

Université MUSTAPHA Stambouli de Mascara



Faculté des Sciences et Technologies
Département d'Hydraulique
Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau (LSTE)

THESE DE DOCTORAT 3 ème Cycle

Spécialité: Ressources Hydrauliques

Délimitation des zones potentielles de recharge des eaux souterraines-cas du bassin versant de la Tafna

Présentée par: Mlle MEHELLA Oum Eldjilali Soumia

Soutenue publiquement, le 10/10/2025

Devant le jury composé de :

Président	GAIDI Laouni	Pr.	Université de Mascara
Examinateur	BENARICHA Boumediene	MCA	Université de Mascara
Examinateur	TIDJANI Abdelhafid El Bari	Pr.	Université USTO Oran
Rapporteur	BEKKOUSSA Belkacem Samir	Pr.	Université de Mascara
Rapporteur	MAHI Habib	MCA	CTS-ASAL Arzew

Année universitaire :2025–2026

Remerciement

Je tiens, avant tout, à exprimer ma profonde gratitude à mon encadrant, Monsieur le Professeur BEKKOUSSA Belkacem Samir de l'Université de Mascara, pour la confiance qu'il m'a accordée, la pertinence de ses orientations scientifiques, ainsi que pour sa rigueur et sa patience. Ses conseils avisés, son exigence méthodologique et son accompagnement constant ont été essentiels à l'aboutissement de ce travail.

J'adresse également mes vifs remerciements à mon co-encadrant, Monsieur MAHI Habib, Maître de Conférences A au CTS-ASAL Arzew, pour son suivi attentif, sa disponibilité, ses encouragements permanents et la richesse de ses suggestions, qui m'ont grandement soutenue et guidée tout au long de l'élaboration de cette thèse.

Je suis très honorée par la présence de Monsieur le Professeur GAIDI Laouni, Président du jury, et je lui exprime toute ma reconnaissance pour l'attention et l'intérêt portés à ce travail. Je remercie sincèrement Monsieur BENARICHA Boumediene, Maître de Conférences A à l'Université de Mascara, ainsi que Monsieur le Professeur TIDJANI Abdelhafid El Bari de l'Université USTO Oran, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'examiner ce manuscrit et pour leurs remarques constructives et enrichissantes.

Mes remerciements les plus respectueux vont à l'ensemble du jury pour le temps consacré à l'évaluation de cette recherche et pour la pertinence de leurs observations, qui ne manqueront pas de nourrir mes réflexions futures.

Je souhaite également témoigner toute ma reconnaissance à la grande famille de l'Université Mustapha Stambouli de Mascara, ainsi qu'au Centre de Technique Spatiale d'Arzew, pour leur appui et leur soutien institutionnel.

Enfin, je tiens à exprimer mes remerciements les plus sincères à Monsieur Bennia Ahmed et Monsieur L'Oussi Abdelkader, pour leur disponibilité, leur aide précieuse et leurs encouragements constants, qui m'ont été d'un grand réconfort tout au long de ce parcours.

MEHELLA Oum Eldjilali

Soumia

Dédicace

À mes **chers parents**,

Je vous dédie ce modeste travail, fruit de vos sacrifices, de vos prières et de votre amour inconditionnel. Vous êtes ma source de force, mon repère et mon plus grand trésor. Que Dieu vous accorde santé, bonheur et longue vie.

À mes deux adorables sœurs, **Rima** et **Zoulikha**, je vous souhaite une vie pleine de joie, de réussite et de sérénité. Vous êtes pour moi un soutien précieux et une source constante d'inspiration.

*Et à mon petit ange, mon bébé d'amour **Ghaith**, lumière de ma vie, je t'offre ce travail comme une promesse d'avenir et comme le symbole de l'amour infini que ta tante te porte.*

Je dédie ce travail à tous ceux qui m'ont portée quand je doutais, et crue quand je chutais.....

Sommaire

Sommaire	III
Liste des figures	IX
Liste des tableaux	XII
Résumé :	1
Abstract:	2
Introduction Générale	3

Partie I

Chapitre II Problématiques liées à la gestion des ressources en eau

Introduction	5
I.1. Pressions anthropiques et usages de l'eau dans le bassin de Tafna	5
I.1.1. Croissance démographique et urbanisation	5
I.1.2. Activités agricoles.....	6
I.1.3. Industries et exploitation minière.....	6
I.2. Impacts des changements climatiques sur les ressources en eau	7
I.3. Importance des eaux souterraines	8
I.4. Les défis d'estimation de recharge	12
I.5. Méthode d'estimation de recharge	12
I.5.1. Le bilan Hydrique	12
I.5.2. La modélisation.....	14
I.5.2.1. Les modèles de bilan hydrique de zones non saturée	14
I.5.2.2. Les modèles des bassins versant	15
I.5.2.3. les modèles d'écoulement des eaux souterraines	15
I.5.3. Les méthodes basées des données de surfaces.....	16
I.5.4. Les méthodes physiques : la zone non saturé	18
I.5.5. Les méthodes physiques : la zone saturée.....	20
I.5.6. Les méthodes de traçage chimiques	20
I.5.7. Les méthodes de traçage thermique	23
I.6. le choix de la méthode d'estimation de recharge.....	24
Conclusion.....	24

Chapitre II Généralités sur les SIG, de la télédétection, apprentissage automatique et des outils d'aide à la décision

Introduction.....	26
Section 1 : Généralités sur les données d'observation de la terre et le traitement	
I. Télédétection.....	28
I .1. Télédétection : historique, définition et principe.....	28
I.2. Aperçu du processus de télédétection électromagnétique.....	28
I.3. Elément de physique de rayonnement.....	29
I.4. Satellites et capteurs et types des images satellitaires.....	30
I.5. Acquisition et stockage des données.....	31
I.6. Prétraitement d'image.....	32
II. Systèmes d'Information Géographique (SIG).....	33
II.1. SIG : historique, définition, principes.....	33
II.2. L'information géographique.....	33
II.3. Domaines d'application des SIG.....	34
III . Méthode de classification.....	34
III .1. Méthodes classiques.....	35
III.1. 1. Classification non supervisée.....	35
III.1.2. Classification supervisée.....	36
III.2. Méthodes de classifications basées sur l'apprentissage automatique.....	36
III.2.1. Catégories de l'Apprentissage Automatique.....	37
III.3. Evaluation de performance de model.....	39
IV. Aide a la décision multicritères (ADMC).....	40
IV.1. Méthode d'aide a la décision multicritères.....	41
IV.2. Comparaison entre les méthodes d'aide a la décision.....	42
V. Comparaison entre les méthodes d'aide a la décision et les méthodes d'apprentissage automatique.....	43

Section 2 : Méthodes adopté dans cette étude

I. Classification supervisé : Maximum de vraisemblance.....	45
II. Méthode d'aide a la descision multicritaire	46
II.1. Processus Analytique Hiérarchique (AHP).....	46
III. Méthode d'apprentissage automatique	51
Conclusion.....	54

Partie II Application à la zone d'étude

Chapitre I Analyse Morphométrique et Hydrologique du Bassin Versant d'Étude

Introduction	57
--------------------	----

I. Localisation géographique	58
1.2. Géomorphologie générale	59
I.3.Réseau hydrographique.....	60
II. Le Choix d'un Sous-Bassin représentatif pour l'application de la méthodologie d'étude.	60
II.1. Localisation géographique.....	61
II.2. Caractéristiques Physiographiques	63
II.2.1. Caractéristiques Géométriques	63
II.2.1.1. Surface (A) et périmètre (P)	63
II.2.1.2. Caractéristiques De Forme	63
II.2.1.2.1. Coefficient de Gravelius (KG)	63
II.2.1.2.2. Répartition altimétrique du bassin versant	65
II.2.1.2.3. Rectangle équivalent.....	68
II.2.1.2.4. Indices des pentes	69
II.2.3. Caractéristiques hydrographiques du bassin versant	71
II.2.3.1. Hiérarchisation du réseau	71
II.2.3.2 Profil en long	72
II.2.3.3. Densité de drainage Dd.....	73
II.2.3.4. Fréquence des thalwegs d'ordre 1 (F1)	74
II.2.3.5. Coefficient de torrentialité (Ct)	75
II.2.3.6. Rapport de confluence (Rc).....	75
II.2.3.7. Rapport des longueurs (Rl).....	76
II.2.3.8. Temps de concentration des eaux (Tc) :	77
II.2.3.9. Vitesse de ruissellement	78
Conclusion.....	80

Chapitre II Contexte géologique et hydrogéologique

Introduction	80
II.1 Contexte géologique	81
II.1.1. Historiques des travaux	81
II.1.2. Configuration Lithostratigraphique de la région d'étude	82
II. 2. Contexte structural.....	86
II.2.1. Contexte géodynamique régional	86
II.2.2 Subdivisions structurales de l'Oranie	87
II.2.3. Structure géologique du bassin de la Tafna.....	87

II.3. Aspect hydrogéologique	88
II.3.1. Caractéristiques hydrogéologiques des formations	88
Conclusion.....	93

Chapitre III Contexte hydro-climatique

Introduction	94
III.1.Précipitations.....	94
III.1.1. Contrôle de la fiabilité des séries pluviométriques	94
III.1.2. Comblement des lacunes d'observations	95
III.1.3.Corrrection préalable par méthode des doubles cumuls.....	96
III.1.3.1.Principe et application	96
III.1.3.2. Test de Pettitt.....	98
III.1.4. Variabilité spatio-temporelle des précipitations.....	100
III.1.4.1. Variabilité spatio-temporelle des précipitations moyennes annuelles	100
III.1.4.2. Variabilité spatio-temporelle des précipitations moyennes mensuelles.....	101
III.1.4.3. Analyse des sécheresses (SPI).....	104
III.2. Température	106
III.3. Étude de l'évapotranspiration potentielle (ETP)	109
III.4. Hydrologie.....	112
III.4.1. Variation annuelle, mensuelle et saisonnière moyenne des débits.....	113
III.4.1.1. Variation des débits annuels moyens (m ³ /s).....	113
III.4.1.2. Variation mensuelle moyenne des débits	114
III.4.1.3. Variation saisonnière des débits	116
III.4.1.4. Variation du coefficient mensuel de débit (CMD).....	117
III.5. Diagrammes intégrateurs.....	119
III.5.1. Ombrothermique de GausSEN	119
III.5.2. Climagramme d'Emberger : Détermination des étages bioclimatiques.....	120
Conclusion.....	121

Chapitre IV Intégration des SIG, de la télédétection, des méthodes d'aide à la décision et du Machine Learning pour la délimitation des zones de recharge

Introduction	123
IV.1. Matériels.....	124
IV.1.1. Collecte des données	124
IV .1.2. Logiciel utilises	125
IV.2 Méthodologie	126

IV.2.1. La génération des cartes thématiques.....	126
IV.2.1.1. Carte d'occupation du sol et carte des fracturations	126
IV.2.1.1.A. Carte de l'occupation du sol	126
IV.2.1.1.B. Extraction et analyse des linéaments à partir d'images satellitaires.....	128
IV.2.1.1.C. Carte de précipitation	130
IV.2.1.1.D. Carte Geologique	131
IV.2.1.1.E. Carte de la densité de drainage	131
IV.2.1.1.F. Carte de la pente	131
IV .2.2. Génération des carte de potentielle de recharge.....	132
IV.2.2.1. Délimitation des zones potentielles de recharge par la méthode AHP	132
IV.2.2.1.1. Détermination des coefficients de pondération.....	132
IV.2.2.1.2. Agrégation des facteurs par pondération	135
IV.2.2.2. Délimitation des zones potentielles de recharge par L'apprentissage automatique	136
IV.2.2.2.1. Variable cibles : données des puits d'eau	137
VI.2.2.2.2 Procédure de cartographie prédictive basée sur le Machine Learning.....	138
IV.3. Résultats	140
IV.3.1. Génération des cartes thématiques	140
IV.3.1.1. Carte d'occupation du sol	140
IV.3.1.2. Carte de précipitation	141
IV.3.1.3. Carte lithologique.....	142
IV.3.1.4. Carte de la densité des linéaments	144
IV.3.1.5. Carte de densité de drainage	146
IV.3.1.6. Carte de pente.....	146
IV.3.2. Délimitation des zones potentielles de recharge par AHP	147
IV.3.3. Délimitation des zones potentielles de recharge par L'apprentissage automatique...	155
IV.3.3.1. Analyse de colinéarité	155
IV.3.3.2. La performance des modèles.....	157
IV.3.3.3. Importance des variables explicatives.....	158
IV.3.3.4. La génération des cartes des potentielles en eaux souterraine en utilisant les trois Modèles	160
IV.4. Discussion	161
IV.4.1. Moyenne arithmétique des modèles ML.....	162
IV.4.2.Comparaison de l'importance des facteurs selon le modèle SVM et la méthode AHP	163

IV.4.3.Limite de des méthodes ML (Machines Learning) et AHP	164
IV.4.4.Perspectives.....	165
Conclusion.....	165
Conclusion générale	167
Références	190

Liste des figures

Figure I.1 Niveau de stress hydrique dû au secteur agricole, par bassin, 2018(FAO,2021)	7
Figure I.2 Aperçu de la distribution de l'eau douce, de l'eau salée et des autres formes d'eau à l'échelle mondiale (source : UNESCO-WWAP, 2006).....	8
Figure I.3 Schéma conceptuel de la colonne de sol, de la surface terrestre à la base de l'aquifère, illustrant les différents compartiments de stockage	19
Figure II.1 Principe général de Télédétection.....	31
Figure II.2 Images radar (a) et optique (b) de la région de Tafna.....	31
Figure II.3 Les trois domaines d'intelligence artificielle.....	37
Figure II.4 Déroulement du processus AHP.....	47
Figure II.5 Architecture d'AHP.....	48
Figure II.6 Schéma de classification par Forêts aléatoires (RF)	59
Figure II.7 Schéma de classification par XGBoost (XGB).....	59
Figure II.8 Schéma de classification par machine à vecteurs de supports (SVM).....	59
Figure I.1 Situation géographique du bassin versant de la Tafna et des sous bassin	59
Figure I.2 Principaux oueds dans le bassin versant de la Tafna.....	60
Figure I.3 Localisation géographique du bassin de Oued Isser-Sikkak	61
Figure I.4 principaux oueds dans le bassin de Oued Isser-Sikkak	62
Figure I.5 Carte hypsométrique du bassin de Oued Isser-Sikkak	65
Figure I.6 Courbe hypsométrique du bassin versant de l'Oued Isser-Sikkak	66
Figure I.7 Rectangle équivalent avec tranches d'altitudes (m) du bassin versant de l'Oued Isser-Sikkak	69
Figure I.8 Carte des pentes du bassin versant de Oued Isser-Sikkak	70
Figure I.9 Carte du réseau hydrographique du bassin De O, Isser-Sikkak	71
Figure I.10 Profil en long du cours d'eau principale.....	72
Figure I.11 Rapport de confluence.....	76
Figure I.12 Rapport de la longueur	77
Figure II.1. Cadre géologique du l'Oranie (Extrait de la carte géologique de l'Algérie au 1/500.000, in BOUCIF, 2006).....	85
Figure II.2 Log stratigraphique des différentes formations géologiques dans le bassin de la Tafna Bensert (1986)	86
Figure II .3. coupe schématique au niveau d'Oued Isser (Bouanani A , 2004) modifié	88
Figure II.4. Coupe schématique d'Ain Foura Supérieure (Hayane, 1983)	89
Figure II.5 . Coupe Hydrogéologique (Hayane, 1983)	91

