. (Calcaires blancs et Marno-calcaires blanc à Inocérames).
- : **CAMPANIEN INFÉRIEUR - EMSCHERIEN** (Marnes et intercalation de bancs calcaires à Lumachelles).
- : **TURONIEN** (Calcaires, Marnes et bancs calcaires).
- : **CÉNOMANIEN** (Marnes et bancs calcaires à Lumachelles).
- : **TRIAS** (Argiles à Gypse, Calcaires et Cargneules).

Figure 15: coupes géologiques de la zone d'étude (d'après DUROZOY, 1984 in Rouabhia, 2006).

7.1.4.1.1 Crétacé moyen

Caractérisé par des marnes marno-calcaires, disposées en bancs ou en plaquettes, retrouvées localement dans les monts voisins (Soufi, 2015, modifié).

7.1.4.1.2 Crétacé inférieur

Représenté par des marnes argileuses épaisses, associées à des grès fins. Ces formations montrent localement des inclusions de manganèse, particulièrement dans les gorges du Safsaf (Soufi, 2015, modifié).

7.1.5 Formations triasiques

Les affleurements triasiques sont localisés dans les structures anticlinales, comme au Djebel Dhalaa, composés de marnes bariolées, de dolomies, et de gypses. Ces formations sont souvent tectoniquement déformées, témoignant d'une activité structurale intense.

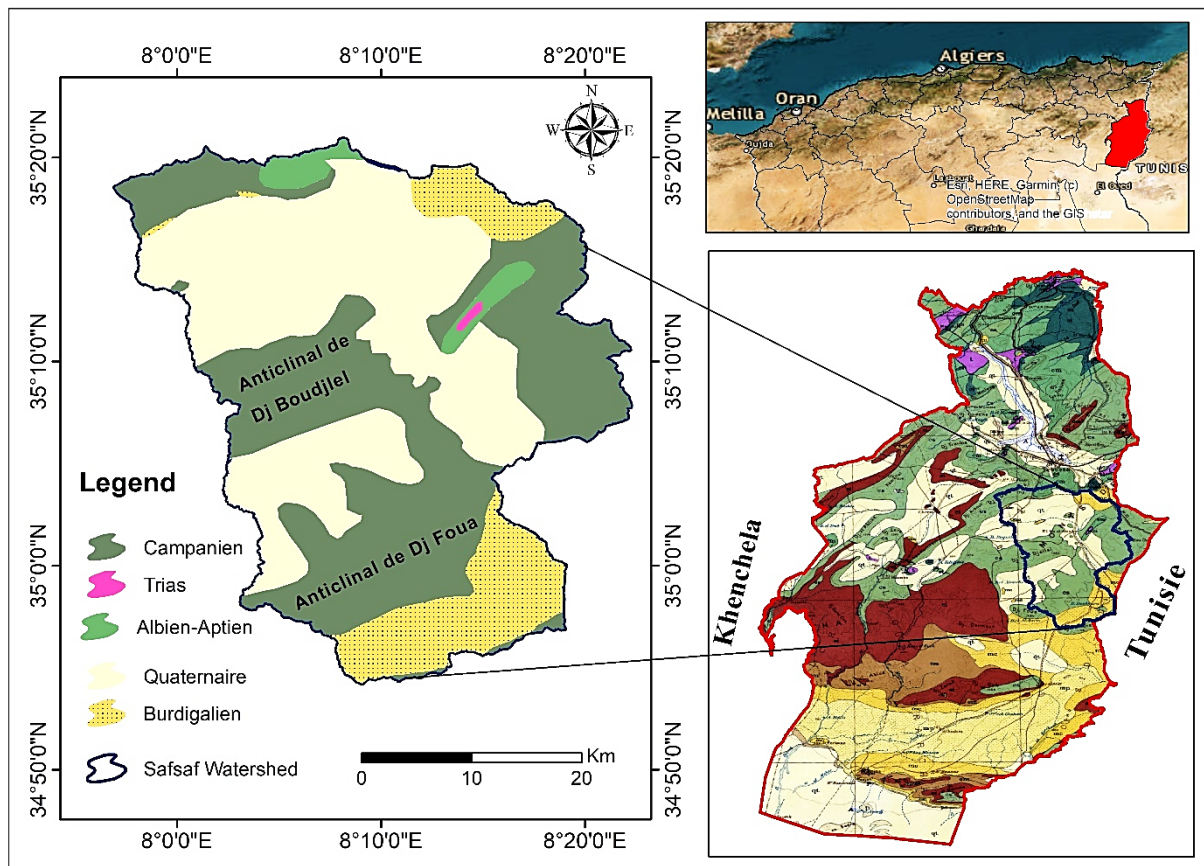


Figure 16: Esquisse géologique du bassin versant de Safsaf extraite de la carte de Tébessa à échelle 1/25000 (Ramdani, 2025).

7.2 Tectonique

La région du bassin versant étudié, englobant les zones d'El Malabiod et de Safsaf, témoigne d'une histoire tectonique complexe marquée par une succession d'événements qui ont profondément influencé sa morphologie actuelle. Les structures tectoniques principales se caractérisent par des systèmes de fractures multiples, des failles, des fossés tectoniques et des phénomènes karstiques, associés à deux phases orogéniques majeures (Soufi, 2015).

Les fractures NE-SW et NO-SE sont prédominantes, ayant souvent accompagné les plissements. Elles se manifestent sous forme de failles normales, inverses, joints de cisaillement et flexures bien visibles dans le relief. Les failles, bien que peu nombreuses, se répartissent avec des orientations variées, notamment N-S et E-W, comme en témoigne la faille de Tnoukla au nord. Par ailleurs, les fossés tectoniques, orientés perpendiculairement aux structures plissées, constituent un trait distinctif marquant en raison de leur influence sur le relief. Dans la région de Safsaf, ces fossés et les zones karstiques se manifestent par des phénomènes de dissolution et un remplissage partiel des cavités anciennes, avec des matériaux terrigènes tels que sables et argiles, ainsi que des calcites.

La tectonique du bassin versant est aussi marquée par deux phases principales. La première, une impulsion distensive du Crétacé-Éocène, a favorisé un milieu subsident où se sont déposés des matériaux néritiques. La seconde, compressive, liée à la phase atlasique de l'Éocène terminal, est caractérisée par une contrainte maximale orientée NO-SE, responsable des plissements serrés et verticaux de direction SW-NE typiques de l'Atlas saharien. Ainsi, l'ensemble du bassin versant présente une tectonique variée et complexe, influençant à la fois la topographie et l'hydrographie de la région (Rouabhia, 2006).

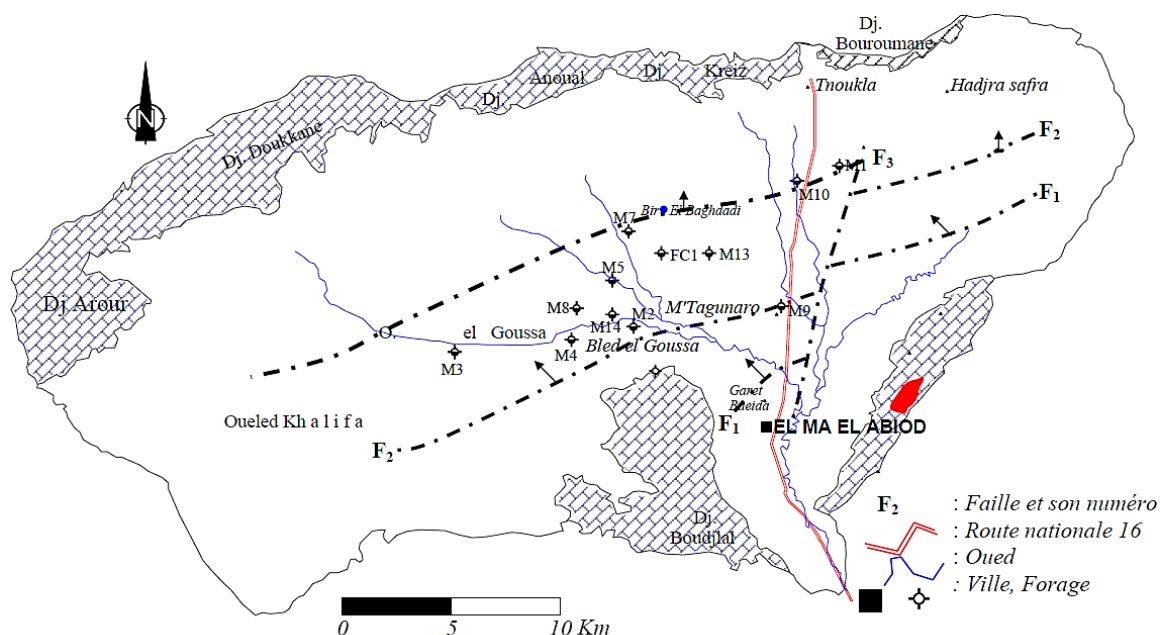


Figure 17: Carte du système de failles (UGF-BRNO 1971), (in Djebari 2011).

Conclusion

L'analyse du contexte géologique du bassin versant de Safsaf révèle une histoire complexe, marquée par une succession de cycles sédimentaires et d'événements tectoniques qui ont directement façonné le paysage actuel.

D'un point de vue stratigraphique, la séquence s'étend du Trias aux dépôts quaternaires, avec une prédominance nette des formations carbonatées du Crétacé supérieur. Ces calcaires, qui constituent l'ossature des principaux reliefs (Djebel Boudjellel, Foua, Bottna), forment le réservoir géologique majeur de la région. La présence de formations marneuses étanches (Crétacé inférieur et moyen, Emschérien) joue un rôle crucial dans la structuration des écoulements souterrains.

D'un point de vue structural, la région a été affectée par deux phases orogéniques majeures. Une phase compressive, liée à l'orogénèse atlasique, est responsable des plissements serrés de direction SW-NE et a favorisé la fracturation des massifs calcaires. Cette fracturation, avec des directions préférentielles NE-SW et NO-SE, combinée à des phénomènes de dissolution (karst), est un facteur déterminant pour la perméabilité et le stockage des eaux souterraines. Les fossés tectoniques et les failles, comme celle de Tnoukla, viennent complexifier cette structure et influencent directement le drainage et la répartition des aquifères.

CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

En résumé, la géologie du bassin de Safsaf est caractérisée par une imbrication de réservoirs calcaires fracturés et de couches marneuses imperméables, le tout structuré par une tectonique active.

8 CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

8.1 Etudes hydrogéologiques dans la région d'étude

Les études menées dans cette région incluent celles de Rouabhia (2006), Samoun (2021), ont révélé la présence de trois nappes aquifères superposées dans la région d'El Malabiod. La première nappe est située dans les sables miocènes, la deuxième dans les grès, et la troisième dans les argiles sableuses d'âge miocène. Ces nappes ont été clairement identifiées grâce aux analyses géophysiques et géologiques, fournissant une vue détaillée de la répartition des ressources en eau souterraine dans cette zone.

8.2 Structure géologique et hydrogéologique du système

Il existe deux unités aquifères distinctes dans la plaine d'El Malabiod, qui se distinguent par leur profondeur. Les formations alluviales récentes sont associées à la première, peu profonde et largement répandue. Ce sont des argiles remaniées, du sable et des cailloutis qui la composent. Dans certaines régions, comme à Oglat Chaachaa, deux puits ont exploité une formation calcaire proche de la surface, aujourd'hui asséchée. L'unité suivante, plus profonde, se trouve dans les formations Miocènes de grès, de sables et de graviers. Elle fournit l'eau à une dizaine de forages et une centaine de puits. Malgré la liberté de ces deux nappes, la nappe Miocène a tendance à être légèrement retenue vers l'est, en particulier aux abords du forage AT1.

8.2.1 Aquifères en milieu poreux

8.2.1.1 Aquifère captif du Sud-Est

Dans le sud-est de la région, un aquifère à nappe captive est présent. Il est exploité par deux forages, AT1 et AT2, bien que seul ce dernier soit utilisé pour l'irrigation. Le forage AT1 a été abandonné à cause du taux de salinité trop élevé (Samoun, 2021).

8.2.1.2 Aquifères superposés sans confinement

La région abrite deux aquifères superposés. Le premier, qui est peu profond, représente une nappe temporaire nourrie par une fine couche d'alluvions et est actuellement exploité par des puits peu profonds en déclin. En l'absence de couche imperméable, l'eau s'infiltré vers le second aquifère, qui est plus profond et composé de sables et d'argiles marneuses. Ce dernier constitue la principale source d'eau, utilisée de manière continue pour l'approvisionnement en eau potable à travers une vingtaine de forages, et de façon intermittente pour l'agriculture et l'industrie via 60 à 100 forages supplémentaires (Rouabhia, 2006).

8.2.2 Aquifères en milieu fissuré

8.2.2.1 Systèmes karstiques en milieu fissuré

Deux types de réseaux karstiques ont été identifiés. Le premier, situé au nord du Djebel Boudjellal, est constitué d'une structure ondulée recouverte de dépôts sableux et de graviers argileux, exploités localement pour l'irrigation. Le second correspond aux formations crétacées karstifiées en périphérie de la région. L'existence de ce réseau est confirmée par d'anciennes sources asséchées au nord-ouest, dont les conduits souterrains sont enfouis sous les formations du glaci. Au nord-est, plusieurs études (Adjoum B., 1991 ; Rouabhia, 2006 ; Boughanem, 2011) ont démontré l'alimentation de cette nappe, tandis qu'au sud-ouest, elle bénéficie des apports hydriques du système du Djebel Boudjellal (Samoun, 2021).

Il existe ainsi une zone aquitard plus étendue à l'est, s'insérant entre les formations calcaires et le champ captant, tandis qu'au nord-est, les sables miocènes sont en contact direct avec les versants sud du Djebel Bouroumane et du Djebel Tenoukla.

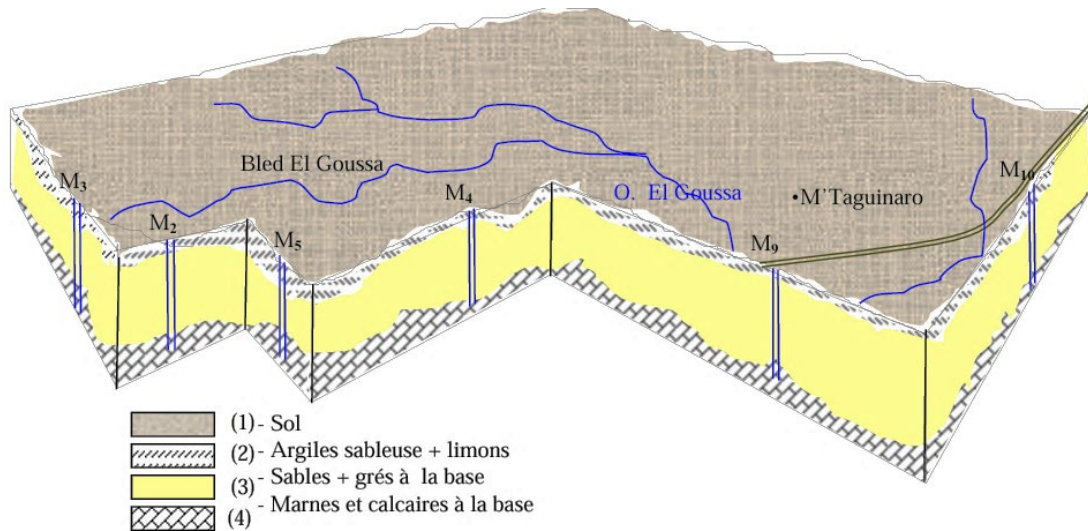


Figure 18: Structuration géologique et hydrogéologique du système aquifère de la plaine d'El Malabiod (in Rouabhia, 2006).

8.3 Comportement hydrodynamique des eaux souterraines

8.3.1 Piézométrie

L'analyse hydrodynamique du système aquifère est fondée sur une campagne piézométrique intensive menée de mars à mai. Les données acquises ont été synthétisées sous la forme d'une carte piézométrique, qui révèle la distribution spatiale des charges hydrauliques et permet de proposer un modèle conceptuel des conditions aux limites. Cette interprétation est contextualisée et renforcée par l'intégration systématique de l'ensemble des campagnes de mesure antérieures.

CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

La zone d'étude se caractérise par une forte densité d'ouvrages de captage, indiquant une exploitation intensive de la ressource en eau. Deux types d'ouvrages prédominent : des puits domestiques (10-30 m) et des forages profonds (100-150 m et au-delà). Soixante-neuf de ces forages ont été inventoriés et constituent le jeu de données de base pour l'analyse hydrogéologique (Fig.19).

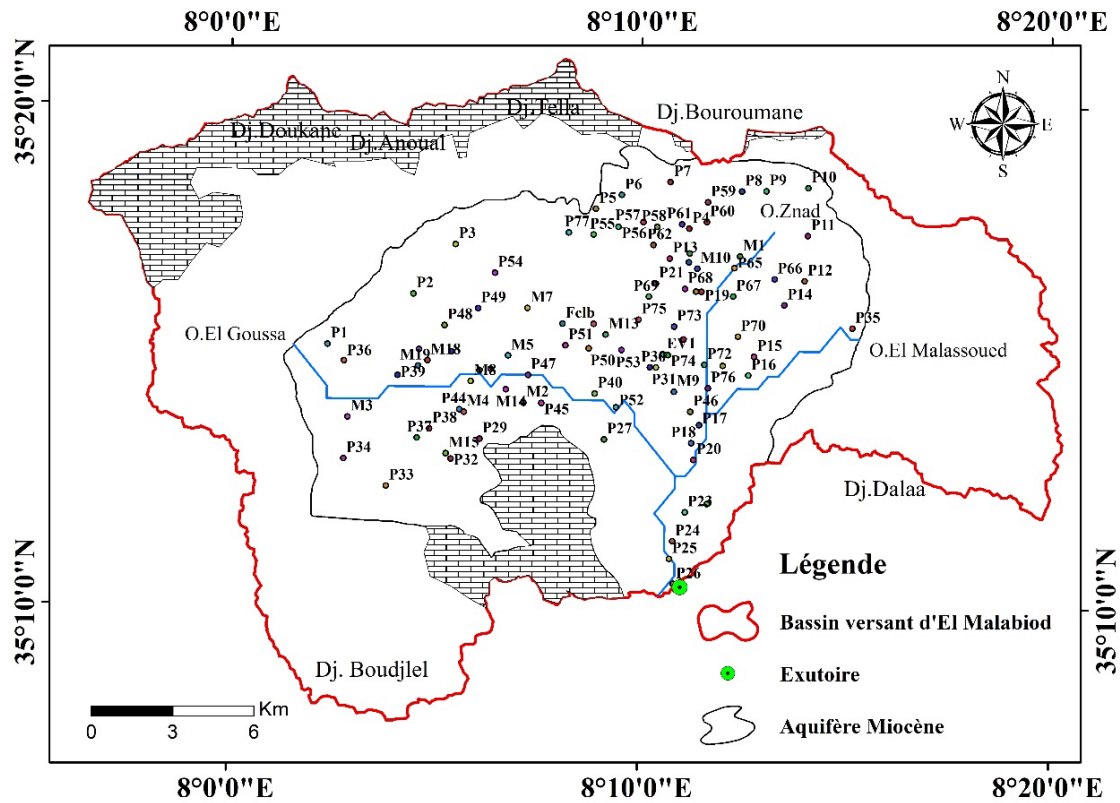


Figure 19: Carte de localisation des points d'observation de l'aquifère Miocène (Ramdani, 2025).

8.3.1.1 Campagne piézométrique de Mars 2024

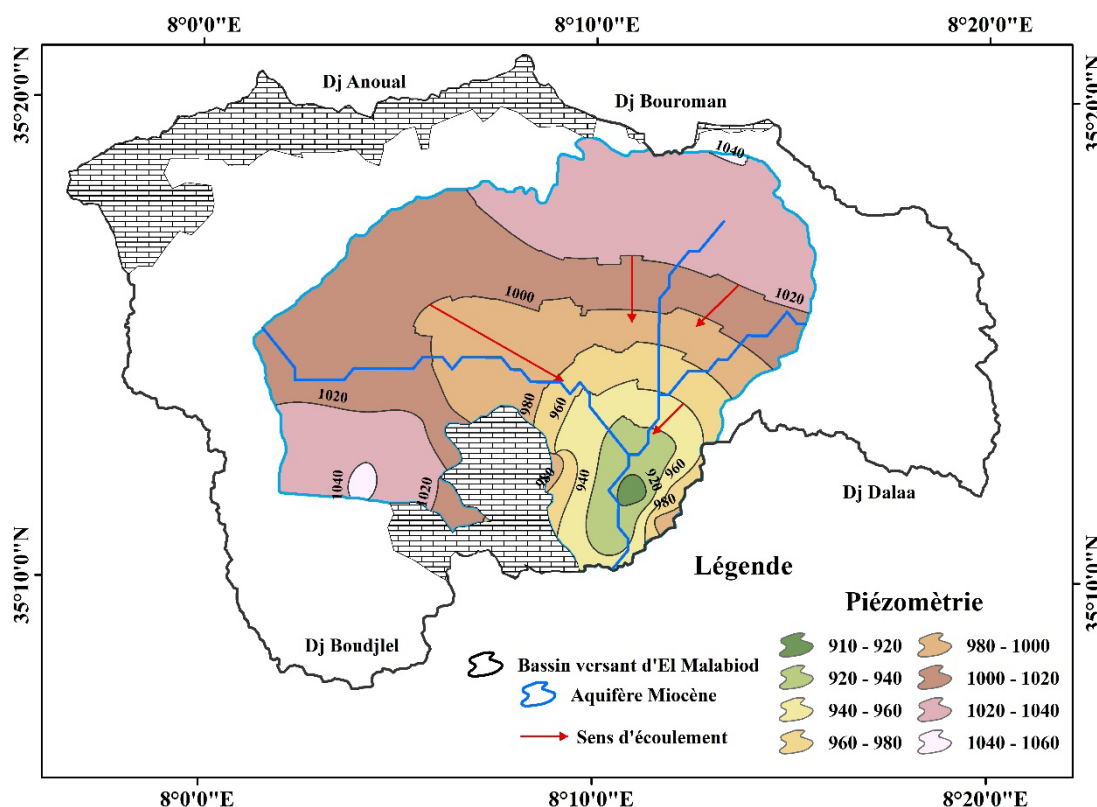


Figure 20: Carte piézométrique de l'aquifère en Mars 2024, (Ramdani, 2024).

L'analyse de la carte piézométrique du bassin versant d'El Malabiod met en évidence deux zones hydrodynamiques distinctes au sein de l'aquifère miocène (fig.20).

La première zone, située au nord du bassin, présente des valeurs piézométriques élevées (comprises entre 1020 et 1060 m) et un écoulement orienté globalement du nord-est vers le sud-ouest. Cette partie correspond à une zone d'alimentation de la nappe, où l'infiltration des eaux météoriques est favorisée par la topographie élevée et la nature perméable des formations géologiques. La proximité des courbes isopièzes traduit un gradient hydraulique important, indiquant une vitesse d'écoulement relativement forte.

La deuxième zone, localisée au sud du bassin, se caractérise par une diminution progressive des altitudes piézométriques (de 940 à 910 m) et par une convergence des lignes d'écoulement vers un axe de drainage principal. Cet axe coïncide nettement avec le tracé de l'Oued El Malabiod, orienté vers le sud-ouest, traduisant ainsi une zone de décharge naturelle de l'aquifère.

Globalement, la carte piézométrique illustre un écoulement général des eaux souterraines du nord vers le sud-ouest, depuis les zones de recharge situées dans les reliefs (Dj Doukane, Dj

CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

Bouroumane) vers les zones basses du bassin, où la nappe s'écoule en direction de la vallée d'El Malabiod.

Au centre-sud du bassin d'El Malabiod, on observe la présence d'une dépression piézométrique matérialisée par la convergence des courbes isopièzes autour des altitudes comprises entre 920 et 940 m. Cette zone traduit un abaissement du niveau piézométrique, probablement induit par l'exploitation intensive des eaux souterraines. En effet, ce secteur correspond à une zone agricole et habitée, caractérisée par un grand nombre de puits domestiques et de forages profonds destinés à l'irrigation et à l'approvisionnement en eau. Cette densité de captages explique la formation d'un cône de dépression local, indiquant une forte sollicitation de l'aquifère miocène dans cette partie du bassin.

La cartographie successive des états piézométriques (2001, 2002, 2003, 2004, 2009), mise en perspective avec les résultats de l'étude de 2024, offre une vision dynamique des variations de l'aquifère sur le long terme.

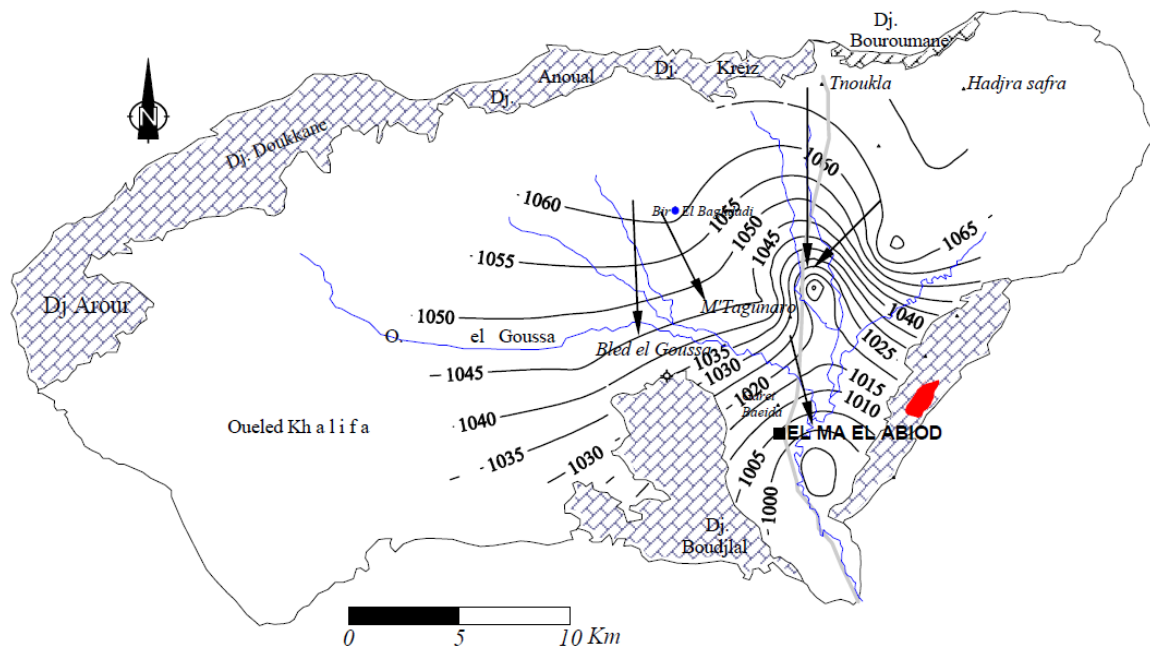


Figure 21: Cartographie piézométrique du mois de mars 2001 (Rouabhia, 2006).

CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

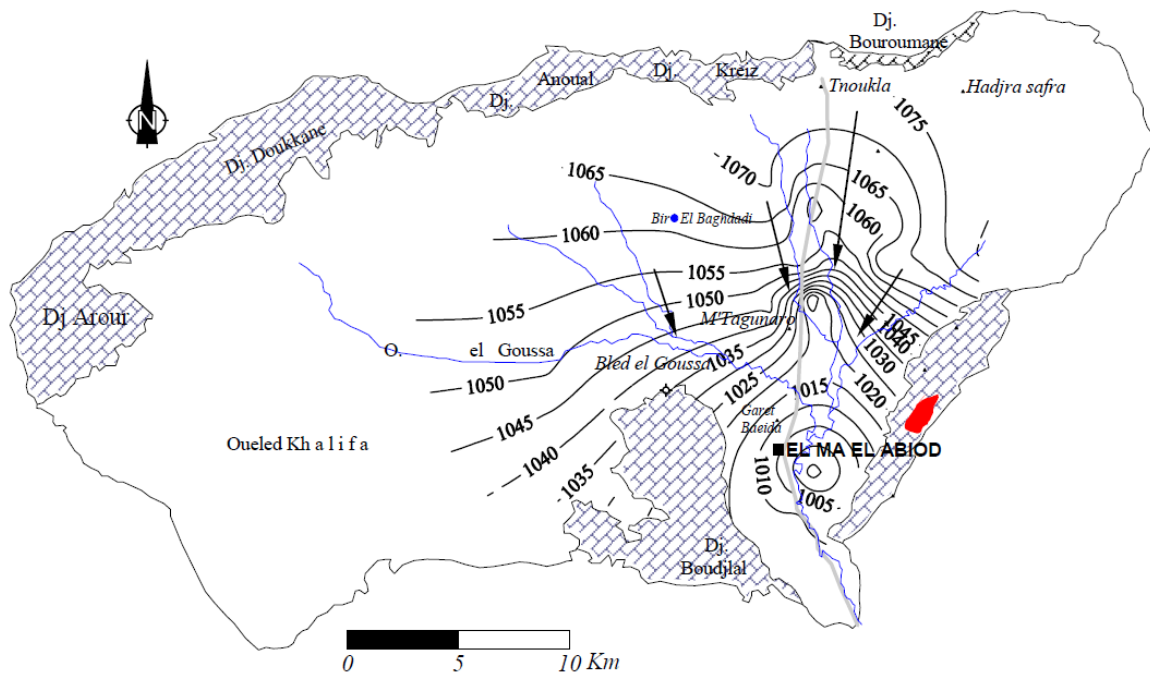


Figure 22 : Cartographie piézométrique Octobre 2002 (Rouabhia, 2006).

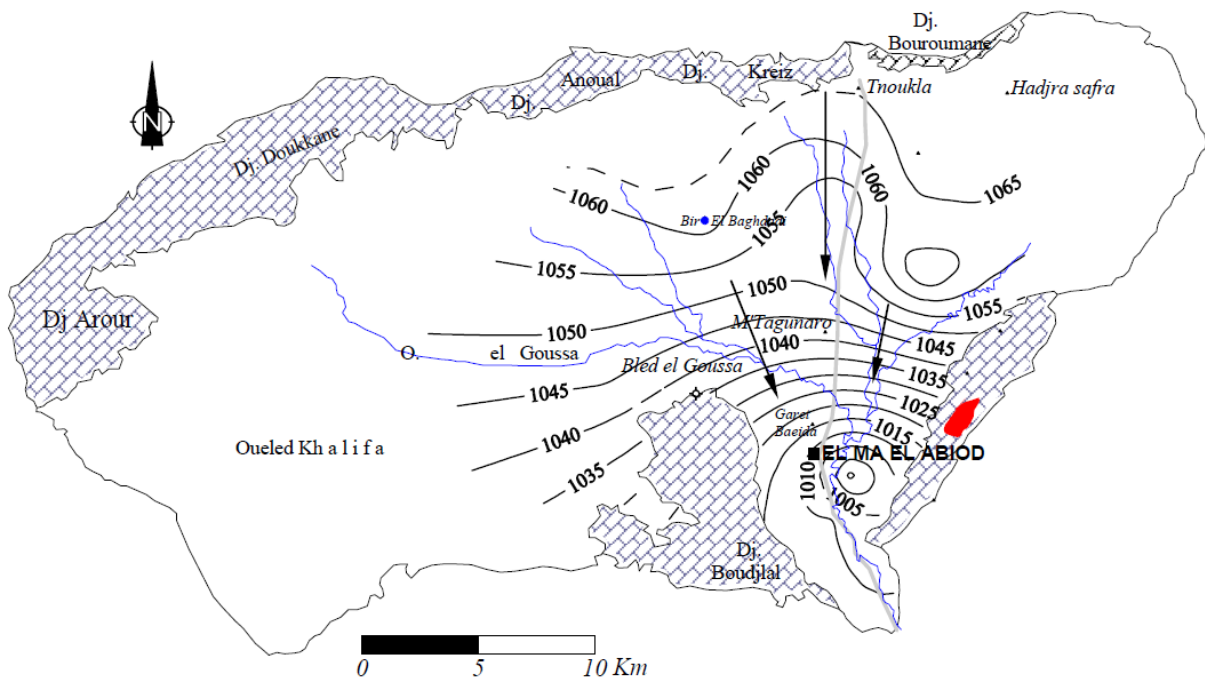


Figure 23 : Niveaux piézométriques mesurés en septembre 2003 (Rouabhia, 2006).

CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

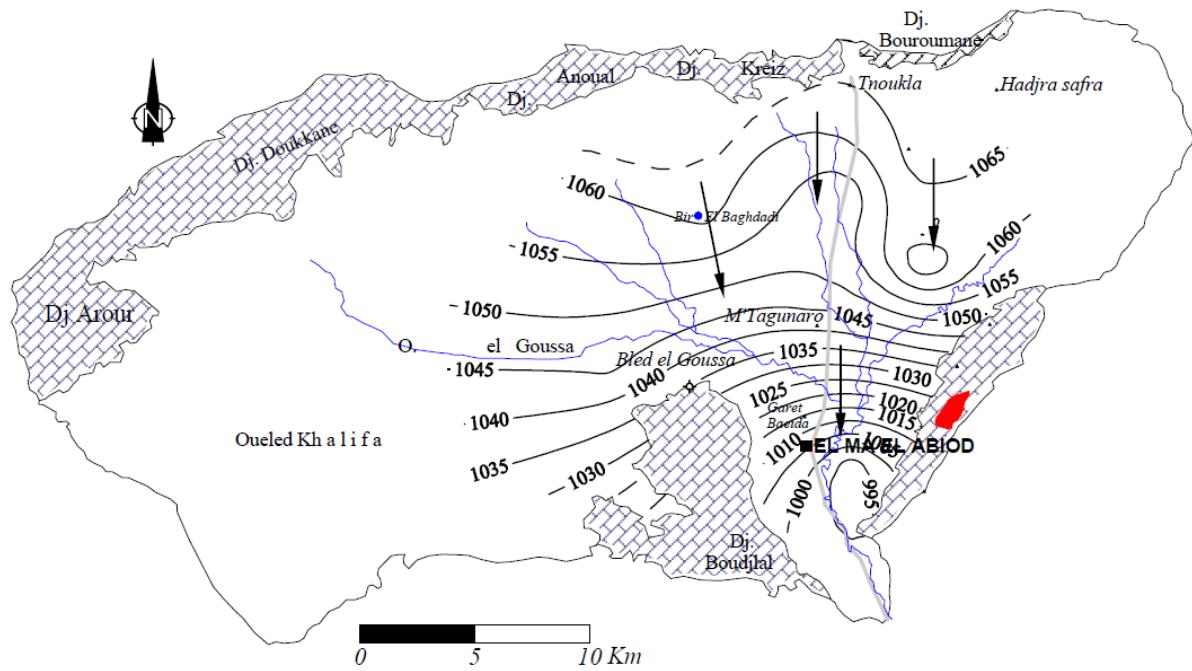


Figure 23: Configuration piézométrique de l'aquifère (Mars 2004), (Rouabhia, 2006).

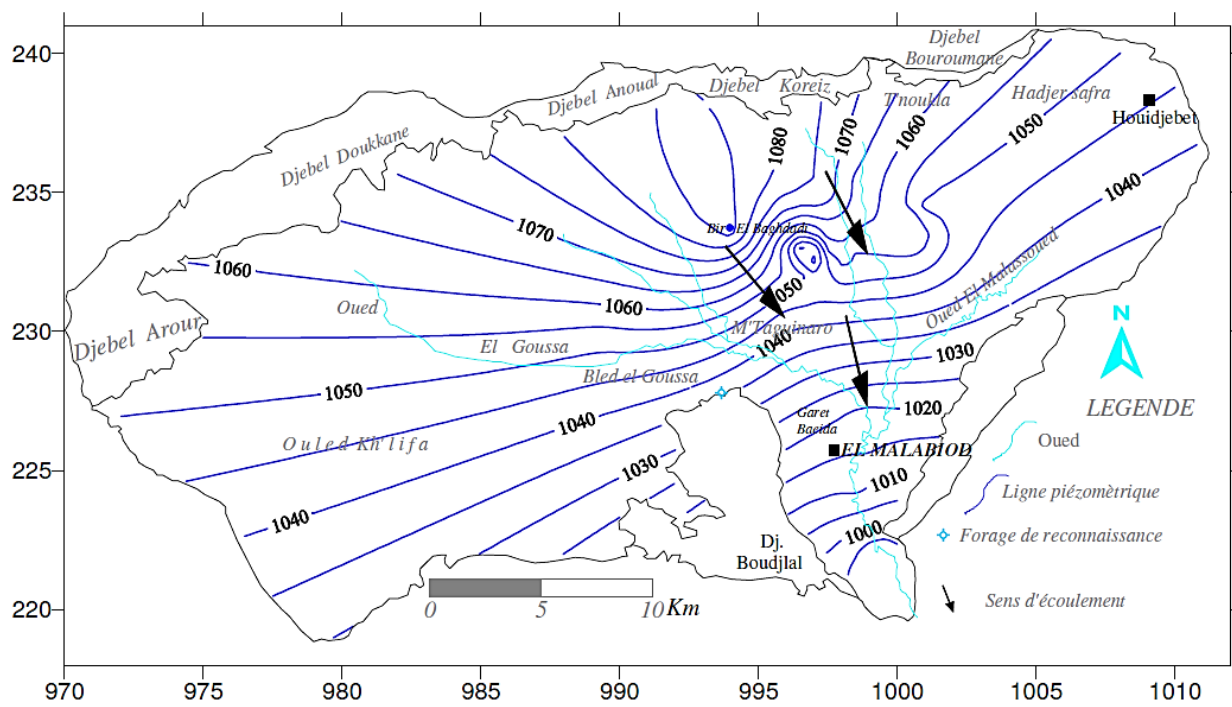


Figure 22: Piézométrie Septembre 2009 (Djebari, 2011).

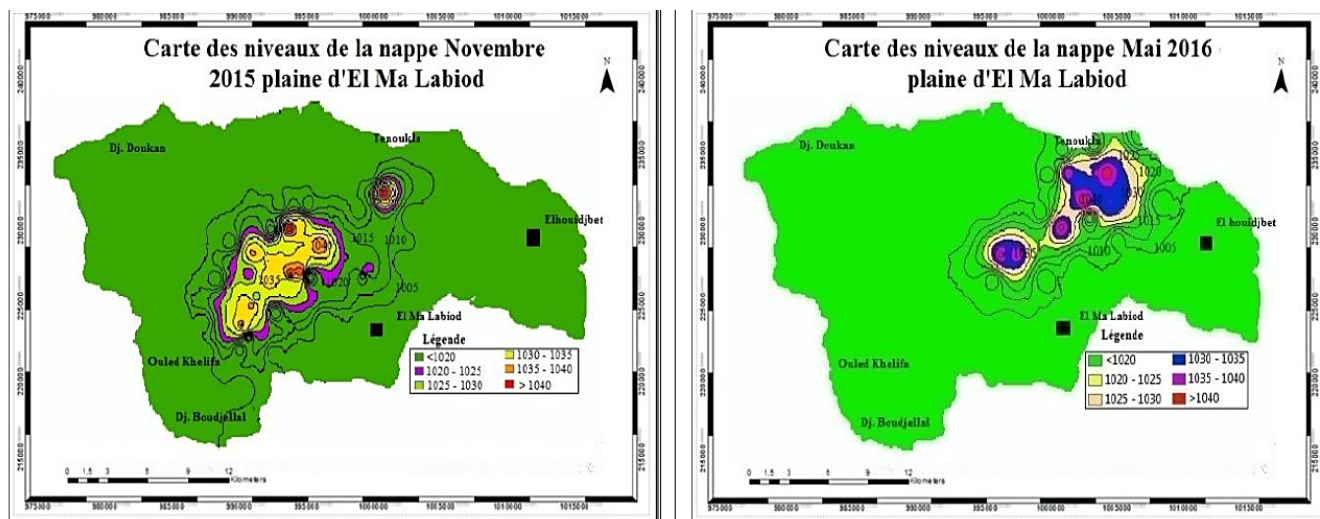


Figure 24: Représentation cartographique des hauteurs piézométriques Novembre 2015 et Mai 2016 (Samoun, 2021).

L'analyse comparative des cartes piézométriques de la nappe du bassin d'El Malabiod entre 2001 et 2024 met clairement en évidence une évolution spatio-temporelle significative du niveau piézométrique.

Au début des années 2000 (2001–2004), la nappe présentait un niveau relativement élevé, notamment dans la partie nord et nord-est du bassin, traduisant une alimentation active liée aux infiltrations des précipitations et à la proximité des zones de recharge naturelles. Les courbes piézométriques montraient un gradient hydraulique modéré, orienté globalement du nord-est vers le sud-ouest, indiquant un écoulement régulier vers les zones de drainage naturelles.

Cependant, au fil des années, une tendance à la baisse généralisée du niveau piézométrique s'est progressivement installée. Cette diminution du potentiel hydrodynamique est surtout marquée dans les zones exploitées à des fins agricoles et domestiques, traduisant les effets conjugués de la surexploitation des forages et de la réduction des apports de recharge.

La carte de 2024 met en évidence une accentuation du rabattement piézométrique dans plusieurs secteurs du bassin, notamment au centre et au sud, où les courbes piézométriques sont plus resserrées, indiquant une accélération des vitesses d'écoulement vers les zones de drainage. Cette configuration illustre la pression croissante exercée sur la ressource, associée à une diminution notable des réserves d'eau souterraine.

8.3.1.2 Cartographie des rabattements observés entre 2001 et 2024

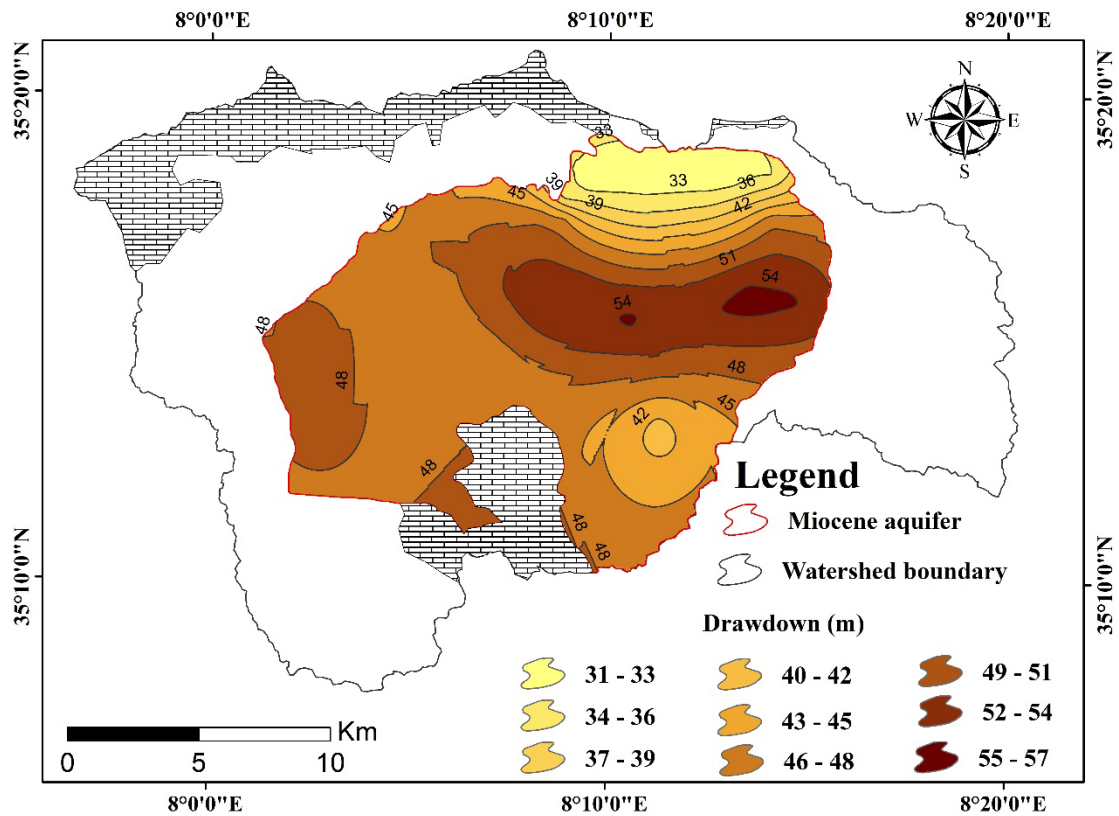


Figure 27: Cartographie du rabattement (2001-2024) (Ramdani, 2024).