Figure III.1 La repartition spatiale des stations pluviometrique.....	95
Figure III.2.a Corrélation avant la correction – la méthode de double cumul- (Lalla Setti – Stations).....	97
Figure III.2.b Test de double cumul entre la station de Lalla setti et les six stations (après correction).....	98
Figure III.3 Évolution des précipitations annuelles dans diverses stations (1974-2008) ...	101
Figure III.4 Précipitations mensuelles des 7 sautions.....	104
Figure III.5 l'Indice Pluviométrique Standardisé (SPI) des 9 stations	106
Figure III.6 Température moyenne mensuelle (°C) à la station de Zenata (1981-2010)....	107
Figure III.7 Température moyenne annuelle (°C) à la station de Zenata (1981-2009)	107
Figure III.8 Variation saisonnière des précipitations, de l'évapotranspiration potentielle et de la température	111
Figure III.9 Représentation graphique de déficit agricole pour la période (1996-2015) la station de Zenata.....	111
Figure III.10 La variation annuelle des débits au niveau des 8 stations	114
Figure III.11 La variation mensuelle des débits au niveau des 8 stations	116
Figure III.12 La variation saisonnière des débits au niveau des 8 stations.....	117
Figure III.13 La variation de coefficient moyen de débit (CMD) au niveau des 8 stations	119
Figure III.14 Diagramme Ombrothermique de Zenata.....	120
Figure III.15 Climagramme d'Emberger	121
Figure IV.1 Extraction automatique des linéaments	129
Figure IV.2 Extraction manuelle des linéaments	130
Figure IV.3 Organigramme méthodologique adapté pour la délimitation des zones potentielles en eau souterraine	136
Figure IV.4 Répartition géographique des points d'eau exploités dans le cadre de cette étude.	138
Figure IV.5 Méthodologie pour la cartographie du potentiel en eau souterraine en basant sur l'apprentissage automatique.....	140
Figure IV.6 La carte d'Occupation du sol de bassin de oued Isser-Sikkak	141
Figure IV.7 La carte de précipitation de bassin de oued Isser-Sikkak	142
Figure IV.8 Coupe géologique du bassin de l'Oued Isser-Sikkak (1/200.000) (Gentil, 1902)	143
Figure IV.9 Répartition des ensembles lithologiques sur le bassin versant de l'oued Isser-Sikkak	143
Figure IV.10 La carte de densité des linéaments du bassin d'oued Isser-Sikkak	145

Figure IV.11 Distribution des classes densité des linéaments dans le bassin versant de l’Oued Isser-Sikkak	145
Figure IV.12 .La carte de densité de drainage de bassin de Oued Isser-Sikkak	146
Figure IV.13 .La carte des pentes du bassin de oued Isser-Sikkak	147
Figure IV.14 La cartes des zones potentiel de recharge générées par la méthode AHP.....	148
Figure IV.15 Répartition des puits sur la zone d'étude	150
Figure IV.16 Schéma montrant la situation des points d'eau dans le Modèle ; <i>A</i> : <i>Superficie</i> , <i>P</i> : <i>Productivité</i>	153
Figure IV.17 Carte piézométrique du bassin de Oued Isser-Sikkak	154
Figure IV.18 Analyse de la courbe ROC pour le modèle AHP.	155
Figure IV.19 Matrice de corrélation entre les 6 paramètres.....	156
Figure IV.20 Analyse de la courbe ROC pour les modèles d'apprentissage automatique. ..	158
Figure IV.21 Poids relatifs des variables selon le model SVM. (La somme des poids attribués à l'ensemble des caractéristiques est égale à un).	159
Figure IV.22 Cartes du potentiel d'eau souterraine générées par les modèles RF, XGBoost et SVM	160
Figure IV.23 Cartes comparatives des zones potentielles de recharge des eaux souterraines dans le bassin de l’Oued Isser-Sikkak, obtenues par les approches AHP (à gauche) et Apprentissage automatique (ML, à droite).	162
Figure IV.24 Comparaison de l'importance des facteurs (SVM Vs AHP)	163

Liste des tableaux

Partie I

Tableau II.1 Comparaison des principales méthodes d'aide à la décision multicritère (MCDM).....	42
Tableau II.2 Comparaison entre les méthodes d'apprentissage automatiques et les méthodes d'aides à la décision multicritères (MCDM).....	43
Tableau II.3 Interprétation de l'échelle des jugements verbaux (Saaty, 1980)	48
Tableau II.4 Matrice des jugements.....	49
Tableau II.5 Indices RI pour calculer le ratio de cohérence (Saaty, 1977).....	50

Partie II

Tableau I.1 Superficie et périmètre du bassin de l'Oued Isser-Sikkak	63
Tableau I.2. Répartition altimétrique du bassin de l'oued Isser- Sikkak.....	66
Tableau I.3 Détermination de la pente de Roche Ip.....	69
Tableau I.4 Classification O.R.S.T.O.M du relief à partir de l'indice de pente global	70
Tableau I.5 Hiérarchisation du réseau hydrographique du Bassin de O.Isser-Sikkak.....	72
Tableau I.6 Rapport de confluence du bassin de Oued Isser-Sikkak.....	75
Tableau I.7 Rapport de la longueur du bassin de Oued Isser-Sikkak	77
Tableau I.8 Tableau récapitulatif des paramètres physiques du BV d'oued Isser-Sikkak....	79
Tableau III.1 Stations pluviométriques retenues	95
Tableau III.2 Les résultats de test de Pettitt	100
Tableau III.3 Les précipitations mensuelles	101
Tableau III.4 Température moyenne mensuelle (°C) à la station de Zenata (1981-2010)..	106
Tableau III.5 La variation mensuelle de Température, précipitation et évapotranspiration potentielle (ETP) au niveau de la station de Zenata.....	110
Tableau III.6 Les périodes de disponibilité des données pour les stations hydrométriques retenus	111
Tableau III.7 Le débit moyen annuel des 8 stations	113
Tableau III.8 La variation mensuelle des débits au niveau des 8 stations.....	115
Tableau III.9 La variation saisonnière des débits au niveau des 8 stations	116
Tableau III.10 La variation de coefficient mensuel de débit (CMD) au niveau des 8 stations	118
Tableau IV.1 Données collectées, leurs sources et leur utilisation.....	125
Tableau IV.2 Matrice de confusion de la classification par maximum de vraisemblance ..	127

Tableau IV.3 Matrice de confusion de la classification par maximum de vraisemblance (en pourcentage)	128
Tableau IV.4 Matrice de comparaison par paires et poids normalisés en pourcentage des critères utilisés.....	133
Tableau IV.5 Classification des critères d'influence pour les zones de potentiel des eaux souterraines.....	134
Tableau. IV.6 Les classes du potentiel de la recharge du bassin de Oued Isser-Sikkak selon la méthode AHP	148
Tableau IV.7. Comparaison de la carte de la zone potentielle des eaux souterraines avec la productivité des 43 puits étudié.....	151
Tableau IV.8. Les métriques de performance de modèle (AHP).....	155
Tableau IV.9. Les métriques de performance des modèles (XGBoost, Forêt Aléatoire et SVM).....	158
Tableau IV.10 Pourcentage des superficies correspondant aux cinq classes de potentiel de recharge, selon les trois modèles (XGBoost, Forêt Aléatoire et SVM).	160

Liste des abréviations

ACP : Analyse en Composantes Principales.

ADMC : Aide à la décision multicritères.

AHP : Analyse Hiérarchique des Processus.

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.

AUC : Aire Sous la Courbe

DD : Densité de drainage

DL : Densité des linéaments

GWPZ : Groundwater Potential Zones /Zones potentielles en eau souterraine.

L : Lithologie.

MAE : Erreur absolue moyenne.

ML : Machine learning .

MNT : Modèle Numérique de Terrain.

ONM : Office national de météorologie.

OS : Occupation du sol.

P : précipitation.

R : Recharge.

RF : Random Forest/ Forêt Aléatoire.

RMSE : Erreur quadratique moyenne.

ROC : Receiver Operating Characteristic.

RS : Télédétection.

S : Pente .

SIG : Système d'Information Géographique.

SVM : Support Vector Machine.

XGB/XGBoost : eXtreme Gradient Boosting.

Résumé :

Dans un contexte de stress hydrique croissant en Algérie, la préservation et la gestion durable des ressources en eau souterraine s'imposent comme des priorités stratégiques. La présente thèse a pour objectif la délimitation des zones potentielles de recharge des nappes souterraines dans le bassin versant de l'Oued Isser-Sikkak, situé au nord-ouest de l'Algérie. Pour ce faire, deux approches complémentaires ont été mises en œuvre : la méthode d'aide multicritère à la décision AHP (Analytic Hierarchy Process) et des modèles d'apprentissage automatique (Random Forest, SVM et XGBoost).

Dans la première approche, six facteurs influençant la recharge ont été intégrés : la lithologie, les précipitations, la pente, la densité de drainage, la densité des linéaments et l'occupation du sol. L'analyse par paires a révélé que la lithologie constitue le critère prépondérant, suivie des précipitations. L'intégration pondérée des cartes thématiques à l'aide de l'outil *Weighted Overlay* a permis de générer une carte des zones à potentiel de recharge. Celle-ci montre que le sud du bassin présente un potentiel élevé à très élevé, tandis que les zones à faible potentiel se situent principalement au nord-ouest et dans la vallée de l'Oued Sikkak, caractérisée par un ruissellement important et une faible infiltration. La carte obtenue a été validée par les données réelles de débits de puits, révélant une concordance satisfaisante de l'ordre de 83.7 %.

La seconde approche repose sur l'intelligence artificielle. Les modèles ont été entraînés à partir d'un jeu de données comprenant 72 points d'eau, répartis en deux sous-ensembles : 70 % pour l'entraînement et 30 % pour la validation. L'évaluation des performances, fondée sur plusieurs indicateurs (AUC, précision, coefficient de Kappa, etc.), a montré une efficacité remarquable des trois algorithmes, avec une aire sous la courbe ROC atteignant 0,93 pour le modèle SVM.

Cette étude démontre la pertinence de l'intégration des outils de télédétection, des SIG et des méthodes d'analyse avancée pour l'identification des zones favorables à la recharge. Les résultats obtenus constituent un apport précieux pour la planification et la gestion durable des ressources en eau dans les régions semi-arides.

Mots-clés : Recharge ; GWPZ ; SIG ; Télédétection ; AHP ; Apprentissage automatique.

Abstract:

In the context of increasing water stress in Algeria, the preservation and sustainable management of groundwater resources have become strategic priorities. This thesis aims to delineate potential groundwater recharge zones in the Oued Isser-Sikkak watershed, located in northwestern Algeria, by integrating two complementary approaches: the Analytic Hierarchy Process (AHP) and machine learning models (Random Forest, SVM, and XGBoost).

In the first approach, six key factors influencing groundwater recharge were considered: lithology, precipitation, slope, drainage density, lineament density, and land use/land cover. Pairwise comparison analysis revealed that lithology is the most influential factor, followed by precipitation. The weighted overlay of thematic maps generated a recharge potential map, showing that the southern part of the basin has high to very high recharge potential. In contrast, low potential zones are mainly found in the northwest and in the Oued Sikkak valley, an area characterized by high surface runoff and low infiltration. The resulting map was validated using actual well discharge data, with a strong agreement of approximately 83.7%.

The second approach involved machine learning algorithms. The models were trained using a dataset of 72 wells, divided into 70% for training and 30% for validation. Model performance, evaluated using various indicators (AUC, accuracy, Kappa coefficient, etc.), demonstrated high predictive capacity, with the SVM model achieving an AUC of 0.93.

This study highlights the relevance of combining remote sensing tools, GIS, and advanced spatial analysis techniques for the identification of favorable groundwater recharge areas. The generated maps serve as valuable decision-support tools for sustainable water resource planning and management in semi-arid regions.

Keywords: Recharge; GIS; GWPZ; Remote sensing; AHP; Machine learning.

Introduction Générale

Dans un contexte mondial marqué par la raréfaction des ressources en eau, notamment dans les zones arides et semi-arides, l'eau souterraine constitue une ressource stratégique pour assurer la sécurité hydrique et soutenir le développement socio-économique durable. En Algérie, les effets combinés du changement climatique, de la variabilité pluviométrique et de l'augmentation démographique exercent une pression croissante sur les nappes phréatiques. Cette situation impose une réévaluation des stratégies de gestion et de protection de cette ressource vitale, en s'appuyant sur des outils scientifiques modernes, précis et adaptés.

La nécessité de délimiter les zones à fort potentiel de recharge en eau souterraine s'impose comme une priorité pour assurer un approvisionnement en eau fiable, durable et spatialement équilibré. Les approches traditionnelles de prospection et d'évaluation des ressources souterraines, souvent coûteuses, ponctuelles et peu représentatives à l'échelle régionale, atteignent leurs limites. Dans ce contexte, l'émergence des technologies de télédétection, des Systèmes d'Information Géographique (SIG), de l'analyse multicritère et de l'apprentissage automatique offre de nouvelles perspectives méthodologiques, permettant une évaluation plus globale, intégrée et précise du potentiel hydrogéologique d'un territoire.

Cette recherche s'inscrit dans cette dynamique d'innovation méthodologique, en combinant des données environnementales, géologiques, morphologiques et climatiques avec des approches décisionnelles et d'intelligence artificielle. Elle vise à identifier, cartographier et analyser les zones favorables à l'infiltration et à l'accumulation d'eau souterraine au sein du bassin versant de l'Oued Isser-Sikkak, situé au nord-ouest de l'Algérie. L'objectif principal est de proposer une méthode robuste, reproductible et opérationnelle pour la cartographie des zones à fort potentiel de recharge, en s'appuyant notamment sur la méthode Analytic Hierarchy Process (AHP) et des algorithmes d'apprentissage supervisé tels que Random Forest, SVM et XGBoost.

La question centrale qui guide ce travail est la suivante : comment mobiliser et combiner efficacement les outils géospatiaux, décisionnels et d'apprentissage automatique pour localiser les zones à forte capacité de recharge en eau souterraine dans un contexte semi-aride complexe ? L'hypothèse avancée repose sur l'idée que l'intégration raisonnée de ces

Introduction générale

approches permet non seulement d'améliorer la précision des résultats, mais aussi de fournir un appui scientifique solide à la prise de décision en matière de gestion des ressources en eau.

L'analyse de la littérature existante révèle un intérêt croissant pour les approches intégrées dans le domaine de l'hydrogéologie, mais également un déficit de travaux combinant méthodologie multicritère, apprentissage automatique et validation de terrain, notamment dans le contexte algérien. Cette thèse vise donc à combler en partie ce vide, en proposant une démarche croisée et rigoureuse. Elle se distingue par la mise en œuvre conjointe de la méthode AHP et d'algorithmes de classification supervisée, et par la comparaison de leurs performances sur un même ensemble de données, permettant de mettre en évidence les complémentarités et les limites de chaque approche.

La première partie de la thèse pose le cadre théorique de la recherche. Elle s'ouvre par une analyse des enjeux liés à la gestion durable des ressources en eau, avec un accent particulier sur les pressions climatiques et anthropiques qui affectent les régions arides et semi-arides. Elle présente également une revue critique des méthodes employées dans la délimitation des zones de recharge, tout en soulignant les avancées offertes par l'utilisation des technologies spatiales et des outils d'aide à la décision. Ensuite, un aperçu approfondi est donné sur les concepts et techniques mobilisés dans ce travail, allant des Systèmes d'Information Géographique à la télédétection, en passant par l'apprentissage automatique et les méthodes multicritères. Cette base conceptuelle fournit les fondements méthodologiques nécessaires au développement de l'étude expérimentale.

La deuxième partie est consacrée à l'application concrète de ces méthodes sur le bassin versant de l'Oued Isser-Sikkak. La zone d'étude y est d'abord présentée dans ses dimensions géographiques, géologiques, hydrologiques et climatiques. Une attention particulière est accordée à la nature des formations géologiques, aux structures tectoniques, à la morphologie du terrain et au régime climatique, éléments déterminants dans la recharge des nappes. Ensuite, l'approche intégrée développée dans cette recherche est exposée en détail, depuis la sélection et le traitement des critères (pente, lithologie, densité de drainage, densité de linéaments, occupation du sol, précipitations) jusqu'à la pondération via la méthode AHP et l'évaluation des performances des algorithmes de classification. La validation des résultats est assurée par l'analyse de données de terrain telles que les puits et la carte piézométrique. L'étude se conclut par l'élaboration de cartes finales des zones à potentiel élevé en recharge, qui constituent des outils pratiques pour les décideurs et les gestionnaires du secteur de l'eau.

Introduction générale

Ainsi, cette recherche propose une contribution originale à la connaissance et à la gestion des ressources en eau souterraine en milieux semi-arides, en combinant rigueur scientifique, innovation technologique et application concrète à une zone géographique stratégique. Elle ambitionne de servir de modèle pour des études futures, tant au niveau national qu'international.

Partie I : Problématiques et Fondements Théoriques

Chapitre I**Problématiques liées à la gestion des ressources en eau****Introduction**

L'eau, ressource naturelle précieuse et indispensable à la vie, joue un rôle central dans la satisfaction des besoins fondamentaux humains, le maintien des écosystèmes et le développement socio-économique. Cependant, cette ressource vitale est aujourd'hui confrontée à des pressions croissantes, issues à la fois de causes naturelles et anthropiques. Ces pressions menacent non seulement la quantité et la qualité de l'eau, mais aussi la durabilité des écosystèmes aquatiques et les services essentiels qu'ils fournissent. La dégradation des ressources en eau, exacerbée par les activités humaines et les changements climatiques, soulève des défis majeurs pour leur gestion durable.

Ce chapitre traite des enjeux de gestion des ressources en eau dans le bassin de la Tafna, un écosystème typique des défis hydriques en zone méditerranéenne. Il examine les pressions anthropiques, notamment la surexploitation, la pollution et la dégradation des habitats aquatiques, en lien avec les dynamiques naturelles des écosystèmes. Les impacts des changements climatiques, tels que la variabilité des précipitations, les sécheresses et la hausse des températures, sont également explorés, avec un accent sur le rôle des eaux souterraines dans l'atténuation des pressions hydriques et le maintien de la résilience des écosystèmes. Enfin, une revue critique des méthodes d'estimation de la recharge des nappes souterraines (bilans hydriques, modèles numériques, techniques isotopiques) est proposée, évaluant leur pertinence dans un contexte méditerranéen. Ce cadre théorique vise à approfondir la compréhension des processus hydrologiques et à soutenir une gestion durable des ressources en eau.

I.1. Pressions anthropiques et usages de l'eau dans le bassin de Tafna**I.1.1. Croissance démographique et urbanisation**

L'augmentation rapide de la population dans la région de Tlemcen exerce une pression croissante sur les ressources en eau. En 2010, la wilaya de Tlemcen comptait 956 030 habitants, avec une densité de 106,6 habitants par kilomètre carré. À cette époque, l'approvisionnement en eau potable était principalement localisé et ne rencontrait pas de contraintes majeures liées aux limites du système hydrique. Cependant, une projection

démographique jusqu'en 2025, basée sur une allocation de 150 litres d'eau par habitant et par jour, révèle une augmentation significative des besoins en eau, nécessitant une planification rigoureuse pour garantir un approvisionnement durable.

I.1.2. Activités agricoles

L'irrigation intensive représente l'une des principales causes de la surexploitation des ressources en eau dans le bassin de la Tafna, contribuant significativement à la pénurie d'eau dans cette région. L'agriculture joue un rôle central dans l'économie et l'environnement du bassin, avec des cultures variées telles que la céréaliculture (170 000 hectares), l'arboriculture (26 280 hectares) et les cultures maraîchères (7 695 hectares) (**Taleb , 2016**). Cette diversité agricole reflète les conditions géographiques et environnementales spécifiques de la région, mais elle s'accompagne également d'une pression accrue sur les ressources hydriques.

Dans le secteur agricole, les ressources en eau allouées sont passées de 34,10 à 50,10 millions de mètres cubes par an entre 1998 et 2007. Malgré cette augmentation, la demande agricole s'élevait à 120 millions de mètres cubes par an, créant ainsi un déficit important. Pour pallier ce manque, plus de 13 % des besoins ont été couverts par des eaux recyclées (**Merabet-Baghli et al .,2018**), une solution qui pourrait être davantage exploitée pour réduire la pression sur les ressources naturelles

I.1.3. Industries et exploitation minière

Le bassin de la Tafna abrite 181 unités industrielles dont les activités diversifiées (agroalimentaire, chimie, métallurgie, etc.) entraînent un prélèvement annuel de 64,3 Mm³ d'eau, calculé sur une base légale de 44 heures de travail hebdomadaires (Loi n° 90-11 du 21/04/1990). Ces industries génèrent des rejets aux conséquences préoccupantes pour ce bassin hydrographique fragile : 17 unités déversent directement leurs effluents dans les oueds et milieux naturels, 44 les dirigent vers les réseaux d'assainissement, tandis que la destination et la composition des rejets de 119 unités restent non documentées. L'absence totale de systèmes de recyclage des eaux usées, combinée à une régulation insuffisante, expose les écosystèmes locaux (comme l'oued Tafna et ses affluents) à des polluants potentiellement toxiques (métaux lourds, produits chimiques), menaçant la biodiversité aquatique, la qualité des nappes phréatiques et la sécurité sanitaire des populations riveraines. (**Merabet-Baghli et al .,2018**).

I.2. Impacts des changements climatiques sur les ressources en eau

De nombreuses études ont montré que le nord-ouest de l'Algérie a connu une forte sécheresse dans les années 70, notamment en 1975, en raison d'une réduction significative des précipitations. Selon **Taïbi (2016)**, l'année 1975 marque une année de rupture, avec une évolution notable des régimes pluviométriques avant et après cette période. Cette modification du climat a entraîné des conséquences contrastées : d'un côté, des inondations fréquentes, causées par la dégradation des infrastructures hydrauliques, un ruissellement accru et une érosion des sols ; de l'autre, des sécheresses prolongées, caractérisées par l'assèchement des cours d'eau.

Le changement climatique exerce une pression croissante sur les ressources en eau du bassin de la Tafna, au nord-ouest de l'Algérie. Cette région, déjà caractérisée par un climat semi-aride avec des précipitations annuelles moyennes de 383 mm, voit ses ressources en eau menacées par une aridification accentuée. D'après **Bakreti (2014)** et **Ghenim et Megnounif (2013)**, l'augmentation des températures moyennes (de 0,65 à 1,45 °C entre 1970 et 2004) et l'évapotranspiration accrue (+0,77 fois la moyenne historique entre 1975 et 2004) exacerbent le déficit hydrique dans le bassin de la Tafna. La réduction de 27 % des précipitations, la diminution drastique de 69 % des écoulements de surface et l'appauvrissement des nappes souterraines (**Khaldi , 2005**) témoignent de l'impact significatif du changement climatique sur la disponibilité de l'eau.

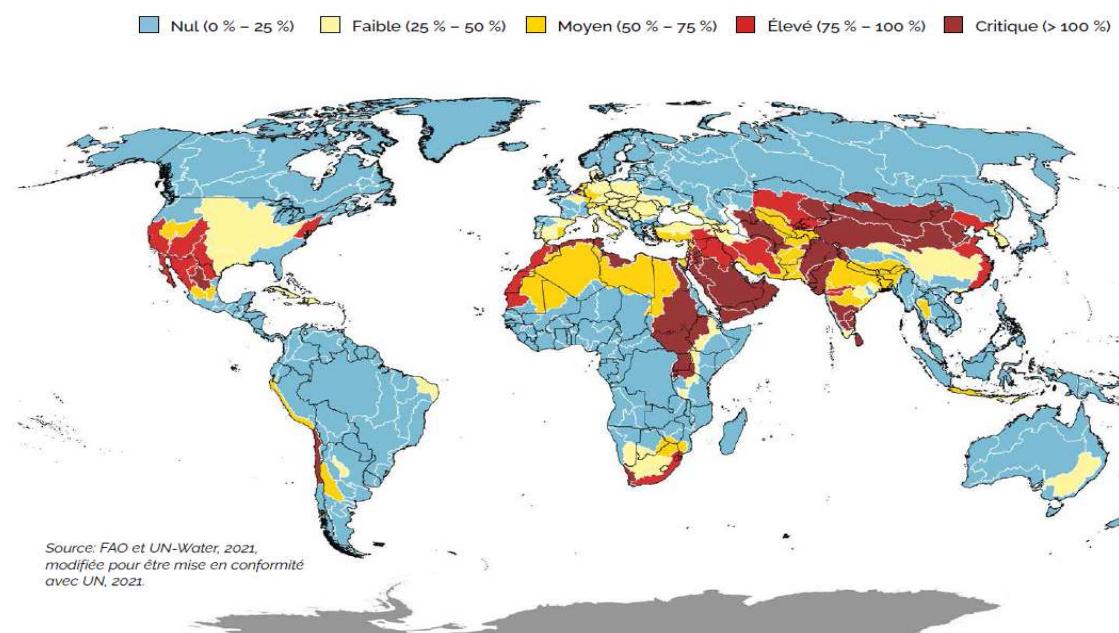


Figure I.1 Niveau de stress hydrique dû au secteur agricole, par bassin, 2018(**FAO,2021**).

I.3. Importance des eaux souterraines

Dans le contexte des défis de la pénurie d'eau, les eaux souterraines représentent une alternative vitale pour rependre aux besoins fondamentaux en eau, c'est une source stable et accessible. À la différence des eaux de surface, souvent marquées par des variations saisonnières et une disponibilité réduite en période de sécheresse, les eaux souterraines représentent une source d'approvisionnement plus constante et fiable. Elles jouent un rôle stratégique dans les régions régulièrement confrontées à des pénuries d'eau, telles que le Moyen-Orient, l'Afrique du Nord et certaines zones de l'Asie du Sud, où les aquifères constituent fréquemment l'unique ressource disponible lors des périodes critiques. (**FAO ,2021**). Dans le cycle hydrologique mondiale, les eaux souterraines occupent 30% du totalité des eaux douces sur terre (**Figure I.2**), et contribuent à 50% des eaux potable du monde (**Choi et al ., 2021**) Cela met en évidence l'importance cruciale des eaux souterraines pour la sécurité alimentaire.

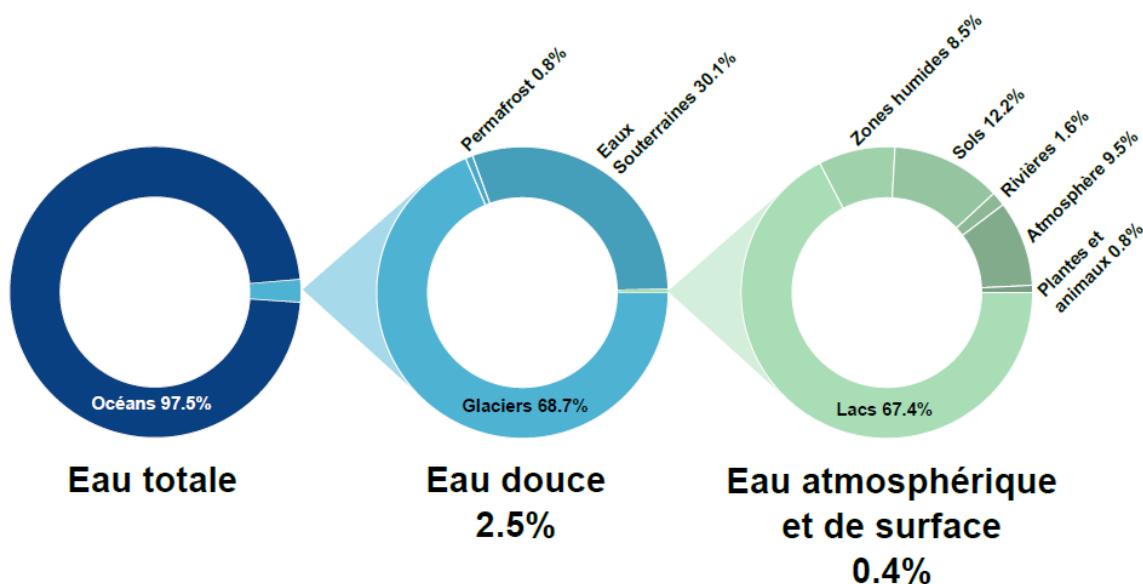


Figure I. 2 Aperçu de la distribution de l'eau douce, de l'eau salée et des autres formes d'eau à l'échelle mondiale (source : UNESCO-WWAP, 2006).

Au cours des quatre dernières décennies, l'exploitation des eaux souterraines a considérablement progressé à l'échelle mondiale, grâce aux avancées technologiques et au soutien des politiques publiques (**Lassaube, 2020**). D'après Le rapport de la **Banque Mondiale (2019)**, l'Inde se positionne comme le principal exploitant d'eaux souterraines au

monde. Ces ressources jouent un rôle clé dans le développement du pays, avec 60 % des zones irriguées dépendant des puits. À l'instar de nombreuses régions arides, le développement économique et social de la région du Sahel repose principalement sur les écosystèmes étroitement liés aux ressources en eaux souterraines (**Banque mondiale, 2019**). En Nouvelle-Galles du Sud (NSW), Australie, les ressources en eau souterraines répondent à environ 20% des besoins en eau du pays et soutiennent les activités agricoles et minières majeures de la région (**Crosbie et al., 2023**). Selon **Daoudi et al. (2017)**, l'Algérie se trouve dans le groupe des principales régions où les eaux souterraines sont largement utilisées pour l'agriculture.

Ces études, ainsi que d'autres, mettent en avant les eaux souterraines comme une ressource essentielle pour faire face au stress hydrique. Toutefois, leur disponibilité à long terme dépend d'une gestion optimisée de ces ressources laquelle repose sur une meilleure connaissance de la quantité d'eau stockée (**Bouteldjaoui et al., 2017; Hountondji et al., 2019**), des zones potentielles de recharge des nappes souterraines (**Ali et Konaté ,2020**), ainsi que des zones exposées à la pollution(**El Orfi et al., 2022**). Toute cette importance accordée aux eaux souterraines soulève des questions fondamentales : *qu'entend-on exactement par "eaux souterraines" ? Comment peut-on évaluer et estimer la recharge des nappes souterraines ?*

- **L'eau souterraine : une ressource vitale au cœur des enjeux géologiques**

L'eau souterraine, présente dans les formations géologiques, constitue une ressource essentielle pour l'alimentation en eau potable, l'agriculture et le maintien des écosystèmes. Sa présence et sa circulation sont intimement liées aux propriétés des terrains qu'elle traverse, notamment la porosité et la perméabilité.

- **Porosité et perméabilité : les clés de la présence et de la circulation de l'eau souterraine**

La porosité, définie comme le volume des vides ou l'espacement entre les particules d'un sol ou d'une roche (**Mejni, 2008**), est un facteur déterminant de la capacité d'un terrain à contenir de l'eau. Elle englobe deux types d'ouvertures :

- Les pores : espaces intergranulaires ou intercristallins, dont la taille et la connectivité varient considérablement.

- Les fractures : fissures ou cassures dans les roches, qui peuvent être d'origine tectonique ou autre.

La porosité (n) est quantifiée par le rapport du volume des vides (V_v) sur le volume total du milieu poreux (V_t) :

$$n = \frac{V_v}{V_t} \quad (1)$$

Elle s'exprime généralement en pourcentage et varie de 0 (milieu imperméable) à 1 (milieu totalement vide) (Mejni, 2008).

Cependant, la porosité ne fait pas tout. Encore faut-il que les vides soient interconnectés pour permettre la circulation de l'eau. C'est là qu'intervient la perméabilité, qui mesure la capacité d'un milieu à laisser passer un fluide à travers ses pores et ses fractures. La porosité efficace, qui correspond au volume des pores interconnectés, est un indicateur important de la perméabilité.

- **Types de porosité et leur rôle dans l'écoulement souterrain**

On distingue deux principaux types de porosité :

- La porosité primaire : présente dans les sédiments meubles (sables, graviers) ou les roches peu consolidées, elle est due aux espaces entre les grains ou les cristaux.
- La porosité secondaire : créée par des processus ultérieurs, tels que la fracturation, la dissolution (karstification) ou la diagenèse. Elle est particulièrement importante dans les roches massives (calcaires, granits).

La porosité secondaire, notamment les fractures, joue un rôle majeur dans l'écoulement souterrain, en créant des conduits préférentiels pour la circulation de l'eau. Les systèmes karstiques, caractérisés par la dissolution des roches carbonatées et la formation de réseaux de galeries et de fissures, en sont un exemple emblématique (Mejni, 2008).

Zones saturées et non saturées : la répartition de l'eau souterraine

L'eau souterraine occupe les vides et les fractures du sous-sol, remplissant complètement les pores dans la zone saturée, où se trouvent les nappes phréatiques. Au-dessus de cette zone, la

zone non saturée, ou zone vadose, contient de l'eau en quantité variable, retenue par les forces capillaires.

- **La recharge**

La recharge des nappes souterraines, définie par **Lerner et al .(1997)** comme l'ensemble des apports externes d'eau à un aquifère, est un élément fondamental du cycle hydrologique. Elle comprend deux composantes :

- La recharge naturelle : processus naturel d'alimentation des nappes souterraines, incluant la recharge indirecte (ou locale), liée à l'infiltration des eaux superficielles (cours d'eau, irrigation, lacs...) à travers la zone non saturée, et la recharge diffuse, due à la percolation des eaux de précipitation à travers cette même zone (**Lerner et al., 1997**).
- La recharge artificielle : apport d'eau dans une formation aquifère par des dispositifs artificiels, tels que des bassins d'infiltration, des puits ou des aménagements de cours d'eau (**Todd, 1956** ; **Flint et al., 2002**).