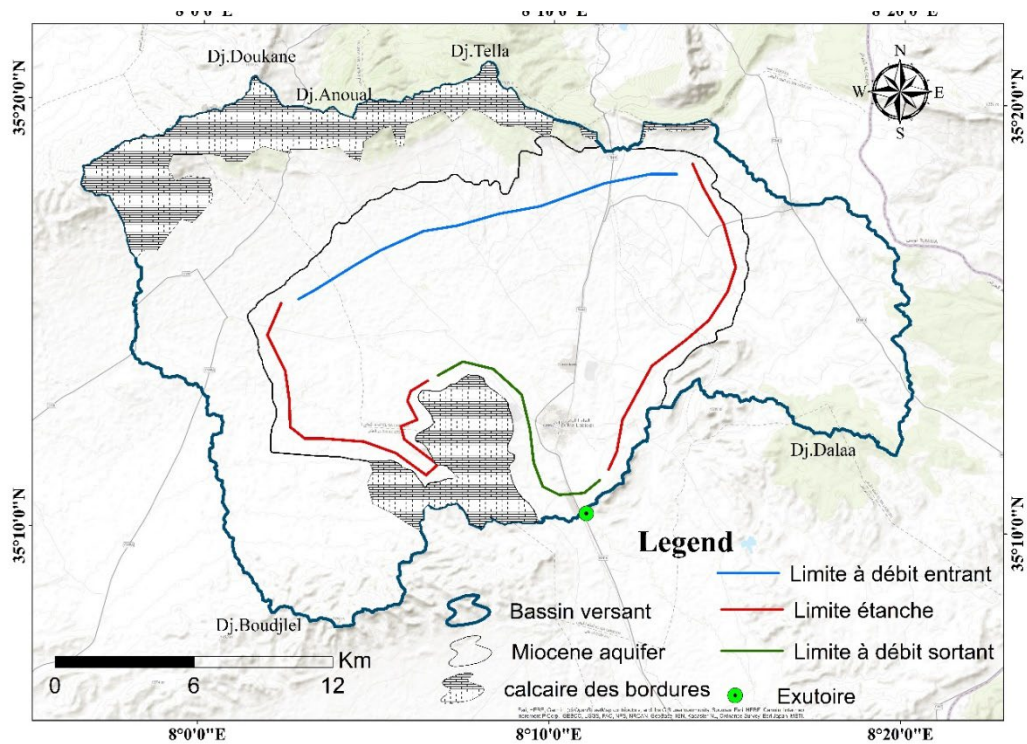


Figure 25: Cartographie des limites de l'aquifère du bassin d'El Malabiod (Ramdani, 2025).

CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

L'étude du système aquifère d'El Malabiod révèle un fonctionnement complexe, principalement alimenté par les précipitations. Les apports proviennent du Nord (calcaires) et du Sud-Ouest (Maestrichtien). Les eaux s'écoulent du Nord vers le Sud, où une zone de transition et un système de failles permettent le transfert des eaux de la nappe alluviale vers la nappe du Miocène. Le bassin est délimité au Sud-Ouest par une bordure imperméable (marnes) et se décharge finalement vers l'Oued El Malabiod.

Conclusion

L'étude du contexte hydrogéologique du bassin d'El Malabiod a permis de caractériser un système aquifère complexe, structuré en plusieurs nappes superposées et influencé par la géologie régionale. On distingue principalement un aquifère libre peu profond dans les alluvions quaternaires et un aquifère principal, plus profond, logé dans les formations grésosableuses du Miocène. Parallèlement, les calcaires crétacés fracturés et karstifiés des reliefs constituent un réservoir en milieu fissuré de grande importance.

Le comportement hydrodynamique de ce système est marqué par un écoulement général du Nord-Est vers le Sud-Ouest, des zones de recharge situées sur les reliefs calcaires vers la zone de décharge que constitue l'Oued El Malabiod. L'analyse piézométrique historique (2001-2024) révèle une tendance préoccupante à la baisse des niveaux d'eau, avec l'apparition d'une dépression piézométrique prononcée dans le centre-sud du bassin. Cet abaissement est une conséquence directe de la surexploitation des forages pour l'irrigation et l'alimentation en eau potable, couplée à une recharge naturelle probablement insuffisante.

Ainsi, la ressource en eau souterraine de la région, bien que structurée en un système interconnecté et potentiellement productif, est soumise à une pression anthropique croissante qui menace sa pérennité. Cette caractérisation hydrogéologique est un prérequis indispensable pour envisager toute stratégie de gestion durable et de préservation de cette ressource vitale.

Hydro-climatologie

1 Introduction générale

L'Algérie, avec son vaste territoire de 2 381 741 km², présente une grande variété de climats. Au nord, le climat méditerranéen (classification Köppen Csa) domine, tandis que la majeure partie du pays est soumise à un climat désertique (BWh et BWk). Entre ces deux grandes zones, des régions de transition apparaissent, notamment un climat semi-aride (BSk et BSh à l'est), marqué par une sécheresse prolongée bien au-delà de l'été. On distingue également un climat méditerranéen d'influence montagnarde, caractérisé par une forte continentalité.

De manière générale, l'Algérie se situe dans la zone subtropicale, où le climat est majoritairement chaud et sec.

Le bassin versant englobant la plaine d'El Malabiod et la région de Safsaf est caractérisé par un climat semi-aride, marqué par une forte variabilité des précipitations et une sécheresse prolongée. Cette aridité influence directement la disponibilité des ressources en eau, tant en surface qu'en profondeur, soumettant les réserves hydriques à d'importantes fluctuations saisonnières. La rareté des pluies, souvent irrégulières et parfois intenses, conditionne les processus d'infiltration et d'alimentation des nappes souterraines, tandis que l'évaporation élevée limite la recharge effective. Ces dynamiques hydroclimatiques jouent un rôle clé dans l'évolution des concentrations chimiques des eaux, influencées par les variations saisonnières des paramètres climatiques. Ainsi, une compréhension approfondie des interactions entre climat et hydrologie est essentielle pour évaluer la disponibilité et la qualité des ressources en eau dans cette région.

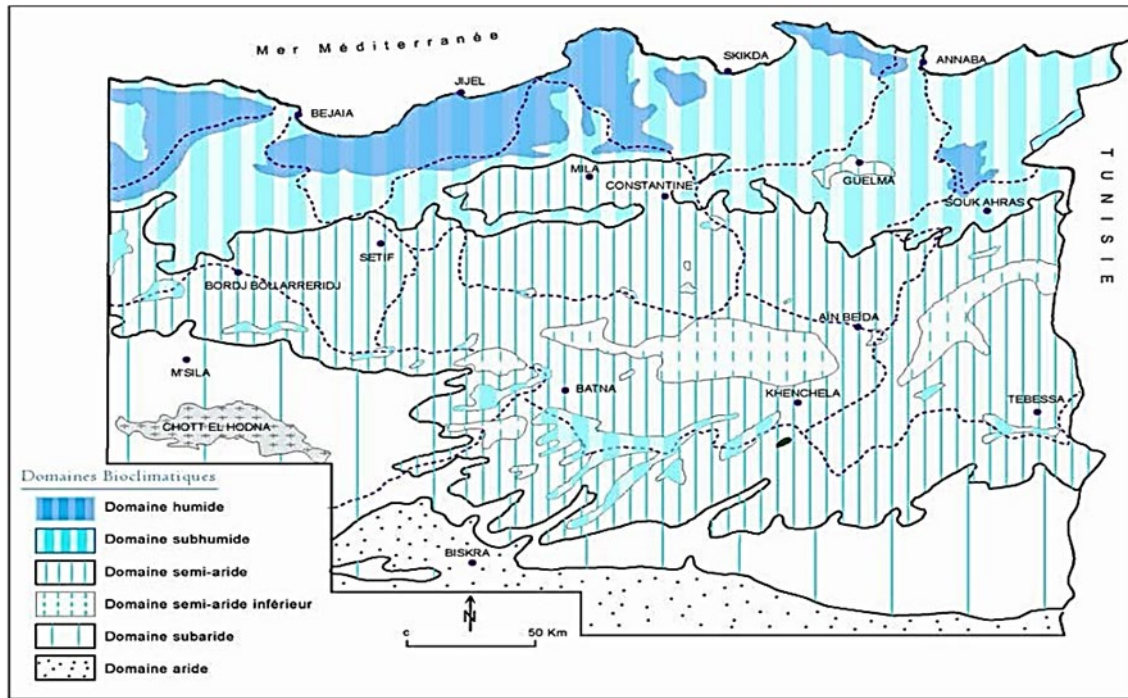


Figure 26: Carte schématique des zones bioclimatiques de l'Est algérien (Côte, 1998 in Gueraidia, 2023).

9 Températures

La température est un facteur clé du climat, influençant directement le cycle de l'eau et le bilan hydrique. L'analyse des données mensuelles et annuelles permet d'identifier des variations saisonnières marquées, facilitant ainsi la distinction entre les différentes saisons thermiques et leur impact sur les ressources en eau. Les températures n'ont pas été relevées directement dans la région d'étude en raison de l'absence de stations météorologiques. Par conséquent, l'analyse climatique s'est appuyée sur les données de la station la plus proche, située à Tébessa, à 809 mètres d'altitude, au sud de la ville.

9.1 Températures moyennes mensuelles

La figure 30 montre l'évolution des températures moyennes mensuelles à Tébessa entre 1972 et 2023, typique d'un climat aride à semi-aride. Les températures augmentent progressivement jusqu'à un pic estival en juillet et août autour de 27°C, avant de redescendre à partir de septembre. Cette variation saisonnière reflète une forte amplitude thermique, avec des étés chauds et secs et des hivers frais, influençant directement le bilan hydrique régional.

Tableau 1: Tendances des températures moyennes mensuelles à la station de Tébessa (1972-2023).

Mois	Sept	Octo	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Jui	Juill	Aout
T°C	21.81	17.03	11.21	7.67	6.45	7.58	10.22	13.49	18.37	23.54	26.91	26.14

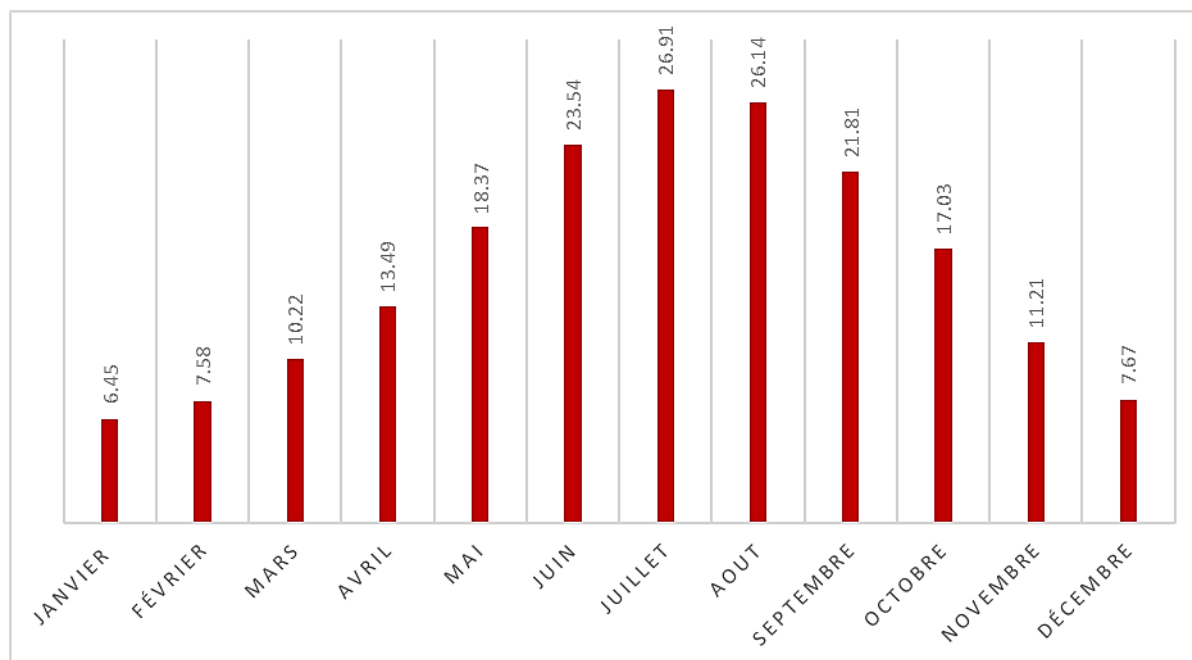


Figure 27: Évolution des moyennes mensuelles des températures à la station de Tébessa (1972-2023) (Ramdani, 2025).

I.2. Températures moyennes annuelles

Le graphe montre une tendance générale à l'augmentation de la température moyenne entre 1972 et 2023, avec des fluctuations interannuelles. Cette évolution suggère un réchauffement climatique progressif au cours des dernières décennies.

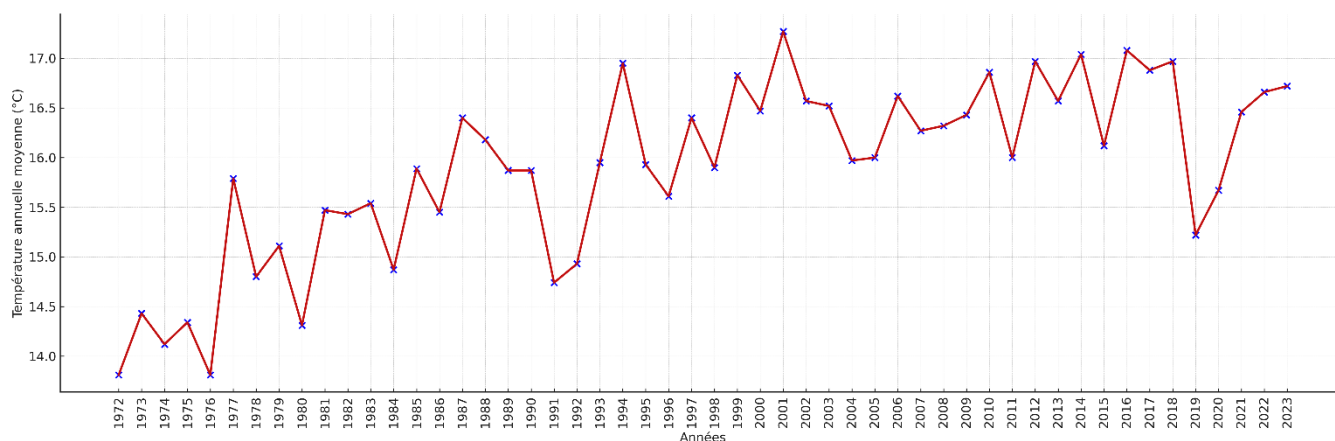


Figure 28: Analyse de la variabilité interannuelle des températures (1972-2023) (Ramdani, 2025).

10 Les précipitations

Pour analyser le régime pluviométrique de la région, les données issues des stations de la plaine d'El Malabiod et de Safsaf ont été exploitées. Ces stations, situées stratégiquement au sein du bassin versant, permettent de suivre la répartition spatio-temporelle des précipitations et d'évaluer leur influence sur la dynamique hydrologique locale. Leurs principales caractéristiques sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 2: Données des stations pluviométriques utilisées pour l'analyse du régime pluviométrique.

Stations	Code de la station	Coordonnées		Altitude (m)
		X	Y	
El Malabiod	062802	997.62	225.15	1020
Safsaf	062808	1003.15	198.1	375

10.1 Précipitations interannuelles

Le graphique ci-après montre une forte variabilité interannuelle des précipitations à El Malabiod entre 2000 et 2023, avec des années humides comme 2011 (480,3 mm) et 2019, et des années plus sèches comme 2021 (126 mm) et 2018 (220 mm). La moyenne sur cette période est d'environ 346,9 mm, mais plusieurs années récentes affichent des valeurs inférieures, suggérant une possible diminution des précipitations. Cette tendance pourrait impacter la recharge des aquifères et la gestion des ressources en eau dans la région.

HYDRO-CLIMATOLOGIE

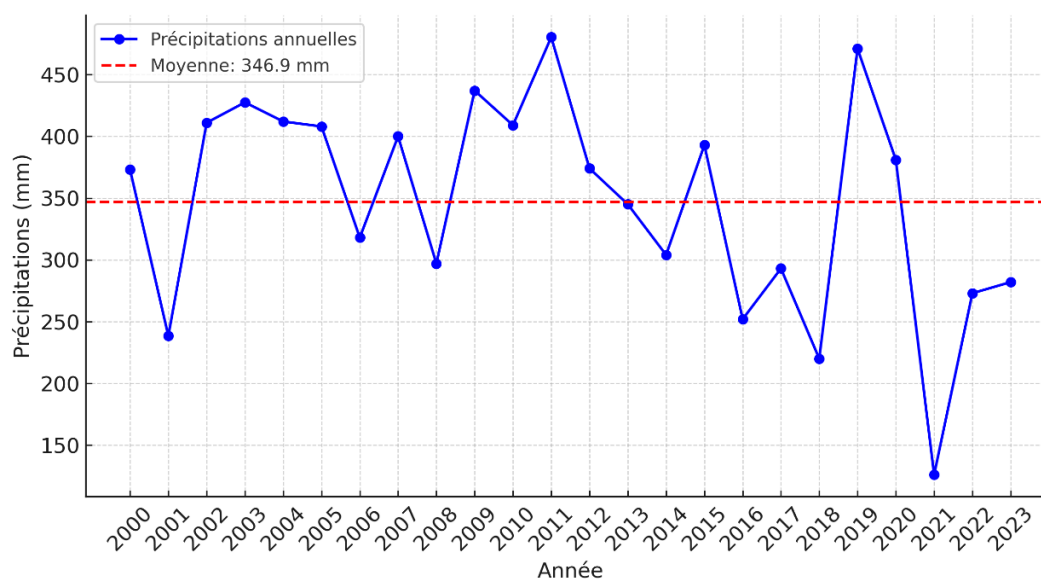


Figure 29: Evolution des précipitations interannuelles à la station d'El Malabiod (2000-2023) (Ramdani, 2025).

Le graphique illustre la variabilité interannuelle des précipitations enregistrées à la station de Safsaf entre 1998 et 2014. Pour la station de Safsaf, les données de précipitations s'arrêtent en 2014, aucune donnée ultérieure n'ayant été reçue d'aucun service. L'analyse des données met en évidence des fluctuations importantes, avec des années relativement humides, telles que 2009/2010 (242,2 mm) et 2006/2007 (222,72 mm), ainsi que des années plus arides, notamment 2000/2001 (39,1 mm) et 2012/2013 (39,1 mm).

La moyenne des précipitations sur cette période est estimée à 162,9 mm, mais plusieurs années enregistrent des valeurs nettement inférieures, suggérant une irrégularité marquée du régime pluviométrique.

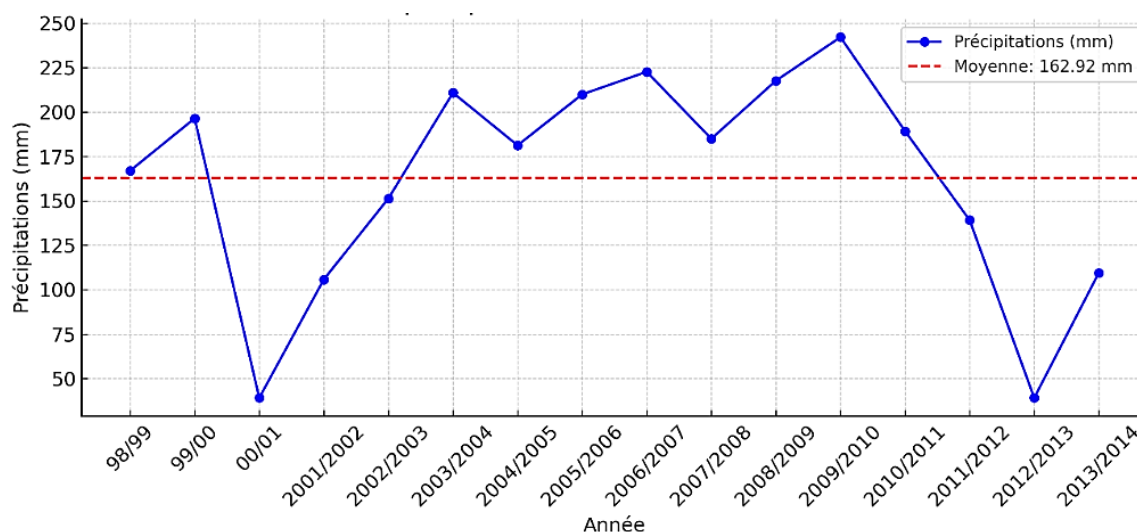


Figure 30: Variabilité interannuelle des précipitations à la station de Safsaf (1998-2014) (Ramdani, 2025).

10.2 Précipitations mensuelles

La figure montre une variation saisonnière marquée des précipitations à la station de Safsaf. Les mois les plus pluvieux sont septembre (30,38 mm), avril (21,45 mm) et mai (21,13 mm), indiquant une saison humide entre l'automne et le printemps. À l'inverse, l'été est caractérisé par une forte sécheresse, avec un minimum en juillet (6,4 mm).

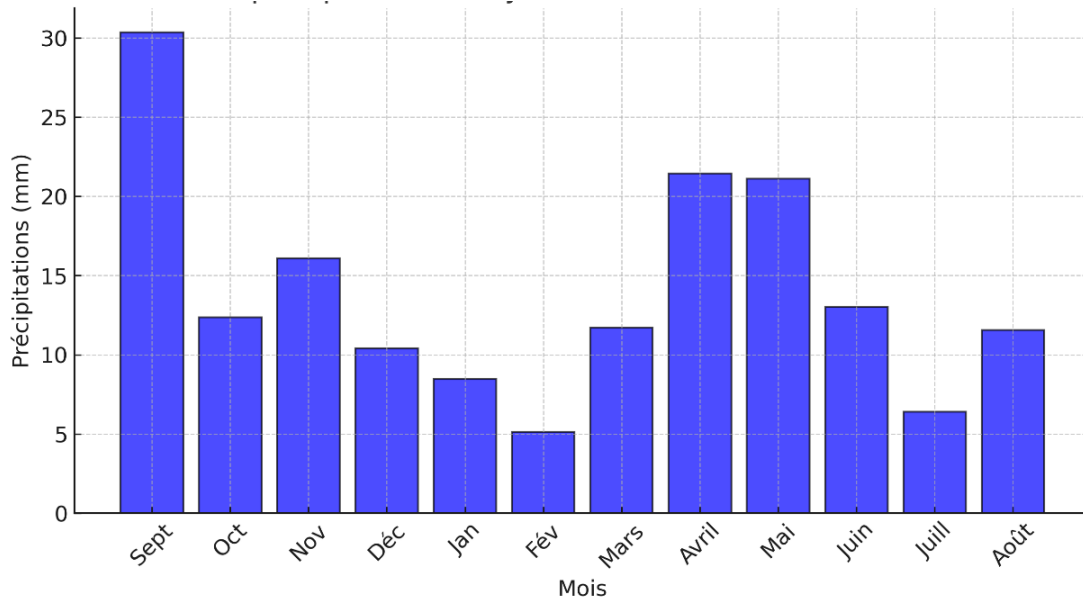


Figure 31: Répartition des précipitations moyennes mensuelles à la station de Safsaf (1998-2014) (Ramdani, 2025).

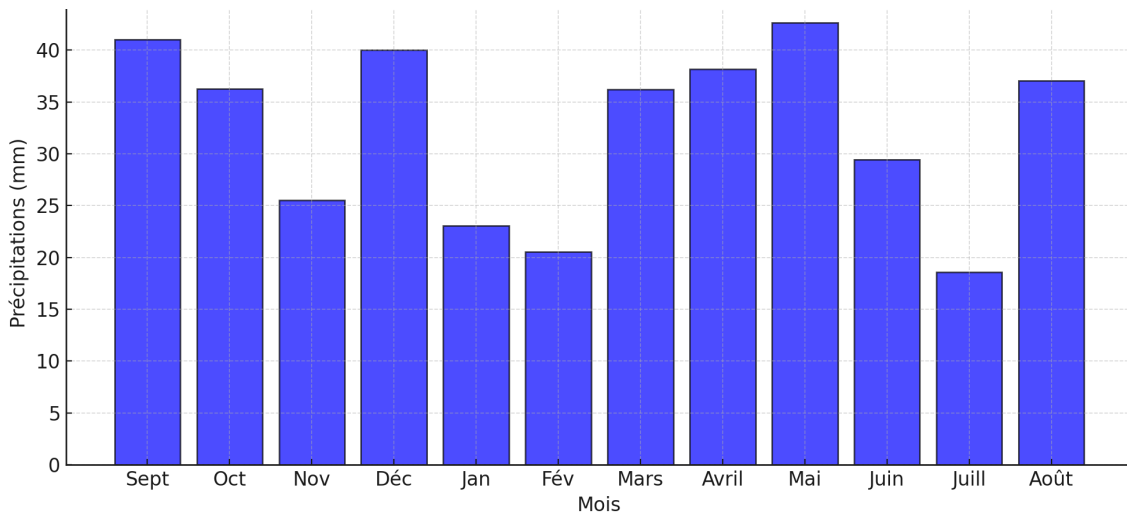


Figure 32: Variation des précipitations moyennes mensuelles à la station d'El Malabiod (2000-2023) (Ramdani, 2025).

La figure 35 met en évidence une répartition saisonnière distincte des précipitations à la station d'El Malabiod. Les cumuls mensuels les plus élevés sont observés en mai (42,67 mm), septembre (41.02 mm) et décembre (40.01 mm), traduisant une période humide qui s'étale généralement de l'automne jusqu'au printemps. En revanche, les mois d'été présentent une forte diminution des apports pluviométriques, avec un creux notable en juillet (18.6 mm).

11 La neige

Les chutes de neige, particulièrement sur le versant nord des reliefs, y compris au Djebel Doukkane, peuvent être abondantes. Cependant, l'absence de relevés récents et systématiques rend difficile une évaluation précise. Selon SELTZER, cette région connaît un enneigement moyen au sol estimé entre 5 et 10 jours par an (Rouabhia, 2006). Certaines données partielles indiquent qu'en 1983/84, un total de 7 jours de précipitations neigeuses a été enregistré, représentant environ 60 mm de précipitations. De plus, au début du mois de février 2001, la neige a recouvert l'ensemble des bordures nord de la plaine. Ce phénomène joue un rôle fondamental dans l'alimentation en eau de la région. En effet, la fonte progressive de la neige, favorisée par la présence de reliefs environnants, permet une infiltration lente et efficace, optimisant ainsi la recharge des ressources souterraines.



Figure 33: Occurrence de la neige sur la plaine d'El Malabiod (Rouabhia, 2006).

12 Graphique ombrothermique selon Gaussen

Le graphique ombrothermique de Gaussen représente l'évolution des précipitations et des températures mensuelles afin d'identifier les périodes sèches et humides. Une période est dite sèche lorsque les précipitations (P) sont inférieures au double de la température moyenne (T), soit $P < 2T$. Dans ce graphe, l'hiver et le début du printemps correspondent à une période humide, tandis que l'été est marqué par une forte sécheresse avec des précipitations faibles et des températures élevées. Cette analyse permet de mieux comprendre le climat local et d'anticiper la gestion des ressources en eau.

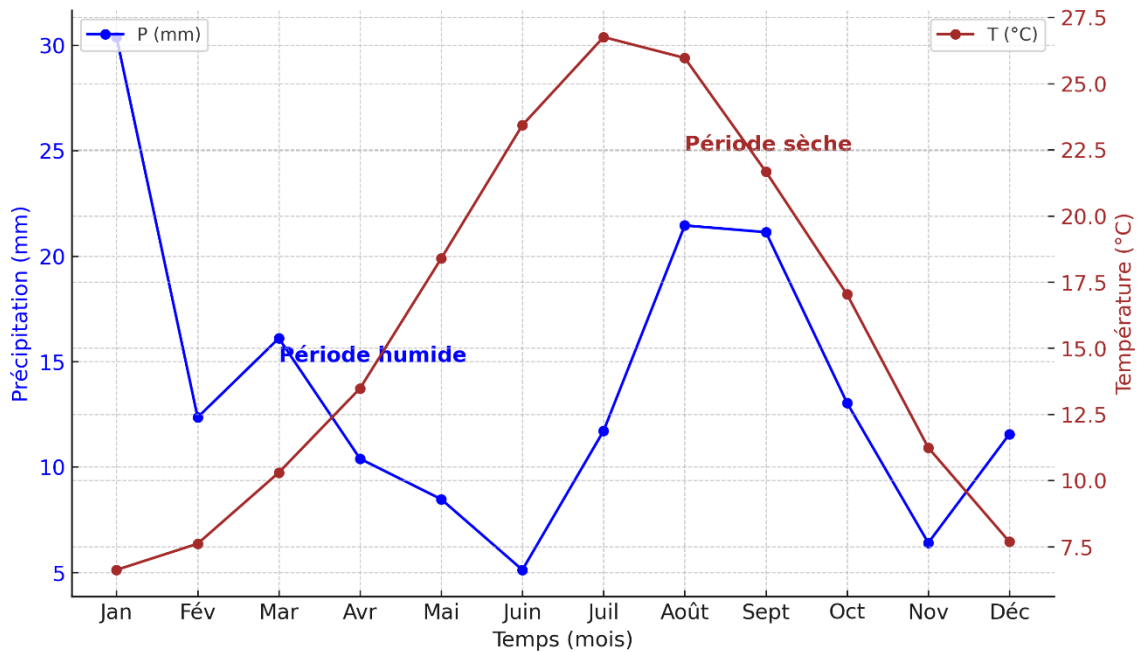


Figure 34: Graphique ombrothermique pour la région d'étude (Ramdani, 2025).

13 Les Vents

Les données du tableau montrent que la vitesse du vent à la station de Tébessa varie au cours de l'année, avec des tendances saisonnières marquées. Les vents sont généralement plus forts en hiver, atteignant une vitesse moyenne de 3,27 m/s en janvier, et restent relativement élevés jusqu'en mai, période où la vitesse du vent oscille autour de 3 m/s. Cela peut être attribué à l'influence des vents dominants secs et froids venant de l'ouest-nord-ouest (WN-NW), qui jouent un rôle important dans les précipitations hivernales. En été, la vitesse du vent diminue, avec des valeurs autour de 2,6 à 2,7 m/s, ce qui coïncide avec la présence des vents chauds et desséchants du sud, comme le sirocco. Ces vents favorisent une augmentation de l'évapotranspiration et contribuent à des conditions plus sèches. Enfin, la moyenne annuelle de

la vitesse du vent est de 3,01 m/s, reflétant une brise modérée mais avec des fluctuations saisonnières liées à la dynamique des vents régionaux.

Tableau 3: Vitesse moyenne du vent enregistrée à la station de Tébessa entre 2000 et 2020.

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moyenne
Vitesse de vent (m/s)	3.27	3.42	3.35	3.2	3	2.62	2.67	2.61	2.7	2.8	3.2	3.33	3.01

14 Humidité relative de l'air

L'humidité relative de l'air, indicateur du taux de saturation en vapeur d'eau, fluctue au cours de l'année sous l'effet des conditions climatiques. À Tébessa, la moyenne annuelle s'établit à 64.87 %, avec un pic en décembre et janvier (82,21 % et 80,95 %), favorisé par des températures basses et des précipitations hivernales abondantes. À partir du printemps, elle décroît progressivement sous l'effet de la montée des températures et de la diminution des précipitations, atteignant 58,97 % en mai. En été, elle chute à son niveau le plus bas en juillet (42,83 %), une période marquée par une forte évaporation et une rareté de l'humidité dans l'air. Avec l'automne, l'humidité augmente graduellement grâce au retour des pluies et à la baisse des températures, atteignant 76,02 % en novembre. Cette évolution saisonnière reflète le climat semi-aride de la région d'étude, où l'alternance entre précipitations et évaporation joue un rôle déterminant dans les variations de l'humidité atmosphérique.

Tableau 4: Humidité relative de l'air à la station de Tébessa entre 1998 et 2021.

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moyenne
Humidité relative (%)	80.95	76.34	70.83	65.78	58.97	50.68	42.83	45.81	60.83	67.18	76.02	82.31	64.87

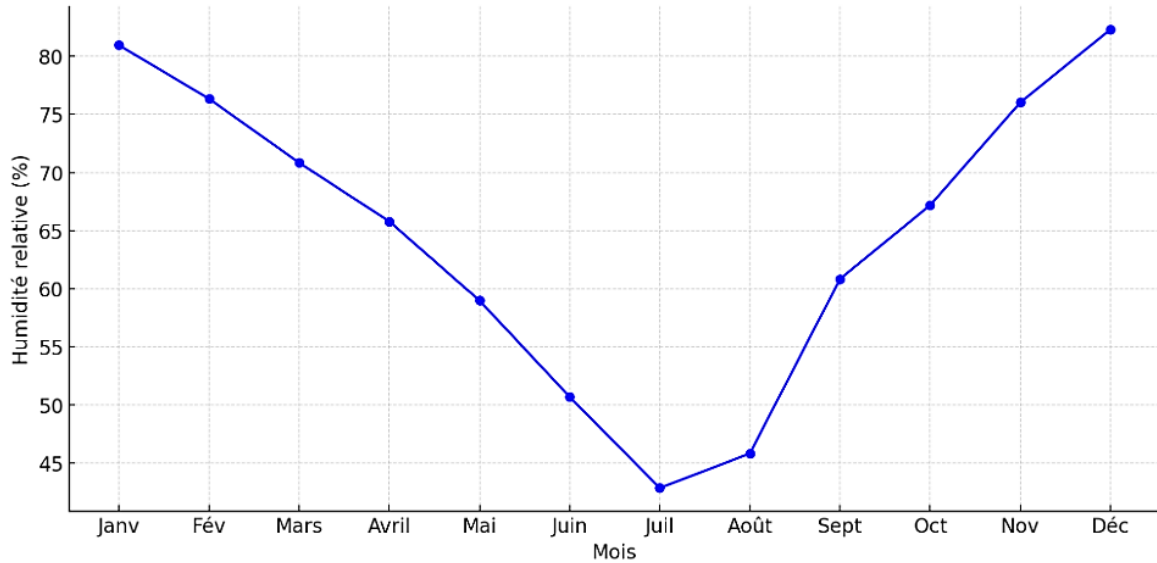


Figure 35: Variation mensuelle de l'humidité relative de l'air à la station de Tébessa (1998-2021) (Ramdani, 2025).

15 Type de climat

15.1 Calcul de l'indice d'aridité de DE MARTONE (1923)

L'indice d'aridité de De Martonne représente un instrument méthodologique rigoureux pour la caractérisation des régimes climatiques dominants. Son calcul repose sur l'intégration de deux paramètres climatologiques fondamentaux : les cumuls pluviométriques annuels moyens et les valeurs thermiques moyennes annuelles. Il est défini analytiquement par la relation :

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

Avec :

I : indice d'aridité

P : précipitations moyennes annuelles (en mm)

T : température moyenne annuelle (en °C)

Dans le bassin versant de Safsaf, l'analyse des paramètres climatiques révèle :

- Une pluviométrie annuelle moyenne de 346,9 mm à la station d'El Malabiod
- Un cumul pluviométrique de 162,92 mm à la station de Safsaf
- Une température moyenne annuelle de 15,9475 °C pour l'ensemble du bassin

L'application de l'indice d'aridité de De Martonne ($I = P/(T+10)$) donne une valeur de 19,65, ce qui permet de classer le climat local dans la catégorie semi-aride selon la typologie climatique établie.

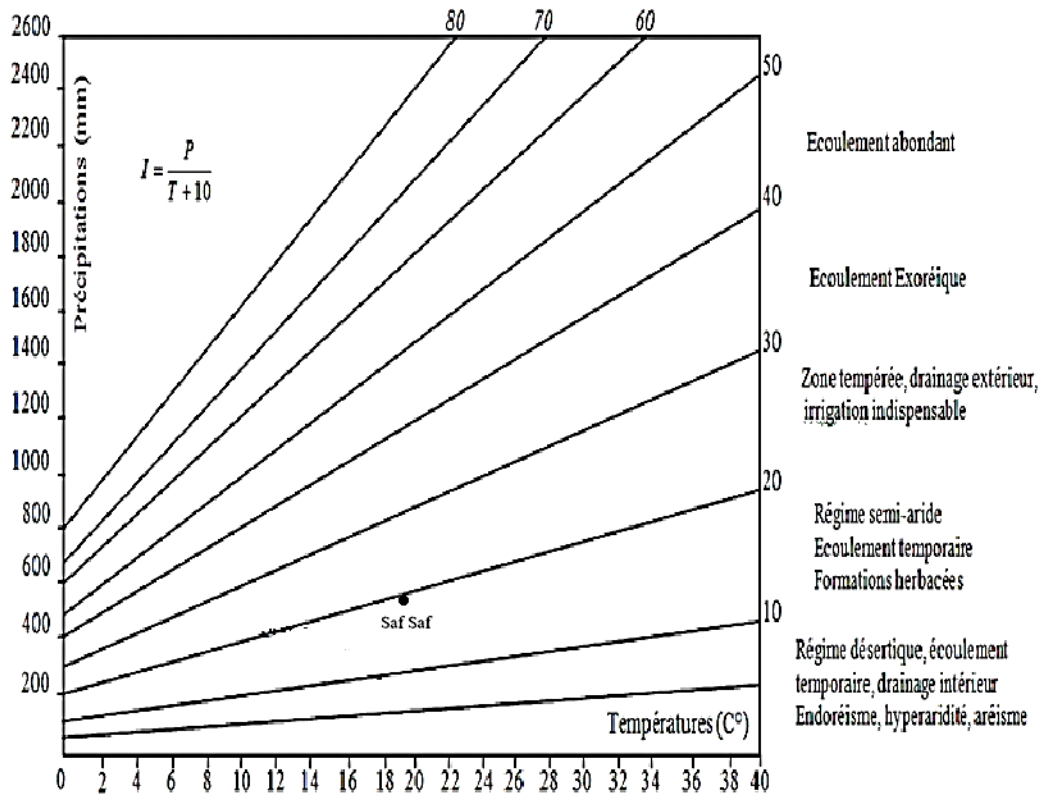


Figure 36: Abaque de classification climatique selon l'indice d'aridité annuel de De Martonne (1923) (Ramdani, 2025).

16 Evaluation du bilan hydrique

Le bilan hydrique représente le suivi quantitatif des flux hydrologiques, depuis l'infiltration des précipitations (liquides ou solides) jusqu'à leur retour dans l'atmosphère via l'évapotranspiration. L'analyse du bilan hydrique du bassin versant de safsaf vise à quantifier les entrées (apports pluviométriques et écoulements de surface) et à évaluer les sorties (évapotranspiration, ruissellement et infiltration profonde).

L'équation fondamentale du bilan hydrique s'exprime comme suit :

$$P = R + ETR + I$$

Où :

P : représente les précipitations totales (mm)

R : désigne le ruissellement superficiel (mm)

ETR : correspond à l'évapotranspiration réelle (mm)

I indique : l'infiltration profonde (mm)

16.1 Analyse quantitative des paramètres du bilan hydrique

16.1.1 Evapotranspiration

L'évapotranspiration est un processus clé du bilan hydrique, qui intègre à la fois l'évaporation (phénomène physique de transfert de l'eau des surfaces libres vers l'atmosphère) et la transpiration (phénomène biologique de libération de la vapeur d'eau par les plantes). Ce mécanisme combine donc les aspects météorologiques et écologiques pour quantifier les pertes d'eau dans l'atmosphère. Dans les études hydrologiques, on distingue traditionnellement l'évapotranspiration potentielle (ETP), qui représente la demande atmosphérique maximale dans des conditions optimales d'approvisionnement en eau, et l'évapotranspiration réelle (ETR), qui correspond aux flux réels observés dans des conditions réelles de disponibilité de l'eau.

16.1.2 Estimation quantitative de l'évapotranspiration potentielle (ETP)

L'estimation de l'ETP peut s'effectuer soit par des mesures directes utilisant des dispositifs spécifiques comme les lysimètres, soit par le biais de modélisations s'appuyant sur des formules semi-empiriques telles que celles proposées par Turc, Coutagne ou Thornthwaite. Ces différentes approches permettent d'appréhender cette variable essentielle pour la compréhension des cycles hydrologiques à différentes échelles spatiales et temporelles.

- Modèle empirique de G.W. Thornthwaite pour l'ETP

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

Avec :

ETP : évapotranspiration potentielle (mm)

T : la température moyenne mensuelle durant le mois concerné (°C)

I : indice annuel, correspond à la somme des indices mensuels (i)

I se calcule par :

$$I = \sum_{m=1}^{12} i$$

Où

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

a : exposant climatique

$$a = \left(\frac{1,6 \times I}{100}\right) + 0,5$$

Ce coefficient ajuste la réponse de l'ETP aux variations thermiques.

Les valeurs d'ETP doivent être ajustées par un coefficient K fonction de l'altitude :

$$\text{ETP corrigée} = \text{ETP} \times K$$

Tableau 5: Valeurs de l'ETP calculées selon Thornthwaite.

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Jui	Aout	Total
T°C	21.67	17.03	11.24	7.68	6.62	7.61	10.3	13.48	18.39	23.43	26.76	25.97	15.84
i	9.21	6.39	3.41	1.91	1.53	1.9	2.99	4.49	7.18	10.36	12.68	12.11	74.1
I	74.1												
a	1.68												
K	1.03	0.97	0.86	0.81	0.87	0.85	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	
ETP mm	97.06	64.75	32.21	17	13.24	16.73	27.82	43.72	73.67	110.60	138.36	131.56	766.72
ETP _c mm	99.97	62.81	27.70	13.77	11.52	14.22	28.65	40.09	89.05	134.93	171.56	152.61	846.88

16.1.3 Calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR)

L'évapotranspiration potentielle (ETP) est la quantité maximale d'eau qui peut être perdue par un sol lorsque la réserve facilement utilisable (RFE) est suffisante ($RFU \geq ETP$). Dans des conditions de déficit hydrique ($RFU < ETP$), les pertes d'eau sont limitées à une valeur inférieure, définie comme l'évapotranspiration réelle (ETR) (Castany, 1967).

Ces paramètres sont estimés à l'aide de modèles climatiques, notamment les formules de Turc (1954) et Thornthwaite (1948), qui intègrent les principales variables météorologiques.

-Formule de Turc

$$ETR = \frac{p}{\sqrt{0,9 + \frac{p^2}{L^2}}}$$

Où

ETR : évapotranspiration réelle (mm)

P : moyenne annuelle des hauteurs de précipitations

$$L = 300 + 25T + 0.005T^3$$

T : moyenne thermique annuelle (°C)

Calcul appliqué :

$$P = 509.82\text{mm}, L = 718.75, T = 15.94^\circ\text{C}$$

$$ETR = 430.40 \text{ mm}$$

-Formulation de l'évapotranspiration selon Thornthwaite (1948)

Le modèle de Thornthwaite distingue deux régimes hydrologiques principaux :

1. Cas de surplus hydrique :

Lorsque les précipitations (P) excèdent l'évapotranspiration potentielle (ETP) :

$$P \geq ETP \Rightarrow ETR = ETP$$

L'évapotranspiration réelle atteint alors son maximum théorique.

2. Cas de déficit hydrique :

Lorsque $P < ETP$, deux sous-cas se présentent :

- **Sous-cas 1** : La réserve hydrique (RFU) comble le déficit

$$P + RFU \geq ETP \Rightarrow ETR = ETP$$

- **Sous-cas 2** : Insuffisance cumulative des apports

$$P + RFU < ETP \Rightarrow ETR = P + RFU$$

L'évapotranspiration réelle est alors limitée par la disponibilité totale en eau.

16.1.4 Quantification du ruissellement (R)

Le terme « ruissellement » désigne les précipitations qui s'écoulent en surface vers le sol, les rivières, les lacs ou les nappes phréatiques sans pénétrer complètement dans le sol ni s'évaporer. Ce phénomène joue un rôle essentiel dans le cycle hydrologique et dans l'enrichissement des ressources en eau des cours d'eau. Il dépend de nombreux facteurs tels que le type de sol, la végétation, la pente et, bien sûr, les conditions climatiques telles que les précipitations, l'évaporation et la transpiration.

Dans ce contexte, le modèle développé par Tixeront et Berkallof permet d'estimer le ruissellement annuel (R) en fonction des paramètres climatiques à l'aide d'une relation mathématique spécifique.

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

Variables :

R : ruissellement en mm

P : précipitations moyenne annuelles en mm

ETP : évapotranspiration potentielle annuelle en mm

Application numérique :

$$R = \frac{(509.82)^3}{3(846.88)^2}$$

Ce qui donne : R= 61.55mm

16.1.5 Calcul de l'infiltration

L'évaluation des volumes infiltrés repose sur une approche bilantaire des composantes hydrologiques, exprimée par la relation fondamentale :

$$I = P_{\text{moy}} - ETR_{\text{moy}} - R_{\text{moy}}$$

Où :

I représente le flux d'infiltration moyen

P_{moy} désigne la hauteur pluviométrique moyenne

ETR_{moy} correspond à l'évapotranspiration réelle moyenne

R_{moy} indique le ruissellement moyen

La méthodologie dérivée des travaux de Thornthwaite introduit le concept de surplus d'eau (EX), qui intègre les flux de ruissellement et d'infiltration :

$$EX=R+I$$

Cette relation permet d'exprimer le flux d'infiltration comme suit :

$$I=EX-R$$

En appliquant les données du bassin versant :

$$I = 509.82 - (430.40 + 61.55) \Rightarrow I = 17.87 \text{ mm}$$

16.1.6 Quantification de la réserve facilement utilisable (RFU)

La « réserve facilement utilisable » correspond à la capacité de rétention d'eau du sol, dont le degré de saturation dépend d'une série de paramètres pédologiques et climatiques :

- Caractéristiques du sol :

- Nature et lithologie de la couche superficielle
- Epaisseur de la zone racinaire active

- Paramètres hydrogéologiques :

- Profondeur de la nappe phréatique
- Dynamique du transport vertical

- Facteurs environnementaux :

- Type et densité de la couverture végétale
- Climat régional

Les études existantes montrent des estimations très différentes de la réserve facilement utilisable (RFU) dans la région. Selon Richard (1979), les réserves disponibles se situent dans une fourchette limitée de 25 à 26 mm. En revanche, les recherches menées par le Cabinet Le Petit (1966-1967) ont donné une fourchette plus large de valeurs comprises entre 23 et 35 mm.

Conformément à la formule de Hailler :

$$RFU = \frac{1}{3} (Da \times He \times p)$$

Validation contextuelle :

- La lithologie locale (formations néogènes argilo-sableuses)
- Le climat semi-aride (ETP $\approx$ 850 mm)
- Les cultures dominantes (céréales et arboriculture)

La RFU théorique du bassin de Safsaf s'établit à 26 mm.

17 Evaluation du bilan hydrologique

Tableau 6: Application de la méthode Thornthwaite au bilan hydrologique de la station d'El Malabiod (2000-2023).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Total
T°C	21.67	17.03	11.24	7.68	6.62	7.61	10.3	13.48	18.39	23.43	26.76	25.97	15.84
ETP _c (mm)	99.97	62.81	27.70	13.77	11.52	14.22	28.65	40.09	89.05	134.93	171.56	152.61	846.88
P (mm)	41.02	36.26	25.53	40.01	23.08	20.54	36.21	38.17	42.67	29.43	18.6	37.08	388.6
P- ETP (mm)	-58.95	-26.55	-2.17	26.24	11.56	6.32	7.56	-1.92	-46.38	-105.5	-152.96	-115.53	.
RFU (mm)	0	0	0	26	26	26	26	24.08	0	0	0	0	.
ETR (mm)	41.02	36.26	25.53	13.77	11.52	14.22	28.65	38.17	42.67	29.43	18.6	37.08	336.92
DA (mm)	58.95	26.55	2.17	0	0	0	0	1.92	46.38	105.5	152.96	115.53	509.96
EX (mm)	0	0	0	26.24	11.56	6.32	7.56	0	0	0	0	0	51.68

$$P = \Sigma ETR + \Sigma Ex = 336.92 + 51.68 = 388.6 \text{ mm ; Vérifié}$$

$$ETP = \Sigma ETR + \Sigma DA = 336.92 + 509.96 = 846.88 \text{ ; Vérifié}$$

Deux bilans hydrologiques supplémentaires seront également établis, dont l'un pour l'année la plus humide :

Tableau 7: Bilan hydrologique de la station d'El Malabiod selon la méthode de Thornthwaite (2009-2010).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Total
T°C	21	15.7	12.4	10.7	11	6.4	9.7	11.5	19	24.2	28.7	26.8	15.84
ETP _c (mm)	92.89	52.73	31.01	22.60	25.47	9.69	24.22	34.79	91.68	140.82	192.58	159.92	878.4
P (mm)	97	2	2	6	77	12	27	112	66	0	23	13	437
P- ETP (mm)	4.11	-50.73	-29.01	-16.60	51.53	2.31	2.78	77.21	-25.68	-80	-140.82	-146.92	.
RFU (mm)	26	0	0	0	26	26	26	26	0.32	0	0	0	.
ETR (mm)	92.89	28	2	6	25.47	9.69	24.22	34.79	91.68	0.32	23	13	351.06
DA (mm)	0	24.73	29.01	16.60	0	0	0	0	0	140.50	169.58	146.92	527.34
EX (mm)	4.11	0	0	0	25.53	2.31	2.78	77.21	0	0	0	0	111.94

HYDRO-CLIMATOLOGIE

$$P = \Sigma ETR + \Sigma Ex = 351.06 + 111.94 = 437 \text{ mm ; Vérifié}$$

La première formule présente un écart de 26 mm, avec une somme des précipitations (P) de 437 mm, alors que $\Sigma ETR + \Sigma EX$ atteint 463 mm. Cet écart s'explique par la réserve utile initiale du sol (RFU) fixée à 26 mm, qui a été mobilisée au cours des mois déficitaires sans être comptabilisée dans les précipitations. Il s'agit d'un phénomène attendu dans le cadre de cette méthode, qui suppose une capacité maximale de stockage en eau du sol en début de période. Ainsi, bien que la première équation ne soit pas rigoureusement vérifiée sur le plan comptable, le bilan hydrique peut être considéré comme équilibré en intégrant cette réserve initiale.

$$ETP = \Sigma ETR + \Sigma DA = 351.06 + 527.34 = 878.4 \text{ ; Vérifié}$$

Remarque : Étant donné que les deux stations (El Malabiod et Safsaf) se situent dans le même bassin versant et que l'année hydrologique 2009–2010 correspond à l'année la plus humide pour les deux stations, il a été jugé pertinent de ne calculer le bilan hydrique que pour une seule station représentative. Cette approche permet d'éviter une redondance dans l'analyse tout en assurant une représentativité adéquate à l'échelle du bassin.

Le bilan hydrologique de l'année la plus sèche sera désormais établi.

Tableau 8: Application de la méthode de Thornthwaite au bilan hydrologique de la station d'El Malabiod (2021-2022).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Total
T°C	24.8	15.9	11.5	7.8	8.7	10.6	9.9	15.4	21.3	27.8	29.8	29.1	17.71
ETP _c (mm)	118.15	47.81	26.63	12.73	15.67	22.81	20.03	46.39	85.91	142.51	162.62	155.44	856.69
P (mm)	2	43	5	10	4	12	15	22	20	5	1	49	188
P- ETP (mm)	-116.15	-4.81	-21.63	-2.73	-11.67	-10.81	-5.03	-24.39	-65.91	-137.51	-161.62	-106.44	.
RFU (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.
ETR (mm)	2	43	5	10	4	12	15	22	20	5	1	49	188
DA (mm)	116.15	4.81	21.63	2.73	11.67	10.81	5.03	24.39	65.91	137.51	161.62	106.44	668.7
EX (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

$$P = \Sigma ETR + \Sigma Ex = 188 + 0 = 188 \text{ mm ; Vérifié}$$

$$ETP = \Sigma ETR + \Sigma DA = 188 + 668.7 = 856.69 \text{ ; Vérifié}$$

HYDRO-CLIMATOLOGIE

La réserve facilement utilisable (RFU) est restée nulle tout au long de l'année, car les précipitations mensuelles n'ont jamais été suffisantes pour recharger le sol au-delà des besoins en évapotranspiration, empêchant ainsi toute restitution à la réserve. En conséquence, l'excès d'eau (EX) est inexistant sur toute la période étudiée. Par ailleurs, le déficit hydrique (DA) s'est révélé particulièrement marqué durant la période estivale, notamment de juin à août, en raison de la forte évapotranspiration couplée à des précipitations très faibles.

Tableau 9: Estimation du bilan hydrologique à Safsaf (1998-2014) à l'aide de la méthode de Thornthwaite.

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Total
T°C	21.67	17.03	11.24	7.68	6.62	7.61	10.3	13.48	18.39	23.43	26.76	25.97	15.84
ETP _C (mm)	99.97	62.81	27.70	13.77	11.52	14.22	28.65	40.09	89.05	134.93	171.56	152.61	846.88
P (mm)	30.38	12.35	16.1	10.39	8.47	5.12	11.71	21.45	21.13	13.03	6.4	11.56	168.09
P- ETP (mm)	-69.59	-50.46	-11.60	-3.38	-3.05	-9.10	-16.94	-18.64	-67.92	-121.90	-165.16	-141.05	.
RFU (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.
ETR (mm)	56.38	12.35	16.10	10.39	8.47	5.12	11.71	21.45	21.13	13.03	6.4	11.56	194.09
DA (mm)	43.59	50.46	11.60	3.381	3.05	9.10	16.91	18.64	67.92	121.90	165.16	141.05	652.79
EX (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

$$P = \sum ETR + \sum Ex = (194.09-26) + 0 = 168.09 \text{ mm ; Vérifié}$$

$$ETP = \sum ETR + \sum DA = 194.09 + 652.79 = 846.88 \text{ ; Vérifié}$$

Tableau 10: Analyse hydrologique de l'année la plus sèche (2012–2013) à Safsaf selon la méthode de Thornthwaite.

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Total
T°C	22.4	19.3	14.2	8.8	5.9	4.1	10.5	14.4	19.3	27.1	28.8	28.8	16.97
ETP _C (mm)	100.04	71.73	36.27	14.23	7.35	3.69	25.00	47.59	89.48	167.91	190.76	178.45	932.5
P (mm)	22.2	6	5.7	00	5	00	7.8	19.5	0	0	0.7	27	93.9
P- ETP (mm)	-77.84	-65.73	-30.57	-14.23	-2.35	-3.69	-17.20	-28.09	-89.48	-167.91	-190.06	-151.45	.
RFU (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.
ETR (mm)	48.20	6	5.70	0	5	0	7.80	19.50	0	0	0.70	27	119.9
DA (mm)	51.84	65.73	30.57	14.23	2.35	3.69	17.20	28.09	89.48	167.91	190.06	151.45	812.6

EX (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-------------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

$$P = \sum ETR + \sum Ex = (119.9-26) + 0 = 93.9 \text{ mm ; Vérifié}$$

$$ETP = \sum ETR + \sum DA = 119.9 + 812.6 = 932.5 ; \text{Vérifié}$$

Conclusion

L'étude du climat et du bilan hydrique du bassin versant d'El Malabiod et de Safsaf révèle un régime semi-aride prononcé, marqué par une forte variabilité spatio-temporelle. La région se caractérise par des étés chauds et secs, avec des vents desséchants type sirocco et une humidité relative minimale (~43 %), et des hivers modérément humides, où l'humidité dépasse 80 %. L'indice d'aridité de De Martonne ($I = 19,65$) confirme cette classification.

Les précipitations, irrégulières et en baisse tendancielle, présentent une moyenne annuelle de 346,9 mm à El Malabiod et 162,9 mm à Safsaf, avec une saison humide d'automne à printemps et une sécheresse estivale sévère. La fonte nivale printanière contribue partiellement à la recharge des aquifères, bien que son rôle reste mal quantifié.

L'analyse du bilan hydrique selon Thornthwaite met en lumière un déficit hydrique structurel. En année humide, un excédent temporaire (~112 mm) permet une recharge limitée des sols et des nappes. En année sèche, le déficit est marqué ($DA > 650 \text{ mm}$), et l'intégralité des pluies est consommée par l'évapotranspiration, sans excédent ni recharge.

Ainsi, la ressource en eau est fortement contrainte par le climat, avec une évapotranspiration qui excède durablement les apports pluviométriques. Cette vulnérabilité, accentuée par les prélèvements anthropiques, exige une gestion adaptative et durable, axée sur la recharge des nappes et une utilisation raisonnée de l'eau, particulièrement en période estivale.

18 Hydrologie

18.1 Introduction

L'hydrologie est la science qui étudie le cycle de l'eau, sa distribution et ses propriétés sur Terre. Ce chapitre a pour objectif de caractériser le bassin versant étudié à travers l'analyse de ses paramètres morphométriques et de sa courbe hypsométrique.

Dans un premier temps, nous déterminerons les caractéristiques physiques du bassin superficie, périmètre, indice de Gravelius qui influencent directement le régime des écoulements.

Parallèlement, l'étude de la pente moyenne et du réseau hydrographique nous éclairera sur la dynamique du transfert des eaux.

La courbe hypsométrique, qui représente la distribution altimétrique du bassin, fera l'objet de la seconde partie. Son analyse nous renseignera sur l'état d'équilibre du bassin et son stade d'érosion.

18.2 Caractérisation morphométrique du bassin versant

La détermination du périmètre et de la superficie d'un bassin versant, réalisée par mesures planimétriques sur cartes topographiques, est tributaire de l'échelle de travail et de la densité du réseau hydrographique. Appliquée au bassin versant de Safsaf, cette méthode a permis d'établir une superficie de 1197 km² et un périmètre de 195 km (Fig.40).

18.3 Calcul de l'indice de compacité de Gravelius (Kc)

La géométrie du bassin versant exerce une influence prépondérante sur la transformation pluie-débit. Son rôle est déterminant dans les processus de concentration et de transfert des écoulements, ce qui se traduit par des hydrogrammes aux caractéristiques morphologiques distinctes selon la forme du bassin.

L'indice de compacité de Gravelius (Kc) est défini par la relation suivante :

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

Où :

Kc : Indice de compacité du bassin versant (sans unité)

P : Périmètre du bassin versant (km)

A : Superficie du bassin versant (km²)

Détermination numérique :

$$Kc = 1.58$$

Avec un K_c de 1.58, le bassin a clairement une forme allongée, ce qui influence directement son comportement hydrologique.

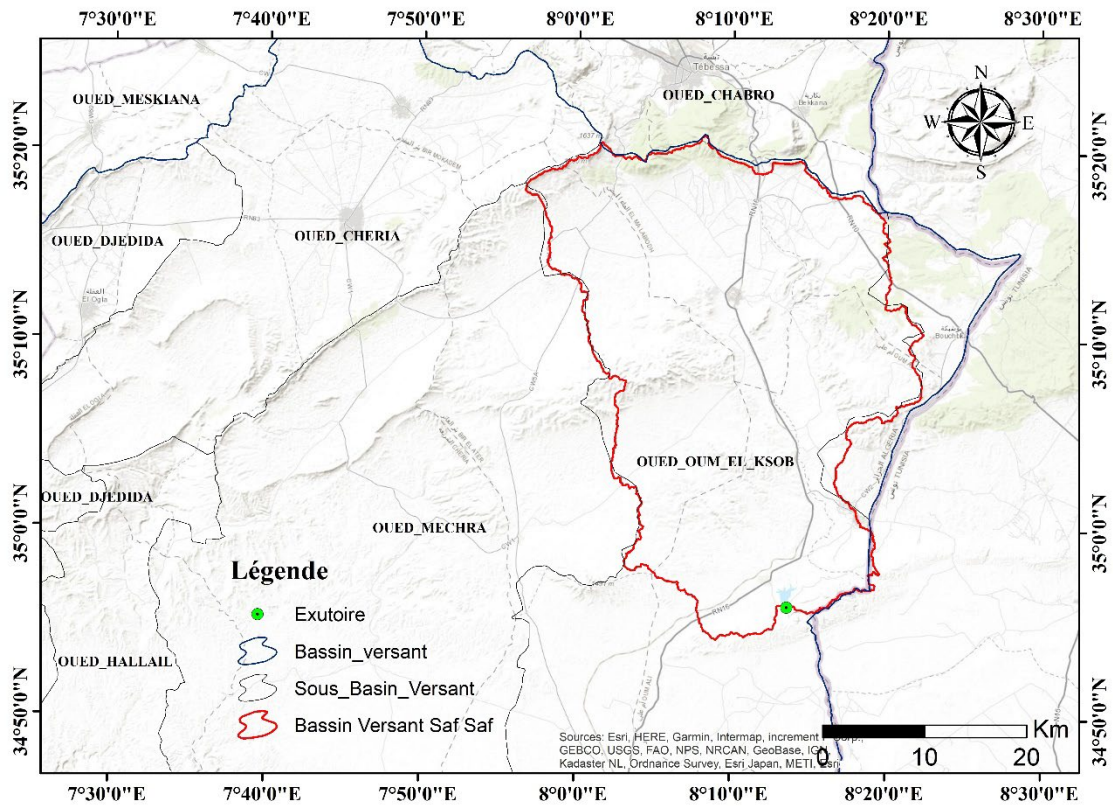


Figure 37: Délimitation spatiale de la zone d'étude (Ramdani, 2025).

18.4 Rectangle équivalent en hydrologie

Le concept du rectangle équivalent isole l'effet de la forme sur le débit en proposant une modélisation où tout bassin est représenté par un rectangle possédant des propriétés hydrologiques identiques (surface, indice de compacité, répartition altimétrique), permettant ainsi une comparaison objective de leur réponse hydrologique.

18.4.1 Formule de la longueur du rectangle équivalent

$$L = \frac{K_c \times \sqrt{A}}{1.12} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right)$$

$$L = 83.2 \text{ Km}$$

18.4.2 Formule de la largeur du rectangle équivalent

$$I = \frac{K_c \times \sqrt{A}}{1.12} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right)$$

$$l=14.4 \text{ Km}$$

Le rectangle équivalent de ce bassin versant a une longueur de 83,2 km et une largeur de 14,4 km, ce qui donne un rapport longueur/largeur d'environ 5,8. Ce rapport très élevé confirme la forme extrêmement allongée du bassin, cohérente avec l'indice de compacité $K_c = 1,58$.

18.5 Caractérisation morphométrique du réseau hydrographique

Le réseau hydrographique a été caractérisé par sa densité de drainage, son profil en long et sa structure de confluence. Son extraction, réalisée à partir du MNE, a été corrigée manuellement dans les zones planes à l'aide d'imagerie satellitaire. La classification selon la méthode de Strehler a permis une analyse hiérarchique structurée du réseau (Fig.41).

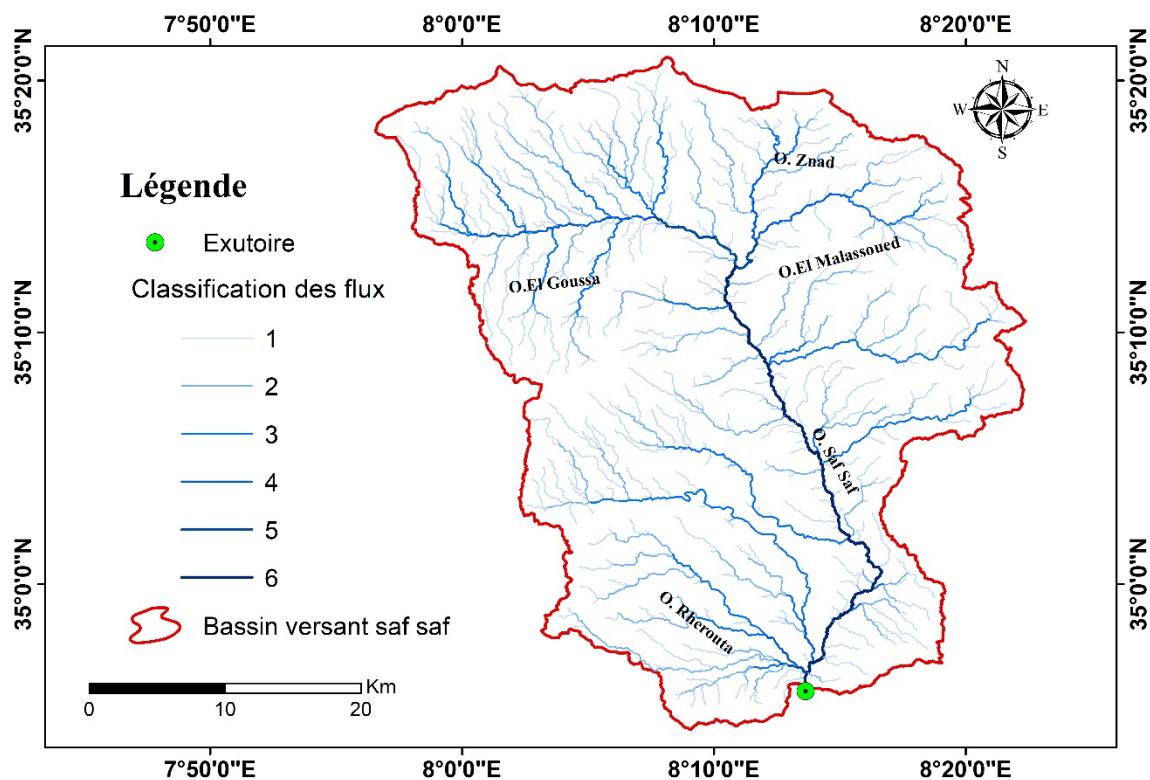


Figure 38: carte du réseau hydrographique du bassin versant de Safsaf (Ramdani, 2025).

18.6 Les indices de pente dans l'étude du bassin versant

Les indices de pente offrent une base quantitative pour comparer les bassins versants. La pente, facteur morphologique majeur, conditionne le ruissellement, l'infiltration et l'évaporation. Son

analyse permet de caractériser les classes de relief, la distribution des hauteurs et les gradients du bassin, éclairant ainsi son fonctionnement hydrologique global.

18.6.1 Pente moyenne (I_m)

La pente moyenne, paramètre représentatif de la topographie d'un bassin versant, conditionne directement les processus hydrologiques tels que le ruissellement et la vitesse d'écoulement. Elle est définie par la formule :

$$I_m = \frac{H_{max} - H_{min}}{L}$$

Avec :

H_{max} : altitude maximale (1711 m)

H_{min} : altitude minimale à l'exutoire (844 m)

L : longueur du rectangle équivalent (km)

$$I_m = 10.42 \text{ m/km}$$

Une pente moyenne de 10,42 m/km (soit 1,04%) indique un bassin versant à la topographie globalement douce.

18.6.2 Indice de pente global (I_g) du bassin versant

L'indice de pente globale permet de classer le relief selon le système de référence établi par l'ORSTOM (actuel IRD). Cet organisme a défini une échelle standardisée qui associe un type de relief à une fourchette de pentes. La valeur obtenue se calcule comme suit :

$$I_g = \frac{D}{L} = \frac{H_{5\%} - H_{95\%}}{L}$$

Avec :

$$H_{5\%} = 959 \text{ et } H_{95\%} = 1341$$

$$I_g = 4.59 \text{ m/km}$$

La classification établie par l'ORSTOM permet de catégoriser le type de relief à partir de la valeur de l'indice de pente globale (I_g) :

Tableau 11: Classification des reliefs selon l'indice de pente global (ORSTOM) (Zaoui, 2022).

Classe	Type du relief	Ig (m/Km)
R1	Très faible	<2 m/km
R2	Faible	2-5 m/km
R3	Assez faible	5-10 m/km
R4	Modéré	10-20 m/km
R5	Assez fort	20-50 m/km
R6	Fort	50-100 m/km
R7	Très fort	>100 m/km

L'indice de pente global (Ig 2-5 m/km) montre que le bassin versant se caractérise par un relief faible.

18.6.3 La dénivelée spécifique

La dénivelée spécifique est un indice morphométrique fondamental pour la caractérisation objective des reliefs d'un bassin versant. Elle quantifie l'énergie du relief en exprimant le dénivelé total par unité de surface, offrant ainsi une mesure comparative de la vigueur et de la maturité géomorphologique du bassin.

Son interprétation s'appuie sur le système de classification standardisé développé par l'ORSTOM (Office de la recherche scientifique et technique outre-mer), permettant de catégoriser les bassins selon des classes de relief normalisées : des plaines sub-horizontales aux régions montagneuses escarpées.

La dénivelée spécifique (Ds) se calcule à l'aide de la relation suivante :

$$Ds = Ig \times \sqrt{A}$$

Avec

Ig : indice de pente globale (m/km)

A : superficie du bassin versant (km²)

$$Ds = 158.80 \text{ m}$$

Selon la classification de l'ORSTOM et avec une dénivelée spécifique Ds = 158,80 m, le bassin versant présente un relief assez fort.

Cette valeur de $D_s = 158,80$ m semble indiquer un relief plus accentué que ne le laissait supposer l'indice de pente global ($I_g = 4,59$ m/km). Cela suggère la présence de versants localement pentus dans un bassin par ailleurs allongé, ce qui est tout à fait plausible.

18.6.4 Densité de drainage

La densité de drainage (D_d) est un paramètre morphométrique fondamental qui quantifie la longueur totale des cours d'eau par unité de surface dans un bassin versant. Elle exprime le degré de développement du réseau hydrographique. Donnée par la formule suivante :

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

Où :

$\sum L$ = Longueur cumulée de tous les cours d'eau (km)

A = Surface du bassin versant (km²)

Unité : km/km² ou km⁻¹

$$\text{Application numérique : } D_d = \frac{1232.745708}{1197} = \mathbf{1.03 \text{ km/km}^2}$$

Tableau 12: Echelle d'interprétation généralisée de la densité de drainage.

Densité de drainage	Interprétation	Comportement hydrologique
$D_d < 2 \text{ km/Km}^2$	Faible densité	Ruissellement lent, infiltration dominante
$2-4 \text{ km /Km}^2$	Densité modérée	Équilibre infiltration/ruissellement
$D_d > 4 \text{ Km/Km}^2$	Forte densité	Ruissellement rapide, réponse hydrologique rapide

Avec une densité de drainage de $1,03 \text{ km/km}^2$, le bassin présente un réseau hydrographique peu développé. Cette faible valeur reflète la prédominance de l'infiltration sur le ruissellement de surface, cohérente avec la faible pente moyenne et la nature perméable des sols.

18.7 Courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique est une représentation graphique qui montre la répartition des surfaces en fonction de l'altitude dans un bassin versant. Elle illustre le pourcentage cumulé de la surface du bassin situé au-dessus ou en dessous d'une altitude donnée.

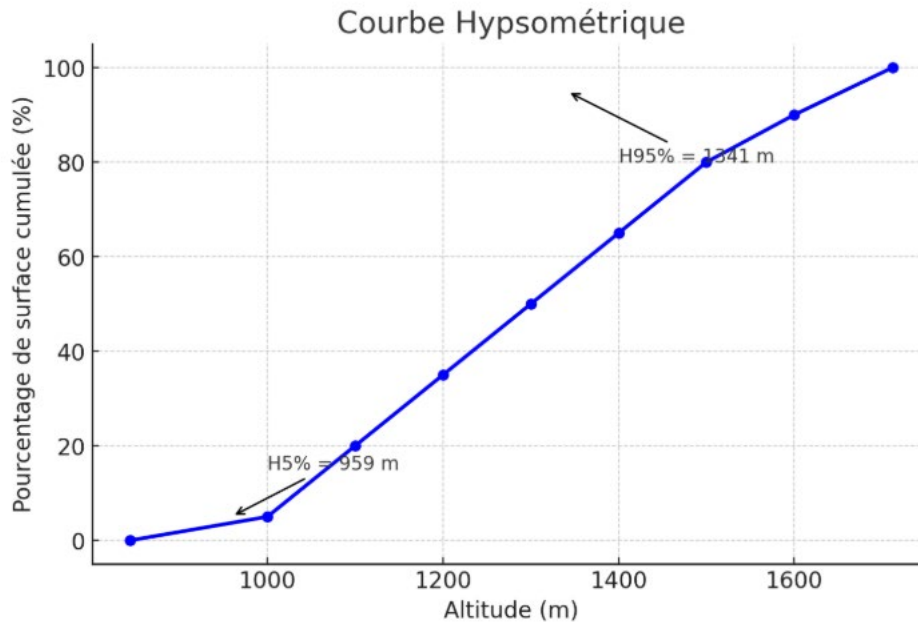


Figure 39: courbe hypsométrique du bassin versant de Safsaf (Ramdani, 2025).

La courbe hypsométrique obtenue présente une forme convexo-concave modérée, traduisant un bassin versant en stade d'évolution intermédiaire, caractérisé par un relief peu contrasté et des pentes généralement faibles. La répartition majoritaire des surfaces autour des altitudes moyennes (environ 1100–1300 m) indique une topographie relativement homogène, sans zones sommitales abruptes ni vallées profondément incisées, ce qui reflète une dynamique érosive limitée et des formes plutôt stabilisées. La dénivelée comprise entre H5% (959 m) et H95% (1341 m) montre une amplitude altitudinale modérée, cohérente avec un modelé adouci et des processus morphogéniques relativement équilibrés. Dans l'ensemble, la courbe confirme que le bassin versant appartient à la catégorie des reliefs faibles, en accord avec la faible valeur de l'indice de pente global.

Tableau 13: Proportion des surfaces élémentaires dans l'ensemble du bassin versant.

Tranche d'altitude (m)	Surface partielle (km²)	Surface partielle (%)	Surface accumulée (km²)	Surface accumulée (%)
844-900	0.12	0.01	0.12	100
900-950	1.44	0.12	1.56	99.99
950-1000	8.38	0.70	9.94	99.87
1000-1050	46.33	3.87	56.27	99.16
1050-1100	92.28	7.71	148.55	95.24
1100-1150	131.65	11.00	280.20	87.43
1150-1200	151.281	12.64	431.48	76.29
1200-1250	173.48	14.49	604.96	63.48
1250-1300	154.69	12.92	759.65	48.79
1300-1350	134.71	11.25	894.36	35.69
1350-1400	114.45	9.56	1008.81	24.29
1400-1450	88.19	7.37	1097	14.60
1450-1500	55.38	4.63	1152.38	7.13
1500-1550	28.47	2.38	1180.85	2.44
1550-1600	9.50	0.79	1190.35	0.64
1600-1650	4.69	0.39	1195.04	0.24
1650-1712	2.53	0.21	11971	0.00

18.8 Temps de concentration (Tc)

Le temps de concentration (Tc) représente la durée totale requise pour qu'une particule d'eau, tombée en un point hydrologiquement le plus éloigné du bassin versant, parcoure l'intégralité du réseau d'écoulement jusqu'à l'exutoire.

Il correspond ainsi au temps de réponse du bassin à une précipitation et constitue un paramètre fondamental pour l'étude des crues et de l'hydrologie de surface. Le temps de concentration peut être estimé à l'aide de la Formule de Giandotti :

$$Tc = \frac{(4\sqrt{A} + 1.5 \times L)}{0.8\sqrt{H_{moy}}}$$

Où :

Tc : Temps de concentration (heures)

A : Surface du bassin versant (km²)

L : Longueur du cours d'eau principal (km)

H_{moy} : Altitude moyenne du bassin versant (mètres)

$$T_c = \frac{(4\sqrt{1197} + 1.5 \times 48.4)}{0.8\sqrt{1012}} \approx 8.3h$$

L'application de la formule de Giandotti révèle un temps de concentration de 8.3 heures pour ce bassin de 1197 km². Cette valeur, bien que modérée pour une telle superficie, reflète l'influence combinée de la longueur du cours d'eau principal (48.4 km) et de l'altitude moyenne élevée (1012 m). Le bassin présente ainsi une capacité de réponse aux précipitations caractéristique des zones montagneuses, avec un transfert des écoulements relativement efficace vers l'exutoire.

18.9 Vitesse d'écoulement de l'eau dans le bassin versant

La vitesse d'écoulement de l'eau représente la célérité moyenne avec laquelle l'eau parcourt le réseau hydrographique depuis les points les plus éloignés jusqu'à l'exutoire. Elle est déterminée par le rapport entre la longueur du cours d'eau principal et le temps de concentration.

Formule :

$$V = \frac{L}{T_c}$$

Où :

V : Vitesse d'écoulement moyenne (m/s ou km/h)

L : Longueur du cours d'eau principal (m ou km)

T_c : Temps de concentration (s ou h)

$$V = \frac{48.4}{8.3} \approx 5.83 \text{ Km/h} \approx 1.62 \text{ m/s}$$

La vitesse moyenne d'écoulement de l'eau dans le bassin versant est estimée à 1.62 m/s (5.83 km/h). Cette valeur, relativement élevée, confirme la nature torrentielle des écoulements, caractéristique des bassins versants à forte pente et à réponse hydrologique rapide. Cette vitesse

influence directement la puissance d'érosion et le transport sédimentaire dans le réseau hydrographique.

18.10 Rapport d'allongement

Le coefficient d'allongement est un indicateur morphométrique qui caractérise la forme du bassin versant. Il exprime le rapport entre la largeur moyenne et la longueur maximale du bassin, permettant d'évaluer sa compacité et son aptitude à la concentration des écoulements.

$$K_a = \frac{L}{l} = \frac{L}{\frac{L}{A}} = \frac{L^2}{A}$$

Où :

K_a : Coefficient d'allongement (sans dimension)

L : Longueur maximale du bassin (km)

l : Largeur moyenne du bassin (km)

A : Surface du bassin versant (km²)

$$K_a = \frac{L}{l} = \frac{83.31}{14.4} \approx 5.78$$

Le bassin présente une forme très allongée ($K_a = 5.78$) avec un faible coefficient de compacité ($K_c = 1.58$), caractéristique qui tend à ralentir la concentration des écoulements vers l'exutoire.

Tableau 14: Synthèse des principaux paramètres du bassin versant de Safsaf.

Paramètre	Valeur	Unité
Superficie (A)	1197	Km ²
Périmètre (P)	195	Km
H max	1711	m
H moy	1012	m
H min	844	m
Longeur du rectangle équivalent (L)	83.2	Km
Largeur du rectangle équivalent (l)	14.4	Km
Longeur du thalweg principal L	48.4	Km

HYDRO-CLIMATOLOGIE

Dd	1.03	Km/km ²
Ig	4.591	m/km
Tc	8.3	h
Ka	5.78	/
V	1.62	m/s
Ds	58.80	M
Pente moyenne (Im)	10.42	m/km
kc	1.58	/

Conclusion

L'analyse morphométrique exhaustive du bassin versant de Safsaf a permis de caractériser précisément ses propriétés physiques et hydrologiques. Avec une superficie de 1197 km² et un périmètre de 195 km, ce bassin présente une forme allongée, comme en témoignent son rapport de forme ($K_c = 1,58$) et les dimensions du rectangle équivalent (Longueur = 83,2 km ; Largeur = 14,4 km).

La topographie du bassin, marquée par une altitude maximale de 1711 m et minimale de 844 m, avec une altitude moyenne de 1012 m, influence directement son comportement hydrologique. La pente moyenne ($I_m = 10,42$ m/km) et l'indice de pente globale ($I_g = 4,591$ m/km) reflètent un relief modéré à assez accusé, favorable à un écoulement relativement rapide.

Le temps de concentration ($T_c = 8,3$ h) et la vitesse d'écoulement ($V = 1,62$ m/s) sont des paramètres clés pour la modélisation des crues et la gestion des ressources en eau. Par ailleurs, la densité de drainage ($D_d = 1,03$ km/km²) indique un réseau hydrographique moyennement développé, tandis que le coefficient de compacité ($K_a = 5,78$) confirme la forme allongée du bassin, ayant des implications sur la concentration des écoulements.

En synthèse, ces paramètres calculés offrent une base solide pour la compréhension du fonctionnement hydrologique du bassin versant de Safsaf et serviront de fondement aux études ultérieures, notamment pour l'estimation des débits, l'évaluation des risques d'inondation et l'aménagement du territoire.

Matériels et méthodes

1 Présentation générale de la démarche méthodologique

Dans un contexte de pression accrue sur les ressources hydriques, particulièrement en zones semi-arides, une compréhension globale des processus hydrologiques, hydrogéologiques et géochimiques à l'échelle du bassin versant de Safsaf s'avère essentielle. Cette étude adopte une approche intégrative et multidisciplinaire combinant plusieurs méthodologies complémentaires : la modélisation hydrogéologique (MODFLOW) pour simuler le comportement de l'aquifère et évaluer les variations piézométriques sous différents scénarios de gestion, l'analyse de la subsidence par interférométrie radar (InSAR) afin de détecter et quantifier les déformations du sol liées à la surexploitation des nappes, la modélisation hydrogéochimique (PHREEQC) pour interpréter les interactions eau-roche et l'évolution chimique des eaux souterraines, la modélisation hydrologique des risques d'inondation à travers l'approche SIG-AHP et l'analyse morphométrique appliquée au bassin d'El Malabiod, ainsi que l'évaluation de la susceptibilité aux aléas naturels basée sur la télédétection dans le bassin versant de Safsaf, nord-est de l'Algérie. L'intégration de ces approches permettra d'améliorer la compréhension des dynamiques hydrologiques et géochimiques régionales, tout en contribuant à une gestion durable et raisonnée des ressources en eau.

La première phase de la méthodologie repose sur la modélisation hydrogéologique réalisée à l'aide du logiciel Visual MODFLOW Flex. À partir d'un modèle conceptuel intégrant les données géologiques, hydrodynamiques et piézométriques, cette modélisation permet de simuler les écoulements souterrains, d'analyser les bilans hydriques et d'évaluer l'impact des pressions naturelles et anthropiques sur les niveaux piézométriques. Cette étape est essentielle pour quantifier les ressources disponibles, comprendre leur dynamique spatio-temporelle et proposer des scénarios de gestion durable des aquifères.

La seconde phase concerne l'analyse de la subsidence par interférométrie radar (InSAR). Cette technique de télédétection avancée permet de mesurer avec une grande précision les déformations verticales du sol induites par la surexploitation des nappes souterraines ou par des phénomènes géotechniques. L'interprétation des images radar permet d'identifier les zones à risque de tassement et d'établir un lien entre la dynamique piézométrique et la stabilité du sol.

La troisième phase est dédiée à la modélisation hydrogéochimique à l'aide du logiciel PHREEQC, visant à caractériser les processus réactionnels qui influencent la qualité des eaux souterraines. Les simulations permettent d'analyser les équilibres minéraux, les réactions d'oxydoréduction, la spéciation chimique et les échanges ioniques, afin de distinguer les

influences naturelles des perturbations anthropiques sur la composition chimique des eaux et d'évaluer leur faisabilité chimique.

La quatrième phase concerne la modélisation hydrologique des risques d'inondation, réalisée à travers une analyse spatiale multicritère (SIG-AHP) et une analyse morphométrique appliquées au bassin versant d'El Malabiod. Cette approche permet de hiérarchiser les facteurs d'inondation tels que la pente, l'occupation du sol, la distance au réseau hydrographique ou la perméabilité, et d'établir une cartographie des zones les plus vulnérables. Les résultats constituent un outil d'aide à la décision pour la prévention et la gestion des risques hydrologiques.

Enfin, la cinquième phase porte sur l'évaluation de la susceptibilité aux aléas naturels basée sur la télédétection dans le bassin versant de Safsaf, au nord-est de l'Algérie. Cette étape permet d'intégrer les données issues de la télédétection et des analyses spatiales afin de déterminer les zones sensibles aux phénomènes naturels, notamment les mouvements de terrain, l'érosion ou les inondations.

L'articulation de ces cinq composantes méthodologiques permet d'appréhender de manière intégrée le fonctionnement hydrique et géochimique du bassin versant. En combinant la modélisation hydrogéologique, la détection de la subsidence, l'analyse géochimique, la modélisation hydrologique et l'évaluation des aléas naturels, cette approche fournit une base scientifique solide pour une gestion durable, quantitative et qualitative, des ressources en eau en milieu semi-aride.

La surexploitation de l'aquifère miocène dans la région d'El Malabiod est la résultante d'une conjugaison de facteurs anthropiques et naturels interdépendants. Ces déterminants, d'ordre socio-économique, hydrologique et climatique, exercent des pressions cumulatives sur le système, induisant un déséquilibre critique entre les prélèvements et la recharge naturelle. Les principaux facteurs étiologiques incluent : l'intensification de l'agriculture irriguée, la pression anthropique, les défaillances de gouvernance et les contraintes hydroclimatiques.

L'analyse systémique de ces causalités est essentielle pour appréhender les processus conduisant à la baisse piézométrique chronique et, par voie de conséquence, au phénomène de subsidence observé dans le bassin d'El Malabiod.

19 Modélisation hydrogéologique à l'aide de VISUAL MODFLOW Flex

La modélisation numérique constitue un outil fondamental pour l'analyse et la compréhension des dynamiques hydrogéologiques. Elle joue un rôle essentiel dans l'aide à la décision en matière de gestion durable, d'exploitation rationnelle et de préservation des ressources en eau souterraine. Dans le cadre de cette étude, un modèle hydrogéologique représentant la nappe miocène d'El Malabiod a été développé afin d'évaluer son comportement et ses interactions avec les facteurs environnementaux et anthropiques. Historiquement reconnue pour son important potentiel hydraulique, la nappe miocène d'El Malabiod est aujourd'hui confrontée à une surexploitation accrue, exacerbée par l'absence de stratégies de gestion adaptées. Par ailleurs, la diminution de la recharge naturelle induite par les changements climatiques accentue la vulnérabilité de cette ressource et compromet sa durabilité. L'élaboration de ce modèle constitue une première approche régionale et quantitative visant à combler l'absence de travaux antérieurs consacrés à une évaluation détaillée du fonctionnement hydrodynamique de cette nappe et à une analyse prospective de son évolution sous l'effet des pressions anthropiques et climatiques. Il permet d'approfondir la compréhension des mécanismes gouvernant son fonctionnement, de prédire l'impact des prélèvements et de formuler des scénarios de gestion durable. La simulation des différentes configurations d'exploitation fournit des éléments d'aide à la décision en vue d'atténuer les effets des rabattements et d'optimiser l'utilisation des ressources en eau souterraine. L'étude approfondie de l'environnement permet de discerner les processus dynamiques qui régissent le comportement de l'aquifère, et, le cas échéant, d'en formuler une représentation mathématique en tant que paramètres déterminants du système hydrogéologique. L'intégration de ces informations contribue à la construction d'un modèle conceptuel, qui, par le biais de la formalisation des phénomènes, devient un instrument analytique puissant pour aborder les défis liés à l'échelle spatiale et temporelle de l'analyse (Djellali, 2024). Une fois traduit en algorithmes informatiques, ce modèle permet de simuler le comportement réel du système et d'évaluer les écarts entre les simulations et les observations mesurées. La modélisation suit généralement une démarche structurée comprenant : la définition des objectifs, la construction du modèle conceptuel, sa formulation mathématique, l'ajustement des paramètres, l'analyse des résultats avec projections futures, et enfin l'évaluation des marges d'erreur (Fig. 46).

19.1 Présentation de VISUAL MODFLOW Flex

Visual MODFLOW Flex est une interface avancée de modélisation hydrogéologique développée par Waterloo Hydrogeologic. Contrairement aux versions précédentes, elle propose une approche plus flexible et intuitive grâce à une interface graphique améliorée et une gestion efficace des modèles conceptuels. Visual MODFLOW Flex permet la modélisation des écoulements souterrains, du transport des contaminants et des interactions entre les nappes et les cours d'eau. Il intègre plusieurs solveurs numériques, comme MODFLOW-2005, MODFLOW-USG et MT3DMS, offrant ainsi une meilleure adaptabilité aux systèmes complexes, y compris les aquifères hétérogènes et anisotropes. Son avantage principal réside dans sa capacité à intégrer différentes sources de données, facilitant ainsi la construction et la calibration des modèles tout en optimisant la prise de décision en gestion des ressources en eau.

MATERIELS ET METHODES

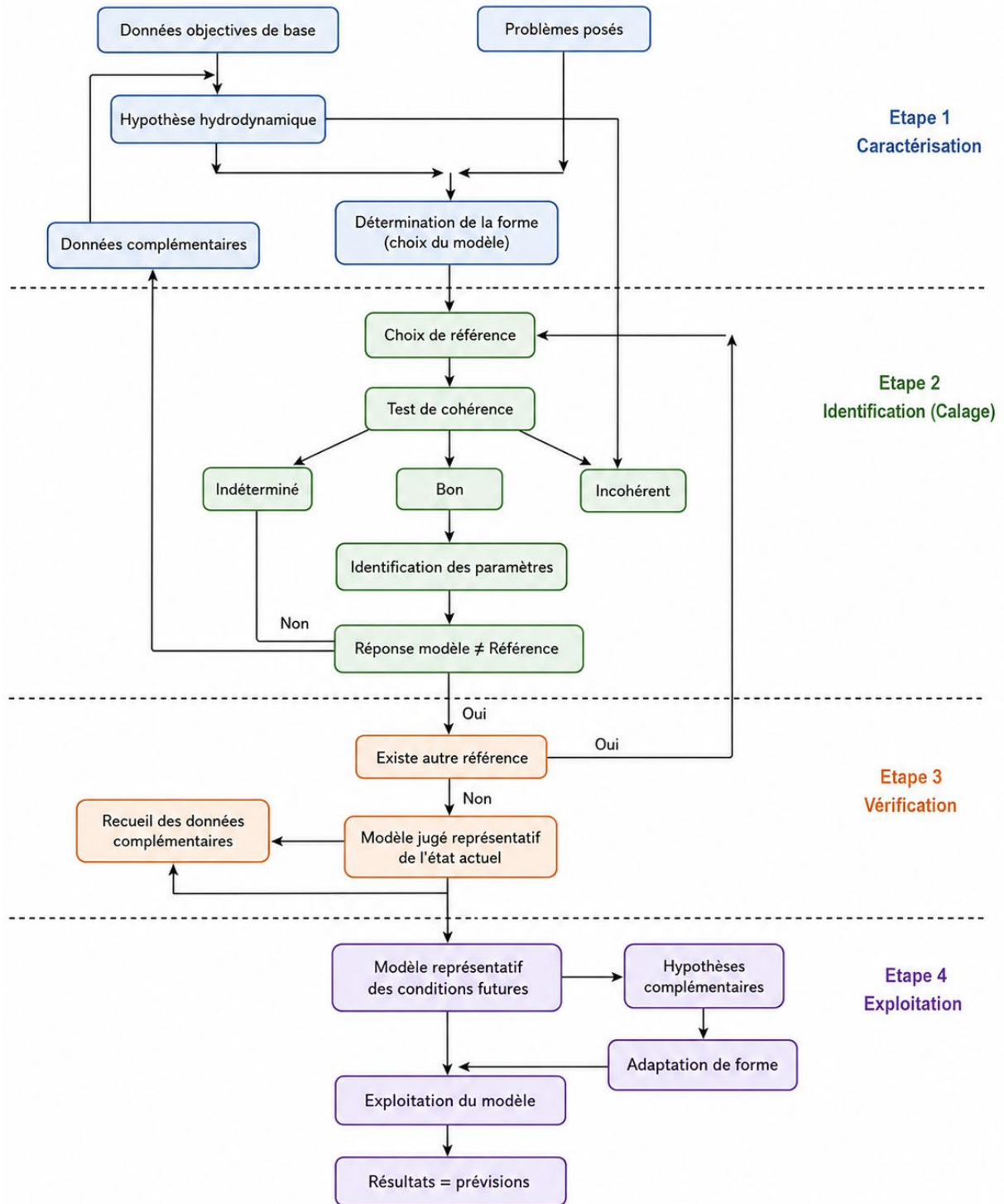


Figure 43 : Enchaînement des principales étapes de la méthode du modèle (Ramdani, 2025).