- **Recharge potentielle et recharge réelle : une distinction importante**

Dans le cadre de cette thèse, le terme "recharge" est utilisée pour désigner la "recharge naturelle potentielle diffuse", c'est-à-dire la quantité d'eau percolée et infiltrée sous la zone racinaire. Cette notion se distingue de la "recharge réelle", qui, selon **Lerner et al (1997)**, inclut tous les apports externes à l'aquifère.

Ces deux termes peuvent être équivalents lorsque le mouvement des eaux dans la zone non saturée est principalement vertical (de la surface du sol vers la nappe) et que l'évapotranspiration de l'aquifère vers l'atmosphère est limitée (**Besbes et De Marsily, 1984**). Cependant, ils peuvent différer lorsque l'infiltration est limitée par des ouvrages anthropiques (**De Vries et Simmers, 2002**).

- **Complexité et incertitudes liées à l'estimation de la recharge**

La recharge est un processus hydrologique particulièrement difficile à estimer, en raison de sa dépendance à de nombreux facteurs variables, tels que l'occupation du sol, les précipitations (et donc le climat), la perméabilité du sol et la topographie (Dripps et Bradbury, 2009). Cette complexité engendre une variabilité spatio-temporelle cruciale de la recharge.

I.4. Les défis d'estimation de recharge

Dans le cadre de la caractérisation des aquifères, la recharge constitue un élément essentiel. Toutefois, son estimation avec une grande précision demeure une tâche complexe. En effet, l'évaluation de la recharge repose principalement sur des méthodes indirectes basées sur des hypothèses simplificatrices, ou sur l'analyse des processus qui l'influencent (Gosselin, 2016).

Ces méthodes indirectes, bien qu'indispensables, nécessitent des hypothèses qui peuvent entraîner des estimations éloignées de la réalité, générant ainsi une incertitude non négligeable (Healy, 2010). L'application conjointe de plusieurs approches améliore la fiabilité des résultats, mais ne garantit pas nécessairement une réduction significative des incertitudes inhérentes à la quantification de la recharge.

En plus des limites méthodologiques, des contraintes pratiques, telles que les restrictions financières et temporelles, peuvent freiner l'adoption d'une approche multi-méthodes. Dans ce contexte, la comparaison des résultats issus de méthodes complexes avec ceux obtenus par des approches plus simples, comme le bilan hydrique basé sur des données facilement accessibles, peut s'avérer pertinente (Gosselin, 2016).

I.5. Méthode d'estimation de recharge

Il est à signaler qu'il n'y a pas des méthodes applicables dans tous les cas sur tous dans la région aride et semi-aride

I.5.1. Le bilan Hydrique

La recharge d'un aquifère peut être estimée à partir de son bilan hydrologique. Il s'agit de l'une des méthodes les plus largement utilisées dans les pays à climat tempéré. Elle est applicable à différentes échelles : aquifères, bassins versants, cours d'eau, colonnes de sol, et ce, sur de larges étendues spatio-temporelles.

Cette méthode permet de mieux comprendre le fonctionnement du système hydrologique et les relations entre la recharge et les différents paramètres du cycle de l'eau. L'équation du bilan hydrique offre ainsi une vue d'ensemble de l'hydrologie du système étudié.

L'approche repose sur l'estimation de la quantité d'eau percolée dans le sol, afin de déterminer le taux de recharge des nappes. Cette estimation peut être réalisée à l'aide d'une équation connue sous le nom d'équation de bilan hydrique, qui peut prendre plusieurs formes.

La version la plus simple s'écrit de la manière suivante :

$$P + S = R + E + (S \pm \Delta S) \quad (2)$$

Avec :

P : Précipitations (liquide et solide) (mm),

S : Stock hydrique de la période précédente (eaux souterraines, humidité du sol, neige, glace) (mm),

R : Ruissellement de surface et écoulements souterrains (mm),

E : Evaporation (y compris évapotranspiration) (mm),

S + ΔS : Stock hydrique à la fin de la période (mm)

L'un des avantages de cette méthode est l'absence d'hypothèses contraignantes sur les différentes composantes du bilan hydrique, ce qui lui confère une grande flexibilité. Il convient de noter que la plupart des modèles hydrologiques reposent sur cette équation pour estimer non seulement le taux de recharge, mais aussi les autres composantes du cycle hydrologique.

Cependant, selon **Chantry (2003)**, bien que la méthode du bilan hydrique soit largement utilisée par de nombreux chercheurs dans les pays à climat tempéré pour l'évaluation et la gestion des ressources en eau, elle est moins adaptée aux zones arides et semi-arides de type sahélien en raison de deux principaux obstacles. D'une part, dans ces régions, l'évaporation potentielle est très élevée. Ainsi, en appliquant la méthode du bilan hydrique pour estimer la recharge des aquifères, la soustraction du taux élevé d'évaporation aux précipitations conduit à des valeurs de recharge très faibles. D'autre part, en climat aride et semi-aride, la recharge des aquifères provient principalement des mares endoréiques, qui constituent un mécanisme de restitution indirecte de l'eau vers la nappe. Ce processus est difficilement quantifiable par la méthode du bilan hydrique, ce qui limite son efficacité dans ces environnements.

I.5.2. La modélisation

Dans le cadre des différentes études hydrologiques, les modèles de simulation sont parmi les méthodes les plus adaptées. Certains de ces modèles sont spécifiquement destinés à l'estimation de la recharge. En effet, un modèle fournit une large gamme d'informations qui contribuent à une meilleure compréhension du fonctionnement des systèmes hydrologiques, en identifiant les facteurs influençant le taux de recharge, tels que l'occupation du sol, les conditions climatiques et d'autres paramètres environnementaux.

La majorité des méthodes de modélisation sont étroitement liées aux méthodes de bilan hydrique. Ainsi, certains modèles s'appuient sur une forme spécifique de l'équation du bilan hydrique, tandis que d'autres, plus empiriques, utilisent des équations simples permettant d'estimer la recharge annuelle en fonction des précipitations, des caractéristiques du bassin versant et des données climatiques.

La complexité des modèles de simulation varie considérablement. On trouve :

- Des modèles à calculs simples, permettant une estimation rapide de la recharge.
- Des modèles plus complexes, cherchant à caractériser avec une grande précision le mouvement de l'eau, depuis la surface du sol jusqu'à la nappe phréatique en passant par la zone non saturée. C'est notamment le cas des modèles fondés sur l'équation de Richards.
- D'autres modèles fournissent une estimation indirecte de la recharge.

Le processus d'étalonnage d'un modèle est essentiel pour affiner l'évaluation de la recharge. Il permet d'ajuster les paramètres hydrologiques et la recharge afin que les niveaux d'eau mesurés et estimés correspondent.

Comme pour toute méthode d'estimation de la recharge, la variation des échelles spatio-temporelles doit être prise en compte lors du choix du modèle. Certains modèles supposent une recharge uniforme sur l'ensemble du domaine de simulation, tandis que d'autres considèrent une recharge variable. À l'échelle temporelle, la recharge peut être simulée quotidiennement, mensuellement ou annuellement.

I.5.2.1. Les modèles de bilan hydrique de zones non saturée

Lorsque les précipitations s'infiltrent à travers le sol, elles génèrent une recharge diffuse, qui constitue le mode de recharge dominant dans de nombreuses régions. Par conséquent, les

modèles de bilan hydrique appliqués au sol et à la zone racinaire sont considérés comme les plus pertinents pour estimer ce type de recharge. Bien que ces modèles puissent différer dans leur approche et leur complexité, ils reposent tous sur une hypothèse commune : l'écoulement à travers la zone non saturée est vertical et unidimensionnel.

Les modèles de bilan hydrique du sol sont généralement définis par l'équation de bilan suivante :

$$R = P - ET^{zs} - \Delta S^{zs} - R_{ruis} \quad (3)$$

Où : **R** : Recharge (mm).

P : Précipitation (mm) plus irrigation (mm).

ET^{zs} : Evapotranspiration (mm).

ΔS^{zs} : Changement de stockage de la zone de sol (mm).

R_{ruis} : Ruissèlement (mm).

I.5.2.2. Les modèles des bassins versant

Le climat exerce une influence directe sur l'hydrologie d'un bassin versant, ce qui a conduit au développement de divers modèles pour en évaluer les impacts. Un modèle de bassin versant se focalise principalement sur l'écoulement fluvial. Aujourd'hui, ces modèles sont largement utilisés pour l'étude de la recharge des nappes, l'analyse de la chimie des eaux souterraines et superficielles, ainsi que pour la gestion des ressources en eau. Parmi les modèles les plus répandus, on retrouve SWAT, PRMS et MIKE-SHE.

Il convient de noter que les modèles de bassin versant reposent sur un ou plusieurs processus hydrologiques tels que l'évapotranspiration, le ruissellement et l'infiltration.

I.5.2.3. Les modèles d'écoulement des eaux souterraines

Pour gérer efficacement les ressources en eau, estimer la réponse des aquifères à la réalimentation (variation du niveau de la nappe) et quantifier les flux entrants et sortants d'un aquifère, l'utilisation de modèles des eaux souterraines s'avère indispensable. Ces modèles fournissent des informations essentielles sur les vitesses d'écoulement des eaux souterraines, ce qui est crucial pour la simulation du transport des contaminants dans la nappe.

Selon **Harbaugh (2005)**, la forme la plus couramment utilisée de l'équation des écoulements des eaux souterraines est la suivante :

$$\frac{\partial(K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x})}{\partial x} + \frac{\partial(K_{yy} \frac{\partial H}{\partial y})}{\partial y} + \frac{\partial(K_{zz} \frac{\partial H}{\partial z})}{\partial z} + Q' + R = S_s \frac{\partial H}{\partial t} \quad (4)$$

Elle est dérivée de l'équation de Darcy et l'équation de continuité.

Où K_{xx} , K_{yy} et K_{zz} sont les valeurs de la conductivité hydraulique saturée le long des axes de coordonnées X, Y et Z.

H est la charge totale.

Q' Représente toutes les sources et tous les puits hors recharge.

S_s Le stockage spécifique

I.5.3. Les méthodes basées des données de surfaces

Il s'agit d'une autre catégorie de méthodes d'estimation de la recharge, reposant sur l'évaluation du taux d'échange entre les eaux de surface et les eaux souterraines dans les zones humides à subhumides. Ces méthodes sont souvent privilégiées lorsque des données suffisantes sur les débits sont disponibles.

- **Estimer l'échange entre les eaux de surfaces et les eaux souterraines « le débit de base »**

L'échange entre les eaux de surface et les eaux souterraines, appelé « débit de base », est un phénomène crucial dans l'hydrologie des bassins versants. En effet, dans de nombreux bassins, une interaction constante se produit entre les nappes souterraines et les masses d'eau superficielles, régulée par la différence d'élévation entre ces deux réservoirs.

Lorsque le niveau des eaux de surface est inférieur à celui de la nappe souterraine, un transfert d'eau de la nappe vers le cours d'eau se produit, alimentant ainsi le débit de base. Ce phénomène fait du cours d'eau un « cours d'eau gagnant », où l'eau souterraine s'écoule vers la surface, soutenant ainsi le débit en période sèche. En revanche, lorsque le niveau du cours d'eau dépasse celui de la nappe souterraine, un flux d'eau s'inverse, et le cours d'eau devient un « cours d'eau perdant », contribuant à alimenter la nappe phréatique par infiltration. Ce processus est également appelé perte de débit, et l'eau s'infiltre dans le sol, s'acheminant progressivement vers la nappe.

Il est important de noter que ces deux scénarios sont liés à des processus de recharge, mais de manière différente. Le premier cas, où le cours d'eau est gagnant, représente une recharge indirecte, où l'eau alimentée par le cours d'eau peut potentiellement contribuer à la recharge

d'autres nappes souterraines en aval. Ce processus est particulièrement pertinent dans les régions arides et semi-arides, où la recharge indirecte joue un rôle clé dans la gestion des ressources en eau. Quant au second cas, il concerne la recharge directe de la nappe phréatique, souvent observée dans les zones où les cours d'eau interagissent directement avec les nappes superficielles.

Le bilan hydrique d'un cours d'eau.

On peut présenter l'équation de bilan hydrique d'un tronçon d'un cours d'eau comme suite :

$$Q_{sor} = Q_{ent} + P + ET - \Delta S + R + Q_{aff} + Q_{inter} + Q_{inf} \quad (5)$$

Q_{sor} : Le débit à l'extrémité aval de tronçon de cours d'eau.

Q_{ent} : Le débit à l'extrémité Amont de tronçon de cours d'eau

P: La quantité d'eau tombant sur le cours d'eau

ET: Evaporation de cours d'eau

ΔS: La variation de stockage de cours d'eau

R: La quantité d'eau ruisselée vers le cours d'eau.

Q_{aff}: Le débit des affluents vers le cours d'eau

Q_{inter}: Le débit d'eau provenant de la zone non saturée

Q_{inf}: Le débit d'eau résultant des échanges entre le cours d'eau et le sous-sol, il peut être (+) comme il peut être (-).

Le débit d'eau obtenue des échanges entre le cours d'eau et le sous-sol est positif dans le cas où le cours d'eau est un cours gagnant, si le débit est négatif, le cours d'eau est perdant, dans ce cas une estimation de ce terme est une estimation de recharge focaliser à partir de cours d'eau.

- **Estimation des infiltrations dans le lit de cours d'eau « compteurs d'infiltration, la méthode de Darcy »**

Un grand nombre de chercheurs ont choisi d'évaluer l'échange d'eaux entre le sous-sol et le cours d'eau en s'appuyant sur l'estimation de la quantité d'eau infiltrée par le lit de cours d'eau. Les compteurs d'infiltration sont l'un des dispositifs les plus rentables pour mesurer le taux d'eau percolé à travers le lit d'un cours d'eau. Ce sont des dispositifs simples à utiliser, composés d'une chambre qui isole une portion du lit du cours d'eau. Cette chambre est reliée à un réservoir dont le volume est variable, permettant de quantifier, sur un intervalle de temps donné, le volume d'eau entrant et sortant de la zone isolée. Les compteurs d'infiltration peuvent ainsi fournir des mesures précises du volume d'eau infiltrant dans le sol sous-jacent.

Selon **Labaugh et al .(1995)** et **Wentz (1995)**, l'échange de débit entre les eaux souterraines et les masses d'eau superficielles peut également être estimé par la méthode de Darcy. Cette méthode repose sur l'idée que l'eau se déplace sous l'influence d'un gradient de potentiel hydraulique. Pour un écoulement vertical, l'équation de Darcy pour l'infiltration peut être formulée comme suit :

$$q = -K_s \frac{\partial H}{\partial Z} \quad (6)$$

Où q est la vitesse de darcy

K_s est la conductivité hydraulique dépend de la teneur en eau de sol

$\frac{\partial H}{\partial Z}$ est le gradient hydraulique entre deux sections

I.5.4. Les méthodes physiques : la zone non saturé

Il est incontestable que tout flux d'eau alimentant les nappes phréatiques transite par la zone non saturée du sol. Ainsi, le taux de recharge d'une nappe souterraine peut être quantifié soit en mesurant le débit des flux verticaux, soit en estimant la variation du stockage en eau au sein de cette zone. Ces deux approches supposent que l'ensemble des flux verticaux contribuent directement à la recharge des eaux souterraines. Toutefois, elles reposent sur des données physiques de la zone non saturée qui sont souvent difficiles et coûteuses à obtenir, ce qui limite leur application dans les études hydrogéologiques. Malgré ces contraintes, ces méthodes offrent des avantages significatifs en termes de précision et de compréhension des processus d'infiltration.

Dans la zone non saturée, deux principales méthodes d'estimation de la recharge peuvent être adoptées :

i. La méthode de plan à flux nul (ZFP)

En 1956, Richards a proposé une méthode de bilan hydrique appliquée à la zone non saturée. Cette méthode repose sur l'identification d'un plan où le gradient hydraulique est nul dans le sol (Singh, 2012). Ce plan à flux nul (*Zero Flux Plane* - ZFP) agit comme une frontière séparant deux mouvements opposés de l'eau dans un sol totalement saturé (Figure I.3)

- **Au-dessus du ZFP**, l'eau contenue dans le sol migre vers le haut sous l'effet de la capillarité et de l'évapotranspiration, notamment dans la zone racinaire.
- **En dessous du ZFP**, l'eau s'écoule vers le bas sous forme de drainage gravitaire, contribuant ainsi à la recharge de la nappe phréatique.