19.2 Démarche adoptée

Cette étude a été réalisée selon une approche de modélisation conventionnelle, articulée en trois étapes.

19.2.1 Conception du modèle conceptuel et numérique

Cette étape implique la collecte et l'organisation des informations essentielles à la modélisation, en commençant par la définition des finalités du modèle, à travers une analyse précise de la problématique à résoudre et des paramètres à investiguer. Il est crucial de rassembler des données représentatives pour caractériser l'environnement géologique et hydrogéologique, ainsi que pour évaluer les exigences et les demandes en eau. Avant d'élaborer le modèle, il est nécessaire de poser des hypothèses concernant l'étendue de l'étude, les conditions aux frontières, ainsi que la nature des limites (soit perméables, soit imperméables), en tenant compte des éléments comme les cours d'eau, les étangs et les zones salées. L'identification des différentes influences, telles que les apports de recharge et les extractions, doit également être effectuée. Ces informations sont ensuite intégrées dans l'interface de Visual MODFLOW Flex.

De manière générale, la conception du modèle numérique s'appuie sur le modèle conceptuel, visant à atteindre une représentation fidèle de la réalité, tout en exploitant les fonctionnalités avancées de Visual MODFLOW Flex pour simuler et étudier les processus hydrogéologiques.

19.2.2 Calibration et validation du modèle

La calibration et la validation constituent une phase essentielle qui consiste à ajuster les paramètres du modèle afin que les résultats obtenus par le code correspondent le plus précisément possible aux mesures piézométriques observées sur le terrain, et à valider ainsi la pertinence du modèle.

19.2.3 Simulation et exploitation du modèle

La phase de simulation constitue l'étape finale de la modélisation, au cours de laquelle le modèle est déployé pour examiner divers scénarios en fonction des objectifs de l'étude. Cette étape permet d'exploiter de manière optimale le modèle en simulant les réponses du système aquifère à des conditions spécifiques, telles que les pompages, les variations de recharge ou des épisodes de sécheresse. Elle fournit ainsi des prévisions éclairées sur le comportement futur de l'aquifère, offrant des perspectives essentielles pour la gestion durable et l'aménagement des ressources en eau.

19.3 Données utilisées

Les données utilisées incluent :

- Piézométrie en 2001 (Mars), utilisée comme condition de référence pour l'étalonnage du modèle, d'abord en conditions stables, puis en conditions transitoires.
- Les paramètres hydrauliques, y compris la conductivité hydraulique (K), l'emmagasinement spécifique (Ss), le rendement spécifique (Sy) et la porosité totale (%), ont été initialement extraits de la littérature. Ces valeurs seront ajustées au cours de la phase d'étalonnage du modèle.
- Les limites du modèle ont été établies sur la base des données fournies par la carte piézométrique

19.4 Limitations et Considérations Générales de VISUAL MODFLOW Flex

➤ Limitations techniques et conceptuelles :

- La qualité des résultats dépend entièrement de la précision et de la densité des données d'entrée.
- La conceptualisation des hétérogénéités du sous-sol reste une simplification de la réalité.
- La modélisation des écoulements en milieu fracturé ou karstique représente un défi méthodologique.
- Le traitement des conditions aux limites influence significativement les résultats.
- La résolution spatiale et temporelle implique souvent des compromis entre précision et temps de calcul.

➤ Considérations pratiques :

- La courbe d'apprentissage du logiciel est importante et nécessite une formation.
- Les temps de calcul peuvent être longs pour les modèles complexes et haute résolution.
- L'interopérabilité avec d'autres formats de données peut présenter des difficultés.
- La gestion de l'incertitude et l'analyse de sensibilité sont cruciales mais souvent sous-utilisées.

➤ Limitations physiques :

- Certains processus complexes (comme les changements de qualité d'eau dans les écoulements) ne sont pas entièrement capturés.
- Les interactions dynamiques nappe-rivière peuvent être difficiles à calibrer.

- Les effets du changement climatique à long terme sont complexes à intégrer.

Malgré ces limitations, VISUAL MODFLOW Flex reste un outil puissant pour la compréhension des systèmes hydrogéologiques, à condition que l'utilisateur reconnaisse ces contraintes et interprète les résultats avec une compréhension claire des hypothèses sous-jacentes.

20 Analyse de la subsidence par interférométrie radar (InSAR)

20.1 Justification de l'approche InSAR

La surexploitation des eaux souterraines, en particulier dans les aquifères compressibles tels que la nappe du Miocène dans le bassin d'El Malabiod, peut conduire à un affaissement progressif du sol. Ce phénomène, souvent imperceptible à court terme, peut avoir des conséquences importantes sur les infrastructures, la stabilité géotechnique et la dynamique hydrogéologique. L'approche InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) est une technique de télédétection avancée permettant de mesurer les déplacements verticaux du sol à l'échelle régionale, avec une précision millimétrique. Elle repose sur la comparaison de plusieurs images radar acquises par satellite à des dates différentes pour détecter les variations du terrain.

20.2 Aperçu général de la télédétection

Le terme « télédétection » se compose de deux éléments : « télé », qui signifie à distance, et « détection ». La télédétection désigne l'ensemble des techniques et des savoir-faire permettant d'acquérir des informations sur les caractéristiques physiques et biologiques d'une zone d'étude, sans contact direct, grâce à des mesures effectuées à distance. Cette définition a été formulée en 1988 par le Comité interministériel de terminologie de la télédétection aérospatiale (Gueraidia N., 2023).

Aujourd'hui, la télédétection joue un rôle de plus en plus important dans les sciences de la terre. D'abord limitée à la photographie aérienne, elle s'étend aujourd'hui à l'utilisation de satellites et de drones sophistiqués. Elle est ainsi passée d'un outil d'observation à un outil de recherche et d'analyse. La télédétection s'appuie sur les principes de la physique du rayonnement électromagnétique et sur les progrès de l'informatique, notamment grâce aux algorithmes de traitement d'images.

20.3 Éléments essentiels de la télédétection

Un système de télédétection peut être décrit en termes de cinq composants essentiels :

- La cible : C'est la partie de la surface terrestre observée par le satellite. Sa surface peut varier de quelques dizaines à plusieurs milliers de kilomètres carrés.
- La source d'énergie : Elle émet un rayonnement électromagnétique (flux de photons) qui illumine la cible. Dans la plupart des cas, cette source est le Soleil. Cependant, pour des technologies telles que le RADAR, la source est embarquée sur le satellite. En télédétection thermique, la cible elle-même émet de l'énergie sous forme de rayonnement infrarouge.
- Le capteur : C'est l'appareil qui capte l'énergie réfléchie ou émise par la cible. Les satellites en sont équipés et convertissent cette énergie en signaux numériques utilisables.
- Le récepteur : Il capte les signaux émis par le satellite. L'antenne au sol reçoit ces données et les transforme en images brutes.
- La station de traitement des données : Son rôle est de corriger, de convertir et d'améliorer les données collectées afin de produire des images qui peuvent être interprétées et adaptées à diverses analyses.

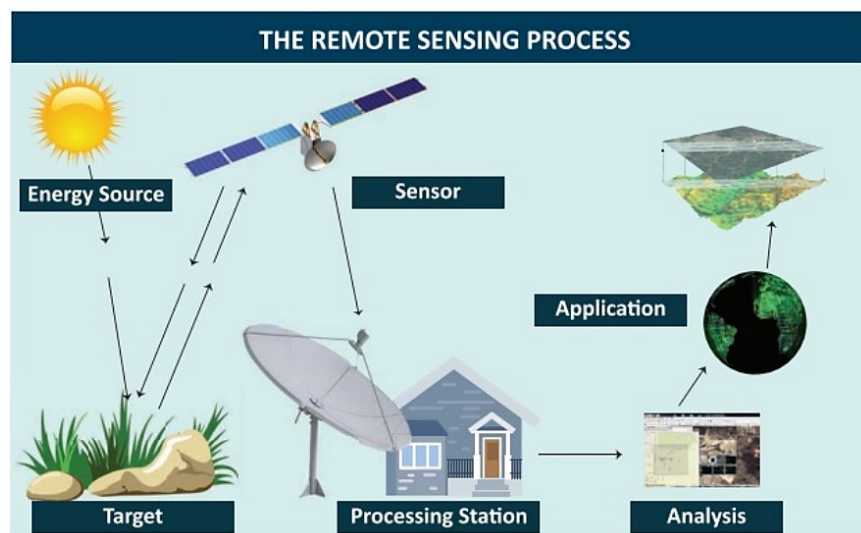


Figure 44 : Schéma des composantes d'un système de télédétection (BRAINKART. Elements of Remote Sensing).

20.4 Les satellites au service de l'observation terrestre

L'observation terrestre est l'un des usages majeurs des satellites. Le type de satellite et son orbite sont choisis en fonction des objectifs spécifiques de la mission. Ces engins spatiaux, notamment ceux dédiés à la télédétection, sont indispensables dans divers secteurs tels que l'agriculture, la cartographie, la gestion forestière, l'étude géologique, la surveillance des ressources naturelles, l'aide humanitaire, la protection des zones maritimes et côtières, ou encore les systèmes d'information géographique (SIG).

Parmi les satellites les plus utilisés dans ce domaine, on retrouve SPOT (développé par la France) et Landsat (provenant des États-Unis), tous deux équipés de capteurs performants adaptés à différentes applications. Le choix de l'orbite dépend des instruments embarqués et des besoins de la mission. Par exemple, les satellites géostationnaires, positionnés à près de 36 000 km d'altitude, offrent une couverture permanente d'une région donnée, ce qui les rend parfaits pour les télécommunications ou l'analyse météorologique. À l'opposé, les satellites en orbite quasi-polaire, souvent héliosynchrones, parcourent la quasi-totalité du globe et maintiennent des conditions d'éclairage stables, facilitant ainsi les analyses comparatives sur le long terme (Gueraidia N., 2025).

20.5 Le radar interférométrique et ses usages

L'interférométrie radar est une technique qui utilise les données radar des satellites pour détecter avec précision les mouvements du sol. En comparant des signaux émis à des moments différents, cette méthode analyse les variations de phase des ondes radar, révélant des déformations telles que des affaissements, des glissements de terrain ou des mouvements tectoniques. Son principal avantage réside dans sa capacité à fournir des mesures millimétriques sur de vastes zones et de longues périodes, offrant ainsi un outil essentiel pour la surveillance géologique. Contrairement à l'imagerie optique, les satellites radar utilisent les micro-ondes (longueurs d'onde de 1 à 20 cm), ce qui les rend insensibles aux nuages et opérationnels de jour comme de nuit. Grâce à leur système actif (émission d'ondes par le satellite), ils permettent une observation continue, quelles que soient les conditions météorologiques ou l'ensoleillement.

20.6 Les satellites à radar à synthèse d'ouverture (SAR)

Contrairement aux satellites optiques passifs qui captent la lumière du soleil, les satellites SAR (Synthetic Aperture Radar) sont des systèmes actifs : ils émettent eux-mêmes des ondes radar

vers la surface terrestre, puis analysent le signal réfléchi. Leur secret ? Une antenne qui enregistre en continu les échos radar, puis les traite pour reconstituer des images haute résolution grâce à une technique appelée "synthèse d'ouverture" - d'où leur nom.

Ces satellites embarquent une technologie encore plus poussée : l'InSAR (Interférométrie par Radar à Synthèse d'Ouverture). En comparant les signaux radar émis à différents moments, ils peuvent détecter des mouvements du sol avec une précision millimétrique. Un véritable tour de force technologique qui fait des SAR les yeux radar de la Terre, capables de percer les nuages et l'obscurité.



Figure 45 : Satellite SAR sentinel-1 utilisé dans la technique InSAR (ESA, ATG medialab).

20.7 Méthode InSAR et mesure de la déformation du sol

L'interférométrie radar à ouverture synthétique (InSAR) est une technique avancée permettant de mesurer avec une grande précision les déformations de la surface terrestre. Elle repose sur l'analyse des variations de phase entre deux images radar acquises à des dates différentes. Si le sol reste stable entre les acquisitions, les phases des signaux radar restent constantes. En revanche, tout déplacement du terrain modifie la distance parcourue par les ondes, induisant une variation de phase détectable. En comparant ces deux scènes, un interférogramme est

général, révélant les mouvements du sol avec une précision pouvant atteindre quelques millimètres (Gueraidia.S et al., 2024).

Cette méthode présente de nombreux atouts : elle permet une surveillance continue de vastes territoires, indépendamment des conditions météorologiques ou de la lumière, grâce à l'utilisation du signal radar. InSAR est aujourd'hui largement utilisé dans des domaines variés tels que la surveillance sismique, le suivi des glissements de terrain, la surveillance des niveaux de l'eau souterraine ou encore le contrôle de la stabilité des infrastructures.

L'interférométrie radar est basée sur l'obtention de deux images prises à des phases et à des moments différents. Lorsque la phase du pixel reste constante entre les deux acquisitions, toute variation observée dans la phase du signal n'est due qu'au déplacement de la surface terrestre dans la direction du regard du satellite.

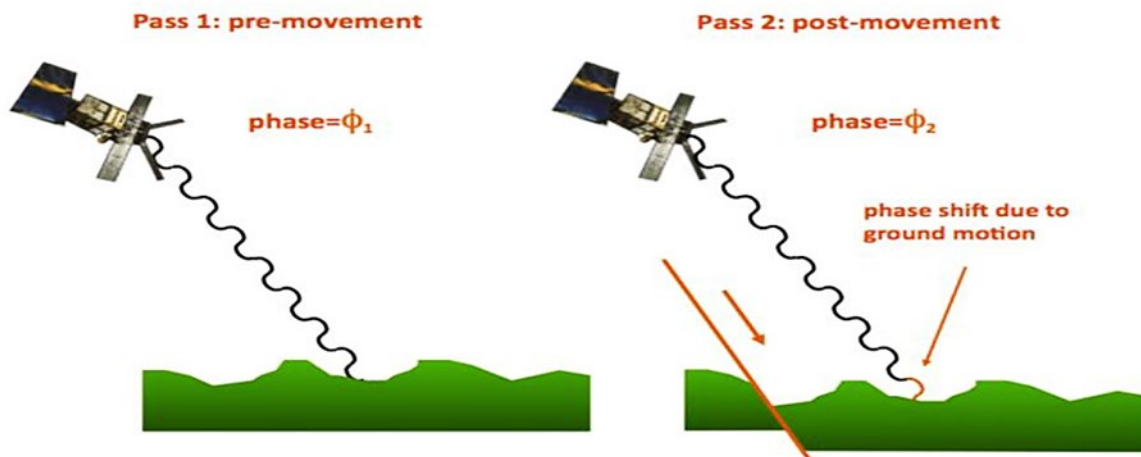


Figure 46 : Mécanisme de fonctionnement de l'InSAR (Gueraidia.N, 2023).

20.8 Données utilisées et prétraitement

L'analyse s'appuiera sur des images radar issues des satellites Sentinel-1 de l'Agence Spatiale Européenne (ESA), couvrant la période [2014–2025]. Ces images seront téléchargées depuis la plateforme Copernicus Open Access Hub, puis traitées à l'aide du logiciel SNAP (Sentinel Application Platform) et du module StaMPS (Stanford Method for Persistent Scatterers). Les étapes principales incluent :

- La co-référenciation des images radar maître-esclave ;
- Le calcul des interférogrammes différentiels ;

- La suppression des phases dues à l'orbite, à la topographie et aux variations atmosphériques ;
- La détection des scatterers persistants (PS) ;
- L'extraction des vitesses de déplacement vertical.

20.9 Traitement et interprétation des résultats

Les résultats InSAR seront interprétés en corrélation avec :

- Les zones de pompage intensif identifiées dans le modèle MODFLOW ;
- Les variations piézométriques temporelles ;
- Les caractéristiques géologiques et géotechniques du terrain (nature des formations compressibles) ;

20.10 Interprétation d'un interférogramme radar

20.10.1 Amplitude du déplacement

L'interfrange correspond à un déplacement équivalent à une demi-longueur d'onde. A titre d'exemple, les systèmes radar des satellites ENVISAT et ALOS fonctionnent à des longueurs d'onde respectives de 5,66 cm (bande C) et 23,6 cm (bande L). Il est essentiel de souligner qu'un déplacement de surface donné ne génère pas le même nombre de bangs d'interférence selon le capteur utilisé, cette quantité étant inversement proportionnelle à la longueur d'onde émise. Par conséquent, une forte densité de bangs serrés et étroits sur un interférogramme reflète typiquement une plus grande amplitude de déplacement topographique.

20.10.2 Vecteur de déplacement

Il convient de noter que l'interférogramme est une représentation spatiale des déplacements le long de la ligne de visée (LOS) du capteur satellite. La même déformation de surface, observée sous deux angles d'acquisition différents, produira des diapositives avec des signatures différentes en raison de la géométrie de la mesure. Contrairement aux systèmes GPS, qui offrent une résolution tridimensionnelle des déplacements (composantes est-ouest, nord-sud et verticale), l'interférométrie radar est limitée à la mesure de la projection des déplacements dans la direction de la ligne de visée, ce qui nécessite une modélisation géométrique pour reconstruire le champ de déplacement complet.

20.10.3 Caractéristiques des images SLC générées et des paires Sentinel-1 utilisées pour l'interférométrie

Les produits SLC (Single Look Complex) de niveau 1 sont des images radar brutes codées sous forme de nombres complexes (16 bits pour les composantes I et Q) qui préservent l'amplitude et la phase du signal. Les données enregistrées en géométrie géoréférencée et en Doppler zéro sont organisées différemment selon le mode d'acquisition des données. En mode IW (Interferometric Wide Swath), les données sont sous-cadrées et traitées séquentiellement, puis rééchantillonnées en une seule grille pour simplifier le traitement. Les modes SM (Stripmap) et EW (Extra Wide Swath) suivent une structure similaire mais diffèrent par leur couverture spatiale et leur méthode de rééchantillonnage. Ces formats offrent une couverture cohérente du sol et sont particulièrement adaptés aux applications interférométriques.

Tableau 15: Spécifications des images SLC issues du capteur Sentinel-1 SAR.

Nom	S1A_IW_SLC__1SSV_20141110T052941_20141110T053009_003215_003B63_312D_Orb_Stack_esd_ifg_deb_MLflt_TC	S1A_IW_SLC__1SDV_20250103T172855_20250103T172922_057283_070C24_07AB_Orb_Stack_ifg_deb_MLflt_TC
Date	29-10-2014	03-01-2025
Instrument	SAR-C	SAR-C
Mode	(Large Bande interférométrique) Interferometric Wide swath (IW)	(Large Bande interférométrique) Interferometric Wide swath (IW)
Satellite	Sentinel-1	Sentinel-1
Nombre d'orbite	3558	57283
Nombre de cycle	34	341
Sens de passage	Ascendante	Ascendante
Polarisation	VV VH	VV VH
Niveau de produit	L1	L1
Type de produit	Single Look Complex (SLC)1	Single Look Complex (SLC)1
Orbite relative	161	161

Les deux images SLC présentées dans le tableau résultent d'un traitement interférométrique appliqué à deux paires d'images Sentinel-1 :

- L'image SLC du 20 mai 2015 a été générée à partir des acquisitions du 29 octobre 2014 et du 20 mai 2015.
- L'image SLC du 3 janvier 2025 a été produite à partir des acquisitions du 9 janvier 2024 et du 3 janvier 2025.

Pour chaque paire, un interférogramme a été calculé afin d'estimer les déplacements du sol entre les deux dates. Ces traitements ont été effectués en conservant des paramètres orbitaux identiques (orbite relative 161, passage ascendant), garantissant ainsi une cohérence géométrique et temporelle essentielle pour l'analyse des déformations.

20.11 Description des outils logiciels mis en œuvre

20.11.1 Logiciel SNAP

Le logiciel SNAP (Sentinel Application Platform), créé par l'Agence spatiale européenne (ESA), est une application dédiée au traitement des images satellitaires. Il permet d'exploiter, de traiter, d'analyser et de visualiser les données issues notamment des satellites Sentinel du programme européen Copernicus, mais aussi d'autres missions d'observation de la Terre.

Cet outil propose une interface graphique intuitive qui facilite la réalisation de différentes opérations, telles que les corrections radiométriques et atmosphériques, la classification de l'occupation des sols, ou encore la fusion de données provenant de diverses sources.

SNAP se distingue également par son caractère open source et gratuit : il est accessible à tous et peut être installé sur les environnements Windows, Linux et MacOS.

21 Modélisation hydrogéochimique à l'aide du PHREEQC

La modélisation géochimique est couramment utilisée en hydrochimie pour interpréter les données de terrain et de laboratoire. Ces approches, s'appuyant sur des bases de données thermodynamiques, permettent de calculer l'état de saturation des eaux par rapport aux phases minérales et de simuler des scénarios réactionnels. Le code PHREEQC, outil de référence, facilite la simulation des équilibres chimiques en solution aqueuse. Les sorties du modèle servent ainsi de fondement à l'analyse et à la discussion des résultats expérimentaux. Le logiciel simule les équilibres chimiques dans les systèmes aqueux en interaction avec divers milieux (minéraux, gaz, phases solides, etc.). Bien que son acronyme, PH-Redox-Equilibrium, mette l'accent sur cet aspect, l'application excelle également dans la simulation des réactions gouvernées par la cinétique et des processus de transport 1D. Son moteur de calcul intègre les

mécanismes de dispersion, de diffusion et d'advection, et peut s'appliquer à des matrices à double porosité. De plus, il résout la diffusion pour des composants multiples, chacun avec son coefficient de diffusion propre, et ajuste dynamiquement les flux ioniques pour conserver l'équilibre électrique au cours du transport. Le logiciel est doté d'un module de modélisation inverse permettant de déterminer quelles réactions chimiques produisent les signatures géochimiques mesurées dans l'eau, que ce soit dans un contexte naturel (suivi hydrologique) ou expérimental.

Cette fonctionnalité, combinée à ses modules de simulation de réactions et de transport, est rendue universellement applicable par des bases de données chimiques constamment enrichissables. Ainsi, il peut traiter pratiquement toute réaction susceptible d'affecter la qualité des eaux, des précipitations aux eaux souterraines en passant par les eaux de surface et du sol.

21.1 Le potentiel de PHREEQC en modélisation géochimique

PHREEQC simule un vaste ensemble de processus géochimiques, incluant les équilibres de dissolution, les échanges ioniques, les réactions de surface et les équilibres gazeux. Il modélise également le transport des solutés (advection, diffusion 1D) et les réactions cinétiques. Le logiciel calcule en sortie les concentrations des espèces, le pH, le potentiel redox et les indices de saturation, quantifiant les transferts de masse pour l'ensemble des réactions spécifiées.

21.2 Méthodologie analytique

Pour la modélisation hydrogéochimique, trois échantillons d'eau ont été prélevés dans le bassin d'El Malabiod (Mars 2024) : un échantillon représentatif des eaux souterraines de la nappe du Miocène et deux échantillons provenant des eaux de surface, dont l'un correspond à l'eau brute de l'oued El Malabiod et l'autre à l'eau de l'oued El Goussa. Ces échantillons ont été collectés selon les protocoles standards d'échantillonnage hydrogéologique, afin de garantir la représentativité et la fiabilité des analyses. Les paramètres physico-chimiques in situ (pH, température, conductivité électrique et résidu sec) ont été mesurés directement sur le terrain à l'aide d'un multiparamètre portable. Les analyses ioniques majeures (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-) ont été réalisées en laboratoire selon les méthodes normalisées : la titration pour les carbonates et bicarbonates, la spectrophotométrie pour les anions, et la chromatographie ionique pour les cations. Ces données chimiques ont ensuite été intégrées dans

le logiciel PHREEQC pour la modélisation, en vue de déterminer les équilibres minéraux et les processus géochimiques dominants dans la zone d'étude.

22 Modélisation hydrologique des risques d'inondation : Approche SIG-AHP et analyse morphométrique appliquée au bassin d'El Malabiod

Les inondations, phénomènes naturels inhérent au cycle hydrologique, représentent un risque majeur à l'échelle mondiale avec des conséquences socio-économiques et environnementales significatives. Comme le soulignent Bobbili et al. (2023), ces événements extrêmes affectent profondément les populations humaines, les infrastructures, les écosystèmes et la stabilité financière. Leur principale cause réside dans les précipitations intenses, particulièrement dans les bassins versants (Nikita et al., 2024). Au-delà des dommages matériels, les inondations engendrent des pertes humaines, des déplacements de population et des perturbations écologiques majeures, constituant ainsi une menace sérieuse pour le développement économique durable. Leur caractère récurrent et leurs impacts multidimensionnels en font un enjeu crucial pour la gestion des risques naturels et l'aménagement du territoire.

Les inondations figurent parmi les catastrophes naturelles les plus fréquentes, engendrant régulièrement des conséquences dévastatrices. Selon les estimations, près de 170 millions de personnes seraient affectées annuellement par ce phénomène à l'échelle mondiale (Kowalzig, 2008 ; Mezgebe et al., 2018). L'analyse du risque inondation consiste en l'étude d'un événement physique naturel d'intensité donnée, caractérisé par une probabilité d'occurrence spatio-temporelle spécifique, susceptible d'affecter gravement les infrastructures et les populations (Hamid et al., 2019). Les projections actuelles indiquent une augmentation probable de la fréquence et de l'intensité des inondations d'ici 2050, sous l'effet combiné des changements climatiques, de l'évolution des modes d'occupation des sols et de la croissance démographique. Paradoxalement, les crues éclair, bien que destructrices, peuvent présenter certains aspects bénéfiques et contribuer au développement durable dans certaines régions. Elles participent notamment à la recharge des nappes phréatiques, améliorant ainsi la disponibilité en eau dans les zones arides (Al-Qudah, 2011). Les études hydrologiques jouent à cet égard un rôle pivot, tant pour la recherche fondamentale que pour les applications opérationnelles, notamment dans les domaines de la prévision des crues, de l'évaluation des ressources en eau et de la gestion environnementale.

D'un point de vue scientifique, ces études permettent une compréhension approfondie du fonctionnement des bassins versants grâce à l'analyse systématique des paramètres

hydrologiques pertinents. La cartographie des zones inondables génère des représentations visuelles claires et interprétables, offrant aux aménageurs territoriaux une aide précieuse pour identifier les secteurs à haut risque et hiérarchiser les actions de prévention. Le risque inondation, défini comme la mesure de la vulnérabilité aux dommages et pertes induits par les crues, s'évalue traditionnellement par l'intégration de facteurs physico-climatiques, hydrodynamiques, économiques, sociaux et écologiques (Shuayb, 2023). Les approches par télédétection et Systèmes d'Information Géographique (SIG) se sont révélées particulièrement efficaces pour cette évaluation. Les récents progrès techniques en matière de SIG permettent désormais une gestion optimisée des bassins versants et une caractérisation plus fine des réseaux hydrographiques (Gaurav et al., 2022).

La présente étude adopte une approche multicritère spatialement explicite pour l'identification des zones à risque inondation, s'appuyant sur l'intégration des Systèmes d'Information Géographique (SIG) et de la méthode Analytic Hierarchy Process (AHP). Les SIG constituent un outil fondamental permettant le traitement, l'intégration et l'analyse spatiale de données hétérogènes. Cette technologie facilite la représentation sous forme de couches thématiques géoréférencées des divers paramètres environnementaux influençant la genèse et l'intensité des phénomènes inondatoires, notamment la topographie (pente, altitude), les caractéristiques pédologiques (perméabilité), l'occupation du sol, la densité du réseau hydrographique et les régimes pluviométriques. Ces données sont dérivées de multiples sources incluant les modèles numériques de terrain (MNT), les cartes topographiques et géologiques, ainsi que les produits de télédétection.

La méthodologie implique une standardisation et un reclassement des couches d'information via des fonctions raster, préalablement à leur combinaison pondérée. L'attribution des poids respectifs aux différents facteurs est réalisée selon la méthode AHP (Saaty, 1980), approche décisionnelle multicritère rigoureuse basée sur des comparaisons par paires des critères selon une échelle d'importance relative variant de 1 (équivalence) à 9 (prépondérance extrême). Ces jugements sont structurés en une matrice de comparaison dont la diagonalisation permet d'extraire les vecteurs propres et valeurs propres, aboutissant au calcul des coefficients de pondération.

La robustesse de la démarche est assurée par le calcul d'indices de cohérence (IC) et de ratio de cohérence (RC), garantissant la validité des jugements émis. Un RC inférieur à 0,1 atteste de la cohérence logique des évaluations, condition sine qua non pour la validation des poids attribués.

Ces coefficients sont ensuite intégrés dans le modèle SIG pour générer, par combinaison linéaire pondérée des différentes couches, une cartographie finale de susceptibilité aux inondations. Cette dernière est typiquement classifiée selon cinq niveaux de vulnérabilité croissante : très faible, faible, modérée, élevée et très élevée.

Cette synergie entre capacités d'analyse spatiale (SIG) et formalisme décisionnel structuré (AHP) permet d'aboutir à une évaluation objective et scientifiquement fondée de l'aléa inondation, intégrant simultanément la distribution spatiale des facteurs physiques et leur importance relative dans la genèse du phénomène. L'approche constitue ainsi un outil d'aide à la décision pertinent pour la gestion territoriale des risques hydrologiques.

22.1 Cartographie de la susceptibilité aux inondations par SIG

La cartographie régionale de la susceptibilité aux inondations représente un outil essentiel pour la gestion proactive des risques hydrologiques, permettant d'orienter les stratégies d'adaptation et d'atténuation face aux conséquences destructrices des crues. L'avènement des technologies de télédétection, notamment l'analyse d'images satellitaires, a révolutionné ce domaine en offrant la possibilité de générer des cartes de susceptibilité avec une actualisation quasi immédiate. Ces données spatialisées, une fois interprétées, fournissent non seulement une délimitation précise des zones inondables, mais permettent également de reconstituer a posteriori les hauteurs d'eau atteintes lors des épisodes de crue, constituant ainsi une base indispensable pour la modélisation hydrologique et la planification territoriale. La cartographie de l'aléa inondation, qui identifie les zones les plus vulnérables en s'appuyant sur les caractéristiques physiques propices aux crues, constitue un élément clé des systèmes d'alerte précoce et des stratégies de prévention des risques. Cette approche spatialisée représente un outil fondamental pour l'aménagement du territoire en zones inondables et l'élaboration de mesures d'atténuation. Les cartes d'aléa produites, par leur visualisation intuitive et interprétable, offrent aux décideurs une aide précieuse pour hiérarchiser les secteurs à risque et optimiser les interventions (Lawal et al, 2011).

La carte d'aléa inondation représente un outil décisionnel fondamental permettant d'évaluer spatialement le niveau de risque d'un territoire. Essentielle pour orienter les choix d'aménagement et d'urbanisme, cette cartographie doit allier rigueur scientifique et accessibilité visuelle afin de servir efficacement l'ensemble des parties prenantes, des experts techniques aux décideurs politiques et citoyens. En fournissant une représentation claire et interprétable des

zones vulnérables, elle constitue un support incontournable pour la planification territoriale et la prévention des risques, tout en facilitant la concertation entre les différents acteurs concernés par la gestion du risque inondation.

22.2 Cartographie du risque inondation avec les SIG

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) se révèlent un outil performant pour cartographier et gérer les risques d'inondation dans des régions spécifiques [Lawal, 2011]. Leurs fonctionnalités avancées permettent de générer des cartes de vulnérabilité, en identifiant précisément les zones exposées aux inondations. Les SIG stockent, analysent et visualisent des données spatiales, ce qui facilite la superposition de différentes couches d'information (topographie, hydrologie, occupation des sols, etc.) pour délimiter les secteurs à risque. Cette analyse spatiale contribue à une meilleure gestion des zones inondables et à la planification de stratégies de mitigation.

Parmi les méthodes d'analyse adaptées, l'AHP (Analytic Hierarchy Process) développé par Saaty est largement utilisé dans la prise de décision multicritère (MCDM), notamment pour les problématiques liées à l'eau. L'AHP permet de classer des alternatives selon plusieurs critères en évaluant leur importance relative via une matrice de comparaison par paires. Chaque critère est pondéré sur une échelle de 1 (équivalence) à 9 (prépondérance absolue), garantissant une évaluation rigoureuse et cohérente des priorités décisionnelles.

22.3 Processus analytique hiérarchique (AHP)

La méthode Analytic Hierarchy Process (AHP), développée par Saaty (1980), est une approche multicritère systématique qui permet d'évaluer et de hiérarchiser des alternatives complexes via des comparaisons par paires des critères. En convertissant des jugements subjectifs en poids numériques grâce à une matrice dédiée, l'AHP génère un vecteur de priorités reflétant l'importance relative de chaque critère. Cette méthode, reconnue pour sa rigueur mathématique et sa flexibilité, est particulièrement utile dans la gestion des risques (ex : inondations), l'aménagement du territoire ou les choix stratégiques, offrant ainsi un cadre structuré pour des décisions objectives et transparentes.

La méthode Analytic Hierarchy Process (AHP) offre un cadre rigoureux pour la prise de décision complexe (Hummel et al., 2014). Ce modèle multicritère, largement utilisé dans divers domaines (Kordi & Brandt, 2012 ; Beskese et al., 2014), permet de hiérarchiser des facteurs

selon leur importance relative. Son atout majeur réside dans sa capacité à intégrer simultanément des critères quantitatifs et qualitatifs. Son succès s'explique par sa simplicité d'utilisation, son interface intuitive et son adaptabilité à différents contextes décisionnels.

23 Évaluation des aléas naturels par télédétection dans le bassin versant de Safsaf (Nord-Est algérien)

Afin d'évaluer la susceptibilité du bassin versant de Safsaf aux aléas naturels, une approche basée sur l'analyse d'images satellitaires a été adoptée. Cette démarche repose sur l'exploitation des données multispectrales issues du capteur Landsat 8, permettant de caractériser l'occupation et l'utilisation du sol.

Plusieurs indices spectraux ont été calculés pour extraire les informations environnementales pertinentes influençant la vulnérabilité du milieu, notamment :

- Le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) pour évaluer la densité et la santé de la végétation ;
- Le NDWI (Normalized Difference Water Index) et le MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) pour la détection des zones humides et des plans d'eau ;
- Le SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) afin de corriger l'effet du sol sur la réponse spectrale de la végétation ;
- Le NBR (Normalized Burn Ratio) pour la caractérisation des surfaces dégradées ou brûlées ;
- Et le NDBI (Normalized Difference Built-up Index) destiné à identifier les zones urbanisées et bâties.

Ces indices ont été extraits à partir des bandes spectrales correspondantes du satellite Landsat 8 et intégrés à un Modèle Numérique d'Élévation (MNE) pour analyser la distribution spatiale des zones à risque. Cette intégration a permis de mettre en évidence les secteurs les plus sensibles aux aléas naturels, en fonction de la topographie, de l'humidité, de la couverture végétale et du degré d'urbanisation.

23.1 Démarche méthodologique

Cette section décrit la méthodologie adoptée pour analyser et évaluer les impacts des aléas naturels à partir de l'application d'indices multispectraux. L'approche repose sur l'utilisation de plusieurs indices dérivés des données satellitaires, notamment : le NDVI (Normalized

Difference Vegetation Index), permettant d'évaluer l'état et la vitalité de la végétation ; le SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index), qui corrige l'influence de la brillance du sol dans les zones de végétation clairsemée ; et le NDBI (Normalized Difference Built-up Index), utilisé pour la détection des zones urbanisées. La détection de l'eau de surface a été abordée à travers deux indices complémentaires : le NDWI (Normalized Difference Water Index), adapté à la détection de l'humidité et des plans d'eau dans les milieux naturels, et le MNDWI (Modified NDWI), qui améliore la détection des zones humides en milieux urbanisés en réduisant l'influence des surfaces bâties (Xu, 2006). De plus, le NBR (Normalized Burn Ratio) a été appliqué pour identifier les zones brûlées et évaluer la régénération de la végétation après incendie. Les images satellitaires ont fait l'objet d'un prétraitement comprenant la correction atmosphérique et la normalisation radiométrique, afin de réduire le bruit et d'assurer la cohérence des données (Gueraidia et al., 2025). L'ensemble de ces indices a été dérivé à partir d'images multi-temporelles dans le but d'identifier et de classifier les zones affectées, fournissant ainsi un cadre robuste pour l'évaluation des changements environnementaux et des impacts des aléas naturels (Huete, 1988).

23.1.1 Extraction des données

Les images Landsat 8 comportent 11 bandes spectrales, s'étendant de 0,43 μm (Aérosol) à 12,51 μm (Thermique 2), la plupart ayant une résolution de 30 m, à l'exception de la bande panchromatique, dont la résolution est de 15 m (Tableau 16). Ces données nécessitent une correction atmosphérique afin d'améliorer la précision radiométrique en réduisant les interférences atmosphériques (Patel et al., 2019) (Fig.50). Une correction géométrique est ensuite appliquée pour garantir que les pixels soient correctement alignés à la surface terrestre (Gueraidia et al., 2023). Après ces corrections, des indices spectraux tels que le NDVI, le NDWI, le MNDWI, le SAVI, le NDBI et le NBR sont calculés pour analyser l'occupation du sol, la végétation et l'humidité.

23.1.2 Étapes de traitement des données Landsat 8

- Extraction des données : téléchargement des images Landsat 8 à partir de la plateforme Earth Explorer (USGS).
- Correction atmosphérique : amélioration de la précision radiométrique en réduisant les effets liés à l'atmosphère.
- Correction géométrique : ajustement de la position des pixels afin de les aligner avec leurs emplacements réels à la surface terrestre.

Tableau 16: Bandes spectrales Landsat 8 (Gueraidia et al., 2024).

Bande	Nom	Plage de longueurs d'onde (µm)	Résolution (m)
B1	Aerosol	0.43–0.45	30
B2	Blue	0.45–0.51	30
B3	Green	0.53–0.59	30
B4	Red	0.60–0.64	30
B5	Near-infrared (NIR)	0.85–0.88	30
B6	SWIR 1	1.57–1.65	30
B7	SWIR 2	2.11–2.29	30
B8	Panchromatic	0.50–0.68	15
B9	Cirrus	1.36–1.38	30
B10	Thermal 1	10.60–11.19	100 x 30
B11	Thermal 2	11.50–12.51	100 x 30

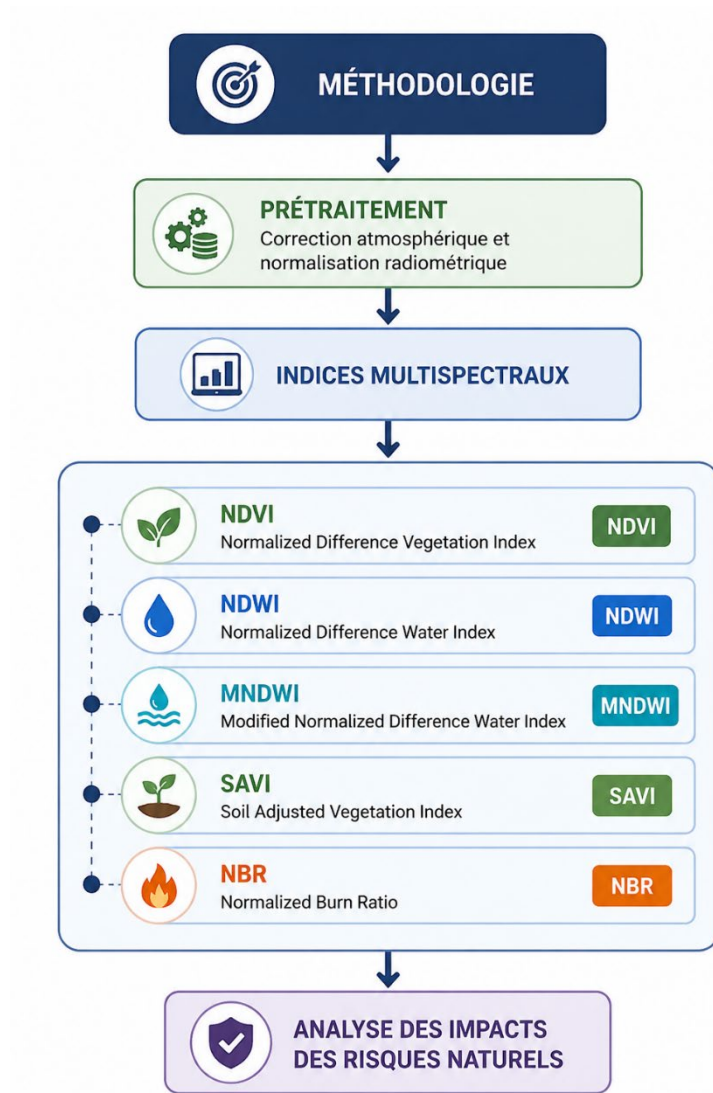


Figure 47 : Organigramme de la méthodologie basée sur les indices spectraux (Ramdani, 2025).

Tableau 17: Formules pour les indices spectraux.

Indice	Utilisation principale	Formule
NDVI	Évaluation de la végétation	$\frac{NIR - RED}{NIR + RED}$
NDWI	Teneur en humidité superficielle	$\frac{Green - SWIR1}{Green + SWIR1}$
MNDWI	Détection d'eau	$\frac{Green - SWIR1}{Green + SWIR1}$
SAVI	Végétation avec ajustement du sol	$\frac{(NIR - RED) \times (1 + L)}{(NIR + RED + L)}$
NDBI	Cartographie des zones urbanisées	$\frac{SWIR1 - NIR}{SWIR1 + NIR}$
NBR	Détection des zones brûlées	$\frac{NIR - SWIR2}{NIR + SWIR2}$

Résultats et discussions

1 Modélisation hydrogéologique à l'aide de VISUAL MODFLOW Flex

1.1 Discrétisation du modèle aquifère

L'aquifère examiné dans cette étude est principalement constitué d'une nappe miocène profonde, dont l'existence a été validée par une étude géophysique réalisée en 1971. Cette nappe est localisée entre les failles F1 et F2, orientées WSW-ENE (Rouabhia, 2006), et est exploitée par plusieurs forages présents dans la région. Les forages réalisés en dehors de cette zone, de part et d'autre de ces failles, se sont révélés infructueux, malgré la présence de couches sableuses. Cette structure aquifère se divise en deux principales unités géologiques : la première, superficielle et largement distribuée, se compose de formations alluviales récentes, intégrant des argiles remaniées associées à du sable et des graviers. La seconde unité se situe dans les formations miocènes profondes, formées de grès, de sable et de gravier, et est exploitée par une dizaine de forages et plusieurs centaines de puits. La nappe miocène se trouve principalement entre des couches calcaires aptiennes, et son alimentation est en grande partie influencée par les déformations tectoniques associées aux failles, qui ont permis le remplissage du fossé d'effondrement de la plaine d'El Ma El Abiod. À l'ouest de cette plaine, l'aquifère miocène est situé à une profondeur considérable, tandis qu'à l'est, il coïncide avec des formations miocènes affleurantes. Pour cette modélisation hydrogéologique, un système monocouche est adopté pour représenter l'aquifère sablonneux miocène, en excluant l'aquifère quaternaire, qui est devenu obsolète en raison des conditions de sécheresse persistantes au cours des dernières décennies et de la surexploitation des ressources en eau. Ce modèle permet de simuler l'écoulement de l'eau souterraine en tenant compte de l'extension et de l'épaisseur variables de la nappe, ainsi que des débits mesurés dans les forages exploitant cette ressource.

La simulation numérique d'un aquifère repose sur la résolution d'un ensemble d'équations différentielles, fréquemment abordées par le biais de la méthode des différences finies ou celle des éléments finis. Dans le présent travail, l'approche par différences finies a été adoptée en raison de sa simplicité de mise en œuvre et de son adéquation aux conditions du site étudié. Cette méthode exige une discrétisation spatiale du modèle, réalisée à l'aide d'un maillage régulier, généralement constitué de cellules carrées. Le dimensionnement du maillage, en termes de nombre et de taille des cellules, est déterminé en fonction du niveau de précision requis, de la configuration géométrique du système aquifère et des ressources informatiques disponibles, le temps de calcul augmentant proportionnellement à la finesse du maillage.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Chaque cellule du maillage est caractérisée par des paramètres hydrodynamiques spécifiques, notamment la conductivité hydraulique et les conditions initiales de charge piézométrique, indispensables à la représentation réaliste du comportement du réservoir souterrain.

Le domaine spatial du modèle numérique s'étend sur une superficie d'environ 224,74 km², structurée selon un maillage régulier constitué de 40 colonnes et 40 rangées, soit un total de 1600 cellules élémentaires. Cette configuration spatiale assure une représentation fidèle de la géométrie de l'aquifère dans le plan horizontal (x-y) et constitue le support sur lequel sont appliqués les paramètres hydrodynamiques requis pour la simulation.

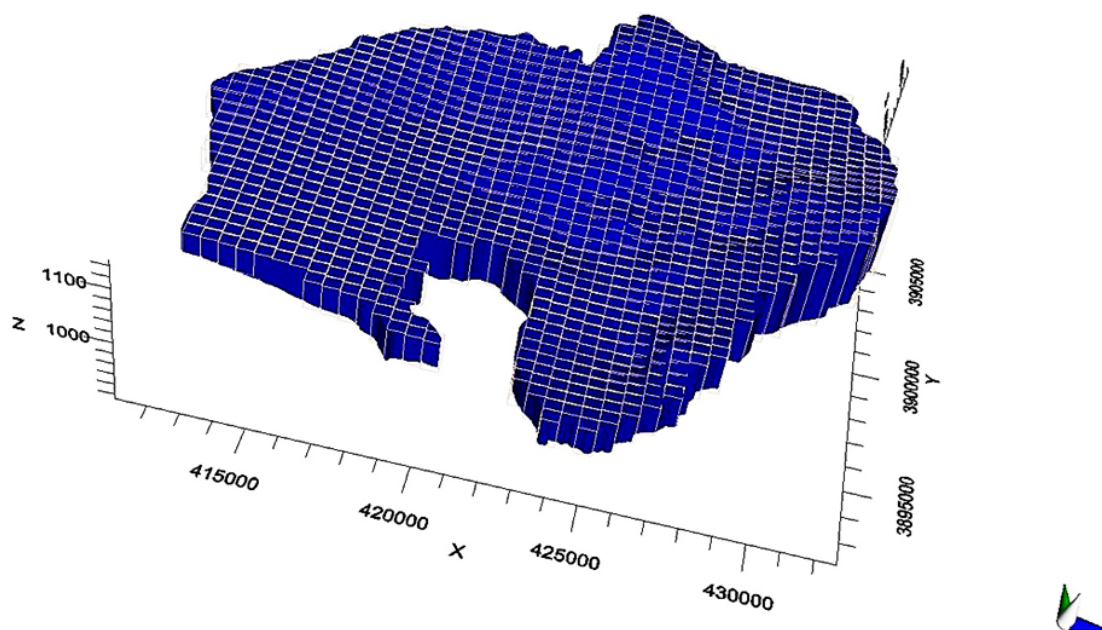


Figure 48 : Grille numérique et représentation 3D de l'aquifère étudié (Ramdani, 2025).

1.2 Géométrie de l'aquifère

Le système aquifère modélisé est représenté par une seule couche, correspondant à la nappe des sables miocènes, délimitée à partir de la compilation des données issues des études géophysiques menées dans le bassin d'étude. La nappe quaternaire n'a pas été intégrée dans le modèle en raison de son appauvrissement progressif, résultant des conditions de sécheresse persistantes observées au cours des dernières décennies, ainsi que de la surexploitation des ressources en eau qui a conduit à sa perte d'intérêt du point de vue hydrodynamique.

Dans cette étude, un total de 69 forages hydrauliques a été utilisés pour déterminer les altitudes du toit de l'aquifère, qui est considéré comme équivalent à la surface du sol, étant donné que la nappe quaternaire située au-dessus n'a pas été prise en compte en raison de son absence d'intérêt

RESULTATS ET DISCUSSIONS

hydrogéologique pour cette analyse. En ce qui concerne le substratum, son altitude a été déterminée en fonction de l'épaisseur des formations sableuses, mesurée à partir des données géophysiques.

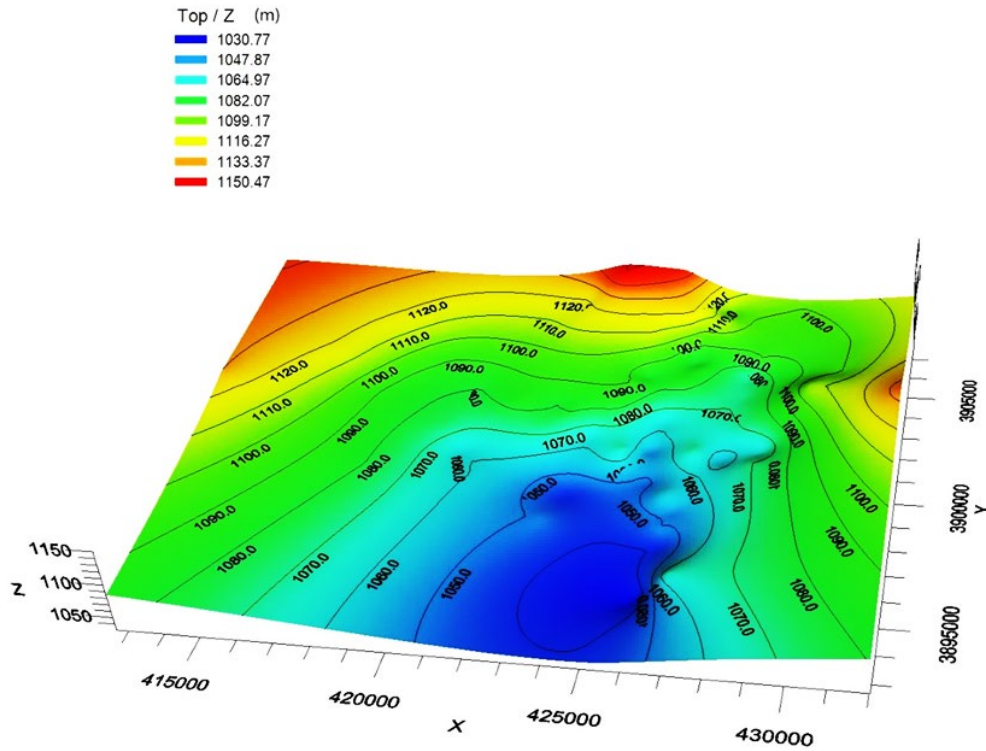


Figure 49 : Altitudes du toit de l'aquifère miocène (Ramdani, 2025).

RESULTATS ET DISCUSSIONS

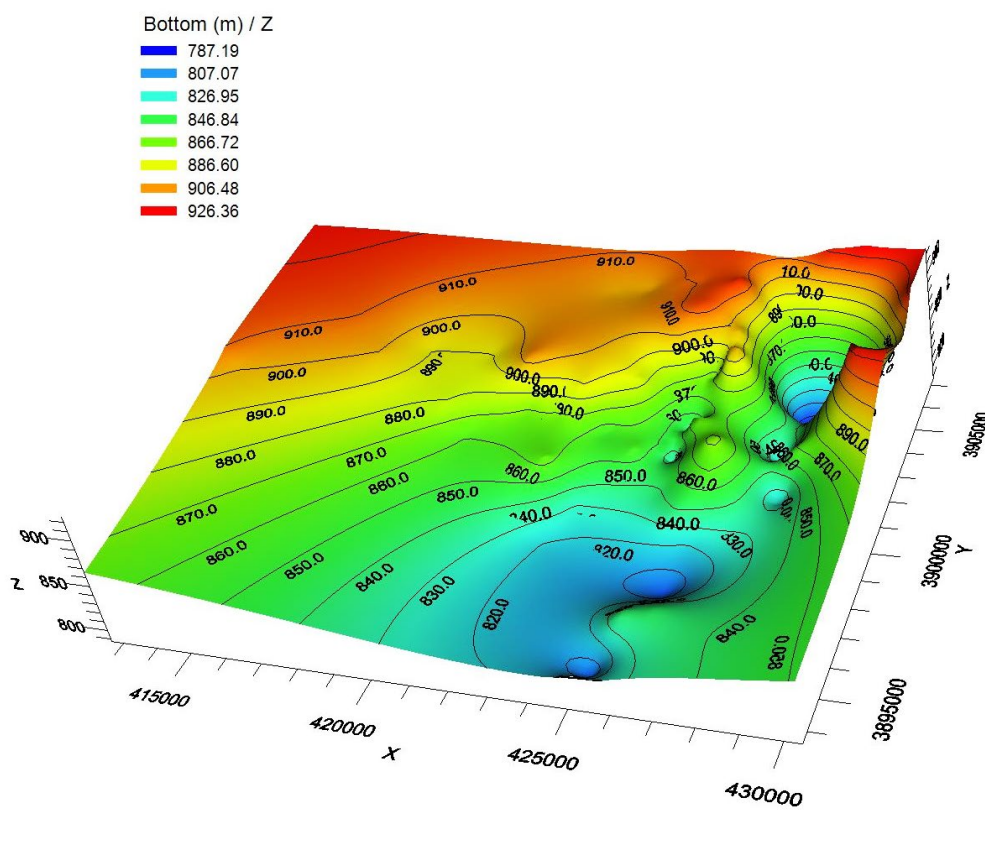


Figure 50 : Altitudes du mur de l'aquifère miocène (Ramdani, 2025).

1.3 Conditions aux limites

Les conditions aux limites concernent les règles d'échange des flux entre le domaine modélisé et le milieu extérieur (Ledoux, 2003). Ces conditions demeurent généralement indépendantes des phénomènes internes au domaine considéré ; elles s'appliquent de manière universelle aux frontières, qu'elles soient de type fermé ou ouvert (Tangug, 2009). Dans la partie septentrionale, la nappe phréatique est en contact avec les formations calcaires secondaires, caractérisées par une bonne perméabilité, dont le pendage orienté vers la plaine induit une dynamique d'écoulement gravitaire en direction du centre du bassin. Au sud, l'aquifère est alimenté de manière diffuse par le ruissellement des précipitations sur les affleurements carbonatés, en complément des apports issus de l'infiltration des précipitations efficaces au niveau de l'aire d'alimentation. En profondeur, le substratum imperméable, constitué d'argiles et de marnes, joue un rôle de barrière hydraulique, imposant un écoulement préférentiel vers l'aval en direction de l'aquifère miocène. À l'exutoire du bassin, la nappe est soumise à un drainage naturel par l'oued El Ma El Abiod, situé à proximité immédiate de la localité éponyme (Rouabhia, 2006).

RESULTATS ET DISCUSSIONS

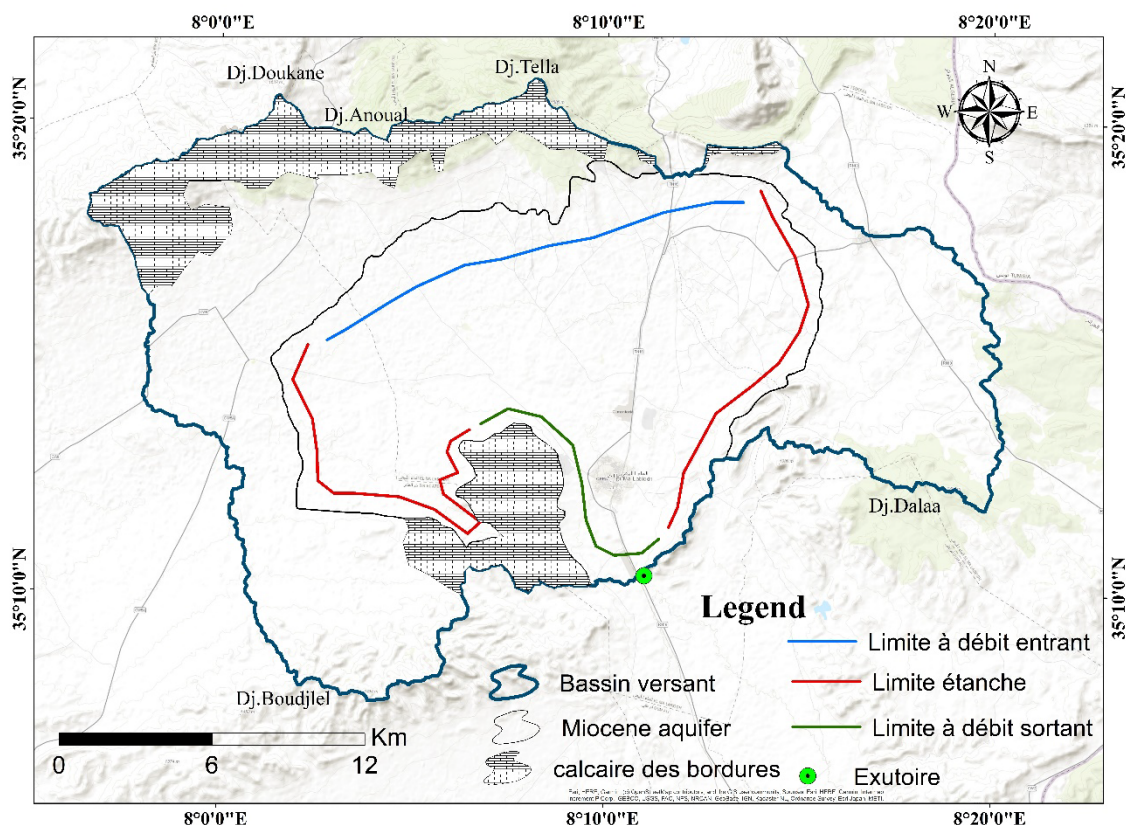


Figure 51 : Carte des limites hydrogéologiques du système aquifère d'El Malabiod (Ramdani, 2025).

1.4 Conditions initiales de charge hydraulique

L'état initial du système aquifère a été caractérisé à partir des hauteurs piézométriques enregistrées lors de la campagne de mesure effectuée par Rouabhia en 2001. L'analyse de la carte piézométrique de 2001 met en évidence trois zones d'écoulement souterrain distinctes : à l'Est, un écoulement important avec un gradient hydraulique de 0,019 ; au Nord, un gradient plus élevé (0,027) associé à une forte exploitation et une dépression piézométrique ; à l'Ouest, un écoulement plus faible (gradient de 0,0024) où la nappe alimente l'Oued El Goussa. L'écoulement général se dirige vers le Sud, où la nappe présente une faible profondeur et des signes de surexploitation (Rouabhia, 2006). La nappe du Miocène s'écoule principalement du nord et de l'est vers le sud, en direction de son exutoire. Les principaux axes d'écoulement convergent en aval vers l'oued El Malabiod, qui draine le système aquifère.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

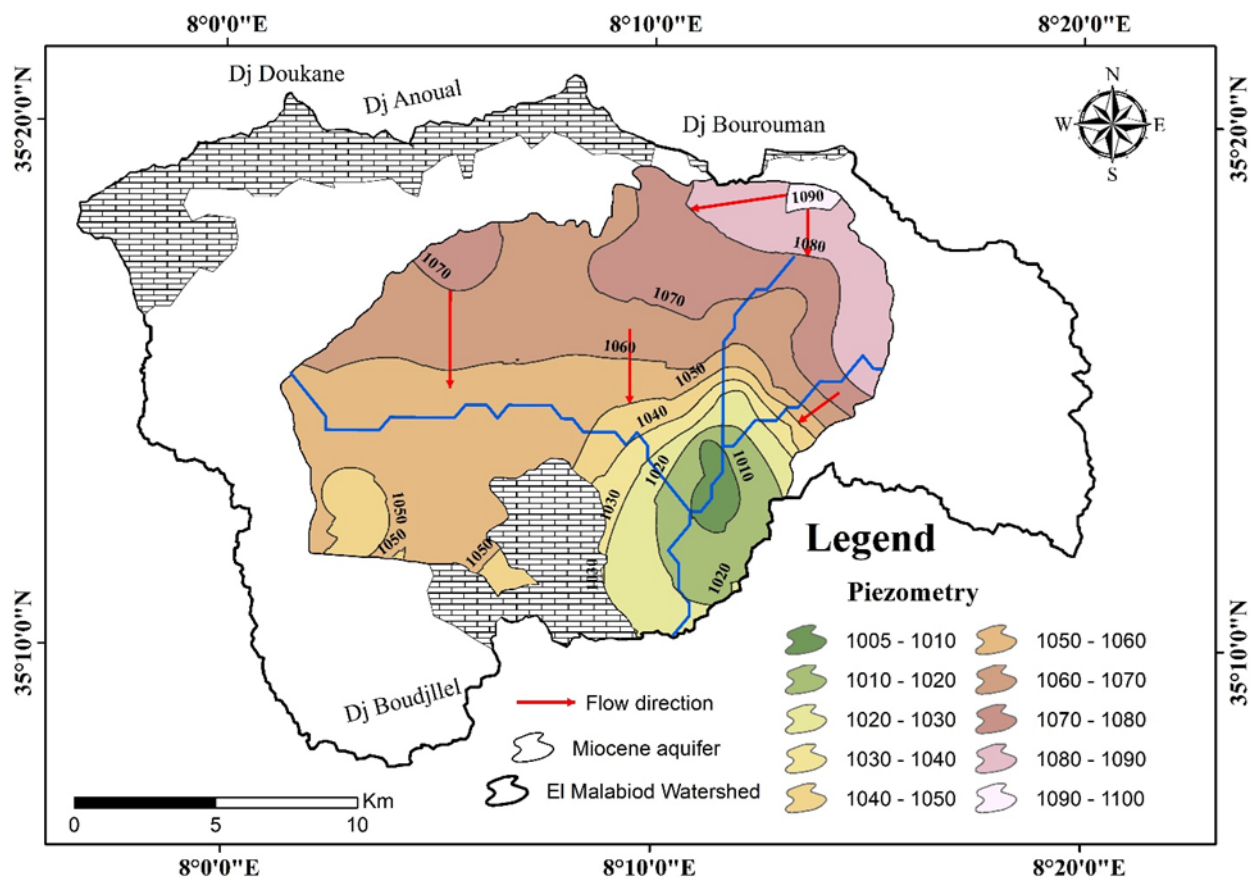


Figure 52 : Carte piézométrique du système aquifère d'El Malabiod en 2001 (d'après Rouabhia, 2001, redigitalisée par l'auteure, 2024).

1.5 Calage en Régime permanent

Le calibrage du modèle en régime permanent a été effectué en se basant sur les principaux paramètres d'entrée, c'est-à-dire la perméabilité et le niveau piézométrique initial. L'objectif de cette phase était d'optimiser ces paramètres pour reproduire avec précision les variations observées dans les données piézométriques. La calibration a été conduite de manière itérative, en utilisant une méthode par ajustements successifs, afin de minimiser les écarts entre les résultats simulés et les mesures réelles. Pour vérifier la fiabilité du modèle, un réseau de 69 puits a servi de référence. Les données relatives à ces puits ont été collectées lors d'enquêtes de terrain, à l'aide de questionnaires administrés auprès des agriculteurs, permettant de relever les niveaux d'eau ainsi que les caractéristiques des ouvrages. Ces informations ont permis d'évaluer

RESULTATS ET DISCUSSIONS

la performance du modèle et de confirmer sa capacité à représenter fidèlement le comportement réel de l'aquifère.

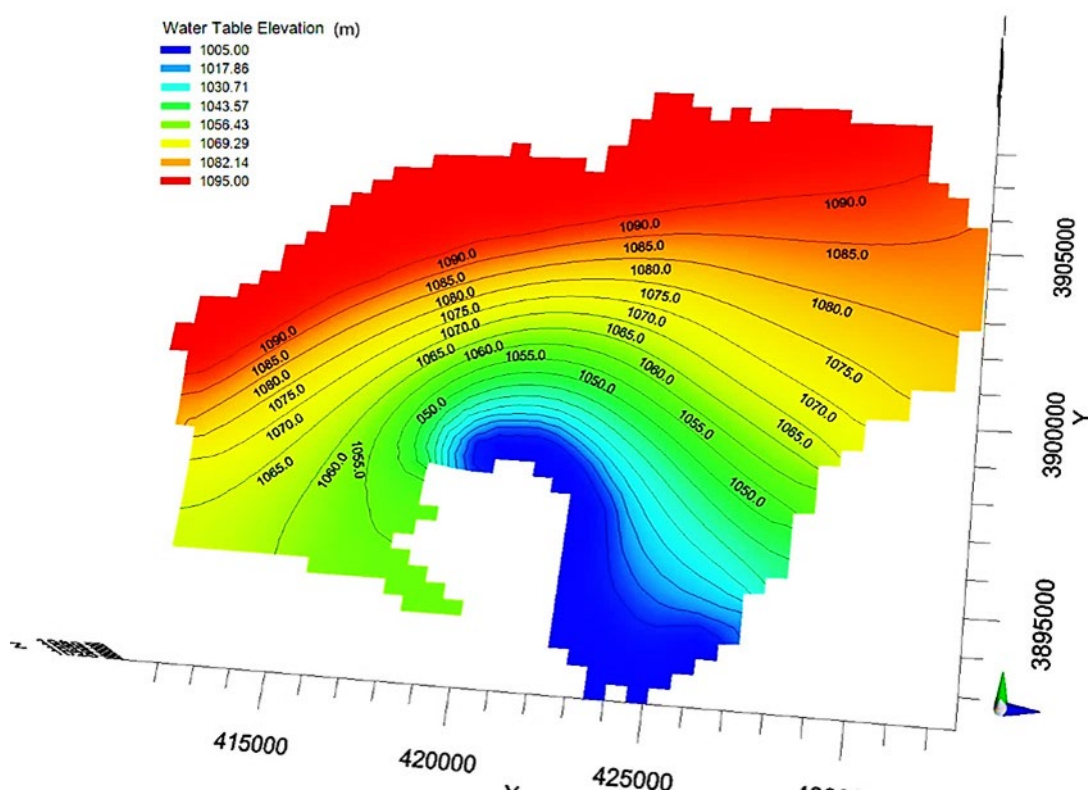


Figure 53 : Reconstitution de la piézométrie en régime permanent (Mars 2001) (Ramdani, 2025).

1.6 Calage en Régime transitoire

Les résultats issus de la modélisation en régime permanent de l'année 2001 ont été adoptés comme conditions initiales pour la simulation en régime transitoire. L'examen de la figure 57 met en évidence une concordance satisfaisante entre les niveaux piézométriques observés sur le terrain et ceux générés par le modèle numérique.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

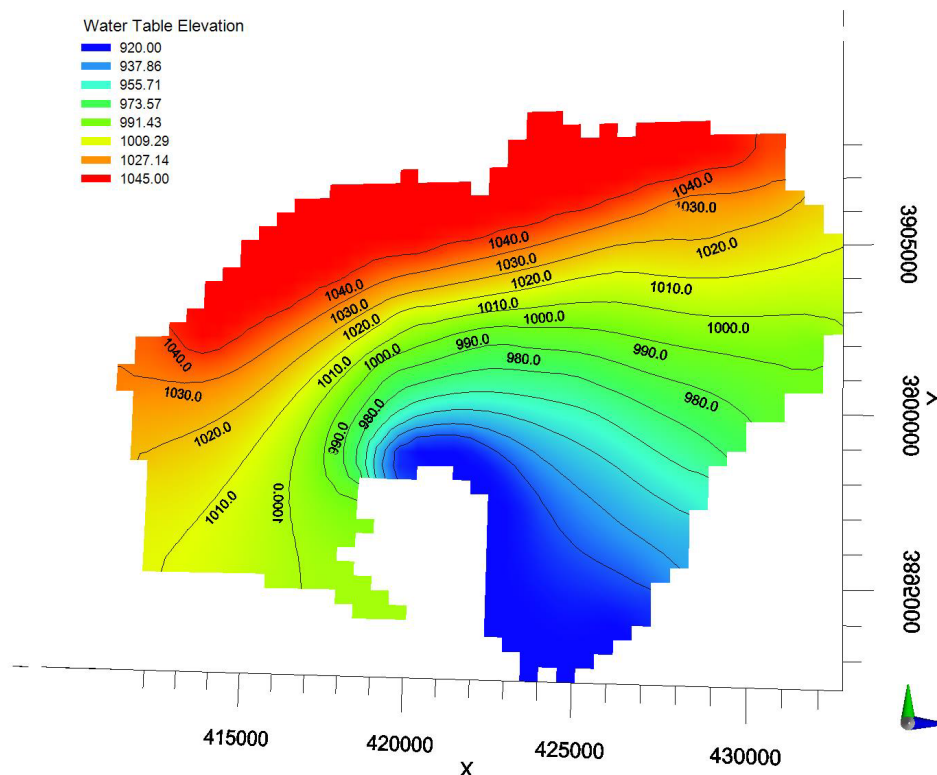


Figure 54 : Reconstitution de la piézométrie en régime transitoire (Mars 2024) (Ramdani, 2025).

1.7 Evaluation de la piézométrie simulée et validation du modèle hydrogéologique

La vérification du modèle est une étape fondamentale dans l'évaluation de la robustesse des résultats simulés. Cette procédure conduit à sa validation, préalable indispensable à son utilisation dans de nouveaux contextes. Le modèle validé peut alors être transféré dans le temps (projections prédictives) ou dans l'espace (extrapolation à d'autres territoires) (Kessasra, 2017).

La validation du modèle est basée sur une méthodologie hybride, combinant des indicateurs statistiques (par exemple Nash-Sutcliffe, RMSE) avec des évaluations graphiques. Les diagrammes de dispersion révèlent des tendances systématiques dans les résidus piézométriques, dont la distribution spatiale doit être aléatoire pour attester de la robustesse du modèle. Le graphique de calibrage, qui croise les données observées et simulées, est un outil visuel essentiel pour évaluer la corrélation entre les deux ensembles de données.

La validation du modèle a reposé sur une comparaison systématique entre les niveaux piézométriques simulés (via le logiciel Visual MODFLOW Flex) et les valeurs mesurées in situ,

RESULTATS ET DISCUSSIONS

issues d'un réseau de 42 forages de contrôle. Les résultats du calibrage (Tableau 18) indiquent des résidus majoritairement contenus dans l'intervalle [0 m ; 5 m], conformes aux critères d'acceptabilité en hydrogéologie numérique. Une adéquation parfaite (écart nul) est observée au forage P25, témoignant d'une précision locale optimale. À l'inverse, un écart anormal de 15,25 m est relevé au forage P28, classé comme point aberrant. Cette divergence pourrait s'expliquer par des hétérogénéités géologiques localisées non intégrées au modèle, D'éventuelles incertitudes métrologiques (erreurs de mesure ou de positionnement) ou Une représentation inadéquate des conditions aux limites ou des paramètres hydrodynamiques dans ce secteur.

L'analyse comparative entre les niveaux piézométriques simulés et observés révèle une corrélation notable, comme l'illustre le nuage de points de la figure 58. Ce graphique montre que les résidus sont globalement centrés autour de la droite de régression linéaire, ce qui traduit un bon accord entre le modèle et les données mesurées. La proximité des points avec la ligne d'équivalence ($y = x$) atteste de la qualité de l'étalonnage, avec une forte concentration de valeurs présentant de faibles écarts résiduels. Cette configuration témoigne de la capacité du modèle à reproduire de manière satisfaisante les conditions piézométriques réelles, malgré la présence occasionnelle de valeurs aberrantes pouvant résulter d'incertitudes locales ou de limitations inhérentes aux paramètres du modèle.

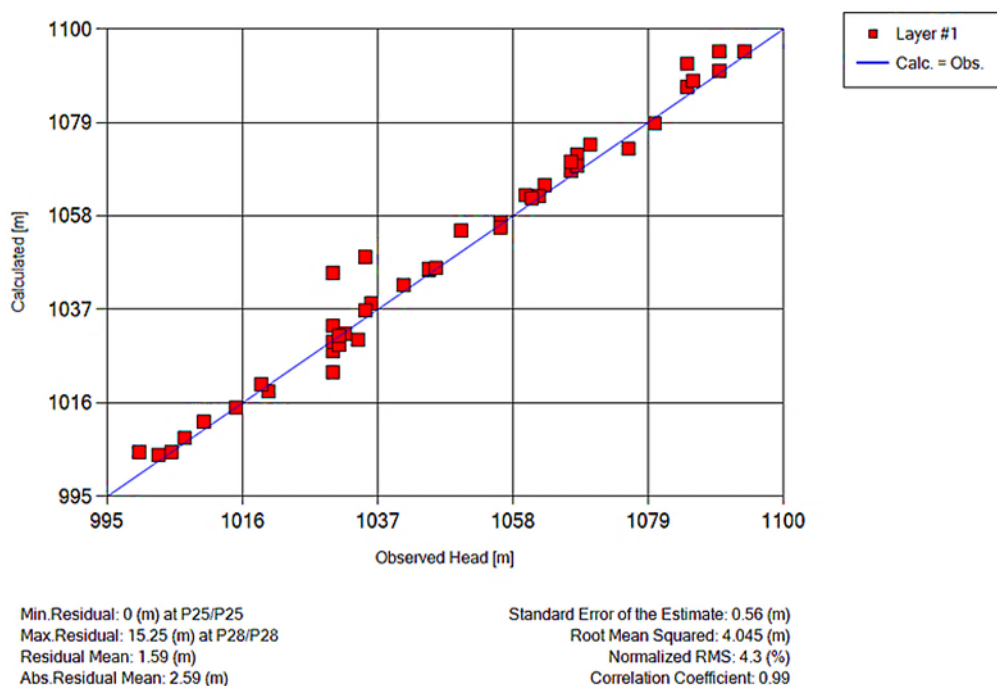


Figure 55 : Diagramme de corrélation entre les niveaux piézométriques simulés et observés (Ramdani, 2025).

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Tableau 18: Concordance entre les niveaux piézométriques observés et calculés.

Forage	Niveau piézométrique calculé en m	Niveau piézométrique observé en m	Ecart en m
EV1	1033.3	1030	3.3
P25	1005	1005	0
M1	1071.7	1068	3.7
M5	1018.5	1020	-1.5
M10	1068.1	1067	1.1
M13	1027.6	1030	-2.4
P10	1090.5	1090	0.5
P14	1064.9	1063	1.9
P18	1020.1	1019	1.1
P19	1062.4	1062	0.4
P22	1011.7	1010	1.7
P23	1008.1	1007	1.1
P24	1004.2	1003	1.2
P27	1005	1000	5
P30	1032	1031.6	0.4
P31	1029.8	1030	-0.2
P36	1087	1085	2
P41	1073	1076	-3
P48	1078.8	1080	-1.2
P49	1074	1070	4
P50	1028.9	1031	2.1
P52	1014.9	1015	-0.1
P53	1031.1	1031	0.1
P55	1095	1094	1
P57	1095	1094	1
P58	1088.3	1086	2.29
P60	1088.7	1087	1.66
P76	1036.9	1035	1.88
P75	1046.2	1046	0.22
P74	1038.3	1036	2.3
P70	1055.4	1056	-0.6
P28	1045.2	1030	15.25
P51	1030.2	1034	-4.2
P68	1061.9	1061	0.9
P64	1069.3	1068	1.3
P65	1070.3	1067	3.3
P67	1062.7	1060	2.7
P73	1046	1045	1
P72	1042.5	1041	1.5
P8	1095	1090	5
P16	1048.9	1035	13.9
P15	1054.8	1050	4.8

Suite à l'étalonnage du modèle, une série de simulations transitoires s'étendant sur dix ans a été effectuée pour anticiper les futures variations des niveaux d'eau souterraine et la dynamique temporelle des fluides. Dans ce cadre, nous avons élaboré et examiné trois scénarios distincts.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

niveaux. Le nord du bassin demeure relativement stable, confirmant que l'impact principal se concentre dans les secteurs les plus sollicités par le pompage.

Scénario 2 :

Ce scénario vise à évaluer la capacité de régénération naturelle de l'aquifère sur une période de dix ans (2024-2034) dans des conditions de cessation totale des prélèvements. La recharge est simulée à partir d'un apport annuel moyen de 10 mm, calculé à l'aide de la méthode du bilan hydrique de Thornthwaite, qui intègre les paramètres climatiques locaux pour estimer l'infiltration effective (Fig. 60).

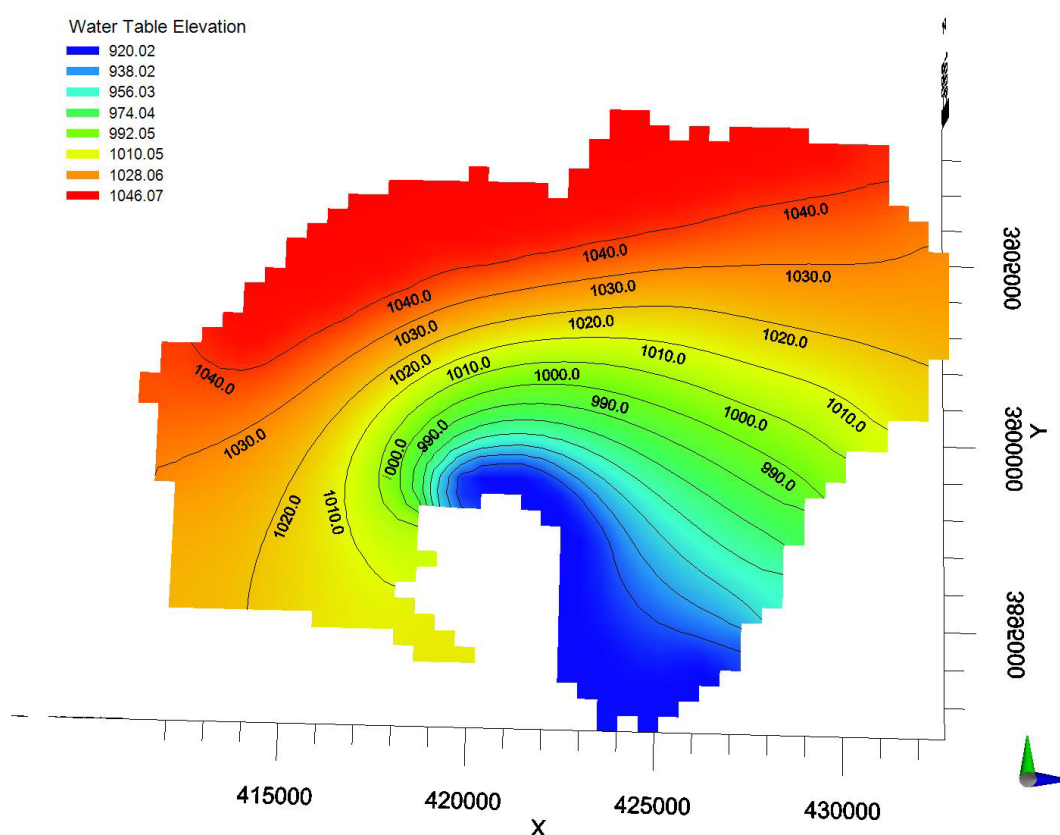


Figure 57 : simulation hydrogéologique sans pompage avec une recharge de 10 mm/an – prévu à l'horizon 2034 (Ramdani, 2025).

Le second scénario (Fig. 60) montre qu'au cours des dix dernières années, les précipitations ont entraîné une hausse du niveau piézométrique de 0.75 à 1.06 m dans la partie nord et nord-est, et de 0.146 à 0.6 m dans les zones centrale. Ces résultats confirment que, bien que l'aquifère réagisse à la recharge naturelle, cette réponse demeure très faible et insuffisante pour compenser les déficits générés par l'exploitation actuelle. Cette faible réactivité s'explique par plusieurs facteurs : un milieu probablement à faible transmissivité ou présentant une forte épaisseur, la

RESULTATS ET DISCUSSIONS

forte exploitation des forages, ainsi que la nature des formations géologiques qui limite l'infiltration et la redistribution des eaux souterraines.

Scénario 3 :

Ce troisième scénario propose une stratégie active de gestion des eaux souterraines fondée sur la recharge artificielle. Il prévoit d'exploiter les carrières abandonnées de la région comme bassins d'infiltration afin d'augmenter la recharge locale de la nappe.



Figure 58 : Ancienne carrière de sable de T'noukla (Rouabhia, 2006).

RESULTATS ET DISCUSSIONS

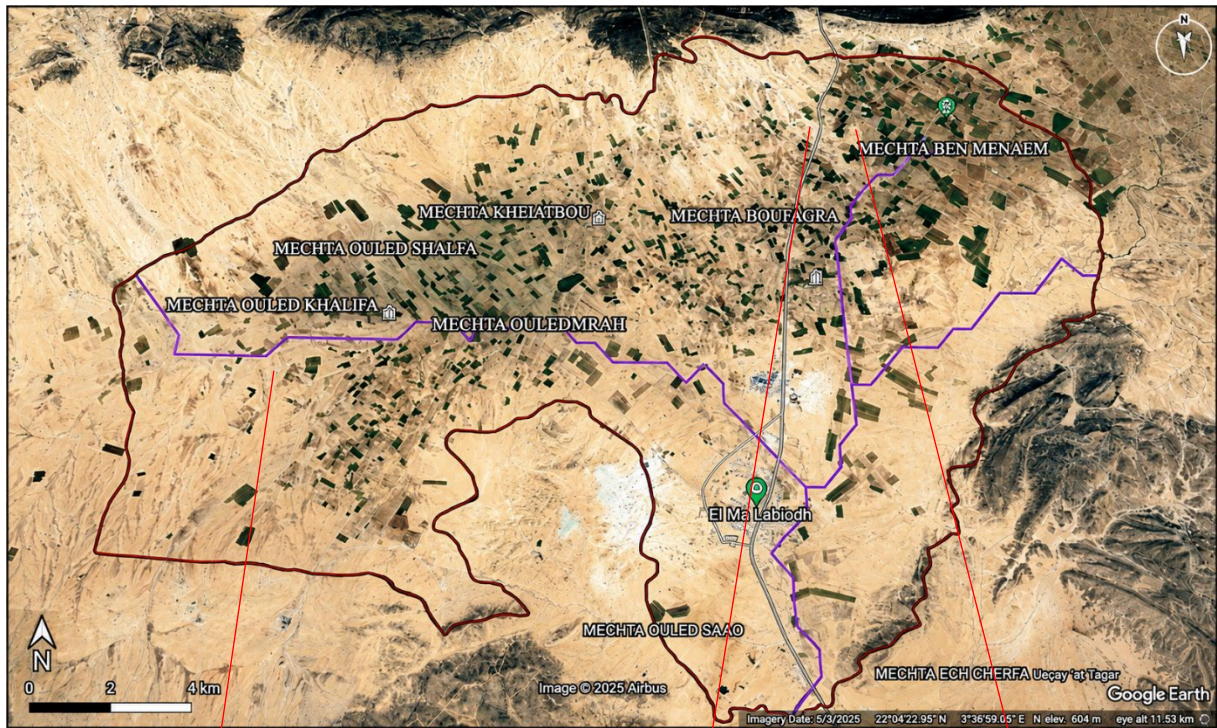


Figure 59 : carrières de sable abandonnée dans la région d'El Malabiod (Ramdani, 2025).

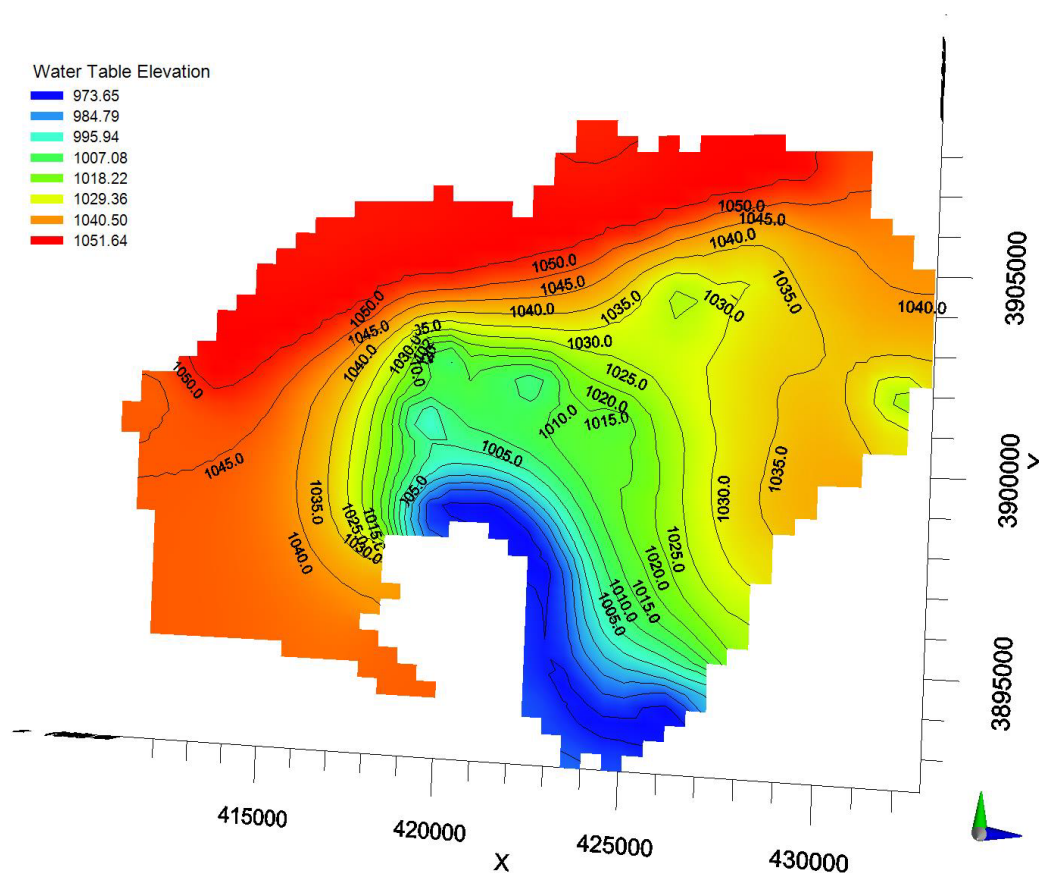


Figure 60 : effet de la recharge artificielle (2024-2034) (Ramdani, 2025).

Le troisième scénario (Fig. 63) de recharge artificielle a entraîné la formation d'un dôme piézométrique sur le site choisi, indiquant une nette remontée de la nappe. Sur dix ans, la hausse locale a été de 21 à 54 m, soit un apport annuel estimé entre 2.1 et 5.4 m.

2 Analyse de la subsidence par interférométrie radar (InSAR)

L'analyse InSAR vise à quantifier et cartographier les déformations du sol (subsidence) dans la région d'El Malabiod afin d'identifier les zones affectées par la surexploitation de la nappe miocène. L'analyse InSAR a été effectuée à partir de deux images radar Sentinel-1 acquises respectivement le 29 octobre 2014 et le 3 janvier 2025. Les images utilisées sont de type SLC (Single Look Complex), permettant d'exploiter la phase du signal pour détecter les déformations du sol. Ces deux acquisitions, couvrant une période d'environ dix ans, ont servi à générer un interférogramme destiné à analyser l'évolution de la subsidence dans le bassin d'El Malabiod.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Les traitements réalisés à partir de ces deux images ont permis d'obtenir une carte de déplacement cumulé du sol entre 2014 et 2025. Les résultats révèlent des variations significatives de la surface terrestre, indiquant la présence de zones de subsidence localisées dans le bassin d'El Malabiod. Ces déformations, exprimées en millimètres, traduisent principalement l'impact de la surexploitation de la nappe miocène sur la stabilité du sol.

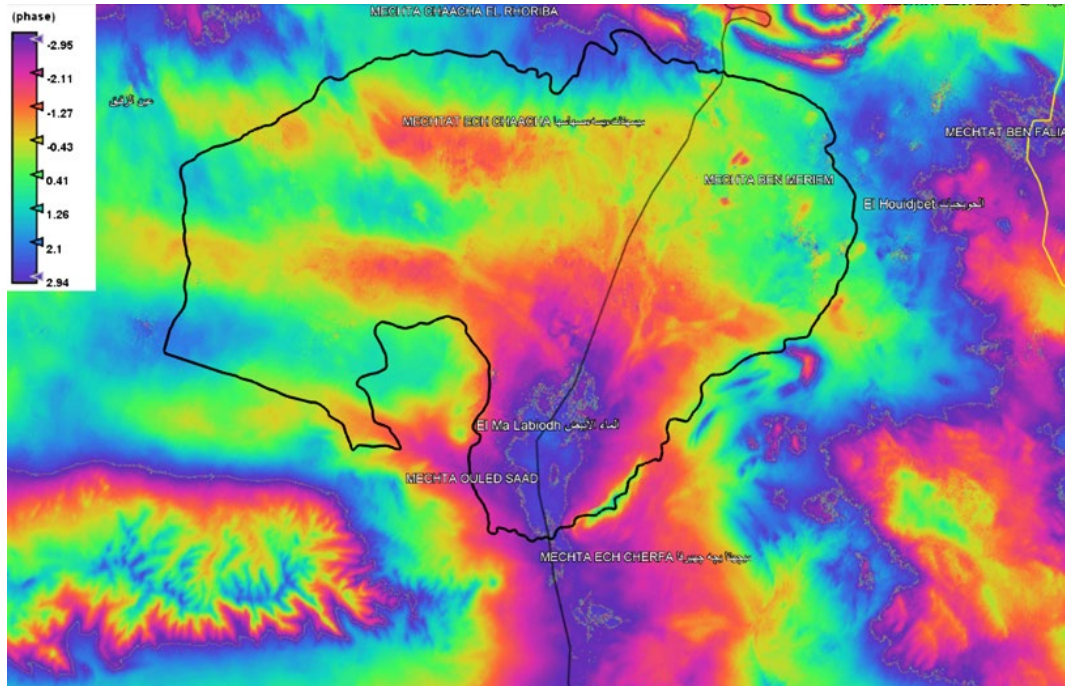


Figure 61 : Carte des déplacements de l'aquifère miocène (2014-2015), résultat InSAR (Ramdani, 2025).