Dans la zone non saturée du sol, le stockage d'eau est quantifié en mesurant la teneur en eau à différentes profondeurs et à divers instants. La variation de stockage est alors déterminée par la différence des teneurs en eau entre deux mesures successives.

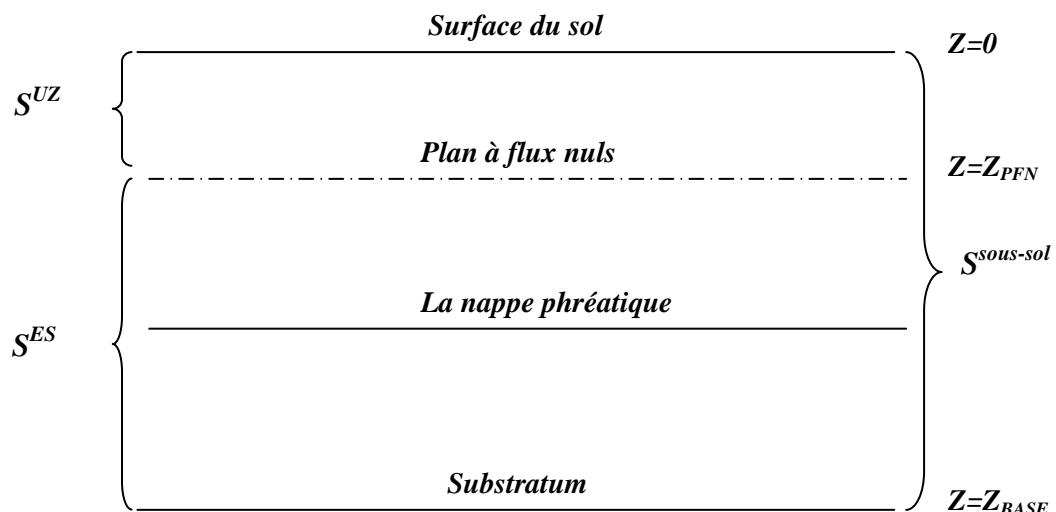


Figure I.3 Schéma conceptuel de la colonne de sol, de la surface terrestre à la base de l'aquifère, illustrant les différents compartiments de stockage

Où **$S^{sous-sol}$** : La quantité d'eau stockée entre la surface du sol et le substratum.

S^{ES} : La quantité d'eau stockée entre le plan à flux nul et le substratum.

S^{UZ} : La quantité d'eau stockée entre la surface du sol et le plan à flux nul.

Ce qui nous intéresse, c'est la quantité d'eau stockée entre le plan à flux nul et le substratum, notée **S^{ES}** et donnée par l'équation suivante :

$$S^{ES} = \int_{Z_{BASE}}^{Z_{PFN}} \theta \, dz \quad (7)$$

Où θ : La teneur en eau volumétrique.

Z_{PFN} : La profondeur au plan a flux nul.

Z_{BASE} : La profondeur a la base d'aquifère.

ii. Les méthodes de darcy

L'une des formes de l'équation de Darcy peut également être utilisée pour évaluer le drainage à travers la zone non saturée. Pour un écoulement vertical dans cette zone, l'équation de Darcy s'écrit comme suit :

$$q = -K_s K_r(h) \cdot \frac{\partial H}{\partial z} \quad (8)$$

Où q : est le taux de drainage.

$K_s K_r(h)$: est la conductivité hydraulique a la hauteur manométrique ambiante h .

H : est la charge totale.

z : est la profondeur.

I.5.5. La méthode physique : la zone saturée

Un autre éventail des méthodes d'estimation de recharge est adapté par un nombre des chercheurs. D'une façon générale, ces méthodes sont basée sur le suivie de la variation de niveau d'eau souterraine dans le temps et dans l'espace. C'est la proche le plus couramment utilisé en vue la simplicité d'application, lors l'abondance des donnés liée aux niveaux des eaux souterraines.

i. La méthode de fluctuations de la nappe phréatique (WTF)

Dès les années 1920, la méthode des fluctuations de la nappe phréatique a connu une large reconnaissance. En effet, le niveau des nappes souterraines peut monter ou descendre sous l'effet de plusieurs phénomènes naturels, tels que :

- **Les changements climatiques**, qui induit des variations à long terme.

- **Les fluctuations saisonnières**, dues aux variations du taux d'évapotranspiration, des précipitations et aux interactions avec les masses d'eau de surface, pouvant soit rehausser, soit abaisser le niveau de la nappe.

Par ailleurs, des facteurs anthropiques influencent également ces variations. Par exemple :

- Le remplacement des forêts par des terres agricoles peut accroître la recharge.
- L'intensité du pompage a un impact direct sur le niveau de la nappe.

L'équation du bilan hydrique au niveau de la zone saturée s'écrit alors comme suit

$$\Delta S_{ES} = R - Q^{BASE} - ET^{ES} - Q_{off}^{ES} - Q_{on}^{ES} \quad (9)$$

Où ΔS_{ES} : Le changement de stockage au niveau de la zone saturée (inclut les variations de stockage au dessous de plan a flux nul)

R : La recharge

Q^{BASE} : Le débit de base

ET^{ES} : L'évapotranspiration des eaux souterraines

Q_{off}^{ES} et **Q_{on}^{ES}** : les flux souterraines depuis et vers le domaine d'intérêt

I.5.6. Les méthodes de traçage chimiques

Dans les études hydrologiques, les traceurs sont utilisés dans diverses applications, fournissant aux hydrogéologues une large gamme de données permettant l'estimation des aspects quantitatifs et qualitatifs des sources de recharge des nappes. Ils permettent également d'évaluer le temps et la vitesse de déplacement de l'eau depuis la surface jusqu'à la nappe. Les traceurs incluent des ions, des isotopes et des gaz détectables dans l'atmosphère, les eaux de surface et le sous-sol.

Les traceurs se classent en trois catégories :

- **Traceurs naturels environnementaux**, tels que le chlorure (Cl), le Cl-36 et le tritium (H3), produits naturellement dans l'atmosphère.
- **Traceurs historiques ou anthropiques**, produits par l'intervention humaine dans l'atmosphère, tels que le Cl et le H issus des essais nucléaires.

- **Traceurs appliqués**, comme le bromure (Br) et le chlorure (Cl), qui sont appliqués directement à la surface du sol en raison des activités humaines.

Les méthodes d'estimation de la recharge à l'aide de traceurs varient et reposent sur des principes multiples, parmi lesquels :

- Des processus similaires à ceux utilisés pour la zone non saturée, avec une simple modification des hypothèses, permettant une estimation ponctuelle de la recharge.
- L'utilisation d'échantillons d'eau souterraine.
- Les méthodes de datation des eaux souterraines.
- L'utilisation de contaminants comme traceurs dans certains cas.
- Enfin, la méthode de bilan massique réalisée avec des données souterraines. Les concentrations de chlorure et de tritium sont les plus fréquemment utilisées dans ces bilans.

Selon **Böhlke (2002)**, l'estimation de la recharge par les méthodes de datation des eaux repose sur une équation simple :

$$R = \varphi \cdot V_v \quad (10)$$

Où **R** : La recharge

φ : La porosité

V_v : La vitesse verticale de l'eau à la nappe phréatique.

Parfois, les traceurs utilisés dans la zone non saturée et la zone saturée sont identiques, comme le chlorure (Cl⁻) et le tritium (³H). Cependant, certains traceurs sont exclusivement employés pour les eaux souterraines, notamment les chlorofluorocarbures (CFC), l'hexafluorure de soufre (SF₆) et le carbone 14 (¹⁴C).

L'estimation de la recharge par la méthode du bilan massique du chlorure (BMC) est décrite par les équations suivantes

1/ Au niveau de la zone non saturée :

$$D = (PC_p + Q_{entr}^s C_{entr}^s - Q_{sort}^s C_{sort}^s - M_{app})/C_{ZNS} \quad (11)$$

Où **D** : Le drainage

P : Précipitation.

C_{entr}^S , C_{sort}^S , C_p et C_{ZNS} : Les concentration de Chlorure entrant et sortant de la colonne du sol , la concentration de chlorure dans les précipitations et la concentration de chlorure au niveau de la zone non saturé

Q_{entr}^S , Q_{sort}^S : Les débits entrant et sortant d'une colonne de sol.

M_{app} : Le taux d'application de Chlorure à une colonne du sol à l'état sèche

2/ au niveau de la zone saturée :

$$R = \frac{C_p P + M_{\text{pp}}}{C_{\text{es}}} \quad (12)$$

Où **R** : La recharge estimée.

C_{es} : La concentration de Chlorure au niveau de la zone saturée.

I.5.7. Les méthodes de traçage thermique

Depuis plus de 100 ans, plusieurs travaux ont mis en évidence la relation étroite entre la température et le mouvement des eaux dans le sous-sol. En effet, la température est utilisée comme un traceur pratique pour des études parallèles. De manière similaire aux traceurs chimiques, les variations de température dans le temps et dans l'espace contribuent à évaluer le taux de mouvement de l'eau. Elles permettent également de déduire les taux et les origines de recharge (cours d'eau, masses d'eau superficielles, etc.) des nappes souterraines, ou encore le taux de drainage au niveau de la zone non saturée à des profondeurs variables.

La température dans le sol est influencée par deux phénomènes : les flux de chaleur émis par le noyau terrestre, qui remontent vers la surface, provoquant une augmentation de la température à mesure que l'on s'éloigne de la surface de la Terre vers le bas, et les échanges énergétiques produits entre la surface et l'atmosphère en raison des rayonnements solaires.

En fonction des flux de chaleur, le sol peut être divisé en deux zones : la zone superficielle, où la variation de température est une réponse aux échanges énergétiques, et la zone géothermique, plus profonde, totalement isolée des influences extérieures.

Il convient de noter qu'une zone potentielle de recharge se caractérise par des différences de température significatives, tandis qu'une zone qui affiche de faibles différences de température est principalement dominée par la décharge.

I.6. Le choix de la méthode d'estimation de recharge

Une variété de méthodes est disponible pour estimer le taux de recharge des eaux souterraines. Nous avons mis en évidence ci-dessus celles qui sont largement utilisées. L'aspect le plus important dans la compréhension des méthodes d'estimation de recharge réside dans le choix de la méthode elle-même. En effet, plusieurs circonstances doivent être prises en considération.

La première question à poser est : quel est l'objectif de notre étude ? Connaître le but ciblé contribue à limiter l'intervalle de choix (estimer le taux de recharge d'une nappe, sélectionner les zones potentielles de recharge, évaluer le risque de contamination, etc.). Ensuite, un modèle conceptuel du système hydrologique, représentant les mécanismes de recharge, doit être réalisé, dans lequel des estimations initiales de recharge seront présentées. De nombreux facteurs doivent être pris en compte dans le processus de recharge, tels que la précipitation, la topographie, l'occupation du sol, le couvert végétal et la géologie.

Certaines conditions supplémentaires méritent également d'être examinées, telles que le type de recharge. En effet, certaines méthodes sont spécifiquement conçues pour estimer la recharge diffusée, tandis que d'autres s'appliquent à la recharge focalisée. De plus, chaque méthode d'estimation de recharge citée précédemment a un intervalle de temps et d'espace spécifique. Par exemple, pour un grand bassin versant, il est préférable d'adopter des méthodes adaptées aux grandes étendues, telles que le bilan hydrique. Cela ne signifie pas qu'une autre méthode ponctuelle, destinée aux petites surfaces, ne puisse pas être bénéfique. En ce qui concerne l'échelle temporelle, certaines méthodes servent à estimer la recharge sur le long terme (des années, des décennies, voire des siècles), tandis que d'autres sont destinées à l'estimation de la recharge pour des événements individuels de précipitation.

Le temps nécessaire à l'application des méthodes est également un critère important. En effet, une méthode nécessitant un suivi sur plusieurs années est inutile si l'étude doit être réalisée sur un délai plus court. Enfin, le coût de réalisation d'une méthode peut être très élevé (comme l'échantillonnage profond de la zone non saturée), ce qui impose parfois le recours à d'autres méthodes plus accessibles.

Conclusion

Les ressources en eaux souterraines sont une source d'eau renouvelable. Cette réalimentation, ou recharge, peut survenir naturellement par la percolation des eaux de pluie à travers le sol vers la nappe. En effet, une gestion et une valorisation efficaces de cette

ressource, particulièrement face aux changements climatiques ayant un impact direct sur la recharge des nappes souterraines, sont indispensables. Cela ne peut être réalisé que si ces ressources sont correctement estimées, et un large éventail d'approches adaptées à différentes conditions est consacré à cet objectif.

Actuellement, les méthodes conventionnelles d'estimation de la recharge peuvent être complétées par des méthodes basées sur de nouvelles technologies, ce qui sera abordé dans le chapitre suivant.

Chapitre II

Généralités sur les SIG, de la télédétection, apprentissage automatique et des outils d'aide à la décision

Introduction

Dans le cadre des recherches visant à améliorer la gestion et l'évaluation des ressources en eaux souterraines, l'exploitation des technologies spatiales et des outils numériques s'impose aujourd'hui comme une approche incontournable. Les progrès réalisés en télédétection, en systèmes d'information géographique (SIG), ainsi que dans les domaines de l'apprentissage automatique et de l'aide à la décision multicritères (ACDM), offrent un large éventail de méthodes performantes pour l'analyse et la modélisation des dynamiques environnementales. Ce chapitre vise à présenter les fondements théoriques, conceptuels et techniques relatifs aux données d'observation de la Terre et à leurs traitements, qui sous-tendent la démarche méthodologique adoptée dans cette étude. Il s'articule en deux grandes sections.

La première section est consacrée aux généralités sur les données d'observation de la Terre et leurs traitements. Elle aborde les principes fondamentaux de la télédétection, les capteurs et plateformes d'observation, les types d'images satellites, les modalités d'acquisition et de stockage, ainsi que les étapes de prétraitement des images. Les bases théoriques des systèmes d'information géographique (SIG) y sont également exposées, en précisant leurs principes de fonctionnement, la nature de l'information géographique manipulée, ainsi que leurs principaux domaines d'application.

Cette section intègre également une présentation approfondie des méthodes de classification des images satellitaires, en distinguant les approches traditionnelles (classification supervisée et non supervisée) des méthodes plus récentes basées sur l'apprentissage automatique. Les différentes catégories d'apprentissage (supervisé et non supervisé) sont décrites, ainsi que les critères et métriques utilisés pour évaluer la performance des modèles.

La deuxième section introduit les méthodes adoptées dans cette étude. Elle décrit les approches méthodologiques appliquées, notamment la classification supervisée par maximum de vraisemblance, la méthode d'aide à la décision multicritères AHP (Analytic Hierarchy Process), et l'utilisation d'algorithmes d'apprentissage automatique. Une comparaison entre les méthodes classiques de prise de décision et celles basées sur l'intelligence artificielle est enfin proposée, afin de souligner leur complémentarité dans les processus de cartographie thématique et d'aide à la décision environnementale.

Section 1 : Généralités sur les données d'observation de la terre et leurs traitements

I. Télédétection

I.1. Télédétection : historique, définition et principe

La télédétection est une technique d'acquisition d'informations à distance sur la surface terrestre, basée sur la détection du rayonnement électromagnétique réfléchi ou émis par les objets. Elle repose sur deux grands modes d'acquisition : la télédétection passive, qui capte l'énergie naturellement réfléchie (notamment le rayonnement solaire), et la télédétection active, qui émet son propre signal (comme les ondes radar) pour analyser les caractéristiques physiques des surfaces, même en l'absence de lumière. Historiquement, cette discipline a émergé au début du XXe siècle avec la photographie aérienne, avant de connaître un tournant majeur avec le lancement du satellite Spoutnik en 1957, puis l'essor des satellites Landsat dès 1972. Les décennies suivantes ont vu l'évolution des capteurs et le développement de satellites à haute résolution, permettant une cartographie fine des ressources naturelles. Aujourd'hui, la télédétection bénéficie de l'intégration de l'intelligence artificielle et de l'apprentissage automatique, rendant l'analyse des données plus rapide, précise et adaptée aux besoins en observation et gestion de l'environnement.

I.2. Aperçu du processus de télédétection

La télédétection électromagnétique repose sur l'utilisation de capteurs embarqués sur des plateformes aéroportées ou spatiales pour capter l'énergie émise ou réfléchie par la surface terrestre. Ce processus comprend plusieurs étapes essentielles : la source d'énergie (naturelle ou artificielle), la propagation de cette énergie à travers l'atmosphère, son interaction avec les objets terrestres, la détection par les capteurs, puis l'analyse et l'interprétation des données acquises. Ces données, qu'elles soient sous forme d'images ou de valeurs numériques, sont traitées à l'aide d'outils d'analyse et comparées à des données de référence (cartes, mesures de terrain, etc.) pour en extraire des informations utiles sur l'état, la nature ou l'évolution des ressources étudiées. Ces informations sont ensuite restituées sous forme de cartes ou de tableaux intégrables dans des systèmes d'information géographique (SIG) pour appuyer la prise de décision (**Jensen, 2007** ; **Campbell & Wynne, 2011**). Un concept central de ce processus est la signature spectrale, qui désigne la réponse d'un matériau à différentes longueurs d'onde du spectre électromagnétique. Chaque objet ou substance possède une signature spectrale unique, liée à ses caractéristiques physiques et chimiques, ce qui permet de l'identifier à distance à partir de données captées par les capteurs (**Sabins, 1997**).

I.3. Elément de physique de rayonnement

La télédétection repose sur l'analyse du rayonnement électromagnétique, forme d'énergie présentant à la fois des propriétés ondulatoires et corpusculaires. L'énergie d'un photon est proportionnelle à la fréquence de l'onde

$$E = h \cdot f \quad (13)$$

où E représente l'énergie du photon (en joules), h est la constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34} J \cdot s$), et f la fréquence de l'onde électromagnétique (en Hz).

La longueur d'onde (λ) est, quant à elle, inversement proportionnelle à la fréquence :

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (14)$$

où λ est la longueur d'onde (en mètres), c la vitesse de la lumière dans le vide ($\approx 3 \times 10^8 m/s$), et f la fréquence.

Ces relations fondamentales définissent le comportement du rayonnement en interaction avec la matière.

Le **spectre électromagnétique** s'étend des rayons gamma aux ondes radio, mais seuls certains domaines — notamment le visible (400–700 nm), l'infrarouge (proche, moyen et thermique) et les micro-ondes — sont exploitables en télédétection en raison de leur capacité à traverser l'atmosphère.

Lorsqu'un rayonnement interagit avec une surface, il peut être réfléchi, absorbé ou transmis, générant une signature spectrale propre à chaque matériau. Cette signature permet l'identification et la classification des surfaces à partir des données satellitaires.

Trois grands types de télédétection se distinguent par leur domaine spectral d'exploitation :

- Optique, basée sur la lumière visible et l'infrarouge proche/moyen, utilisée pour l'analyse de la végétation, des sols, et de l'occupation du sol ;
- Thermique, centrée sur l'infrarouge thermique, permet la détection des variations de température ;
- Radar, utilisant les micro-ondes, fonctionne quelles que soient les conditions météorologiques et d'éclairage, avec des applications en topographie, en surveillance environnementale et en gestion des risques

I.4. Satellites, capteurs et types des images satellitaires

Les images satellitaires, également appelées images de télédétection, sont obtenues à partir de capteurs embarqués sur des satellites en orbite autour de la Terre. Elles permettent de collecter des données à distance, sans contact direct avec la surface terrestre. Ces images sont utilisées dans de nombreux domaines : cartographie, agriculture, gestion des ressources naturelles, hydrologie, suivi environnemental, etc. (Benali, 2019 ; Ampim, 2021).

Les satellites d'observation de la Terre se distinguent des satellites géostationnaires par leur orbite. Alors que ces derniers restent fixes au-dessus d'un point équatorial, les satellites de télédétection suivent généralement une orbite quasi polaire (ou héliosynchrone), assurant une couverture répétée et systématique de la surface terrestre.

Les capteurs embarqués sur ces satellites peuvent être de deux types :

- **Les capteurs passifs**, qui enregistrent l'énergie solaire réfléchie ou émise naturellement par la Terre. Ils nécessitent la présence de lumière solaire et sont sensibles aux conditions météorologiques.
- **Les capteurs actifs**, tels que le radar à ouverture synthétique (SAR), qui émettent leur propre signal (ondes micro-ondes) et mesurent l'écho réfléchi par la surface terrestre. Ces capteurs sont indépendants de l'éclairage solaire et des conditions atmosphériques, ce qui leur permet de fonctionner de jour comme de nuit, et même en présence de nuages (Lillesand et al., 2015).

Selon la nature des capteurs, les images satellitaires se classent principalement en deux catégories : optique et radar (Figure II.2).

- **Les images optiques** sont produites par des capteurs passifs et se basent sur la lumière solaire réfléchie. On distingue :
 - Les **images panchromatiques**, en noir et blanc, qui offrent une haute résolution spatiale mais une faible capacité spectrale.
 - Les **images multispectrales**, qui capturent plusieurs bandes du spectre électromagnétique (visible, proche infrarouge, etc.), permettant une analyse fine des caractéristiques bio-physiques de la surface terrestre (Jensen, 2005 ; Mohia, 2018).
- **Les images radar**, générées par des capteurs actifs, utilisent des micro-ondes pour détecter la structure et l'humidité de la surface, indépendamment des conditions d'éclairage ou météorologiques. Le radar SAR est particulièrement utile pour la surveillance des zones nuageuses, humides ou forestières.

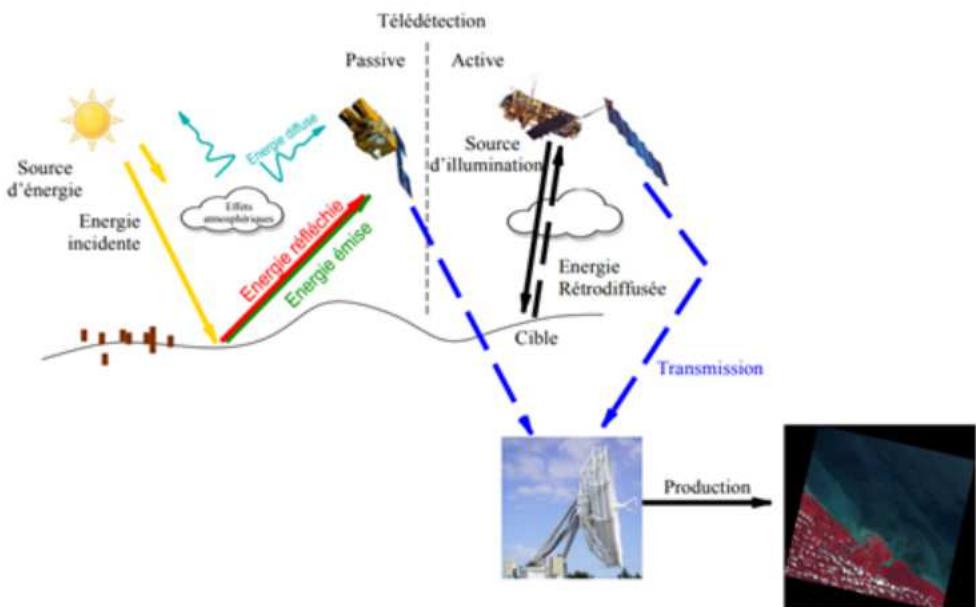


Figure II.1 Principe général de Télédétection

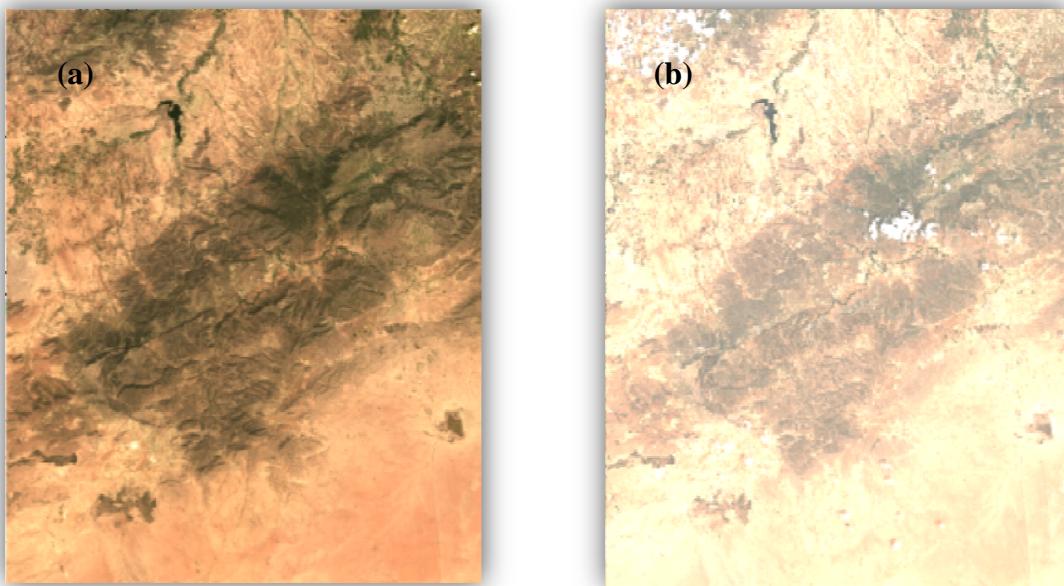


Figure II.2 Images radar (a) et otique (b) de la région de Tafna.

I.5. Acquisition et stockage des données

L'USGS (United States Geological Survey) est une agence scientifique clé dans la collecte, l'archivage et la distribution de données géospatiales, y compris les données de télédétection. Elle gère le programme Landsat, une série de satellites d'observation de la Terre, et offre un accès à une archive complète des images Landsat depuis les années 1970. Ces images sont

disponibles gratuitement et peuvent être téléchargées via le site web de l'USGS Earth Explorer. Le processus d'acquisition des données nécessite la recherche et la sélection des images via les outils en ligne de l'USGS. Une fois choisies, les images sont téléchargées sous forme de fichiers géoréférencés. L'USGS propose également une variété de données provenant de différents capteurs et missions satellites, répondant à des besoins divers dans le domaine de la télédétection (**Haouas, 2019**).

I.6. Prétraitement d'image

Les prétraitements d'image englobent des processus de correction et d'amélioration des images avant leur analyse. Ces étapes permettent de rectifier les imperfections qui peuvent affecter la qualité des données et garantir leur précision dans des études ultérieures. Parmi les prétraitements les plus courants, on trouve la correction atmosphérique, la correction géométrique, la suppression du bruit et la normalisation radiométrique (**Akram, 2015**). Dans cette étude, l'accent a été mis sur les deux premiers.

A. Les corrections atmosphériques

Les capteurs des satellites enregistrent des signaux lumineux qui peuvent être altérés par des phénomènes atmosphériques tels que les gaz (oxygène, ozone, vapeur d'eau) et les aérosols (poussières, pollens). Ces altérations peuvent déformer les mesures radiométriques. Les corrections atmosphériques sont donc appliquées pour réduire ces distorsions et permettre des données plus précises et fiables.

B. Les corrections radiométriques et géométriques

Les corrections radiométriques et géométriques sont des étapes essentielles du prétraitement des images satellitaires. Les corrections radiométriques ajustent les valeurs de chaque pixel pour les rendre proches des mesures réelles sur le terrain, compensant ainsi les défauts des capteurs, leur vieillissement ou des problèmes de calibration. Cela garantit la fidélité des données (**Jensen, 2005**). Les corrections géométriques, quant à elles, visent à éliminer les distorsions spatiales en ajustant les erreurs de parallaxe, en géoréférencant l'image et en corrigeant les déformations dues aux variations topographiques et altimétriques. Ces deux types de corrections, bien que distincts, sont complémentaires et nécessaires pour garantir des images précises, à la fois en termes de positionnement spatial et de qualité radiométrique (**Akram, 2015**).

II. Systèmes d'Information Géographique (SIG)

II.1. SIG : historique, définition, principes

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) constituent des outils informatiques puissants dédiés à la collecte, à la gestion, à l'analyse et à la visualisation des données géoréférencées. Leur principe repose sur la superposition de couches thématiques permettant une interprétation intégrée des phénomènes spatiaux. Introduit dans les années 1960 par Roger Tomlinson à travers le premier SIG canadien (Walser et al., 2011), le concept a connu une évolution rapide grâce aux progrès en informatique, à la démocratisation de l'accès aux données et à l'intégration de la télédétection (Koehl, 2004). Un SIG repose sur quatre composantes fondamentales : le matériel, les logiciels, les données et les utilisateurs, travaillant ensemble pour modéliser et interpréter l'espace géographique (Koehl, 2004). Utilisé initialement dans des domaines institutionnels tels que le cadastre, la défense ou la gestion des ressources, le SIG s'est aujourd'hui imposé comme un outil transversal au service de la recherche, de la planification territoriale et de la prise de décision. Il se distingue par sa capacité à intégrer des données variées pour produire des analyses spatiales complexes, tout en offrant des fonctions telles que la création de zones tampons, l'analyse de proximité ou encore la classification d'images (Bouzekri, 2015). Toutefois, malgré ses avantages considérables, les résultats issus des SIG doivent être interprétés avec rigueur, car leur fiabilité dépend de la qualité des données et des méthodes analytiques employées (Bouzekri, 2015 ; Khoumeri, 2007).

II.2. L'information géographique

L'information géographique désigne toute donnée associée à une position sur la surface terrestre. Elle constitue un élément fondamental pour la gestion de l'espace et des objets localisés spatialement, en intégrant des données liées aux ressources naturelles, aux infrastructures, et aux caractéristiques socio-économiques (population, emploi, etc.). Cette information se décline principalement en deux types de représentations numériques : vectorielles et raster.

Les données vectorielles combinent une composante graphique (points, lignes, polygones) et une composante descriptive ou attributaire, permettant ainsi une modélisation précise des entités spatiales (réseaux, parcelles, unités administratives). Chaque entité peut être enrichie d'attributs sémantiques (alphanumériques), facilitant l'analyse thématique.

Les données raster, quant à elles, représentent l'espace sous forme de grilles de cellules (pixels), où chaque cellule contient une valeur traduisant une mesure physique (énergie, température, altitude, etc.) ou une couleur issue d'une image satellitaire ou aérienne. Ce mode est particulièrement utilisé en télédétection et pour la cartographie de variables continues (Bernier et al., 2014). Par exemple, les images SPOT5 en proche infrarouge permettent de discriminer efficacement la végétation active.

II.3. Domaines d'application des SIG

Depuis 2010, les Systèmes d'Information Géographique (SIG) ont connu des avancées technologiques significatives, entraînant une multiplication de leurs applications dans divers secteurs, aussi bien publics que privés. Les entreprises, les collectivités territoriales et les citoyens en bénéficient aujourd'hui à grande échelle. Dans le secteur des télécommunications, par exemple, les SIG sont devenus des outils incontournables, notamment pour les projets de déploiement de la fibre optique. Face à des réseaux de plus en plus complexes et à des enjeux techniques majeurs, les entreprises de télécommunications s'appuient sur les SIG pour optimiser la planification, la gestion et la maintenance de leurs infrastructures (Esri France, 2019)

Dans la vie quotidienne, la cartographie numérique s'est largement démocratisée grâce à la généralisation des smartphones et de l'accès à Internet. Les cartes interactives permettent aujourd'hui à tout un chacun de localiser des points de vente, consulter des offres commerciales, repérer des bornes Wi-Fi, vérifier l'éligibilité à certains services comme la fibre optique, ou encore planifier des itinéraires. Cette cartographie est désormais dynamique, interactive et participative, renforçant l'engagement des usagers dans la production et l'actualisation de l'information géographique (Esri France, 2019) .

III . Méthode de classification

La classification des images se définit comme le processus consistant à regrouper les pixels d'une image en différentes classes thématiques ou spectrales, telles que les nuages, l'eau, la forêt, les zones urbaines, etc. Ce processus repose sur l'analyse des valeurs numériques (ou niveaux de gris) des pixels, issues d'une ou de plusieurs bandes spectrales. L'objectif principal est d'attribuer à chaque pixel une catégorie spécifique parmi un ensemble de classes prédefinies, en fonction de ses caractéristiques spectrales. Cette étape est essentielle pour

l'extraction d'informations pertinentes à partir d'images satellitaires dans le cadre d'applications en télédétection et en analyse spatiale.

III .1. Méthodes classiques

On distingue principalement deux méthodes

III.1. 1. Classification non supervisée

Souvent utilisée en télédétection, permet de regrouper automatiquement les pixels d'une image en différentes classes selon leurs similarités spectrales, sans intervention directe de l'utilisateur, à l'exception de la définition de certains paramètres comme le nombre de classes. Toutefois, cette méthode présente certaines limites, notamment l'absence d'information thématique préalable, ce qui peut rendre les classes obtenues difficiles à interpréter.