RESULTATS ET DISCUSSIONS

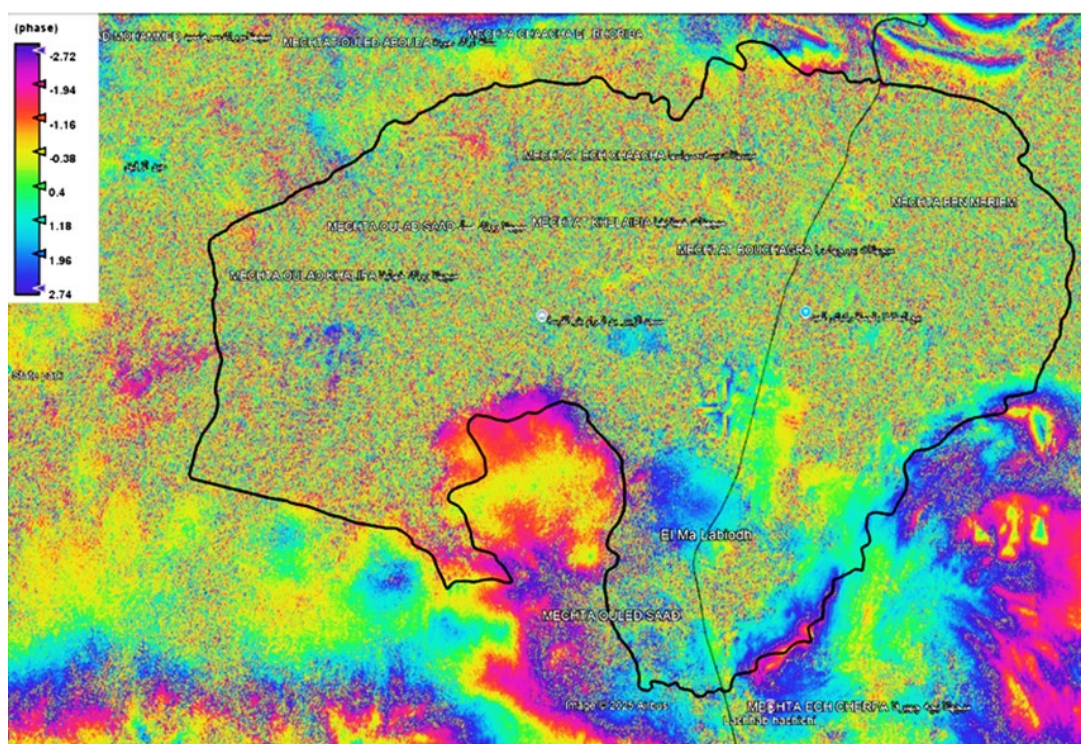


Figure 62 : Carte des déplacements de l'aquifère du Miocène (2024-2025), résultat InSAR (Ramdani, 2025).

Les cartes interférométriques obtenues pour les périodes 2014–2015 et 2024–2025 mettent en évidence une évolution notable des déformations du sol dans le bassin d’El Malabiod.

Sur la carte de 2014–2015, les variations de phase restent globalement modérées, avec des valeurs comprises entre $-2,95$ et $+1,26$ radians. Les anomalies négatives (en bleu et violet), concentrées dans la partie centrale et sud du bassin, traduisent déjà une subsidence débutante. Ces déformations coïncident avec les zones de forte densité de forages destinés à l'exploitation de la nappe miocène, indiquant que la surexploitation des eaux souterraines est déjà un facteur déclencheur du tassement du sol. La carte de 2024–2025 montre une accentuation claire de la subsidence, avec des valeurs atteignant $-2,72$ radians. La zone d'affaissement s'est étendue vers le centre et le sud du bassin, où les franges de phase sont plus denses et continues, traduisant une accélération du mouvement vertical négatif.

Cette intensification est étroitement liée à l'expansion de l'irrigation agricole observée dans la région. Les images Google Earth de 2010 et 2024 montrent une augmentation significative des surfaces cultivées, en particulier sous irrigation, entraînant une hausse importante du pompage des eaux souterraines. Cette pression hydrique accentue la compaction des formations argilo-

RESULTATS ET DISCUSSIONS

marneuses miocènes, provoquant un affaissement progressif et irréversible du sol. Ainsi, la corrélation spatiale et temporelle entre la subsidence détectée par InSAR, la baisse piézométrique observée et l'expansion des zones irriguées confirme que la cause principale du phénomène réside dans la surexploitation anthropique des ressources en eau à des fins agricoles.

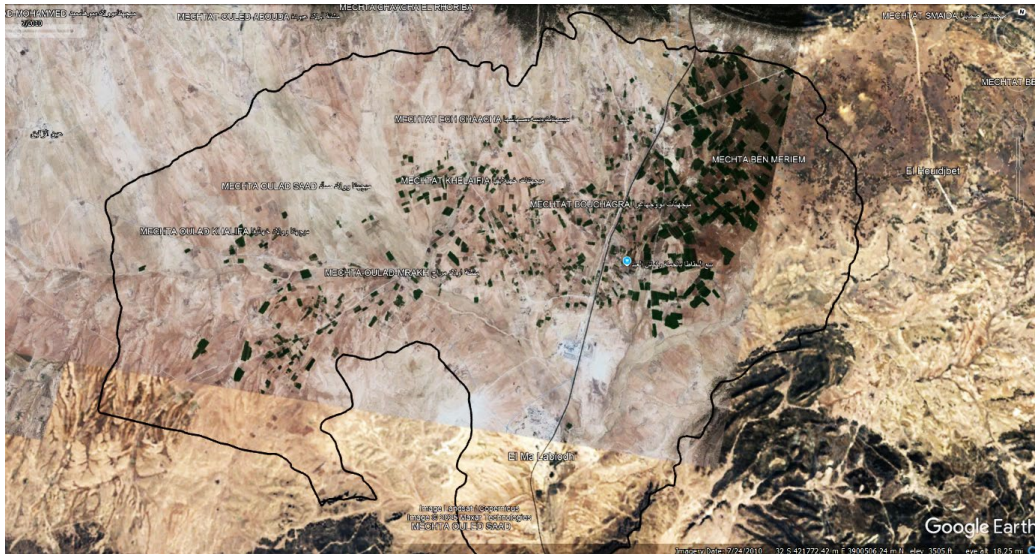


Figure 63 : Image Google Earth (2010), zones irriguées limitées avant l'intensification agricole (Ramdani, 2025).

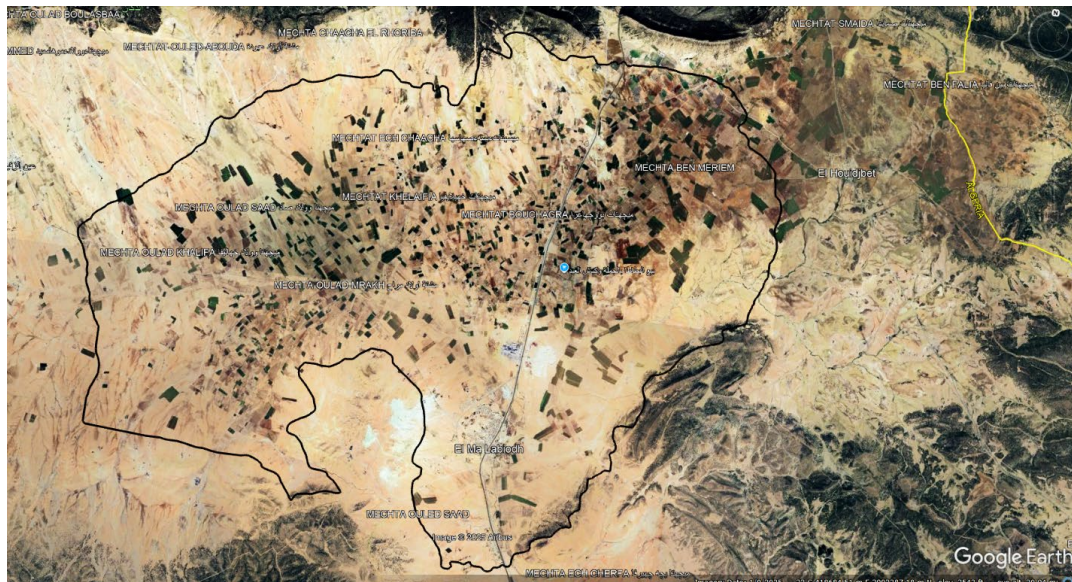


Figure 64 : Image Google Earth (2024), extension marquée des zones irriguées (Ramdani, 2025).

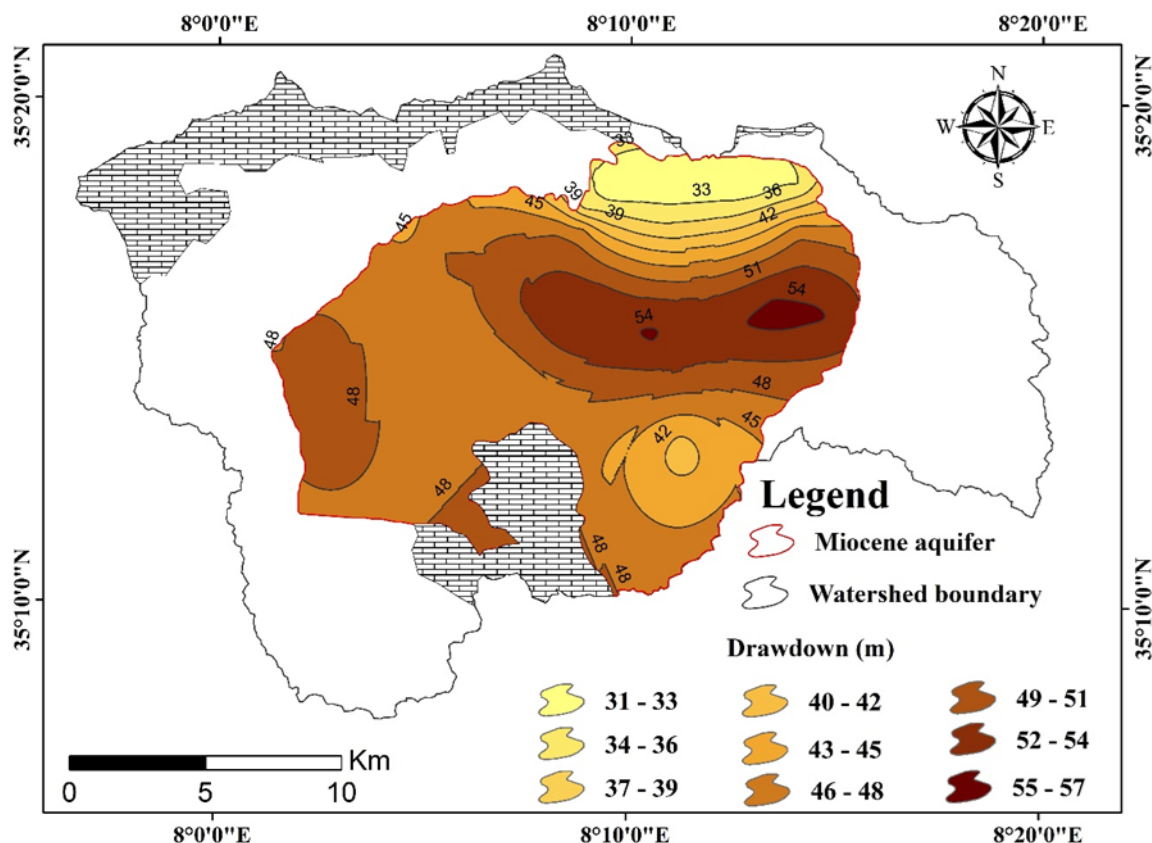


Figure 65 : Carte de rabattement de l'aquifère miocène entre 2001 et 2024 (Ramdani, 2025).

L'analyse des données (2010-2024) montre que la chute du niveau des eaux souterraines et l'affaissement du sol (subsidence mesurée par InSAR) coïncident spatialement. Cette corrélation met en lumière l'impact de la surexploitation de la nappe, due à l'expansion de l'irrigation autour d'El Malabiod. La pression accrue des pompes provoque une baisse locale de la nappe, qui compacte les formations argileuses sous-jacentes et cause ainsi la subsidence observée en surface.

3 Modélisation hydrogéochimique (PHREEQC) pour valider la compatibilité d'un mélange des eaux avec la recharge de l'aquifère

3.1 Introduction

Cette partie présente les résultats de la modélisation hydrogéochimique (PHREEQC) visant à évaluer la faisabilité du mélange des eaux et à identifier les processus chimiques contrôlant la composition des eaux souterraines et de surface du bassin d'El Malabiod.

3.2 Faciès chimique des eaux selon les études antérieures

La composition chimique des eaux souterraines est cruciale pour élucider les processus géochimiques qui contrôlent leur minéralisation. Les recherches menées antérieurement dans la région d'El Malabiod, notamment par Samoun (2021), Rouabhia (2006) et Djebari (2011), ont établi la prédominance d'un faciès bicarbonaté calcique (Ca-HCO_3). Cette signature chimique est interprétée comme le résultat d'une recharge directe et active par l'infiltration des eaux météoriques, un phénomène particulièrement observable dans le nord-est du bassin où les formations sableuses du Miocène affleurent.

Les investigations hydrochimiques réalisées pour cette étude viennent confirmer cette tendance générale, tout en mettant en évidence une évolution spatiale des faciès. Cette évolution est corrélée à la nature des roches en place et à la dynamique de l'écoulement souterrain. Ainsi, une distinction nette apparaît :

- Les eaux de surface, principalement prélevées dans les oueds El Malabiod et El Goussa, sont dominées par un faciès chloruré calcique (Fig. 70). Cette composition semble liée aux apports par ruissellement et à l'influence des terrains marneux et argileux du bassin versant.
- Les eaux souterraines proprement dites présentent une hétérogénéité chimique plus prononcée, avec des faciès variants entre chlorurés (Ca-Cl / Mg-Cl) et sulfatés calciques (Ca-SO_4) (Fig. 69). Cette variabilité reflète des degrés de minéralisation distincts et des interactions eau-roche différenciées.
- Les eaux de source affichent majoritairement un faciès bicarbonaté calcique.

La variation de la composition chimique des eaux est directement contrôlée par la géologie locale. Les calcaires produisent des eaux bicarbonatées calciques, tandis que les marnes et argiles triasiques génèrent, par lessivage et évaporation, des faciès chlorurés et sulfatés. La direction d'écoulement des eaux souterraines, du nord vers le sud, concentre les sels dissous dans la plaine centrale, y accumulant les faciès les plus minéralisés.

Ainsi, la minéralisation des eaux évolue le long de leur parcours, sous l'effet combiné de la géologie, de l'hydrodynamisme et du climat. Une modélisation géochimique (avec PHREEQC) sera utilisée pour quantifier les processus de dissolution, précipitation et échanges ioniques responsables de cette évolution.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

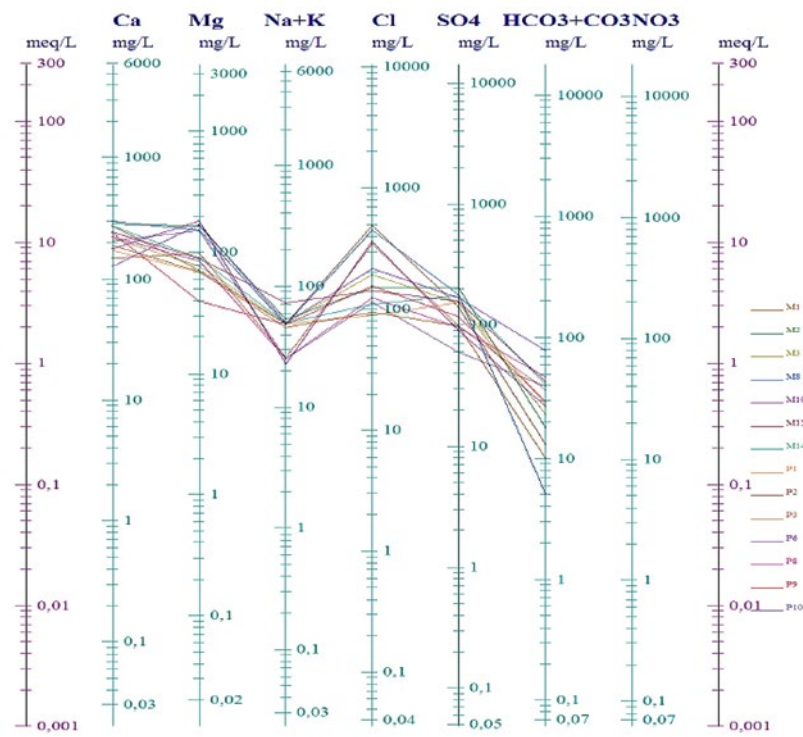


Figure 66 : Représentation des analyses chimiques des eaux souterraines selon le diagramme Schoeller-Berkaloff/Bassin d'El Malabiod (Djebari, 2011).

RESULTATS ET DISCUSSIONS

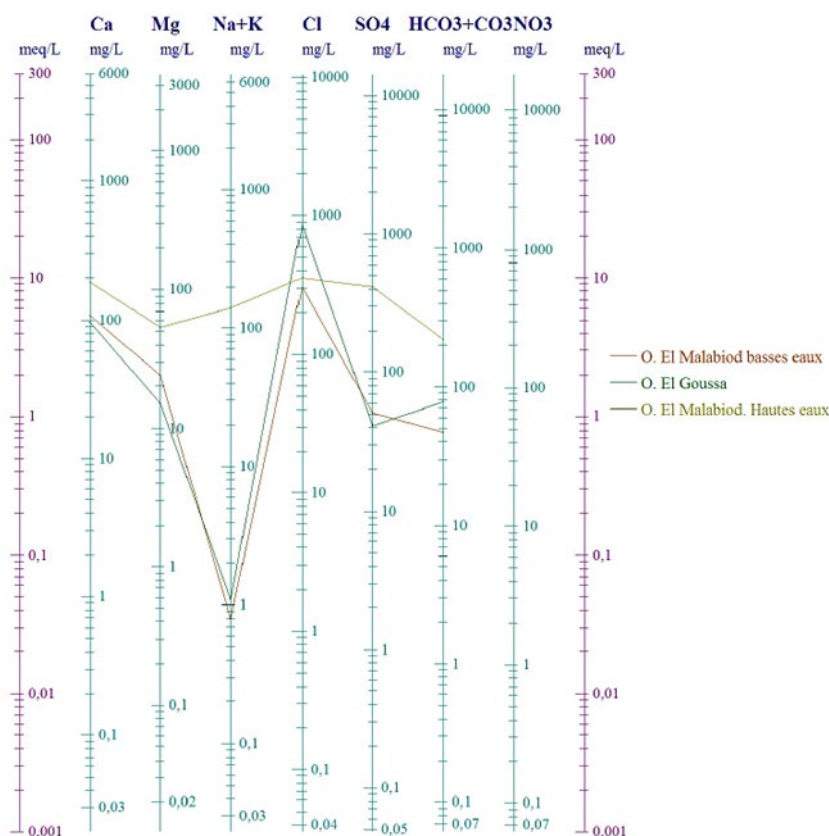


Figure 67 : Représentation des analyses chimiques des eaux de surfaces selon le diagramme de Schoeller-Berkaloff/Bassin d'El Malabiod (Djebari, 2011).

3.3 Analyse et interprétation des données

Trois échantillons d'eau ont été collectés pour les essais de mélange (Mars 2024) : deux échantillons d'eau de surface prélevés respectivement dans l'oued Goussa et l'oued El Malabiod, et un échantillon d'eau souterraine provenant d'un forage exploitant la nappe miocène. Des mélanges ont ensuite été réalisés selon différents ratios eau de surface/eau souterraine afin d'évaluer leur compatibilité hydrochimique et de déterminer le ratio optimal en vue de la mise en œuvre d'une recharge artificielle de l'aquifère.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Tableau 19: Caractérisation physico-chimique des eaux du bassin d'El Malabiod.

Eaux de surface								
Oued	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Hco ₃ ³⁻	Cl ⁻	So ₄ ²⁻
El Goussa	7.77	22.44	8.28	3.7	2.2	62.22	17.04	55
El Malabiod	8.16	220	6.08	130	17.5	310	195.96	232
Eaux souterraines								
Forage P24	7.48	102	2	57	2.5	244	144.84	132

Tableau 20: Résultats des Simulations de Mélange (Eaux Souterraines / Eaux de Surface).

Paramètre/ Échantillon	Unité	Eau de forage	Oued el Malabiod	Oued el Goussa	Mélange 90% 10%	Mélange 70% 30%	Mélange 80% 20%
Concentrations (mg/L)							
Ca ²⁺	mg/L	102.00	220.00	22.44	113.80	137.40	85.49
Mg ²⁺	mg/L	2.00	6.08	8.28	2.41	3.22	3.06
Na ⁺	mg/L	57.00	130.00	3.70	64.30	78.90	46.54
K ⁺	mg/L	2.50	17.50	2.20	4.00	7.00	2.48
Hco ₃ ³⁻	mg/L	244.00	310.00	62.22	250.60	263.80	205.24
Cl ⁻	mg/L	144.84	195.96	17.04	150.56	160.20	118.70
So ₄ ²⁻	mg/L	132.00	232.00	55.00	142.00	162.00	115.60
Paramètres calculés							
CE	Us/cm	2500	980	146.7	2348	2104	2031
pH	/	7.48	8.16	7.77	7.56	7.68	7.53

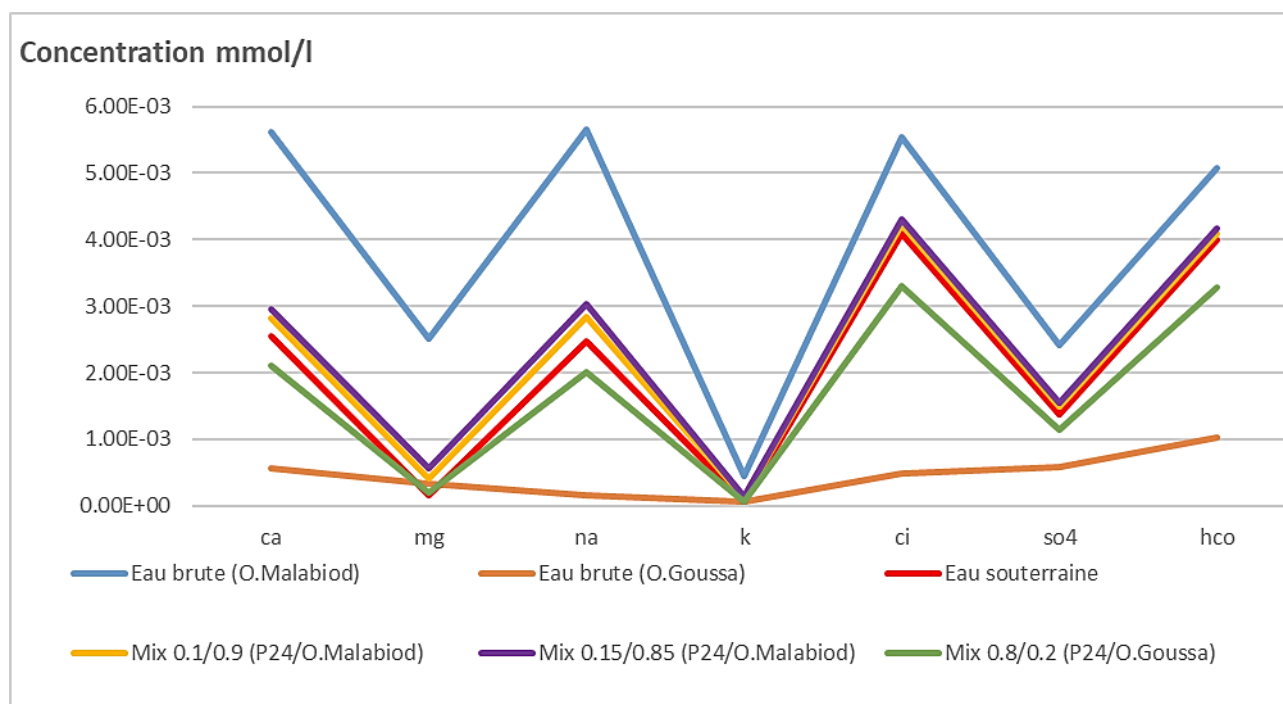


Figure 68 : Concentrations molaires des ions dans les eaux et leurs mélanges (Ramdani, 2025).

3.4 Interprétation et analyse des résultats

3.4.1 Minéralisation (Conductivité Électrique)

- La CE estimée des mélanges est dominée par l'eau de forage (M), fortement minéralisée (2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$).
- Mélange Eau souterraine /O. Malabiod (90/10) : La CE reste très élevée (2348 $\mu\text{S}/\text{cm}$), proche de celle du forage pur.
- Mélange Eau souterraine /O. Malabiod (70/30) : L'apport d'une plus grande proportion d'eau de surface moins minéralisée fait baisser la CE (2104 $\mu\text{S}/\text{cm}$).
- Mélange Eau souterraine /O. Goussa (80/20) : L'utilisation de l'eau d'El Goussa, très peu minéralisée, entraîne une baisse plus significative de la CE (2031 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

3.4.2 Évolution Chimique

3.4.2.1 Cations

La composition cationique des mélanges est un compromis entre les eaux mères.

- Pour les mélanges avec El Malabiod, on observe une augmentation du Calcium et du Sodium par rapport au forage pur, reflétant la forte teneur de l'oued en ces éléments.
- Pour le mélange avec El Goussa, la teneur en Calcium du mélange est plus faible que celle du forage, car cet oued en contient peu.

3.4.2.2 Anions

- Les mélanges avec El Malabiod voient leur teneur en Bicarbonates (HCO_3^-), Chlorures (Cl^-) et Sulfates (SO_4^{2-}) augmenter.
- Le mélange avec Oued El Goussa voit sa teneur en Bicarbonates et Chlorures diminuer par rapport au forage, mais reste dominé par la signature anionique de l'eau souterraine.

3.4.2.3 Potentiel de Précipitation/Dissolution (Indices de Saturation - SI)

- Calcite (CaCO_3) : L'eau de forage (M) est probablement proche de l'équilibre avec la calcite. Le mélange avec des eaux de surface plus basiques (pH plus élevé) pourrait conduire à un $\text{SI} > 0$, indiquant un risque de précipitation de calcite (entartrage).
- Gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) : Toutes les eaux et leurs mélanges sont fortement sous-saturés ($\text{SI} \ll 0$), indiquant que le gypse continuera à se dissoudre s'il est présent dans la roche.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

- Halite (NaCl) : Toutes les eaux sont extrêmement sous-saturées par rapport à l'halite ($SI \ll 0$). Aucun risque de précipitation.

4 Synthèse sur la faisabilité de la recharge par mélange des eaux

Les essais de mélange montrent que la dilution de l'eau souterraine minéralisée par les eaux de surface permet d'en améliorer la qualité, mais avec des efficacités variables selon l'oued et le ratio utilisé :

- L'Oued Goussa apparaît comme la ressource la plus adaptée à une opération de recharge. Un mélange à 80 % d'eau souterraine pour 20 % d'Oued el Goussa (Mix 0.8/0.2 M/Goussa) entraîne une diminution très nette de la concentration de tous les ions, ce qui se traduirait par une conductivité électrique significativement réduite. Ce mélange présente un risque géochimique limité et une compatibilité probable avec l'aquifère.
- L'Oued Malabiod, déjà minéralisé, a un pouvoir diluant limité. Les mélanges testés (0.1/0.9 et 0.15/0.85) n'entraînent qu'une baisse modérée de la minéralisation globale. Plus encore, ils modifient la signature ionique de l'eau en augmentant notablement les teneurs en Na^+ et SO_4^{2-} , ce qui pourrait poser un risque de colmatage géochimique ou de dégradation de la qualité de la nappe.

La recharge par les eaux de l'Oued Goussa est envisageable et prometteuse, sous réserve d'une étude complémentaire sur les interactions sol-eau. À l'inverse, l'utilisation de l'Oued Malabiod semble peu recommandable en l'état, en raison de son efficacité limitée et des risques d'évolution chimique défavorable.

5 Modélisation hydrologique des risques d'inondation : Approche SIG-AHP et analyse morphométrique appliquée au bassin d'El Malabiod

5.1 Facteurs de susceptibilité aux inondations dans le bassin d'El Malabiod

L'application de la méthode AHP (Processus d'Analyse Hiérarchique) à l'étude du risque inondation dans le bassin d'El Malabiod repose sur l'analyse de critères spécifiques. Ces derniers, directement issus de la morphologie et des caractéristiques physiques du territoire, influencent directement la genèse et la sévérité des crues. L'analyse a ainsi croisé des données relatives à la densité de drainage, aux pentes, à l'altitude, à l'occupation du sol et à la texture des sols.

5.1.1 Densité de drainage

La densité du réseau hydrographique est un paramètre fondamental dans l'analyse du risque inondation. Une densité élevée tend en effet à accroître les débits de pointe, ce qui se traduit par une probabilité plus forte de crues. Dans le cadre de la cartographie des aléas, la méthode de Dash et Sar (2020) a permis de synthétiser l'influence de l'altitude et de la densité de drainage via le concept de capacité de drainage. Concrètement, la carte de densité de notre zone d'étude (Fig. 72) a été produite sous ArcGIS 10.8 en utilisant l'outil « Line Density », qui quantifie la longueur totale des cours d'eau par unité de surface. Ce paramètre est d'autant plus crucial que l'intensité des crues est corrélée positivement à la densité du réseau.

5.1.2 Pente

La pente est un facteur clé de l'aléa inondation, puisqu'elle contrôle l'écoulement et le drainage des eaux. Son impact est double : elle détermine la vitesse et le volume du ruissellement de surface, ainsi que la part des précipitations qui s'infiltre. La carte des pentes (Fig. 73), dérivée du MNE sous ArcGIS 10.8, indique pour la zone d'étude des valeurs de 0 % à 49 %. Les plus fortes susceptibilités aux inondations concernent les pentes inférieures à 2 % (plaines et lits de rivières), tandis que les pentes supérieures à 16 % (reliefs vallonnés) y sont moins exposées.

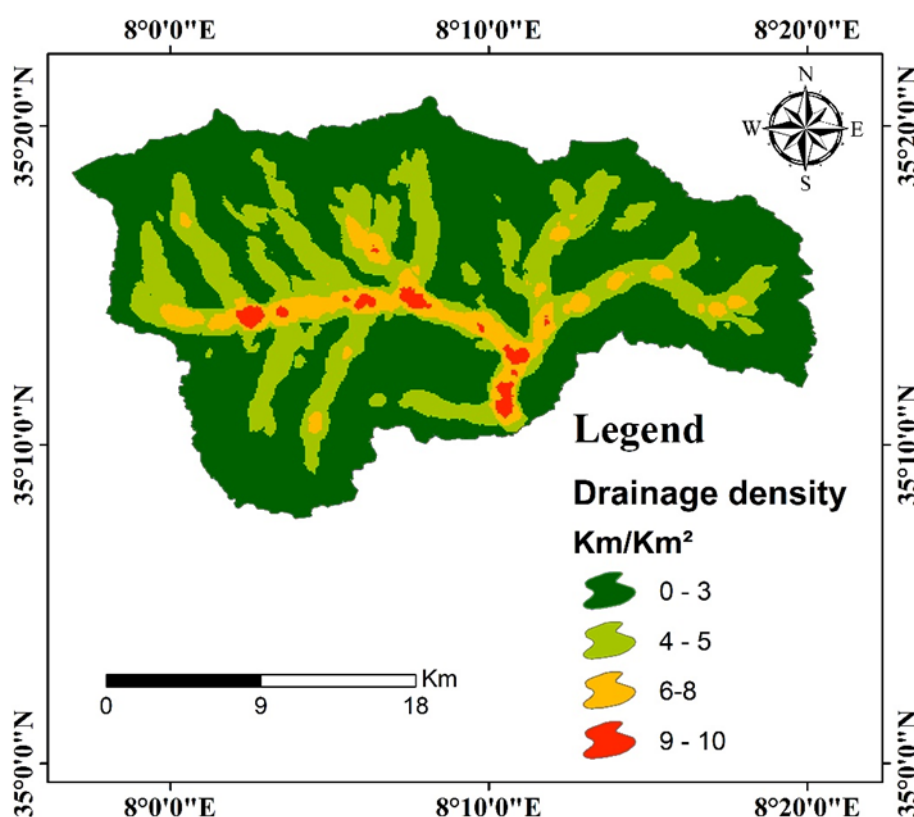


Figure 69 : Carte de la densité de drainage du bassin versant d'El Malabiod (Ramdani, 2025).

RESULTATS ET DISCUSSIONS

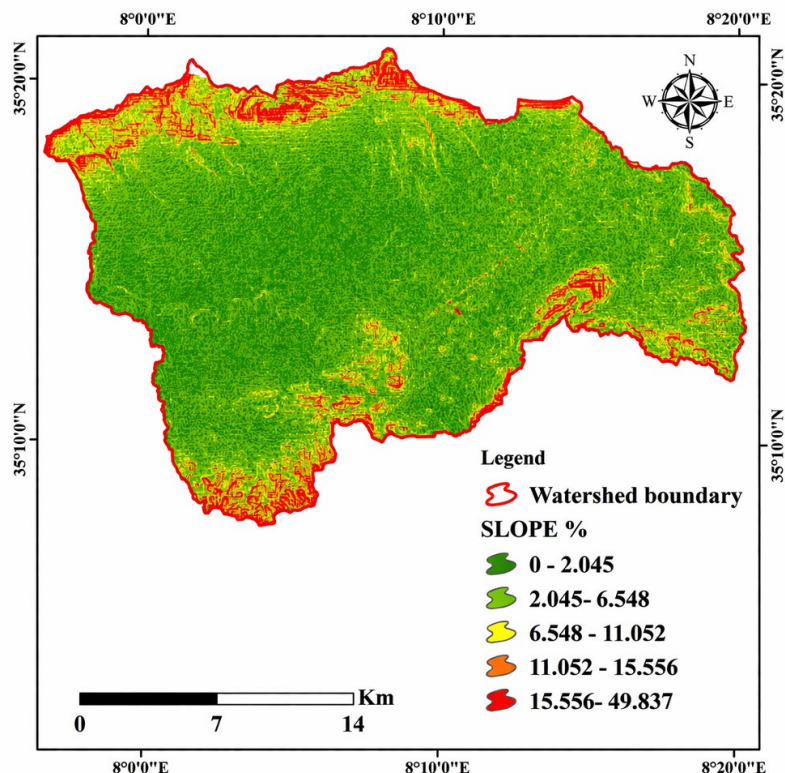


Figure 70 : Carte des pentes du bassin d'El Malabiod (Ramdani, 2025).

5.1.3 Élévation

La dynamique d'écoulement naturel de l'eau, qui suit la gravité des hauteurs vers les dépressions, expose davantage les zones topographiquement basses aux risques d'inondation. Le bassin versant étudié présente un dénivelé important, avec des altitudes s'échelonnant entre 1001 et 1705 mètres. Les secteurs amont, constitués par les reliefs des monts Doukane et Boudjllel, dominent le paysage, tandis que le bassin d'El Malabiod occupe la partie la plus basse de ce système. La combinaison de fortes pentes et de hautes altitudes en amont favorise un ruissellement intense et rapide lors des précipitations, concentrant les écoulements vers l'aval. La carte altimétrique (Fig. 74) a été générée à partir d'un Modèle Numérique d'Élévation (MNE) de 30 mètres de résolution, librement téléchargé sur la plateforme USGS Earth Explorer.

L'ensemble des traitements cartographiques, incluant les analyses de télédétection et les traitements réalisés sous SIG, a été effectué dans le système de projection UTM (Universal Transverse Mercator), zone 32 Nord, afin d'assurer l'homogénéité spatiale des données et la précision des analyses.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

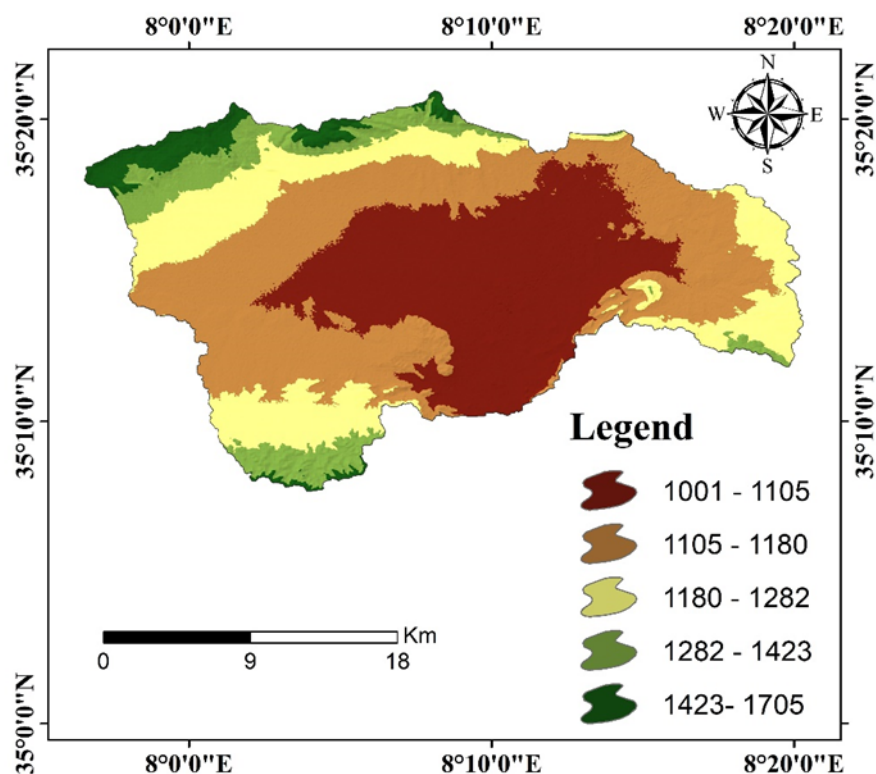


Figure 71 : Carte altimétrique du bassin versant d'El Malabiod (Ramdani, 2025).

5.1.4 Texture du sol

Le comportement hydrologique d'un bassin est fortement tributaire de la structure de ses sols. Leurs propriétés, notamment la porosité et la perméabilité, conditionnent la capacité d'infiltration [Ullah et Zhang, 2020]. On observe qu'une lithologie perméable (sables, conglomérats) favorise la percolation et réduit les risques, tandis qu'une couverture imperméable (marnes, argiles, gypse) intensifie le ruissellement et les inondations. La répartition de ces types de sols a été cartographiée à partir des données de l'ISRIC (base de données mondiale), en utilisant les teneurs en sable, limon et argile fournies par l'Africa Soil Profiles Database pour une tranche de 100-200 cm de profondeur.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

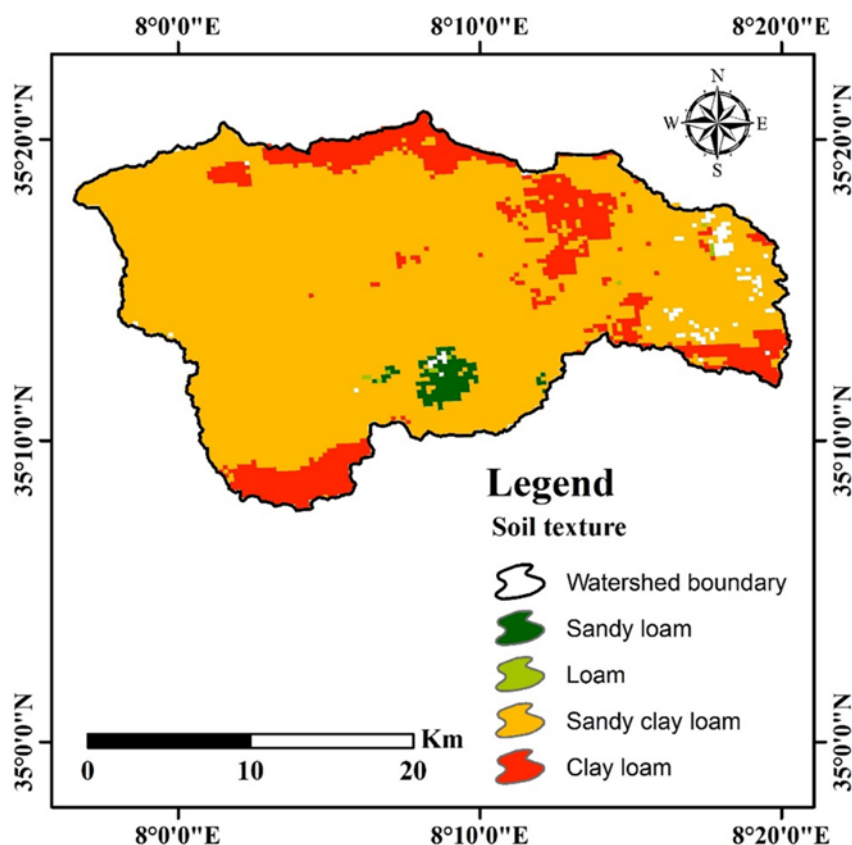


Figure 72 : Carte de la texture du sol du bassin versant d'El Malabiod (Ramdani, 2025).

5.1.5 Occupation du sol

L'occupation du sol est un facteur déterminant du risque inondation, car elle influence directement les processus hydrologiques comme le ruissellement et l'évapotranspiration [Alexakis et al., 2014]. Sa composition incluant zones bâties, surfaces agricoles, couvert forestier, sols nus et réseaux hydrographiques [Al-Shabeeb, 2016] module la réponse du bassin aux précipitations. En outre, les transformations de l'occupation du sol dans le temps peuvent en aggraver significativement la fréquence [Dahri et Abida, 2020]. Les données utilisées, issues de l'USGS avec une précision de 10 mètres, catégorisent le territoire en parcours, terres nues, forêts, eau, cultures et zones urbanisées (Fig. 76).

RESULTATS ET DISCUSSIONS

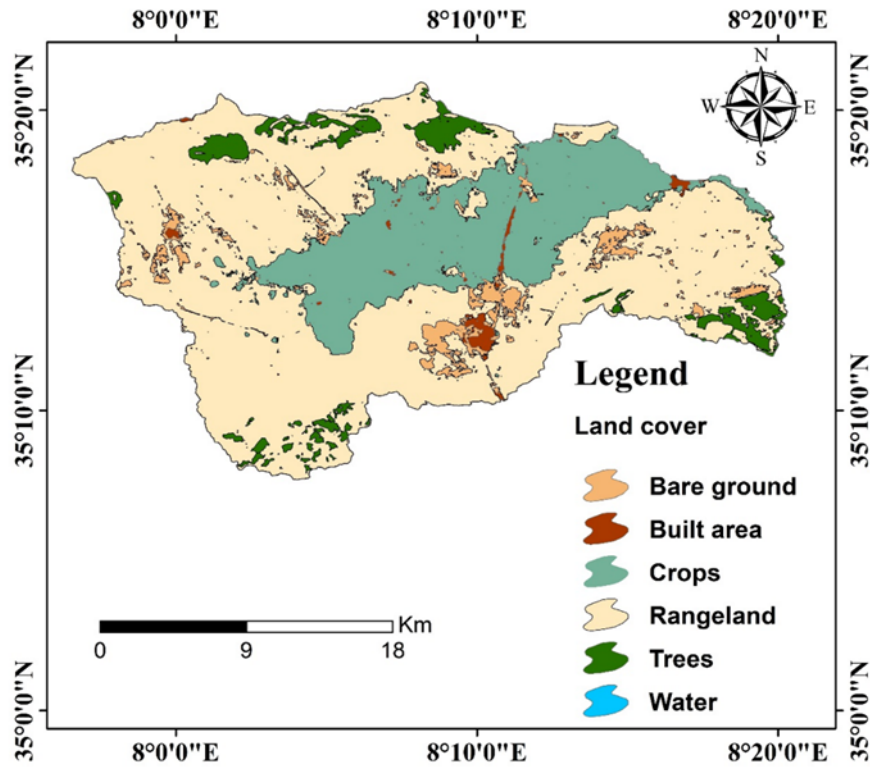


Figure 73 : Carte de l'utilisation des sols et de la couverture végétale du bassin versant d'El Malabiod (Ramdani, 2025).

5.2 Processus analytique hiérarchique (AHP)

5.2.1 Matrice de comparaison par paires

L'étape de comparaison par paires est au cœur de la méthode AHP. Pour les critères sélectionnés, une matrice a été établie où chaque élément a reçu un poids selon l'échelle de Saaty, sur la base de l'expertise mobilisée. L'exploitation de cette matrice a fourni les poids factoriels, les poids des classes et a permis le calcul du taux de cohérence (CR), ce dernier étant obtenu par une formule dédiée afin de garantir la fiabilité des résultats.

Tableau 21: Matrice de comparaison par paires des critères contribuant aux inondations.

Critère/critère	Densité de drainage	Pente	Elévation	Texture du sol	Occupation du sol
Densité de drainage	1	1	2	4	4
Pente	1	1	1	3	4
Elévation	1/2	1	1	2	2
Texture du sol	1/4	1/3	1/2	1	1
Occupation du sol	1/4	1/4	1/2	1	1

RESULTATS ET DISCUSSIONS

5.2.2 Matrice de comparaison par paires normalisée

La normalisation de la matrice de comparaison par paires s'effectue en deux étapes : calculer les totaux de chaque colonne, puis diviser chaque valeur par le total de sa colonne correspondante.

Tableau 22: Matrice de comparaison par paires normalisée des critères contribuant aux inondations.

Critère	Occupation du sol	Elévation	Texture du sol	Densité de drainage	Pente
Occupation du sol	0.023	0.027	0.040	0.017	0.016
Elévation	0.057	0.068	0.090	0.038	0.033
Texture du sol	0.026	0.031	0.041	0.018	0.016
Densité de drainage	0.195	0.232	0.308	0.130	0.113
Pente	0.165	0.197	0.262	0.111	0.096

5.2.3 Vecteur de priorité

Le calcul du vecteur de priorité consiste à déterminer la moyenne arithmétique des valeurs de chaque ligne de la matrice normalisée. Le résultat obtenu représente un vecteur de pondérations relatives quantifiant la priorité attribuée à chaque élément de la matrice.

Tableau 23: Vecteur de priorité des critères contribuant à la susceptibilité aux inondations.

Critère	Vecteur de priorité
Densité de drainage	0.3415
Pente	0.2843
Elévation	0.1989
Texture du sol	0.0901
Occupation du sol	0.0854

5.2.4 Vérification de cohérence

Pour vérifier la cohérence des résultats, on utilise couramment la règle de transitivité. Celle-ci implique le calcul de la valeur $\lambda_{\max}$ grâce à l'expression suivante :

RESULTATS ET DISCUSSIONS

$$\lambda_{\max} = \frac{\sum (A_i \times W_i)}{n}$$

Où :

- A_i est la somme pondérée des colonnes de la matrice de comparaison,
- W_i représente le vecteur de priorité,
- n est le nombre de critères considérés.

Ensuite on calcule :

$$CI = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n - 1)}$$

Où CI est l'indice de cohérence

Enfin, le taux de cohérence

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

Où RI est l'indice aléatoire, dont les valeurs standards selon Saaty (1980)

n	1	2	3	4	5	6	7
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32

Le modèle est jugé cohérent lorsque le rapport de cohérence $CR < 0.10$ (10%).

1- Matrice de comparaison par paires utilisée (A)

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 & 4 & 4 \\ 1 & 1 & 1 & 3 & 4 \\ 1/2 & 1 & 1 & 2 & 2 \\ 1/4 & 1/3 & 1/2 & 1 & 1 \\ 1/4 & 1/4 & 1/2 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

2- Vecteur de priorité (W) moyenne des lignes de la matrice normalisée

$$W = \begin{bmatrix} 0,3415 \\ 0,2843 \\ 0,1989 \\ 0,0901 \\ 0,0854 \end{bmatrix}$$

3- 3) Calculs intermédiaires

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Calcul de A . W :

$$A.W \approx \begin{bmatrix} 1.7256 \\ 1.4366 \\ 1.00495 \\ 0.45509 \\ 0.43140 \end{bmatrix}$$

Calcul des valeurs $\lambda_i = \frac{(A.W)_i}{wi}$

$$\lambda_i \approx \begin{bmatrix} 5.05300146 \\ 5.05311291 \\ 5.05253896 \\ 5.05096189 \\ 5.05152225 \end{bmatrix}$$

- Valeur propre moyenne (valeur propre principale) :

$$\lambda_{\max} = \text{moyenne}(\lambda_i) \approx 5,05222750$$

4- Indice de cohérence CI

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1} = \frac{5,05222750 - 5}{4} \approx 0,0130569$$

5- Indice aléatoire (RI) et Ratio de consistance (CR)

Pour n=5 : RI= 1.12 (valeur standard de Saaty)

$$CR = \frac{CI}{RI} \approx \frac{0,0130569}{1.12} \approx 0,01166 \text{ (soit 1,17\%)}$$

Le CR < 0,10 (10 %) : la matrice est donc cohérente selon la règle de Saaty.

5.3 Pondération des facteurs de susceptibilité aux inondations

Cette partie expose les résultats de l'étude, obtenus grâce à la méthode de l'Analyse Hiérarchique Multi-critères (AHP). La carte de susceptibilité aux inondations présentée ci-après est le résultat de l'application de ces poids à chaque critère, comme détaillé dans le Tableau 24.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Tableau 24: Pondérations finales des facteurs.

Critère	Poids (%)
Elévation	20
Texture du sol	9
Pente	29
Occupation du sol	8
Densité de drainage	34

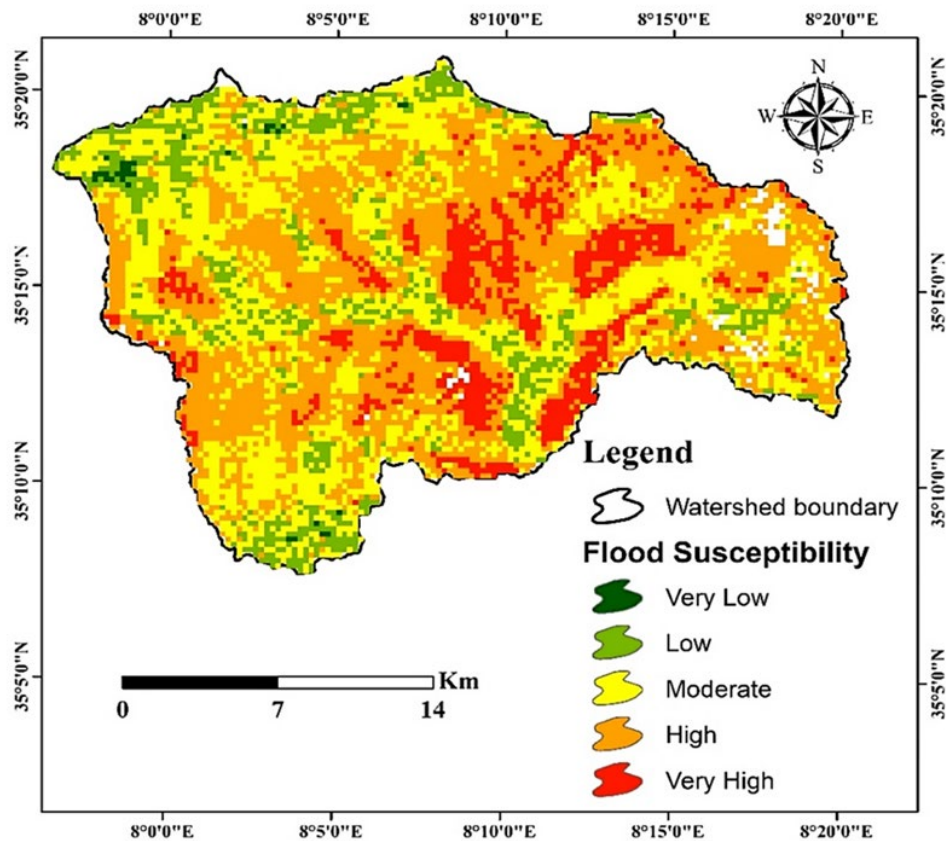


Figure 74 : Carte de susceptibilité aux inondations du bassin versant d'El Malabiod par la méthode AHP (Ramdani, 2025).

La figure 77 présente la carte de vulnérabilité établie selon la méthode AHP (Analyse Hiérarchique Multi-critères), classée en cinq niveaux : très faible, faible, moyen, élevé et très élevé. L'analyse révèle que le bassin présente une susceptibilité aux inondations pouvant atteindre des niveaux modérés à très élevés. Cette zone se caractérise par sa faible altitude, contrairement aux reliefs montagneux environnants qui constituent une barrière naturelle. Leur nature imperméable limite l'infiltration et accentue le ruissellement.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Parmi les facteurs étudiés, la densité du drainage est le paramètre le plus influent, suivi par la pente. L'altitude a un impact modéré, tandis que la texture des sols et l'occupation du sol s'avèrent les moins déterminants.

6 Évaluation de la susceptibilité aux aléas naturels basée sur la télédétection dans le bassin versant de Safsaf, nord-est de l'Algérie

Cette section présente et analyse les résultats issus du traitement des images satellitaires Landsat 8. En exploitant l'ensemble des 11 bandes spectrales disponibles, plusieurs indices clés tels que le NDVI, le NDBI, le MNDWI, le NDWI, le SAVI et le NBR ont été calculés à l'aide des outils d'ArcGIS. Ces indices ont été sélectionnés pour leur pertinence dans l'évaluation des caractéristiques environnementales et leur capacité à fournir des informations précieuses sur l'occupation du sol, les conditions du sol et les ressources en eau. Les résultats obtenus, combinés aux analyses géospatiales, permettent une étude détaillée des dynamiques observées et facilitent l'interprétation et la discussion des implications pratiques des données.

6.1 Résultats des indices spectraux

La Figure 75 illustre la distribution spatiale de la densité de la végétation et de la couverture en eau dans le bassin versant de Safsaf, sur la base des valeurs du NDVI.

Les zones présentant des valeurs de NDVI comprises entre $-0,1741$ et $-0,0095$, représentées en rouge, correspondent généralement à des plans d'eau ou à d'autres surfaces non végétalisées, telles que les zones bâties, les terrains nus ou les affleurements rocheux. Cette plage négative traduit une absence de végétation et une réponse spectrale forte typique des surfaces imperméables ou de l'eau libre. Les régions dont les valeurs de NDVI varient entre $-0,0095$ et $0,12334$ indiquent des zones faiblement végétalisées ou quasi nues. Ces espaces incluent le plus souvent des sols nus, des zones urbaines ou des surfaces à faible couverture végétale, souvent plus vulnérables à l'érosion et à la dégradation de surface.

Les zones en vert clair, avec des valeurs de NDVI comprises entre $0,12334$ et $0,25909$, traduisent une densité de végétation modérée. Elles sont susceptibles d'abriter des formations herbacées, arbustives ou de faible densité, caractérisant un état écologique de transition. Enfin, les régions dont le NDVI est compris entre $0,25909$ et $0,56235$ reflètent une végétation dense, correspondant à des forêts, champs agricoles ou à une flore naturelle bien développée. Ces zones sont moins exposées à l'érosion, la couverture végétale assurant une stabilisation du sol et une réduction du ruissellement de surface.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Cette distribution spatiale de la végétation, révélée par le NDVI, fournit des indications cruciales sur la dynamique hydrogéologique du bassin versant de Safsaf. Dans l'ensemble, la carte NDVI met en évidence un gradient de densité de végétation à l'échelle du bassin versant, fournissant des informations essentielles pour la gestion écologique et l'identification des zones nécessitant des actions de conservation ou d'atténuation des risques environnementaux.

En conclusion, la carte NDVI ne se contente pas de décrire la couverture végétale ; elle permet de cartographier indirectement les zones potentielles de ruissellement préférentiel (faible NDVI) et les zones de recharge des aquifères (NDVI moyen à élevé). Cette information est vitale pour une gestion durable des ressources en eau, en identifiant les zones prioritaires pour la mise en place de techniques de collecte des eaux de ruissellement ou, au contraire, pour la protection des périmètres de recharge des nappes.

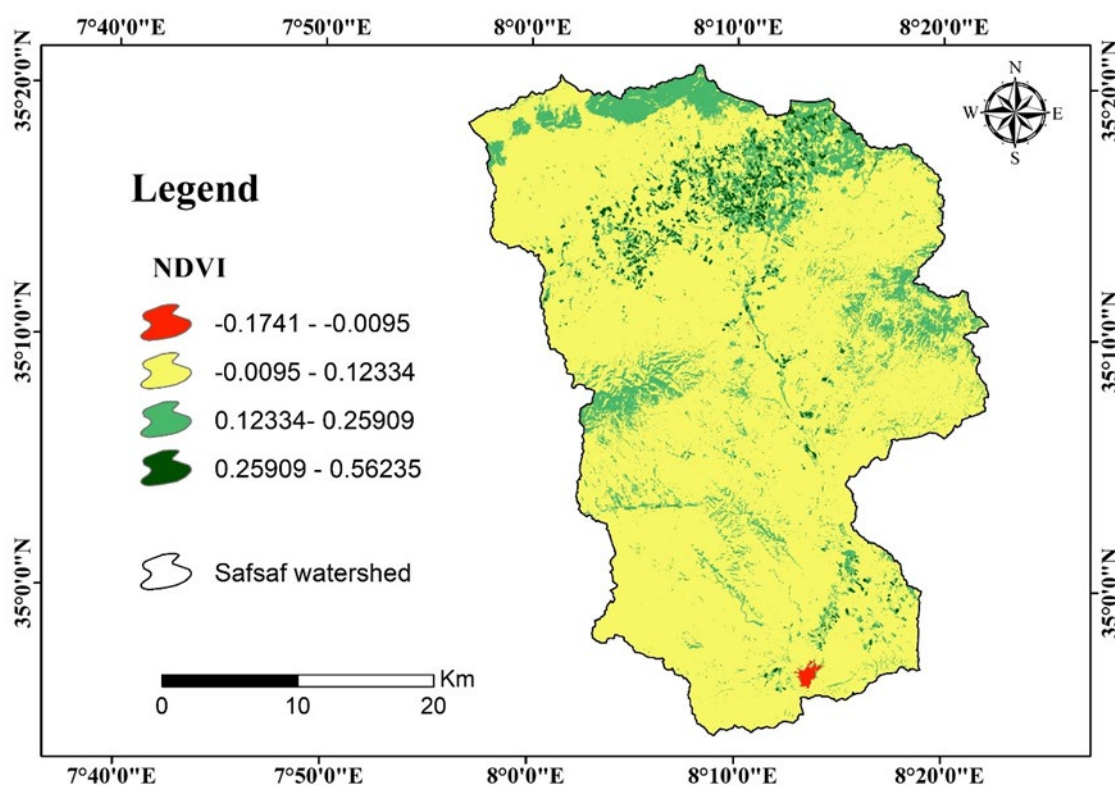


Figure 75 : Carte du NDVI du bassin versant de Safsaf (Ramdani, 2025).

RESULTATS ET DISCUSSIONS

La Figure 76 illustre les variations spatiales de l'occupation du sol et du degré d'urbanisation dans le bassin versant de Safsaf à partir des valeurs du NDBI.

Les zones présentant des valeurs comprises entre $-0,37$ et $-0,12$ correspondent à des régions faiblement urbanisées, représentant principalement des paysages naturels ou végétalisés. Ces secteurs se caractérisent par une faible influence anthropique, une stabilité écologique et la domination d'une couverture naturelle, telle que les forêts ou les terres agricoles. La plage intermédiaire, comprise entre $-0,12$ et $0,009$, correspond à des zones de transition où apparaissent les premiers signes d'activités humaines. Ces espaces incluent généralement des zones rurales ou périurbaines, combinant végétation naturelle et habitats dispersés, traduisant une modification progressive de l'occupation du sol.

Les valeurs de $0,009$ à $0,060$ indiquent des niveaux modérés de développement urbain. Ces zones sont souvent associées à une augmentation des surfaces imperméables routes, petits bâtiments ou extensions urbaines en cours et à une réduction notable de la couverture végétale. Enfin, les valeurs les plus élevées, comprises entre $0,060$ et $0,27$, traduisent une forte urbanisation ou industrialisation. Ces secteurs sont dominés par des surfaces bâties denses, une végétation quasi absente et une pression environnementale accrue.

Cette classification fournit des informations précieuses sur la dynamique spatiale de l'expansion urbaine et sur l'intensité de l'occupation du sol dans le bassin. Elle met en évidence les zones prioritaires pour une planification urbaine durable et une gestion environnementale raisonnée, en particulier là où le développement rapide risque de compromettre les ressources naturelles et l'équilibre écologique. En conclusion, La carte NDBI offre une perspective plus large que la simple délimitation des zones bâties ; elle permet d'identifier les zones d'imperméabilisation (fort NDBI) qui exacerbent le ruissellement et limitent l'infiltration, et les zones de recharge potentielles (faible NDBI) qu'il est essentiel de préserver. Cette information est indispensable pour une planification territoriale qui intègre la gestion des eaux pluviales et la protection de la ressource en eau souterraine.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

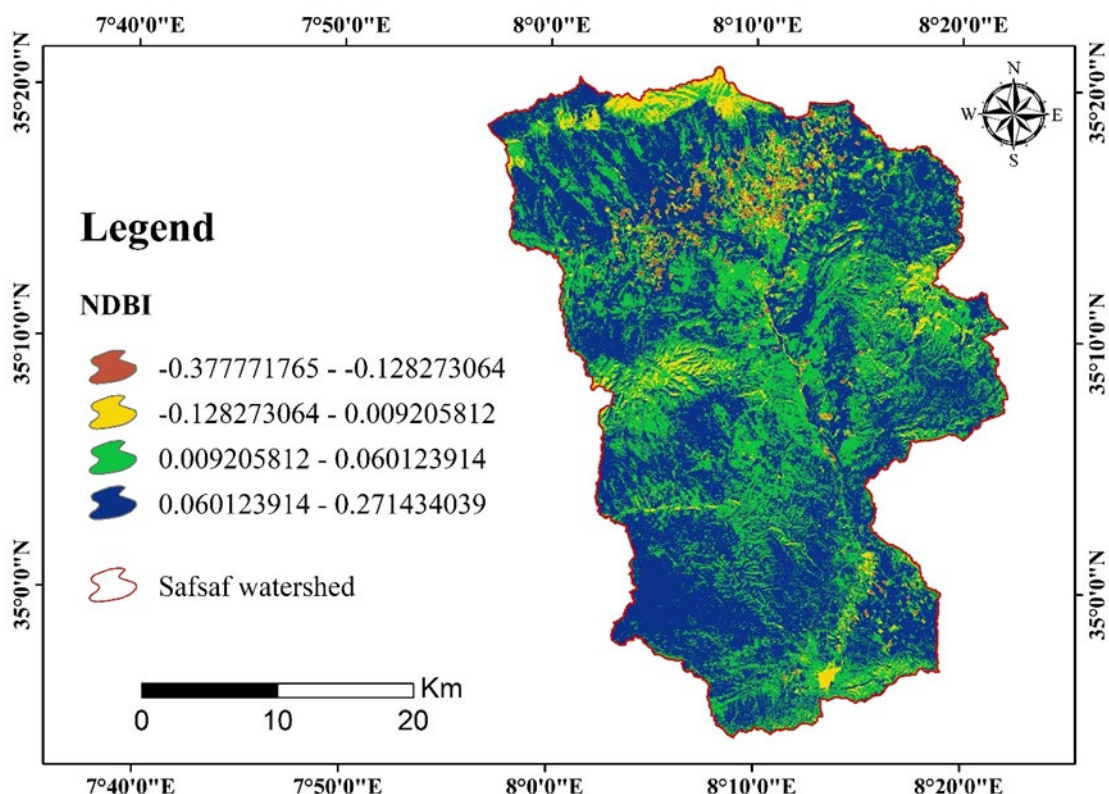


Figure 76 : Carte du NDBI du bassin versant de Safsaf (Ramdani, 2025).

La Figure 77 présente la carte du NDWI du bassin versant de Safsaf, illustrant la répartition spatiale de l'humidité de surface et sa relation potentielle avec la susceptibilité aux glissements de terrain. Les zones représentées en brun foncé correspondent à une teneur en eau très faible, traduisant des conditions de sols secs susceptibles d'augmenter le risque d'instabilité en raison d'une cohésion réduite et d'une plus grande sensibilité à l'érosion ou au glissement. Les zones orangées indiquent une humidité modérée, correspondant à des secteurs de transition où l'humidité du sol est présente mais insuffisante pour assurer une stabilisation complète des pentes. Ces zones demeurent potentiellement vulnérables aux glissements de terrain, notamment lors d'épisodes de pluies intenses ou de ruissellement soudain. Les zones jaune clair traduisent une humidité de surface légèrement plus élevée. Bien qu'un taux d'humidité modéré puisse renforcer la cohésion dans certains sols fins, une saturation excessive en particulier sur les pentes fortes ou dans les secteurs mal drainés peut augmenter la pression interstitielle et réduire la résistance au cisaillement, favorisant ainsi la survenue de glissements.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Dans l'ensemble, la carte NDWI fournit une représentation détaillée de la variabilité spatiale de l'humidité de surface, permettant d'identifier les zones nécessitant une surveillance ciblée selon le gradient de pente, le type de sol et les conditions hydrologiques locales.

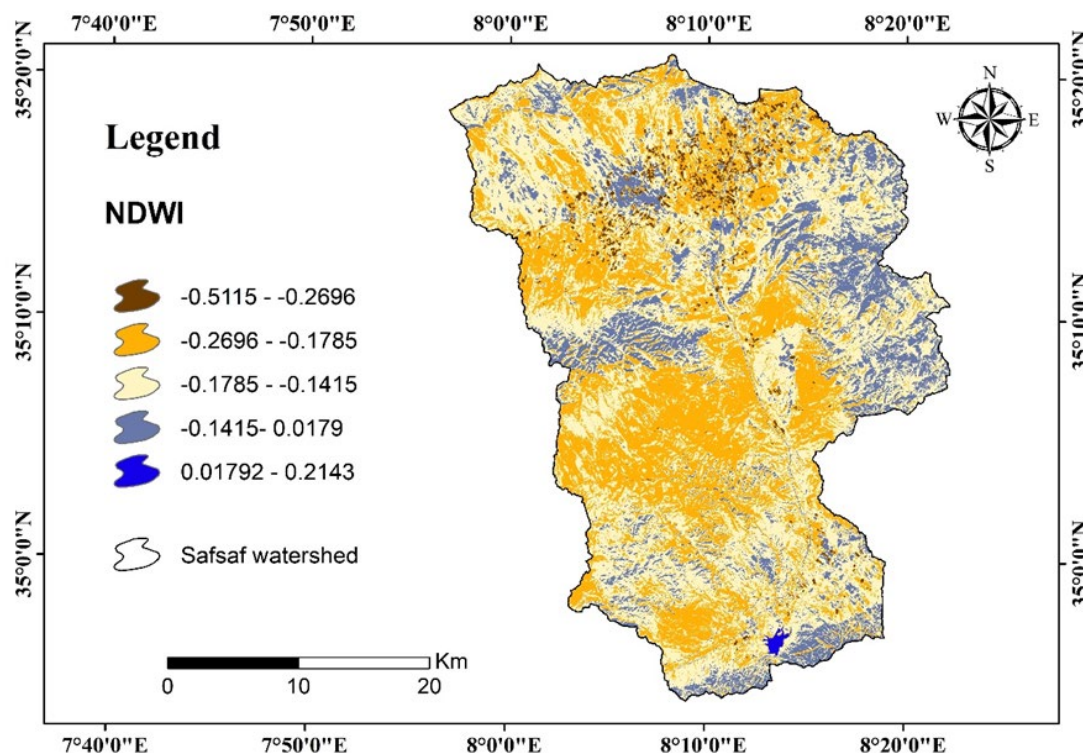


Figure 77 : Carte du NDWI du bassin versant de Safsaf (Ramdani, 2025).

La Figure 78 présente la carte du MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index), qui fournit des informations précieuses sur la répartition spatiale et l'étendue des plans d'eau dans la zone d'étude. Les teintes foncées, notamment le bleu profond, sont généralement associées à la présence de plans d'eau tels que les rivières, lacs ou retenues.

À l'inverse, les teintes claires ou blanchâtres correspondent à des zones sèches ou à des secteurs présentant une faible teneur en eau. Cette variation chromatique permet une évaluation rapide de la taille, de la densité et de la distribution des plans d'eau, ce qui revêt une importance majeure pour les études hydrologiques, la planification du développement urbain et le suivi environnemental. Par ailleurs, l'analyse temporelle des valeurs du MNDWI peut révéler des fluctuations du niveau des eaux ou indiquer la survenue d'événements hydrologiques, tels que des inondations ou des périodes de sécheresse.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

La présence d'eaux de surface, identifiée par le MNDWI, est un indicateur hydrologique important, mais elle ne renseigne pas directement sur les ressources en eaux souterraines. Pour approfondir l'analyse hydrogéologique, la localisation des forages a été superposée à cette carte (Fig. 79). On observe que la majorité des forages se situent à proximité des linéaments

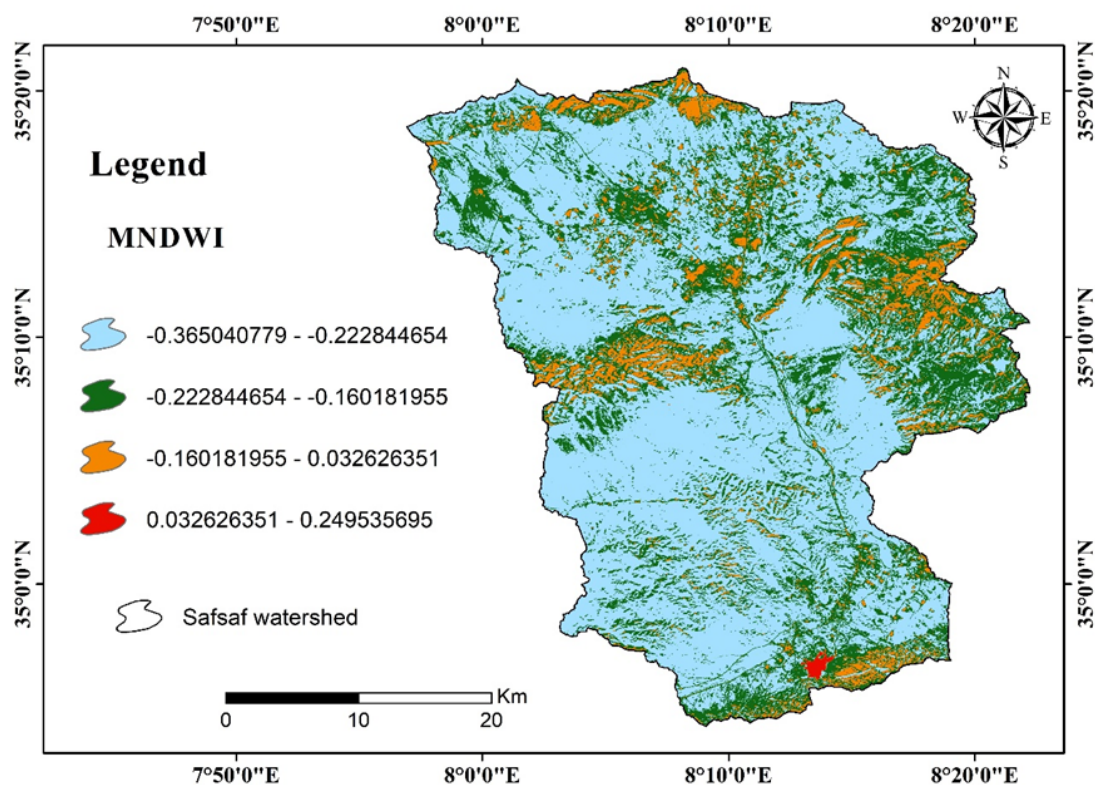


Figure 78 : Carte du MNDWI du bassin versant de Safsaf (Ramdani, 2025).

hydrographiques et des zones identifiées comme humides par le MNDWI. Cette corrélation spatiale suggère une relation potentielle entre les eaux de surface et les aquifères superficiels, où les cours d'eau pourraient jouer un rôle de drainage ou de recharge de la nappe. Inversement, la présence de forages dans des zones où le MNDWI indique un milieu sec peut signaler l'exploitation d'aquifères plus profonds, indépendants des écoulements de surface.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

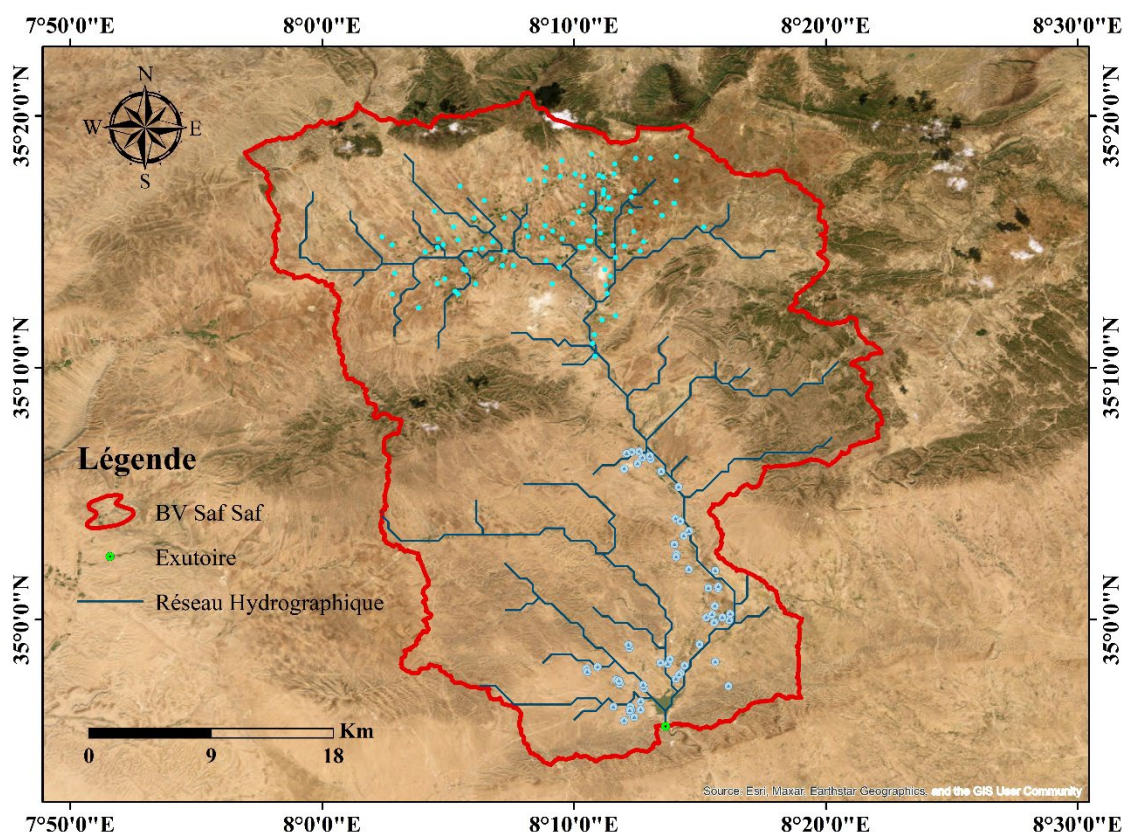


Figure 79 : MNDWI et localisation des points d'eau souterraine (Ramdani, 2025).

La figure 80 présente la carte du Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI), mettant en évidence la variabilité spatiale de la couverture végétale et son influence potentielle sur la susceptibilité aux glissements de terrain dans la zone d'étude.

Les zones de couleur brun foncé, correspondant aux valeurs les plus faibles du SAVI, indiquent des secteurs à végétation clairsemée ou absente, tels que les sols nus, les terrains perturbés ou éventuellement les plans d'eau. Ces zones sont généralement plus vulnérables aux glissements de terrain, car l'absence de couverture végétale réduit la cohésion du sol et le renforcement racinaire, augmentant ainsi la probabilité d'instabilité des pentes. Les zones jaunes et vertes représentent des valeurs modérées du SAVI, traduisant une densité de végétation intermédiaire. Bien que cette végétation offre une protection partielle contre l'instabilité des pentes, ces secteurs peuvent rester sensibles aux glissements dans certaines conditions, notamment en cas de fortes précipitations, de perturbations anthropiques ou de reliefs abrupts. À l'inverse, les zones ombrées de bleu, associées aux valeurs les plus élevées du SAVI, correspondent à une végétation dense. Ces régions présentent généralement une meilleure stabilité des pentes, grâce à la présence de systèmes racinaires profonds qui renforcent la structure du sol, favorisent

RESULTATS ET DISCUSSIONS

l'infiltration de l'eau et réduisent le ruissellement de surface. Dans l'ensemble, la carte du SAVI offre une compréhension approfondie de la relation spatiale entre la densité de la végétation et le risque de glissement de terrain. Elle constitue un outil essentiel pour l'identification des zones prioritaires de stabilisation, de reboisement ou de surveillance, notamment dans les secteurs où la perte de végétation peut aggraver l'instabilité du terrain.

La carte SAVI révèle ainsi un paysage hydrogéologique fonctionnel : les zones à forte végétation (SAVI élevé) agissent comme des zones d'infiltration et de régulation du ruissellement, réduisant les risques, tandis que les zones dénudées (faible SAVI) sont des zones de ruissellement préférentiel qui exacerbent l'érosion et l'instabilité des pentes.

Dans l'ensemble, cette carte constitue un outil essentiel pour identifier les zones prioritaires pour des actions de reboisement visant à restaurer l'équilibre hydrologique et à stabiliser les versants.

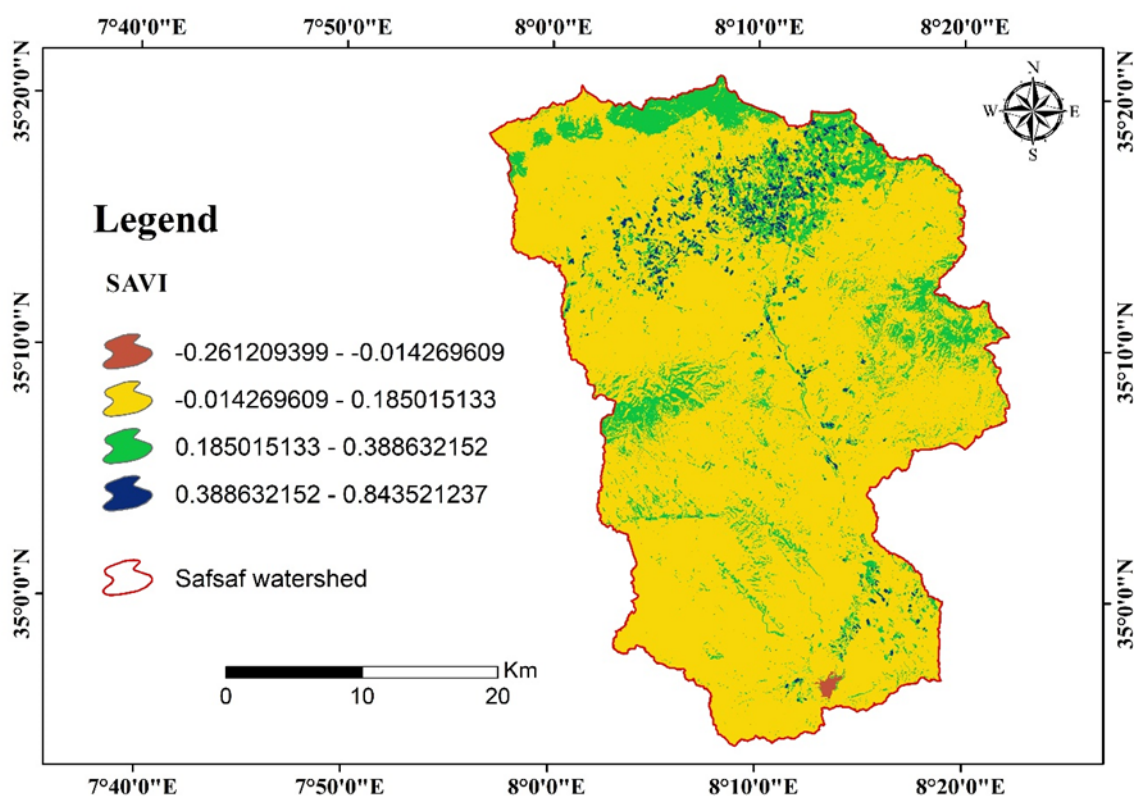


Figure 80 : Carte du SAVI du bassin versant de Safsaf (Ramdani, 2025).

La figure 81 présente la carte du Normalized Burn Ratio (NBR) du bassin versant de Safsaf, offrant des informations précieuses sur l'état de santé de la végétation et les zones potentiellement affectées par des perturbations liées aux incendies. Les zones de couleur jaune

RESULTATS ET DISCUSSIONS

clair correspondent aux valeurs les plus faibles du NBR, généralement associées à des sols nus, des surfaces dégradées ou des secteurs touchés par des perturbations importantes, telles que les traces de brûlures. Les zones vertes et brunes présentent des valeurs modérées du NBR, traduisant une végétation clairsemée ou stressée, ou encore des zones de transition en cours de régénération écologique. En revanche, les zones rouges et brun foncé représentent les valeurs les plus élevées du NBR, correspondant en général à une végétation dense et en bonne santé, sans signe récent d'impact lié aux incendies.

L'état de la végétation révélé par le NBR a une conséquence directe sur le bilan hydrique du bassin. Les zones à faible NBR (dégradées ou brûlées) voient leur sol devenir moins perméable, ce qui amplifie le ruissellement de surface au détriment de l'infiltration, réduisant ainsi la recharge des nappes et accroissant les risques d'érosion et de crues rapides. À l'inverse, les zones à végétation saine et dense (NBR élevé) favorisent une infiltration optimale, contribuant à la recharge des aquifères et à la régulation des écoulements. Cette carte permet donc d'identifier non seulement l'état écologique mais aussi les zones à risque hydrologique, où la dégradation du couvert végétal compromet la ressource en eau souterraine et aggrave l'érosion.

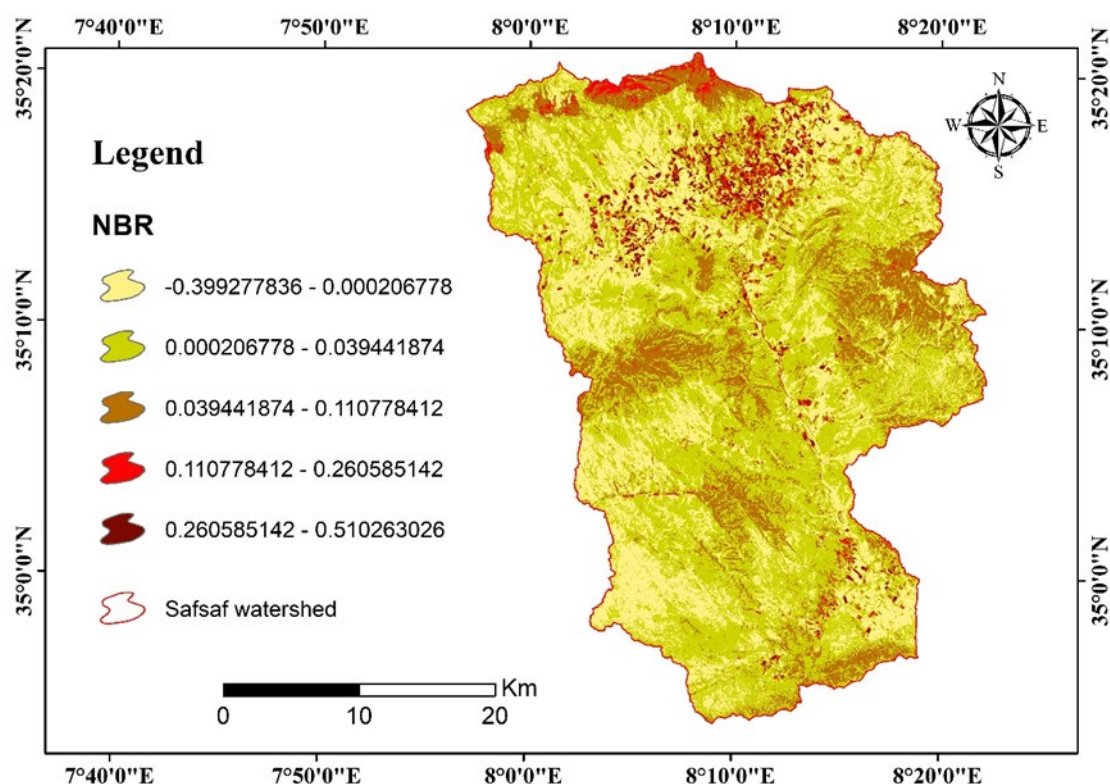


Figure 81 : Carte du NBR du bassin versant de Safsaf (Ramdani, 2025).

Conclusion

La modélisation hydrogéologique de la nappe miocène avec Visual MODFLOW Flex a montré qu'entre 2001 et 2024, le niveau piézométrique a chuté d'environ 55 m dans les zones centrale et sud du bassin en raison de la surexploitation. Les scénarios prospectifs indiquent que le maintien des pompages sans recharge de 2024 à 2034 provoquerait un abaissement supplémentaire de 5 à 10 m, que la recharge naturelle (10 mm/an) entraînerait une remontée limitée de 0,15 à 1,06 m, tandis que la recharge artificielle de 2024 à 2034 via les carrières abandonnées permettrait une hausse significative de 21 à 54 m. Ces résultats confirment l'importance d'une gestion intégrée combinant limitation des prélèvements et recharge artificielle pour assurer la durabilité de la nappe miocène.

Les résultats obtenus à partir de l'analyse InSAR et des données piézométriques révèlent une subsidence progressive et accentuée dans le bassin d'El Malabiod. Les cartes interférométriques montrent une extension et une intensification des zones d'affaissement entre 2014–2015 et 2024–2025, avec des valeurs de phase traduisant un mouvement vertical négatif significatif. Cette subsidence est corrélée spatialement et temporellement à la baisse du niveau piézométrique et à l'expansion des surfaces irriguées, confirmant que la surexploitation anthropique de la nappe miocène constitue le principal facteur de compaction des formations argilo-marneuses, entraînant un affaissement irréversible du sol.

La modélisation hydrogéochimique à l'aide de PHREEQC indique que la recharge artificielle par les eaux de l'Oued Goussa représente l'option la plus efficace pour l'amélioration de la qualité de la nappe, en raison de sa forte capacité de dilution et de son faible potentiel de perturbation géochimique. En revanche, les eaux de l'Oued Malabiod, présentant une minéralisation initiale plus élevée, n'apportent qu'un effet diluant limité et entraînent des modifications ioniques susceptibles d'altérer la composition de l'aquifère. L'ensemble des simulations de mélange montre ainsi que seule l'eau de l'Oued Goussa offre une compatibilité suffisante pour une recharge durable et sécurisée, tandis que l'emploi de l'eau de l'Oued Malabiod demeure peu recommandé dans les conditions actuelles.

L'approche AHP-SIG appliquée au bassin versant d'El Malabiod a permis d'identifier avec précision les zones les plus vulnérables aux inondations en intégrant les paramètres hydrologiques, topographiques et morphométriques. Les résultats montrent que la densité de

RESULTATS ET DISCUSSIONS

drainage constitue le facteur le plus déterminant, suivie de la pente, tandis que l'altitude joue un rôle modéré dans le contrôle du ruissellement. Les zones situées en aval, caractérisées par de faibles altitudes, des pentes faibles à modérées et une forte concentration de réseaux hydrographiques, apparaissent comme les plus exposées aux crues soudaines. Cette analyse fournit une base robuste pour la mise en œuvre de stratégies de gestion du risque inondation, notamment l'amélioration des infrastructures hydrauliques, la maîtrise de l'urbanisation et la protection des zones vulnérables.

L'intégration des indices spectraux issus de la télédétection (NDVI, NDWI, MNDWI, SAVI et NBR) s'est révélée particulièrement efficace pour évaluer la susceptibilité aux glissements de terrain dans le bassin versant de Safsaf. Les résultats montrent que les faibles valeurs de NDVI et SAVI correspondent à des zones à végétation clairsemée, plus sensibles à l'érosion et à l'instabilité des pentes. Les indices hydriques NDWI et MNDWI ont mis en évidence les secteurs fortement saturés en eau, où l'excès d'humidité réduit la résistance au cisaillement et augmente le risque de glissements, surtout sur les pentes raides ou mal drainées. Le NBR a, quant à lui, permis d'identifier les zones affectées par les incendies, où la perte de couverture végétale accentue l'érosion et la vulnérabilité post-feu. Ensemble, ces indices offrent une vision complète des facteurs contrôlant l'instabilité des pentes et constituent un outil essentiel pour la prévention des risques et la gestion durable du bassin.