Parmi les algorithmes couramment utilisés pour ce type de classification, on peut citer **K-means**, **ISODATA**, **DBSCAN**.

- **K-means**

L'algorithme de classification *K-means* constitue une méthode non supervisée largement utilisée pour la segmentation des données en groupes homogènes. Il repose sur l'analyse des caractéristiques intrinsèques des données, leur proximité spatiale et leur degré de similarité (**Bonansea et al ., 2015**) pour organiser ces dernières en *K* clusters distincts. L'objectif fondamental de cette méthode est de maximiser l'homogénéité interne au sein de chaque groupe, tout en assurant une hétérogénéité marquée entre les différents clusters. Chaque cluster est représenté par un centroïde, qui correspond au centre de gravité des instances qui lui sont associées. Le processus itératif de K-means consiste à attribuer chaque instance au cluster dont le centroïde est le plus proche (**Hancer et Karaboga , 2017**), généralement en utilisant la distance euclidienne comme critère de similarité.

- **ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique)**

L'algorithme ISODATA est une méthode itérative de classification non supervisée, largement utilisée en télédétection. Son principe repose sur l'organisation automatique des données en groupes homogènes, tout en permettant l'adaptation dynamique du nombre de classes. Contrairement à l'approche K-means, ISODATA intègre des mécanismes de fusion, de division, et de suppression des clusters selon des critères statistiques précis. L'attribution des

pixels aux clusters est basée sur la distance euclidienne spectrale, et l'évaluation de la qualité du regroupement est assurée par le calcul de l'erreur quadratique totale (*Sum of Squared Error*, SSE). Le processus se répète jusqu'à atteindre une configuration stable où la SSE est minimisée (**Mandal et al., 2019**). Grâce à sa flexibilité et à sa capacité d'ajustement automatique, l'algorithme ISODATA se révèle particulièrement adapté à la classification d'images satellitaires complexes présentant une grande variabilité spectrale (**R V et SV, 2020**).

- **DBSCAN**

L'algorithme DBSCAN (*Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise*) est une méthode de classification non supervisée basée sur la densité des points de données. Il permet d'identifier des regroupements de formes variées tout en détectant automatiquement les bruits ou points isolés. Le processus repose sur deux paramètres : ϵ , qui définit le rayon de voisinage d'un point, et N , le nombre minimal de points requis dans ce voisinage pour former un cluster. Un point est considéré comme « central » s'il respecte ce critère, et un cluster est ensuite construit autour de lui de manière itérative (**Ester et al., 1996**). Contrairement à d'autres méthodes comme K-means, DBSCAN ne nécessite pas la définition préalable du nombre de clusters et s'avère particulièrement efficace pour les ensembles de données à densité variable ou comportant des anomalies (**Sabor et al., 2021**)

III.1.2. Classification supervisée

La classification supervisée nécessite une connaissance préalable de la zone étudiée. L'utilisateur sélectionne des échantillons représentatifs (régions d'intérêt) pour entraîner l'algorithme. Celui-ci applique ensuite la classification à toute l'image. Des algorithmes comme le Maximum de vraisemblance, la Distance minimum ou celle de Mahalanobis sont utilisés.

III.2. Méthodes de classifications basées sur l'apprentissage automatique

L'apprentissage automatique (*machine learning*), branche fondamentale de l'intelligence artificielle, repose sur la conception de systèmes algorithmiques capables d'assimiler des connaissances à partir de données à l'aide de modèles mathématiques, afin de faire des prédictions et prendre des décisions sans être explicitement programmés pour chaque tâche.

Concrètement, ce domaine s'articule autour d'un mécanisme d'extraction ciblée de savoirs exploitables, directement issus de jeux de données d'apprentissage.(De Matteis et al .,2022)

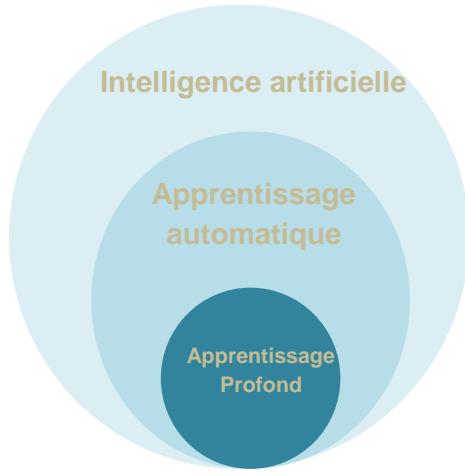


Figure II.3 Les trois domaines d'intelligence artificielle

III.2.1. Catégories de l'Apprentissage Automatique

Selon la nature des données d'entrée et des objectifs, l'Apprentissage Automatique peut être divisé en trois familles

A . Apprentissage non supervisé

L'apprentissage non supervisé est un cadre général de l'intelligence artificielle. Il permet d'analyser des données non étiquetées (pas nécessairement des images) pour en révéler la structure cachée. Il comprend des méthodes de regroupement (*clustering*), de réduction de dimension, comme l'analyse en composantes principales (PCA, *Principal Component Analysis*), ou la décomposition en valeurs singulières (SVD, *Singular Value Decomposition*), ainsi que des techniques d'estimation de densité, telles que l'estimation par noyau (KDE, *Kernel Density Estimation*), utilisées pour modéliser la distribution statistique des données. La classification non supervisée constitue donc un sous-ensemble de l'apprentissage non supervisé, spécifique à l'imagerie, qui consiste à regrouper automatiquement les pixels selon leurs similarités spectrales.

B . Apprentissage supervisé

Lorsqu'on travaille avec l'apprentissage automatique, on dispose souvent d'un ensemble de données d'apprentissage constitué de plusieurs paires (entrée, sortie), notées (x_1, y_1) , $(x_1, y_1), (x_2, y_2) \dots, (x_N, y_N)$.

- x_i représente une entrée (par exemple, des caractéristiques comme la pente, l'occupation du sol, etc.),
- y_i est la sortie attendue (par exemple, une classe comme "zone de recharge forte" ou "zone faible").

Ces sorties sont générées, en réalité, par une fonction inconnue notée $f(x)$, qui reflète la relation entre les données d'entrée et le résultat réel. Le but de l'apprentissage est alors de trouver une fonction approchée, notée $h(x)$, aussi proche que possible de cette fonction réelle $f(x)$, uniquement à partir des exemples fournis.

Les méthodes les plus utilisées dans ce type d'apprentissage incluent :

- **Régression logistique (LR)**

La régression logistique (LR) est un algorithme d'apprentissage supervisé largement utilisé dans divers domaines scientifiques, notamment dans les études environnementales (**Guns et Vanacker, 2012**). En tant que méthode de classification binaire, elle permet d'estimer la probabilité d'occurrence d'un phénomène en attribuant une valeur comprise entre 0 et 1, représentant le degré de vraisemblance de l'événement étudié. Contrairement aux modèles linéaires classiques, la LR ne requiert pas l'hypothèse de normalité des variables explicatives. Ce modèle s'avère particulièrement pertinent lorsque la variable dépendante est de nature dichotomique (par exemple, présence/absence ou succès/échec). (**Nguyen et al., 2020**)

- **Méthode de gradient boosting (Gradient Boosting Machines ,GBM)**

Constituent une technique d'apprentissage supervisé par ensemble particulièrement puissante, reposant sur l'utilisation d'arbres de décision comme apprenants faibles dans un cadre de type *boosting*. Introduit par **Friedman (2001)**, ce modèle vise à construire un prédicteur robuste en corrigent, de manière séquentielle, les erreurs commises par les arbres précédents. Chaque nouvel arbre est ainsi conçu pour s'adapter aux résidus générés

par les prédictions antérieures, dans le but d'améliorer progressivement la performance globale de l'ensemble (Liu et al ., 2024) .

Parmi les implémentations les plus populaires des GBM, on peut citer XGBoost (Extreme Gradient Boosting), LightGBM et CatBoost, qui offrent des performances élevées en termes de précision et d'efficacité computationnelle, en particulier sur des ensembles de données volumineux ou complexes.

III.3.Evaluation de performance de model

Dans un contexte d'apprentissage supervisé, l'évaluation de la performance d'un modèle repose sur des étiquettes de référence. Il existe plusieurs métriques adaptées aux tâches de classification ou de régression. Dans cette étude, seule la classification est utilisée, donc seules les métriques associées à ce type de modèle seront abordées.

L'AUC ROC est un indicateur global de performance d'un modèle de classification binaire. Elle mesure la capacité du classifieur à distinguer correctement entre les classes en traçant le taux de vrais positifs contre le taux de faux positifs pour tous les seuils possibles. Plus l'AUC est proche de 1, meilleure est la performance du modèle.

Y-axis (Taux de vrais positifs, TVP):

$$TVP = \frac{Vrais Positives (VP)}{Vrais Positives (VP) + Faux Negatives (FN)} \quad (15)$$

X-axis (Taux de faux positifs, TFP):

$$TFP = \frac{Faux Positives (FP)}{Faux Positives (FP) + vrais Negatives (VN)} \quad (16)$$

Accuracy mesure la proportion d'instances correctement classées parmi l'ensemble des prédictions effectuées, reflétant ainsi l'efficacité globale d'un modèle. Une valeur élevée de cette métrique indique que le modèle parvient à distinguer avec justesse les différentes classes.

$$Accuracy = \frac{VP + VN}{VP + VN + FP + FN} \quad (17)$$

Le Kappa de Cohen évalue le degré de concordance entre deux évaluateurs ou entre un évaluateur et une référence (gold standard), en tenant compte de l'accord pouvant survenir par hasard. Il est couramment utilisé pour mesurer la fiabilité des jugements catégoriels. (Li et al., 2023)

$$k = \frac{(P_o - P_e)}{(1 - P_e)} \quad (18)$$

P_o : Proportion d'accord observé entre les évaluateurs (ou entre un modèle et la vérité terrain)

P_e : Probabilité d'accord attendue par hasard

Le F1-score est la moyenne harmonique de la précision et du rappel, fournissant une évaluation équilibrée des performances d'un classificateur. Il est particulièrement pertinent lorsque les faux positifs et les faux négatifs entraînent des conséquences importantes.

$$F1 - score = \frac{2 (Precision \times Recall)}{Precision + Recall} \quad (19)$$

$$Precision = \frac{VP}{VP + FN} \quad and \quad Recall = \frac{VP}{VP + FP} \quad (20)$$

Ou : **VP:** Vrais Positives, **VN :** Vrais Negatives, **FP:** Faux Positives, **FN:** Faux Negatives

IV. Aide à la décision multicritères (ADMC)

Aide à la décision multicritères (ADMC), également appelées méthodes d'analyse multicritère, sont des approches relativement récentes et en constante évolution. La manière dont elles intègrent différents types de critères les rend particulièrement adaptées pour parvenir à des compromis judicieux.

Dans des situations de choix entre plusieurs alternatives, le recours à ces techniques d'aide à la décision est fortement recommandé. L'ADMC constitue une branche appliquée de la recherche opérationnelle ; elle vise essentiellement à orienter les décideurs vers des compromis fondés sur des critères souvent subjectifs (Rivest, 2019).

Le choix de la méthode multicritère la plus appropriée dépend largement de plusieurs facteurs: la nature de la problématique, le type d'alternatives, les informations disponibles et le type de résultats souhaités. Par ailleurs, la créativité du décideur ainsi que sa maîtrise des méthodes d'analyse multicritère – qui peut être plus ou moins limitée – influencent également le processus décisionnel (Bekhtari, 2015).

Plusieurs méthodes d'aide à la décision ont été développées au cours des 70 dernières années, parmi lesquelles : ELECTRE, MACBETH, PROMETHEE, LINMAP, MAVT, QUALIFLEX, REMBRANDT ou encore UTA. De manière générale, ces méthodes poursuivent l'un des trois objectifs suivants :

1. Sélectionner la meilleure option ;
2. Identifier un ensemble d'options pertinentes (top-K) ;
3. Établir un classement complet (avec ou sans pondération).

Les méthodes d'aide à la décision multicritère sont couramment employées pour traiter des problèmes de sélection dans divers domaines d'application, tels que la planification des ressources d'entreprise (**Efe, 2016**), les services en cloud computing (**Lee et Seo, 2016**), la sélection de partenaires de collaboration ou encore la gestion de scénarios agricoles (**Awasthi et Kannan, 2016**). Ces approches permettent aux décideurs d'analyser l'ensemble des critères en jeu en adoptant une démarche structurée, rationnelle et efficace dans le processus décisionnel.

IV.1. Méthode d'aide à la décision multicritères

Parmi les méthodes d'aide à la décision les plus couramment utilisées, on trouve notamment :

- **AHP (Analytic Hierarchy Process)**

Une méthode d'aide à la décision multicritère développée par Saaty, visant à structurer des problèmes complexes en hiérarchisant les critères et les alternatives à l'aide de comparaisons par paires. Elle permet ainsi une évaluation rigoureuse et cohérente des priorités décisionnelles. Une présentation approfondie de cette méthode sera proposée dans la deuxième section de ce chapitre.

- **TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)**

Constitue une autre approche d'aide à la décision multicritère. Elle repose sur le principe que la meilleure alternative est celle qui se trouve à la plus courte distance de la solution idéale positive et à la plus grande distance de la solution idéale négative (**Chakraborty et Yeh, 2009**). Chaque alternative est évaluée en fonction de ces distances, permettant ainsi d'établir un classement global. Cette méthode est largement utilisée pour sa simplicité et son efficacité dans la comparaison d'options multiples (**Chakraborty, 2022**).

- **ELECTRE (ELimination Et Choix Traduisant la REalité)**

Constitue une autre méthode d'aide à la décision multicritère, développée par Bernard Roy en 1966. Elle repose sur une analyse des relations d'appariement entre toutes les alternatives, en tenant compte de leurs performances selon un ensemble de critères. Le processus implique la construction d'une relation de surclassement fondée sur des indices de concordance et de discordance, intégrant l'importance relative de chaque critère. Plusieurs versions d'ELECTRE existent (I, II, III, IV, Tri et IS), chacune adaptée à différents types de problématiques décisionnelles. (Rogers et al, 2000).

IV.2. Comparaison entre les méthodes d'aide à la décision

Les principales caractéristiques des méthodes d'aide à la décision sont résumées dans le tableau suivant, permettant une comparaison claire de leurs avantages, limites et cas d'utilisation.

Tableau II.1 Comparaison des principales méthodes d'aide à la décision multicritère (MCDM)

Méthode	Principe	Avantages	Limites	Cas d'utilisation typique
AHP (Analytic Hierarchy Process)	Comparaisons par paires entre critères et alternatives. Calcul de poids.	Méthode simple, structurée, largement utilisée.	Sensible à l'incohérence des jugements, difficulté avec un grand nombre de critères.	Classement d'alternatives, priorisation de critères.
F-AHP (Fuzzy AHP)	AHP avec intégration des nombres flous (jugements linguistiques).	Gère l'incertitude et la subjectivité humaine.	Calculs plus complexes, interprétation parfois difficile.	Problèmes avec incertitude ou subjectivité forte.
TOPSIS	Évaluation basée sur la distance à la solution idéale et anti-idéale.	Facile à mettre en œuvre, résultats intuitifs.	Suppose des critères indépendants, normalisation sensible aux valeurs extrêmes.	Sélection de site, évaluation de performance, gestion de risques.
Fuzzy TOPSIS	TOPSIS avec des valeurs floues pour mieux gérer l'imprécision.	Plus réaliste dans les jugements humains flous.	Complexité accrue.	Choix stratégiques avec informations incertaines.
ELECTRE	Méthode d'élimination fondée sur des relations de surclassement.	Gère bien les conflits entre critères.	Complexité dans le paramétrage des seuils.	Projets d'aménagement, priorisation en urbanisme.
PROMETHEE	Surclassement avec fonctions de préférence et pondération des critères.	Bonne visualisation (GAIA), flexible.	Nécessite une bonne compréhension des fonctions de préférence.	Aide à la planification, décision stratégique.

V. Comparaison entre les méthodes d'aide à la décision et les méthodes d'apprentissage automatique

Dans le but d'évaluer la pertinence et les limites respectives des méthodes d'aide à la décision et des approches d'apprentissage automatique, une comparaison structurée est présentée ci-après.