Ainsi, l'ensemble des analyses hydrogéologiques, hydrogéochimiques et hydrologiques menées dans ce travail met en évidence l'importance d'une approche intégrée et multidimensionnelle pour la gestion durable des ressources en eau et la prévention des risques naturels dans le bassin versant de Safsaf.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

La présente étude a permis d'adopter une approche intégrée pour l'évaluation et la gestion des ressources en eau dans les bassins versants transfrontaliers d'El Malabiod et de Safsaf, combinant modélisation hydrogéologique, analyses hydrochimiques, télédétection et SIG.

La modélisation hydrogéologique de la nappe miocène à l'aide de Visual MODFLOW Flex a montré que le bassin a subi un abaissement significatif du niveau piézométrique, d'environ 55 m entre 2001 et 2024, principalement lié à la surexploitation. Les scénarios prospectifs ont démontré que le maintien des pompages sans recharge entraînerait un abaissement supplémentaire de 5 à 10 m, alors que la recharge naturelle reste limitée (0,15 à 1,06 m). En revanche, la recharge artificielle via les carrières abandonnées pourrait permettre une remontée significative de 21 à 54 m. Ces résultats mettent en évidence la nécessité d'une gestion intégrée, combinant limitation des prélèvements et recharge artificielle ciblée, pour assurer la durabilité de la nappe miocène. La corrélation entre l'évolution piézométrique et la subsidence détectée par InSAR confirme que la compaction des formations argilo-marneuses et l'affaissement du sol sont principalement d'origine anthropique.

La modélisation hydrogéochimique réalisée avec PHREEQC a complété cette analyse en identifiant les eaux de l'Oued Goussa comme la source la plus compatible pour la recharge artificielle, grâce à leur forte capacité de dilution et leur faible potentiel de perturbation chimique, tandis que l'eau de l'Oued Malabiod reste peu recommandée en raison de risques hydrochimiques importants.

Parallèlement, l'analyse hydrologique et morphométrique du bassin d'El Malabiod a révélé la vulnérabilité du bassin aux crues éclair, mettant en évidence l'importance de la densité de drainage, de la pente et de l'altitude dans la dynamique hydrologique. L'intégration des indices multispectraux (NDVI, SAVI, NBR, NDBI, MNDWI) dans le bassin versant de Safsaf a permis de caractériser de manière approfondie la stabilité des pentes, les zones de recharge potentielles et les impacts de l'urbanisation sur les processus hydrogéologiques, fournissant des outils précieux pour la planification et la gestion durable des ressources en eau.

Dans l'ensemble, cette thèse démontre que seule une approche multidimensionnelle, combinant modélisation, observation satellitaire, analyse hydrogéochimique et SIG, permet de comprendre les interactions complexes entre exploitation anthropique, dynamique des nappes, qualité de l'eau et risques naturels. Les résultats fournissent des bases solides pour la mise en œuvre de stratégies concrètes de gestion durable, incluant la recharge artificielle, la limitation des prélèvements, la conservation des zones de recharge et l'aménagement urbain résilient.

CONCLUSION GENERALE

Ainsi, cette recherche souligne l'urgence et l'importance d'une gestion intégrée et transfrontalière des ressources en eau, garantissant à la fois la durabilité de la nappe miocène et la résilience des bassins versants face aux risques naturels et anthropiques.

Perspectives et recommandations

PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS

Ce travail doctoral s'inscrit dans le cadre du projet PRIMA AG-WAMED (Advancing non conventional water management for innovative climate-resilient water governance in the Mediterranean Area), qui vise à renforcer la gestion durable de l'eau dans les régions méditerranéennes à travers le développement, l'adoption et l'upscaling de solutions innovantes, notamment les ressources en eau non conventionnelles (NCW). Dans la continuité des objectifs du projet, cette thèse apporte une contribution scientifique à la compréhension, la quantification et l'amélioration de la gestion des ressources hydriques dans un contexte soumis à une forte pression climatique et anthropique. Les résultats obtenus constituent ainsi un appui technique et stratégique pour guider les futures actions d'intégration des NCW et d'optimisation des politiques de gestion de l'eau.

Dans ce cadre, l'analyse du document stratégique du projet PRIMA (voir annexes) met en évidence plusieurs barrières majeures à l'intégration et à l'upscaling des ENC, que nous présentons ci-après.

1. Barrière Intersectorielle & Politique : Vers une Gouvernance Collaborative

➤ Constats issus du document :

- Les relations entre les acteurs du secteur de l'eau sont souvent marquées par un manque de communication et de coopération.
- Il y a un manque de soutien politique clair pour les initiatives locales.
- L'orientation internationale des bailleurs de fonds est souvent mal adaptée aux besoins locaux.

➤ Recommandations :

- Créer des Plateformes de Concertation Transfrontalières Thématiques (ex : Comité "Eaux Usées Traitées" Tunisie-Algérie) avec un mandat technique et opérationnel, pour dépolitiser les enjeux et favoriser la coopération.
- Élaborer un Schéma Directeur Transfrontalier des ENC qui serve de feuille de route commune et de document de référence pour les bailleurs, afin d'aligner les financements internationaux sur les priorités locales partagées.
- Instituer des "Contrats de Bassin" au niveau local, associant élus, agriculteurs, industriels et société civile, pour ancrer la gouvernance de l'eau au plus près des besoins.

➤ Perspectives de Recherche :

PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS

- Analyse des mécanismes de gouvernance polycentrique les plus adaptés aux contextes de bassins transfrontaliers maghrébins.
- Évaluation de l'efficacité et de la résilience des plateformes de concertation face aux changements politiques nationaux.

2. Barrière institutionnelle & cognitive : Renforcer les capacités et clarifier les rôles

➤ **Constats issus du document :**

- Les principaux défis sont la fragmentation institutionnelle.
- Il n'y a pas suffisamment de connaissances et de formation parmi les acteurs.
- L'Agence des Bassins Hydrographiques (ABH) est une institution formelle qui facilite l'expérimentation.

➤ **Recommandations :**

- -Consolider le rôle des ABH en tant que "guichet unique" des ENC, en leur donnant les moyens humains et financiers de coordonner les projets, de centraliser les données et d'assurer le suivi-évaluation.
- Lancer un Programme National de Formation et de Certification sur les ENC à destination des techniciens, ingénieurs et gestionnaires, en partenariat avec les universités et les centres de recherche.
- Créer un Observatoire Transfrontalier des Données Hydriques (OTDH) pour mutualiser les données sur la qualité des eaux, la disponibilité de la ressource et la performance des projets, comblant ainsi le déficit cognitif.

➤ **Perspectives de Recherche :**

- Développement d'indicateurs standardisés pour le suivi-évaluation des projets d'ENC en contexte de rareté des données.
- Recherche-action sur les méthodes les plus efficaces de transfert de connaissances et de renforcement des capacités techniques locales.

3. Barrière technique et normative : Adapter le cadre pour l'innovation

➤ **Constats issus du document :**

- L'infrastructure actuelle est souvent inadéquate.
- L'acquisition de données essentielles (perméabilité, conductivité hydraulique) est un défi en raison de l'absence de piézomètres.
- Il n'existe pas de soutien légal clair pour faciliter la mise en œuvre des modèles de recharge artificielle.

➤ **Recommandations :**

PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS

- Développer et Promouvoir des "Kits Techniques" standardisés et low-cost pour la recharge artificielle des nappes et la réutilisation des eaux usées traitées, adaptés aux conditions hydrogéologiques et socio-économiques locales.
 - Lancer un programme national d'équipement en stations de monitoring (piézomètres, sondes de qualité) pour acquérir les données critiques.
 - Élaborer et adopter un Cadre Normatif Harmonisé Tunisie-Algérie pour la réutilisation des eaux usées traitées (normes de qualité par usage) et la recharge des nappes, inspiré des standards internationaux mais adapté au contexte régional.
- **Perspectives de recherche :**
- Développement de modèles hydro-économiques pour optimiser le dimensionnement et la localisation des infrastructures de recharge artificielle.
 - Analyse comparative des cadres réglementaires des ENC dans le pourtour méditerranéen et évaluation de leur transférabilité.

4. Barrière économique et comportementale : créer de la valeur et de l'acceptabilité

- **Constats issus du document :**
- Les bénéfices économiques sont souvent perçus comme incertains.
 - Il n'existe actuellement aucun soutien financier significatif.
 - Les bénéfices sont parfois mal perçus par les communautés locales, notamment lorsque les projets n'ont pas été bien expliqués.
- **Recommandations :**
- Mettre en place des instruments financiers incitatifs : Subventions à l'investissement, tarifs préférentiels pour l'eau recyclée, et "Paiements pour Services Environnementaux" pour les agriculteurs utilisant des ENC.
 - Établir un Fonds National de Garantie dédié aux projets d'ENC pour sécuriser l'investissement privé et faciliter les Partenariats Public-Privé (PPP).
 - Lancer des campagnes de démonstration et de communication ciblées ("Champs-Écoles", visites de sites pilotes) pour montrer la valeur ajoutée des ENC et construire la confiance, en impliquant les leaders d'opinion locaux.
- **Perspectives de Recherche :**
- Évaluation économique complète (coûts-bénéfices) des chaînes de valeur des ENC, incluant les externalités positives (environnementales, sociales).

PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS

- Études socio-anthropologiques sur les déterminants de l'acceptabilité sociale des ENC et tests de stratégies de communication participatives.

5. Synthèse et Vision Stratégique

La réussite de l'upscaling des ENC dans le bassin transfrontalier repose sur une approche intégrée et séquentielle :

- **Court terme (0-2 ans) :** Prioriser le renforcement des capacités, la création de plateformes de dialogue et le lancement de projets pilotes démonstrateurs.
- **Moyen terme (2-5 ans) :** Mettre en place le cadre normatif et financier incitatif et déployer les infrastructures de monitoring.
- **Long terme (5-10 ans) :** Généraliser les pratiques et intégrer les ENC comme une ressource stratégique à part entière dans la planification nationale et transfrontalière de l'eau.

L'ensemble de ces recommandations permet d'ouvrir la voie vers un modèle de gestion hydrique plus résilient, inclusif et innovant, capable de répondre durablement aux défis du bassin transfrontalier.

REFERENCES

- Abidin, H. Z., Andreas, H., Gumilar, I., Sidiq, T. P., & Fukuda, Y. (2011). Land subsidence in the coastal city of Semarang (Indonesia): Characteristics, impacts, and causes. *Geodetic Engineering Journal*, 35(1), 1–9.
- Alexakis, D. D., et al. (2014). Integrated use of remote sensing, GIS and AHP for flood hazard assessment in Mediterranean areas. *Natural Hazards*, 72(3), 1343–1364.
- Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F. (2018). Present and future Köppen–Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Nature Scientific Data*, 5, Article 180214. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>
- BrainKart. (n.d.). Elements of remote sensing. Retrieved from https://brainkart.com/article/Elements-of-Remote-Sensing_8996/
- Chang, H., & Franczyk, J. (2008). Climate change, land-use change, and floods: Toward an integrated assessment. *Geography Compass*, 2(5), 1549–1579.
- Chaussard, E., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E., & Amelung, F. (2014). Land subsidence in central Mexico detected by ALOS InSAR time series. *Remote Sensing of Environment*, 140, 94–106.
- Carte des climats de l’Algérie établie selon la classification de Köppen, issue du site <https://fr.maps-algeria.com/>
- Dahri, N., & Abida, H. (2020). Impact of land use change on flood hazard mapping using GIS. *Hydrology Journal*, 7(2), 45–58. *
- Djebbari, H. (2011). Ressources et essai de gestion intégrée des eaux du bassin d’El Malabiod, W. de Tébessa, nord-est algérien (Mémoire de magister). Université Badji Mokhtar – Annaba, Algérie.
- Djellali, M., Guefaïfia, O., Djellali, A., & Hamad, A. (2023). Assessing the impact of artificial recharge on groundwater in an over-exploited aquifer: A case study in the Cheria Basin, North-East of Algeria. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 11(3), 263-277. <https://doi.org/10.26599/JGSE.2023.9280022>
- Engelkemeir, R., Khan, S. D., & Burke, K. (2010). Surface deformation in Houston, Texas, using GPS. *Tectonophysics*, 490(1–2), 47–54.
- Format ISO 690 (français) : image remote sensing BRAINKART. *Elements of Remote Sensing* [en ligne]. [s.l.] : BrainKart, [sans date]. Disponible sur : https://brainkart.com/article/Elements-of-Remote-Sensing_8996/

- Gueraidia, N. H. (2023). Caractérisation géomorphologique et structurale de l'aléa glissement de terrain dans la région de Souk Ahras : apport des outils d'imagerie et de télédétection [Thèse de doctorat LMD, Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi, Tébessa].
- Gueraidia, N. H., Gueraidia, S., & Fehdi, C. (2023). SAR interferometry for landslide investigation and surface deformation monitoring: A case study of Souk Ahras area, north-east of Algeria by Geographic Information System (GIS). *Acta Geographica Silesiana*, 17(2), 51–66.
- Gueraidia, N. H., Gueraidia, S., Ramdani, R. S., Fehdi, C., & Houam, A. K. (2024). Natural hazard processing analyze investigation using different spectral indices (NDVI, NDWI, MNDWI, SAVI, NDBI, NBR): Case study of Souk Ahras area, north-east of Algeria. *Periodico di Mineralogia*, 93(3), 55–65.
- Gueraidia, S., Laouar, M. S., Athmania, D., Gueraidia, N. H., Ramdani, R. S., & Fehdi, C. (2025). Geotechnical and SAR interferometric investigation of collapsible soils in the Biskra region using geographic information system. *South Florida Journal of Development*, 6(1), 1–19.
- Hayashi, T., Tokunaga, T., Aichi, M., Shimada, J., & Taniguchi, M. (2009). Effects of human activities and urbanization on groundwater environments: An example from the aquifer system of Tokyo and the surrounding area. *Science of the Total Environment*, 407(9), 3165–3172.
- Kessasra, F. (2017). Cours de Modélisation en hydrologie et hydrogéologie. Université de Jijel.
- Khan, A. S., Khan, S. D., & Kakar, D. M. (2013). Land subsidence and declining water resources in Quetta Valley, Pakistan. *Environmental Earth Sciences*, 70(6), 2713–2724. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2328-9>
- Lawal, D. U., & Khalifa, A. E. (2014). Theoretical and statistical models for predicting flux in direct contact membrane distillation. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 4(8), 124–135.
- LeDoux, J. (2003). Neurobiologie de la personnalité. Paris: Odile Jacob.
- Lubis, R. F., Abidin, H. Z., Djaja, R., & Suganda, E. (2011, May 18–22). Land subsidence study in Semarang (Indonesia) using GPS surveys. FIG Working Week 2011: Bridging the Gap between Cultures, Marrakech, Morocco.

- Motagh, M., Walter, T. R., Sharifi, M. A., Fielding, E. J., Schenk, A., Anderssohn, J., & Zschau, J. (2008). Land subsidence in Iran caused by widespread water reservoir overexploitation. *Geophysical Research Letters*, 35(16), L16403. <https://doi.org/10.1029/2008GL034563>
- Ramdani, R. S., Fehdi, C., Gueraidia, N. H., Gueraidia, S., & Hafnaoui, S. (2025). Flood susceptibility assessment using GIS-AHP and morphometric analysis in the El Malabiod Watershed, Northeastern Algeria. *Geomatics, Landmanagement and Landscape*, 1(1), 199–216.
- Ramdani, R.S., Fehdi, C., Gueraidia, N.E.H. et al. Remote sensing-based assessment of natural hazard susceptibility in the Safsaf watershed, Northeast Algeria. *Int J Energ Water Res* 9, 2719–2726 (2025). <https://doi.org/10.1007/s42108-025-00416-1>
- Rouabhia, A. (2006). Vulnérabilité et risques de pollution des eaux souterraines de la nappe des sables miocènes de la plaine d'El Ma El Abiod, Nord-Est Algérien [Thèse de doctorat ès-sciences, Université Badji Mokhtar, Annaba].
- Rouabhia, A. (2006). Vulnérabilité et risques de pollution des eaux souterraines de la nappe des sables miocènes de la plaine d'El Ma El Abiod Nord-Est Algérien [Thèse de doctorat ès-sciences, Université Badji Mokhtar, Annaba].
- Rouabhia, A. (2006). Vulnérabilité et risques de pollution des eaux souterraines de la nappe des sables miocènes de la plaine d'El Ma El Abiod, Nord-Est Algérien [Thèse de doctorat ès-sciences, Université Badji Mokhtar, Annaba].
- Rouabhia. A, Fethi, B., Chemseddine, F., Boumezbeur, A., & Boubaya, D. (2010). Hydrogeochemistry of groundwaters in a semi-arid region: El Ma El Abiod aquifer, Eastern Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 4(5–6), 973–982. <https://doi.org/10.1007/s12517-010-0169-3>
- Rouabhia. A, Fethi, B., Nacer, K., & Larbi, D. (2004). Vulnérabilité et risque de pollution des eaux souterraines de la nappe des sables miocènes de la plaine d'El Ma El Abiod (Algérie). *Sécheresse*, 15, 347–352.
- Samoun, F. (2021). États hydrogéologique et hydrochimique et cartographie de la vulnérabilité et du risque à la pollution des eaux souterraines de la nappe alluvionnaire d'El Ma Labiod (NE Algérie) (Thèse de doctorat). Université de Tébessa, Algérie.
- Saaty, T. L. (2004). Decision making—the analytic hierarchy and network processes (AHP/ANP). *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 13(1), 1–35.

- Tangug, J. M. (2009). Modèles mathématiques en hydrologie et en hydraulique fluviale (Vol. 3). Paris.
- Ullah, K., & Zhang, J. (2020). Influence of soil structure and texture on flood hazard modeling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(4), 2341–2352. *
- Yin, C., Xue, Y., & Wu, J. (2006). Urbanization and land subsidence in China. *Proceedings of the International Association for Engineering Geology*, Paper No. 31.
- LeDoux, Joseph. *Neurobiologie de la personnalité*. Paris : Odile Jacob, 2003.
- Zaoui, R. (2022). Modélisation hydrologique pluie-débit appliquée au sous-bassin versant de l’oued Ressoul [Mémoire de master, Université 8 Mai 1945 – Guelma]. Université de Guelma. <https://dspace.univ-guelma.dz/handle/123456789/12992>

Annexes

AG-WaMED | Advancing non-conventional water management for innovative climate-resilient water governance in the Mediterranean Area

Grant Agreement Number: 391 del 20/10/2022

Deliverable 4.2.2.a

Partnership for Research and Innovation in the Mediterranean Area Programme (PRIMA)

The AG-WaMED project has received funding from the PRIMA Programme, an Art. 185 initiative supported and funded under Horizon 2020, the European Union's Framework Programme for Research and Innovation. This project also received funding from the Italian Ministry of University and Research (MUR), Science and Technological Development Fund - STDF (Egitto), Ministry of Higher Education and Scientific Research - MESRS (Tunisia), Hellenic Republic, Ministry of Development and Investments (Grecia), Agencia Estatal de Investigación (AEI) (Spagna) and General Directorate for scientific research and technological development - DGRSDT (Algeria)



Deliverable Identification

Deliverable No and Title	D4.2.2.a - National policy document for NCW upscaling - Algeria		
Grant Agreement No	391 del 20/10/2022	Acronym	AG-WaMED
Project Full title	Advancing non-conventional water management for innovative climate-resilient water governance in the Mediterranean Area		
Funding Instrument	Partnership for Research and Innovation in the Mediterranean Area Programme (PRIMA)		
Call	PRIMA CALL SECTION 2 2021 – MULTI-TOPIC		
Work-Package No and Title	Work Package 4: Governance analysis, policy creation and upscaling		

WP- Main Beneficiary	POLIMI		
WP-Leader	Maria Cristina Rulli mariacristina.rulli@polimi.it		
Task No and Title	Task 4.2 - Integrated Watershed Management Plans and NCW out-scaling		
Task Leader	Maria Cristina Rulli mariacristina.rulli@polimi.it		
Main Author	Dr. Chloe Artero & Dr. Melina Tobias		
Contributors			
Status	Draft ☐ Final ☒		
Dissemination Level	Internal ☐ Public ☒		
Reviewed by			
Abstract	The present report is produced as deliverable for the task 4.2 of AG-WaMED, Integrated Watershed Management Plans and NCW out-scaling. The document contributes to the development of national policy frameworks for upscaling non-conventional water (NCW) uses in selected Mediterranean countries. It addresses the emerging concept of water transition, understood as a shift towards more sustainable governance and use of water resources. Through a systematic literature review, the study develops a conceptual framework that identifies the key barriers and drivers of water transitions. It applies this framework to a case study of a living lab (Algeria) to analyze upscaling processes at the national level. The findings inform future policy recommendations and contribute to broader Mediterranean-scale strategies for NCW deployment.		
Key words			
DOCUMENT HISTORY			
Planned Release Date	30 June 2025	Actual Release Date	30 June 2025
Version	V1	Released Version No	V1

7 Introduction

This document is intended for the development of Deliverable 4.2.2.5, "National policy documents for NCW upscaling (Italy, Spain, Egypt, Tunisia, Algeria, D34)." Subsequently, the results will also contribute to sub-task 4.3.1, "Policy document for upscaling and out-scaling NCW at the Mediterranean scale (M20-34)."

8 Theoretical framework proposal

In this section, we present the barriers and drivers identified from the literature review. For each of them, we provide a definition.

9 Barriers and drivers in Algeria

In this section, we aim to analyze the barriers and drivers identified for the case of Algeria. These were derived from two main sources: the responses to the guidelines provided to the countries (a methodology specific to this deliverable) and the inputs from Deliverable 4.1.1, Integrated Governance and Policy Analysis Report.

9.1 Barriers

9.1.1 Intersectoral Barrier: Weak Coordination and Lack of Institutional Support

In Algeria, stakeholder relationships in the water sector are marked by poor communication and weak collaboration, creating significant intersectoral barriers. While synergies exist, conflicts frequently arise due to diverging interests and priorities, particularly regarding the adoption of new technologies for non-conventional water use (NCW). Technical and collective collaboration is rare, often limited to isolated initiatives that lack continuity and long-term planning.

A major structural issue is the limited capacity to form and sustain water user associations, which significantly impacts the management of collective water infrastructure. In many cases, associations responsible for infrastructure receive insufficient state support, making it difficult to maintain irrigation systems and prevent their degradation. This has resulted in persistent water losses, including infiltration through traditional irrigation channels (Seguía), excessive irrigation doses, and network leaks.

Water scarcity has led farmers to individually and collectively modify existing water systems to meet their needs. While this has enabled localized solutions, it has also contributed to fragmented governance and uneven access to water resources. The adoption of circular agricultural practices could improve water sustainability, but state intervention is necessary to provide regulatory guidance and financial support.

Another key issue is the lack of bilateral cooperation between Tunisia and Algeria for transboundary aquifer management. While several North African countries have made efforts to protect shared aquifers, there is no official treaty or agreement between Algeria and Tunisia to coordinate watershed governance and prevent overexploitation. This absence of cross-border policies results in uncoordinated water extraction, leading to aquifer depletion, soil degradation, and conflicts over groundwater use.

In summary, Algeria's intersectoral barriers are characterized by weak institutional coordination, lack of formal collaboration frameworks, and insufficient government support for infrastructure management. Without stronger cooperation at both national and transboundary levels, NCW solutions will continue to face fragmented implementation and sustainability challenges.

9.1.2 Political Barrier: Lack of Local Support and Misalignment with International Policies

In Algeria, political support for NCW, particularly aquifer recharge, is weak, limiting its effective implementation. There is no clear national strategy or strong governmental backing for local initiatives, which prevents long-term planning and funding for NCW projects.

A major limitation is the lack of mechanisms for local participation in water governance. Decisions regarding water management are often made at the central level, without meaningful engagement from local communities. As a result, the specific needs of different regions are not adequately considered, leading to poorly adapted policies and ineffective interventions.

Additionally, international funding priorities do not always align with local realities. Many donor-supported water management projects follow global frameworks that do not consider the region's climatic, socio-economic, and environmental characteristics. For example, some irrigation policies based on Western models overlook Algeria's arid climate and water scarcity challenges, making them less effective or unsustainable in the long run.

At the same time, modern large-scale water projects have contributed to significant environmental changes, such as aquifer depletion and the disappearance of traditional water sources. Traditional hydraulic techniques, such as rainwater collection, floodwater spreading, and aquifer recharge through small and medium-sized structures like tabias and jessour, are gradually being abandoned due to the lack of state support. However, these low-cost, decentralized solutions could help address droughts if they were properly integrated into national policies.

Overall, Algeria's political barriers are characterized by weak governmental commitment to NCW, exclusion of local stakeholders from decision-making, and a misalignment between international funding priorities and local water needs. Without stronger local participation and more context-specific water policies, NCW initiatives will continue to struggle with ineffective implementation and limited impact.

9.1.3 Institutional Barrier: Fragmentation, Lack of Coordination, and Resistance to Change

In Algeria, institutional fragmentation and poor coordination between different agencies slow the adoption of non-conventional water use (NCW) solutions, particularly aquifer recharge. The absence of a unified governance framework leads to delays, inefficiencies, and competing institutional interests, making it difficult to implement innovative water management strategies.

One of the key obstacles is that existing institutions operate within rigid, traditional frameworks, creating bureaucratic inertia and resistance to change. Many decision-making structures are deeply entrenched in conventional water management approaches, making it challenging to introduce new models for NCW, even when technical solutions exist.

Institutional challenges are further compounded by unclear responsibilities among different governmental bodies, causing overlapping mandates and conflicts in water resource management. This results in delays in project approval, inefficient allocation of resources, and difficulties in enforcing water conservation policies. Additionally, the lack of collaboration between research institutions and government agencies prevents the integration of scientific advancements into policy and practice, limiting the effectiveness of NCW implementation.

Overall, Algeria's institutional barriers are driven by weak inter-agency coordination, bureaucratic resistance to innovation, and a lack of integration between research and policy-making. Without structural reforms to enhance collaboration, streamline decision-making, and foster institutional adaptability, the expansion of NCW solutions will remain slow and inconsistent.

9.1.4 Economic Barrier: High Costs, Uncertain Viability, and Decline of Traditional Practices

In Algeria, the financial viability of NCW solutions, particularly artificial aquifer recharge, is often perceived as uncertain. Compared to traditional water management systems, which are seen as more reliable and cost-effective in the short term, NCW solutions face skepticism regarding their long-term benefits and economic feasibility. A primary concern is the high cost of implementation, especially given uncertainties in regional water demand. The investment required for building and maintaining recharge infrastructure may seem disproportionate, particularly when water availability and usage needs fluctuate. This financial unpredictability discourages both public and private investment, slowing the expansion of NCW solutions (Living Lab responses).

In parallel, modern large-scale hydraulic projects—designed to provide more water—have had unintended environmental and economic consequences. While these projects have increased agricultural yields, they have also led to the depletion of aquifers, the disappearance of water sources, and a shift from collective to individual irrigation practices. This transition has resulted in the erosion of traditional water-sharing systems and the decline of historical conservation techniques that once played a key role in water sustainability.

Traditional rainwater recovery, floodwater spreading, and groundwater recharge techniques—once widely practiced—are now being abandoned due to deteriorating infrastructure, lack of financial support, and limited time for farmers to maintain these systems. Many farmers have switched to wells, often resorting to unregulated water extraction, further exacerbating resource depletion and economic disparities.

Overall, Algeria's economic barriers to NCW adoption stem from high implementation costs, uncertainty in long-term viability, and the decline of traditional water management practices. Without financial incentives, investment in maintenance, and policies to integrate NCW into regional development strategies, these solutions will remain financially unattractive and underutilized.

9.1.5 Normative Barrier: Outdated Legal Frameworks and Slow Regulatory Updates

In Algeria, outdated or poorly defined legal frameworks create regulatory obstacles to the adoption of non-conventional water use (NCW), particularly for aquifer recharge. The lack of clear laws or delays in updating existing regulations limits the ability to introduce innovative models for water management.

There are no reported issues with the interpretation of current laws, but the absence of specific regulatory provisions for NCW makes its implementation more complex. Without a well-defined legal framework, projects related to aquifer recharge and other NCW solutions face delays and administrative barriers.

The slow pace of regulatory adaptation remains a key challenge. As NCW practices evolve, legal updates are necessary to establish clear guidelines and ensure structured implementation that aligns with national water management strategies.

9.1.6 Technical Barrier: Inadequate Infrastructure and Challenges in Technology Adaptation

In Algeria, the current infrastructure is often inadequate to support artificial aquifer recharge models. There is a lack of specialized facilities and irrigation networks, which reduces the effectiveness of NCW projects. One of the main technical challenges is the difficulty in adapting artificial recharge technologies to local conditions. Essential data, such as permeability and hydraulic conductivity, are often missing due to the lack of piezometers to measure these parameters. Additionally, maintenance of equipment and integration with existing water systems remain problematic.

In a broader context, large irrigation infrastructure and irrigation systems are already in poor condition. Challenges such as reservoir silting, defective irrigation systems, and water losses due to infiltration into sandy soils further complicate NCW implementation. Traditional hydraulic techniques for soil and water conservation, including floodwater spreading and groundwater recharge, are gradually being abandoned, due to infrastructure deterioration, lack of resources, and limited time for maintenance. Farmers are increasingly turning to alternative water sources, such as wells, including illegal ones, further exacerbating water management difficulties.

Overall, technical barriers in Algeria stem from inadequate infrastructure, lack of key data for recharge models, and challenges in maintaining both traditional and modern water management systems. Without investment in technical capacity, infrastructure improvements, and enhanced monitoring tools, NCW solutions will remain difficult to scale and sustain.

9.1.7 Cognitive Barrier: Limited Technical Knowledge and Need for Specialized Training

In Algeria, there is a lack of sufficient knowledge and training among stakeholders regarding the use and maintenance of non-conventional water use (NCW) technologies. The absence of specific technical skills in areas such as artificial aquifer recharge is a major obstacle to the effective implementation and long-term sustainability of these solutions.

To address this gap, targeted training programs are needed in key areas, including hydrogeological data acquisition, maintenance of recharge equipment, and the use of modeling tools for groundwater management. Additionally, ongoing training on emerging practices and technologies is essential to ensure that stakeholders can adapt to evolving NCW methods and optimize their performance over time. Without structured capacity-building initiatives and continuous technical education, the adoption and effectiveness of NCW solutions in Algeria will remain limited, as stakeholders lack the necessary expertise to manage and maintain these systems efficiently.

9.1.8 Behavioral Barrier: Influence of Local Practices and Weak Integration of Social Factors

In Algeria, local practices, habits, and beliefs play a critical role in the success of NCW initiatives, particularly in aquifer recharge. Communities are more likely to support technologies and innovations that align with their existing cultural and social practices, making these factors essential for successful adoption. However, these social dimensions have often been insufficiently considered in NCW projects.

In many cases, new water management innovations have been introduced without taking into account local customs and realities, leading to resistance or only partial adoption by communities.

Historically, farmers in Algeria have relied on traditional hydraulic techniques, such as rainwater harvesting, floodwater spreading, and groundwater recharge, which require collaboration for maintenance and water sharing. However, these practices are being abandoned due to infrastructure deterioration, lack of financial resources, and time constraints. As a result, many farmers are shifting to individual water sources, such as wells, which are sometimes unregulated or illegally constructed.

The lack of social integration in NCW strategies contributes to adoption challenges. Without greater alignment between new technologies and local water management traditions, as well as more inclusive decision-making processes, efforts to implement NCW solutions will likely face continued skepticism and limited community engagement.

Table 4. Main Barriers to water transition in Algeria

	Barriers	Definition	Description
1	Intersectoral barrier	Lack of relationships between actors at different levels, absence of individuals, collective, and technical synergies, and/or emergence of conflicts around an innovation.	Weak coordination and lack of collaboration between stakeholders. Institutional fragmentation and absence of cross-border cooperation with Tunisia hinder transboundary aquifer management.
2	Political barrier	Lack of clear political support for local initiatives, absence of participation and consideration of local needs, and international orientation by funders towards policies and projects unsuitable for Southern regions.	Limited political support for local NCW initiatives, particularly aquifer recharge. Centralized decision-making excludes local communities, and international funding priorities do not align with regional needs
3	Institutional barrier	Institutional fragmentation and internal coordination problems, strong institutionalization of the existing sociotechnical regime entrenched in daily institutional practices and logics.	Institutional fragmentation and poor coordination slow NCW adoption. Resistance to change within governmental structures and lack of integration of scientific research further hinder implementation.
4	Economical barrier	Lack of visualization of the benefits and economic viability of the innovation compared to established regimes, or costs too high relative to demand uncertainty.	High implementation costs and uncertainty about long-term viability discourage investment. Traditional water-sharing practices are being abandoned due to financial and logistical constraints

5	Normative barrier	Regulatory obstacles produced by legal frameworks or poor definition of laws leading to interpretation issues.	Outdated or poorly defined legal frameworks create regulatory uncertainty for NCW adoption. The slow pace of regulatory updates limits structured implementation and long-term planning.
6	Technical barrier	Inadequate infrastructure, difficulties in use or malfunction of the innovation.	Inadequate infrastructure to support artificial recharge models. Lack of key hydrogeological data, poor equipment maintenance, and deteriorating irrigation infrastructure reduce effectiveness.
7	Cognitive barrier	Lack of knowledge to use or maintain new technologies.	Insufficient knowledge and technical training among stakeholders. Limited capacity-building efforts hinder the ability to manage and maintain NCW technologies effectively.
8	Behavioral barrier	Failure to consider contexts (practices, habits, beliefs) in developing innovation and the economic, social, and environmental benefits it can provide.	Local habits and beliefs strongly influence NCW adoption. Poor integration of social and cultural factors into new initiatives leads to resistance and limited acceptance by communities.

9.2 Drivers

9.2.1 Shared Vision Driver: The Absence of a Common Strategy Limits NCW Adoption

In Algeria, there is no clear and widely shared vision supporting the transition to new water management models focused on aquifer recharge. This lack of a unified perspective limits the effectiveness of collective efforts and results in fragmented perceptions among stakeholders, reducing engagement and slowing down the adoption of NCW technologies.

According to field contributions, the absence of a common vision has led to a lack of coordinated initiatives, making it difficult to mobilize different actors around NCW solutions. Although no structured collaboration has been identified, some localized efforts have emerged in response to water scarcity. Farmers, particularly in oasis regions, have adapted traditional water harvesting and irrigation techniques to their needs, implementing circular practices such as rainwater collection, aquifer recharge, and improved drainage systems. These practices enable water reuse and efficiency at the local level.

However, these adaptations remain independent initiatives rather than part of an integrated national strategy. The existing fragmentation prevents broader cooperation and limits the large-scale development of NCW solutions.

9.2.2 Cognitive Driver: Limited Knowledge Integration and Professional Learning Hinder NCW Expansion

The creation and assimilation of knowledge on artificial aquifer recharge in Algeria are primarily supported through local case studies, collaborative research projects, and awareness initiatives. However, despite these efforts, the integration of this knowledge into national policies remains slow, limiting its impact on the financing and expansion of NCW solutions.

There are currently no significant efforts to support professional learning or promote changes in practices related to artificial recharge. This gap restricts the dissemination of necessary knowledge and technical skills, creating obstacles to the effective implementation of NCW technologies.

At the local level, individual and social learning processes play an important role in raising awareness among stakeholders about the potential benefits of artificial recharge. These processes facilitate the exchange of practical knowledge and encourage broader adoption of NCW methods. However, without structured professional training and policy alignment, these learning efforts remain scattered and do not translate into widespread, sustainable adoption.

9.2.3 Institutional Driver: The Role of the Hydrographic Basin Agency in Supporting NCW Innovation

In Algeria, the Hydrographic Basin Agency (ABH) serves as a key formal institution facilitating experimentation and innovation in water management. It plays a central role in coordinating initiatives related to artificial aquifer recharge and in implementing pilot projects aimed at enhancing NCW solutions.

While ABH provides a structured institutional mechanism to support the adoption of NCW technologies, no additional mechanisms were identified that actively promote their large-scale installation. The agency's efforts remain focused on pilot projects rather than comprehensive national programs, limiting the widespread adoption of NCW solutions. Strengthening institutional frameworks and expanding support mechanisms could enhance the scalability of artificial recharge initiatives across the country.

9.2.4 Individual Driver: Lack of Key Promoters of NCW

In Algeria, there are no key promoters or influential figures who have actively championed the transition toward artificial recharge models. The absence of strong leadership has limited the momentum necessary for advancing NCW solutions, leaving efforts largely fragmented and lacking coordinated direction.

Without influential individuals advocating for change, there has been little impact on the regulatory framework or on mobilizing institutional and financial support for artificial recharge. Leadership plays

a crucial role in overcoming initial barriers, yet in this case, there are no documented examples of individuals driving progress or pushing for policy reforms to facilitate NCW implementation.

The lack of centralized leadership and advocacy has contributed to slow adoption rates and weak institutional backing. Establishing key figures—whether policymakers, researchers, or local water experts—to champion NCW initiatives could help bridge the gap between technical knowledge, political will, and practical implementation.

9.2.5 Networks Driver: Lack of Structured Networks

In Algeria, there are no structured networks involving stakeholders at different levels to support the dissemination or scaling of innovations in artificial aquifer recharge. Existing initiatives remain mostly local, lacking coordination at the regional or national level. This absence of well-established networks hinders the widespread adoption of NCW solutions, as knowledge sharing and coordinated efforts are minimal.

Due to the lack of strong network structures, the success of artificial recharge initiatives depends heavily on local engagement rather than on broader collaboration. Without organized stakeholder interaction, the diffusion of best practices, access to technical support, and financial mobilization remain limited.

While collaboration across different scales—local, regional, and national—could significantly improve the support for NCW solutions by promoting knowledge exchange, funding coordination, and pilot project expansion, such collaboration remains insufficient. Strengthening formal and informal networks could facilitate the adoption of NCW technologies by aligning efforts and resources across multiple levels.

9.2.6 Political Driver: Lack of National Policy and Regulatory Framework Hinders NCW Development in Algeria

In Algeria, political support for artificial aquifer recharge exists at the local level but remains limited to specific initiatives. However, at the national level, there is no structured support to drive a coordinated transition toward NCW solutions. The absence of a national strategy and aligned public policy instruments significantly impedes the effective implementation and scaling of artificial recharge models.

There is currently no regulatory framework specifically designed to support artificial recharge, nor have any significant policy actions been taken to promote its adoption. Existing initiatives depend mainly on the efforts of institutions like the Hydrographic Basin Agency (ABH) rather than on a broader government-led program.

While traditional hydraulic techniques such as rainwater collection, floodwater diversion, and aquifer recharge have historically been practiced, state support remains insufficient, particularly for small and medium-sized water conservation structures. Instead, most governmental funding is directed toward large-scale unconventional water projects, such as desalination, water transfers, and wastewater treatment, leaving artificial recharge largely unsupported.

A coherent national policy and dedicated regulatory framework would be necessary to facilitate the sustainable development of NCW technologies. Increased political commitment, strategic funding mechanisms, and policy alignment at all levels could enable broader adoption and integration of artificial recharge models into Algeria's water management system.

9.2.7 Normative Driver: Absence of Clear Legal Support for NCW Implementation in Algeria

In Algeria, there is no clear legal framework to facilitate the implementation of artificial aquifer recharge models. The current legal system lacks specific regulations to govern this practice, creating uncertainty and limiting the ability of stakeholders to adopt and implement NCW solutions effectively.

Regulatory measures do not provide adequate support for stakeholders involved in artificial recharge. The absence of clear standards and formal procedures makes it difficult for institutions, farmers, and water managers to integrate recharge techniques into existing water management strategies. Without a structured legal framework, the implementation of these solutions remains fragmented and dependent on local initiatives rather than being part of a coordinated national effort.

Additionally, the lack of regulatory assistance and technical guidelines prevents stakeholders from correctly applying artificial recharge methods. There are no official mechanisms to ensure proper implementation, monitor performance, or provide necessary adjustments to optimize the efficiency of recharge projects.

To advance NCW adoption in Algeria, developing a dedicated regulatory framework with clear legal guidelines, procedural support, and formalized standards would be essential. Such measures would help institutionalize artificial recharge and provide a stable foundation for its broader application across the country.

9.2.8 Economic Driver: Lack of Financial Support and Market Demand for NCW

In Algeria, there is no significant financial support from stakeholders to facilitate the widespread adoption of artificial recharge models. Projects lack structured funding mechanisms and rely on sporadic, uncoordinated financial sources, which limits their scalability and long-term sustainability.

Additionally, there is no well-established market or sufficient demand to drive the adoption of artificial recharge. The absence of institutional support and public awareness has contributed to the underdevelopment of this practice, preventing it from becoming a viable alternative within Algeria's broader water management strategies.

One of the few financial instruments available is the National Agricultural Development Fund (FNRDA), which has provided some funding for specific artificial recharge initiatives. However, its impact remains limited and insufficient to promote large-scale adoption or to serve as a comprehensive financial mechanism supporting NCW implementation.

To advance artificial recharge in Algeria, it would be necessary to develop stronger financial incentives, increase public and private investment, and integrate recharge models into national water management policies. Without these measures, the economic viability of NCW solutions will remain weak, hindering their long-term sustainability.

Table 4. Main Drivers to water transition in Algeria

	Drivers	Definition	Description
1	Shared vision driver	The existence of a common vision that shifts collective perception towards a new regime or widespread adoption of innovation.	No clear common vision for artificial recharge exists, leading to fragmented perceptions and low stakeholder engagement.
2	Cognitive driver	The creation and assimilation of knowledge to enhance policy orientation; the presence of professional knowledge to support innovation; individual and social learning to change practices.	Knowledge creation is supported through case studies and research projects, but policy integration and professional learning efforts remain limited.
3	Institutional driver	The existence of formal and informal institutions to drive experimentation, a coherent and flexible framework, and multiple institutional mechanisms to facilitate regime change and support this transition.	The Hydrographic Basin Agency (ABH) plays a role in facilitating innovation, but there are no widespread institutional mechanisms supporting NCW adoption.
4	Individual driver	The presence of a promoter who uses their influential power to support the transition, particularly from the beginning of the process and to steer towards regulatory framework change.	There are no key promoters or influential figures driving artificial recharge, which limits momentum for its implementation.
5	Networks drivers	The existence of networks with actors located at other scales to support innovations, their diffusion, or scaling up.	There are no structured networks at different levels to support diffusion or scaling of artificial recharge, resulting in local and uncoordinated initiatives.
6	Political driver	Political support from state actors and coherence of public policy instruments to support the transition.	Political support exists at the local level but is limited to specific initiatives. There is no structured national strategy or regulatory framework to facilitate NCW adoption.
7	Normative driver	Legal support through the presence of clear and strict regulatory measures, and assistance to	No clear legal framework exists to regulate artificial recharge. The absence of standards and procedural

		stakeholders for their proper implementation.	guidelines makes implementation difficult for stakeholders.
8	Economic driver	The existence of financial support from various stakeholders and demand or market to support the innovation.	There is no significant financial support or structured funding mechanisms for artificial recharge. The National Agricultural Development Fund (FNRDA) provides limited financial assistance but is insufficient for large-scale adoption.

10 Conclusions: Challenges and Opportunities for NCW Development in Algeria

The implementation of non-conventional water (NCW) solutions in Algeria faces significant barriers but also presents key opportunities for development. Based on the analysis of both barriers and drivers, the main conclusions are as follows:

10.1 Persistent Barriers Hindering NCW Adoption

The intersectoral and institutional barriers remain major obstacles, with fragmented governance, lack of coordination between agencies, and limited collaboration between stakeholders. This fragmentation results in isolated initiatives rather than an integrated strategy for aquifer recharge and water management. Regulatory and political barriers further exacerbate the issue, as the absence of a clear legal framework and structured national policies prevents widespread adoption of artificial recharge models.

From an economic perspective, the lack of financial incentives, limited state support, and an undeveloped market for NCW solutions make large-scale implementation difficult. High initial investment costs combined with uncertainty in water demand discourage stakeholders from investing in these technologies. Additionally, technical barriers, such as inadequate infrastructure, lack of data collection mechanisms, and maintenance challenges, further hinder NCW expansion.

10.2 Drivers That Function as Opportunities for NCW Development

Among the identified drivers, only a few serve as genuine enablers of NCW rather than becoming additional barriers. Institutional mechanisms, such as the Hydrographic Basin Agency (ABH), have the potential to play a central role in facilitating experimentation and pilot

projects. However, these efforts remain limited in scope and require stronger institutional backing and policy integration to become effective at a national level.

Local knowledge and adaptive practices provide another key opportunity. Despite the lack of a shared national vision, farmers and local actors have developed water-saving and recycling techniques, including artificial recharge and small-scale circular irrigation practices. These existing practices can serve as a foundation for expanding NCW adoption if properly supported through capacity-building programs and funding mechanisms.

The political driver, although weak at the national level, provides localized support for artificial recharge models. Local government initiatives and specific funding sources, such as the National Agricultural Development Fund (FNRDA), have supported some small-scale projects. However, scaling these initiatives will require a more structured national policy framework and dedicated funding mechanisms.

In summary, while significant structural and financial barriers persist, Algeria does have some key enabling factors, particularly at the local institutional level and within farmer-led initiatives. Moving forward, bridging the gap between local innovation and national policy support will be crucial for the successful scaling of NCW technologies.