Tableau II.2 Comparaison entre les méthodes d'apprentissage automatique et les méthodes d'aide à la décision multicritère (MCDM)

Critère	Méthodes d'apprentissage automatique	Méthodes d'aide à la décision (MCDM)
Objectif principal	Attribuer une étiquette ou une classe à chaque observation	Évaluer plusieurs alternatives selon plusieurs critères pondérés
Type de sortie	Classes : forêt, eau, zone urbaine, etc. (catégories discrètes)	Classement, score global, ou préférence entre options
Données nécessaires	Données avec ou sans étiquettes (supervisé ou non supervisé)	Matrice de critères pondérés, parfois avec jugements experts
Traitement des critères multiples	Pas explicite, sauf dans certaines méthodes (ex. RF considère plusieurs variables)	Central dans l'analyse (pondération explicite des critères)
Exemples de méthodes	- Random Forest - SVM - K-means	- AHP - TOPSIS - Fuzzy AHP - PROMETHEE - ELECTRE
Utilisation en SIG / télédétection	Très utilisée pour la classification d'images satellite ou raster	Très utilisée pour la délimitation de zones (eau souterraine, risques...)
Approche	Basée sur les données (data-driven)	Basée sur les préférences humaines / experts (critère-driven)
Capacité d'apprentissage	Oui (Machine Learning et Deep Learning)	Non (pas d'apprentissage, mais raisonnement logique ou heuristique)
Gestion de l'incertitude	Possible (méthodes bayésiennes, fuzzy classification...)	Oui avec extensions floues (Fuzzy AHP, Fuzzy TOPSIS)

Section 2 : Méthodes adoptées dans cette étude

Dans le cadre de cette thèse, plusieurs méthodes ont été utilisées afin de garantir une meilleure délimitation des zones potentielles de recharge en eaux souterraines, tout en assurant une analyse rigoureuse et fiable. Dans cette section, nous présenterons en détail les différentes méthodes employées ainsi que les étapes de leur mise en œuvre.

En effet, pour la cartographie des zones potentielles, deux approches ont été comparées et utilisées : les méthodes d'aide à la décision multicritère, notamment l'AHP, ainsi que les méthodes d'apprentissage automatique. Les principaux détails de ces approches seront présentés ci-après.

L'occupation du sol, paramètre influent dans le processus d'infiltration des eaux, a été cartographiée à l'aide d'une classification supervisée basée sur l'algorithme du maximum de vraisemblance, permettant ainsi la génération d'une carte précise d'occupation du sol.

I. Classification supervisée : Maximum de vraisemblance

La classification par **Maximum de vraisemblance** constitue l'un des algorithmes paramétriques les plus utilisés dans le cadre de la classification supervisée. Selon **ERDAS (1999)**, cet algorithme repose sur l'application du théorème de Bayes pour évaluer la probabilité qu'un vecteur de mesure inconnu \mathbf{X} appartienne à une classe donnée \mathbf{M}_c . La vraisemblance \mathbf{D} est alors calculée selon l'équation suivante :

$$\mathbf{D} = \ln(a_c) - [0.5 \cdot \ln(|\mathbf{Cov}_c|)] - [0.5 \cdot (\mathbf{X} - \mathbf{M}_c)^T \cdot \mathbf{Cov}_c^{-1} \cdot (\mathbf{X} - \mathbf{M}_c)] \quad (21)$$

Où : a_c représente la probabilité *a priori* qu'un pixel appartienne à la classe c ,

\mathbf{Cov}_c est la matrice de covariance des échantillons de la classe c ,

$|\mathbf{Cov}_c|$ est le déterminant de cette matrice,

\mathbf{Cov}_c^{-1} en est l'inverse,

T Indique la transposition du vecteur.

L'algorithme attribue chaque vecteur de mesure à la classe pour laquelle la probabilité d'appartenance est maximale. L'un des principaux atouts de cette méthode réside dans sa capacité à intégrer la variance et la covariance internes à chaque classe. Ainsi, lorsque les données sont normalement distribuées, la MLC offre des performances supérieures à celles d'autres classificateurs paramétriques. En revanche, si les distributions s'éloignent de la normalité, la précision des résultats peut être compromise (**Taati et al ., 2015**).

II. Méthode d'aide à la décision multicritaire

Dans cette section, nous nous sommes intéressés à la méthode d'aide à la décision multicritère : **Processus Analytique Hiérarchique (AHP)**, qui constitue la base de la démarche adoptée pour la délimitation des zones potentielles de recharge détaillées au chapitre IV de la deuxième partie.

II.4.1. Processus Analytique Hiérarchique (AHP)

Le processus d'analyse hiérarchique (AHP) est l'une des méthodes d'aide à la décision multicritère les plus répandues, visant principalement le troisième objectif : l'établissement d'un classement pondéré (Robin Rivest, 2019).

Développée par **Saaty (1980)**, la méthode AHP repose sur des fondements mathématiques rigoureux, conçus pour optimiser l'exactitude des pondérations obtenues. Parmi les différentes approches ADMC, l'AHP est la plus ancienne. Elle constitue un outil pertinent pour traiter des situations décisionnelles complexes. Cette méthode permet de prendre en compte à la fois les dimensions objectives et subjectives de la décision en décomposant les problèmes complexes en une série de comparaisons par paires.

Un autre avantage majeur de l'AHP réside dans le contrôle de la cohérence des jugements des décideurs grâce à un indice intégré, ce qui renforce la fiabilité des résultats (**Bekhtari, 2015**). La comparaison par paires constitue l'un des fondements de nombreuses méthodes ADMC. Son utilisation remonte au XIII^e siècle, avec les travaux de Ramon Llull, considéré comme l'un des pionniers dans ce domaine. En analyse multicritère, cette technique allège la charge cognitive imposée au décideur en lui permettant d'évaluer les alternatives deux à deux, facilitant ainsi l'expression des préférences relatives (**Koczkodaj et al., 2016**).

La structuration de problème dans une hiérarchie

La comparaison par paires et la création de la matrice

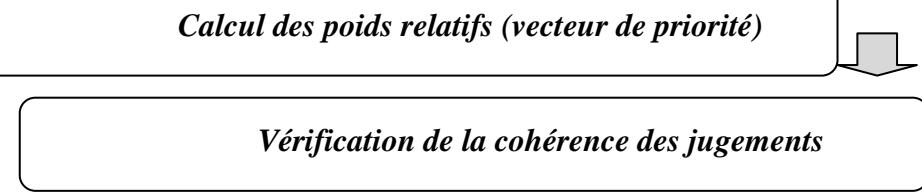


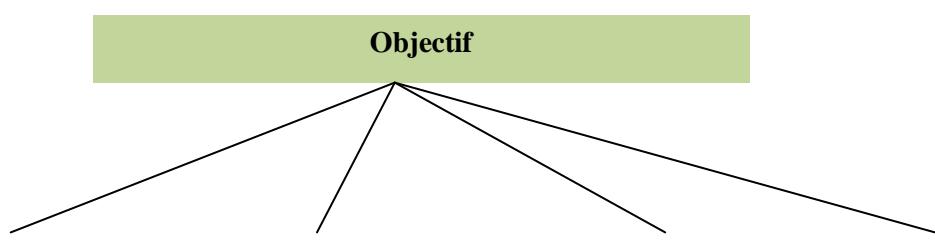
Figure II.4 Déroulement du processus AHP

Étape 1 : Structuration hiérarchique du problème

La première étape du processus AHP consiste à structurer le problème sous forme hiérarchique. Selon **Saaty (1980)**, cette hiérarchie permet de représenter clairement l'objectif global de la décision, les critères et sous-critères influents, ainsi que les alternatives possibles. La structure hiérarchique prend généralement la forme d'un arbre inversé :

- le sommet de la hiérarchie représente l'objectif global du problème à résoudre,
- le niveau intermédiaire regroupe les critères (et sous-critères, si nécessaire),
- le niveau inférieur contient les alternatives à évaluer.

Cette organisation permet de simplifier l'analyse en décomposant un problème complexe en éléments plus gérables. Une bonne hiérarchie, selon Saaty, doit être construite « du haut vers le bas » en partant de l'objectif, ou inversement en remontant des alternatives jusqu'aux critères, afin d'assurer des liens logiques et cohérents entre les différents niveaux.



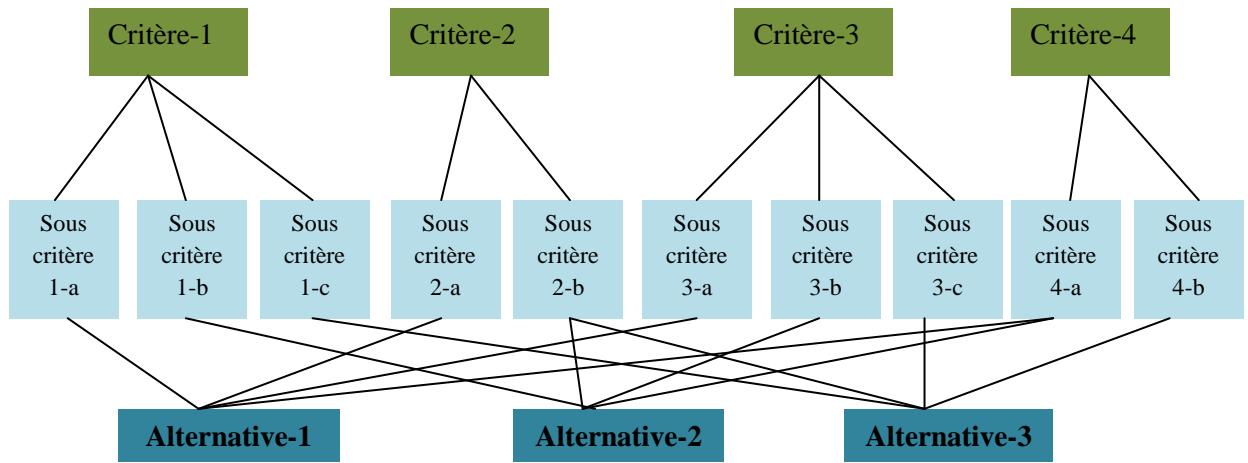


Figure II.5 Architecture d'AHP

Étape 2 : Comparaison par paires des éléments

Une fois la hiérarchie établie, la deuxième étape consiste à comparer les éléments d'un même niveau deux à deux selon leur contribution à l'élément du niveau supérieur. Cette comparaison repose sur l'échelle fondamentale de **Saaty (1980)**, allant de 1 (importance égale) à 9 (importance extrême). Cette échelle permet de traduire les jugements qualitatifs des experts ou décideurs en valeurs numériques.

Tableau II.3 Interprétation de l'échelle des jugements verbaux (Saaty, 1980).

Expression	Explication
Importance égale (1)	Les deux activités apportent une contribution égale à la réalisation de l'objectif.
Importance modérée (3)	L'expérience et le jugement privilégient une activité au détriment de l'autre.
Importance forte (5)	L'expérience et le jugement penchent nettement en faveur d'une activité par rapport à l'autre.
Importance très forte (7)	Une activité est nettement privilégiée, sa prédominance étant clairement démontrée dans la pratique
Importance extrême ou absolue (9)	Les preuves en faveur de l'une des activités atteignent le plus haut niveau de certitude possible.
Valeur intermédiaire entre deux expressions adjacentes (2, 4, 6 et 8)	Lorsqu'il est nécessaire de trouver un équilibre entre deux expressions

Par exemple, si le critère A est jugé « fortement plus important » que le critère B, on lui attribuera la valeur 5 dans la matrice de comparaison. Ces jugements sont enregistrés dans une matrice carrée, où chaque cellule représente l'importance relative d'un élément par rapport à un autre. La réciprocité est respectée : si l'élément i est 3 fois plus important que j, alors l'élément j est 1/3 aussi important que i.

Tableau II.4 Matrice des jugements

	A	B	C	D	E	F	G
A	1	5	3	6	--	9	--
B	1/5	1	--	--	--		--
C	1/3	--	1	2	--	3	--
D	1/5	--	1/2	1	--	--	--
E	--	--	--	--	1	--	--
F	1/9	--	1/3	--	--	1	--
G	--	--	--	--	--	--	1

Étape 3 : Calcul des poids relatifs (vecteur de priorité)

Les matrices de comparaison obtenues sont ensuite utilisées pour déterminer les poids relatifs des critères et alternatives, ce qu'on appelle le vecteur de priorité. Ce calcul se fait en normalisant chaque colonne de la matrice (division de chaque valeur par la somme de sa colonne), puis en moyennant les lignes.

Le vecteur de priorité obtenu représente la contribution relative de chaque élément au niveau supérieur. Il s'agit d'une étape essentielle pour quantifier les préférences subjectives des décideurs de manière cohérente et reproductible.

Étape 4 : Vérification de la cohérence des jugements

Les comparaisons par paires peuvent parfois introduire des incohérences, notamment lorsque les jugements ne sont pas parfaitement transversaux. Pour cette raison, **Saaty (1980)** a proposé des indicateurs de cohérence permettant de quantifier le degré de cohérence d'une matrice de jugement.

Le Ratio de Cohérence (**CR**) est calculé à partir de l'indice de cohérence (**CI**) et de l'indice

$$CR = \frac{CI}{RI(n)} \quad \text{Où} \quad CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (22)$$

aléatoire (**RI**), selon la formule suivante :

Avec λ_{\max} est la valeur propre maximale de la matrice de jugement.

n est le nombre d'éléments comparés,

RI (n) est une valeur extraite du tableau proposé par **Saaty (1977)**.

Tableau II.5 Indices RI pour calculer le ratio de cohérence (**Saaty, 1977**)

n	3	4	5	6	7	8	9	10
RI(n)	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Selon **Saaty (1980)**, une matrice de comparaison est considérée comme cohérente si son ratio de cohérence (CR) est inférieur à 10 %. Cette condition constitue un préalable essentiel pour le calcul du vecteur propre, permettant d'obtenir des pondérations fiables des critères. En cas de dépassement de ce seuil, les jugements exprimés lors des comparaisons par paires doivent être revus, car l'incohérence risque d'altérer la validité du processus décisionnel (**Herman & Koczkodaj, 1996**).

La dernière étape de la méthode AHP consiste en une synthèse des priorités. Une fois les poids des critères déterminés à chaque niveau de la hiérarchie, ces poids sont utilisés pour calculer les scores globaux des alternatives. Ce processus conduit à un classement final des alternatives selon leur pertinence par rapport à l'objectif global (**Zouggari, 2011**). Ainsi, l'AHP permet de structurer le raisonnement du décideur de manière rigoureuse et transparente.

III. Méthode d'apprentissage automatique : Forêts aléatoires (RF) Extreme Gradient Boosting (XGBoust) et Support Vector Machine (SVM)

Dans le cadre de cette étude, trois algorithmes d'apprentissage supervisé ont été mobilisés en raison de leur efficacité éprouvée dans les tâches de classification, notamment dans le domaine de l'analyse environnementale et de la cartographie hydrologique. Il s'agit du Random Forest (RF), du Support Vector Machine (SVM) et de l'Extreme Gradient Boosting

(XGBoost). Ces algorithmes ont été choisis pour leur capacité à gérer des ensembles de données multidimensionnels, à modéliser des relations non linéaires et à offrir de bonnes performances en termes de précision, de robustesse et de généralisation.

- **Forets aléatoires (RF)**

Un algorithme d'apprentissage supervisé introduit par **Breiman(2001)**, reposant sur le principe des *ensembles d'arbres de décision*. Chaque arbre de la forêt est construit à partir d'un sous-échantillon aléatoire des données, obtenu par *bootstrap* (rééchantillonnage avec remise), tandis que la sélection des caractéristiques à chaque nœud s'effectue également de manière aléatoire. Cette double randomisation permet de réduire la variance du modèle et d'améliorer sa généralisation. À chaque nœud d'un arbre, l'algorithme sélectionne la caractéristique x_j et le seuil θ qui minimisent une mesure d'impureté, comme l'indice de Gini ou l'entropie.

Une fois la forêt construite, chaque arbre individuel $h_k(x)$ émet une prédiction, et la classe finale y est déterminée par vote majoritaire :

$$y = \text{mode}\{h_1(x), h_2(x) \dots \dots h_T(x)\} \quad (23)$$

où T représente le nombre total d'arbres dans la forêt. En plus de sa performance en classification, l'algorithme offre une évaluation de l'importance des variables, facilitant l'interprétation des facteurs influents dans le processus de décision. **Belgiu et Drăguț (2016)** ont notamment démontré l'efficacité de Random Forest dans le cadre de la classification des données issues de la télédétection et des analyses spatiales.

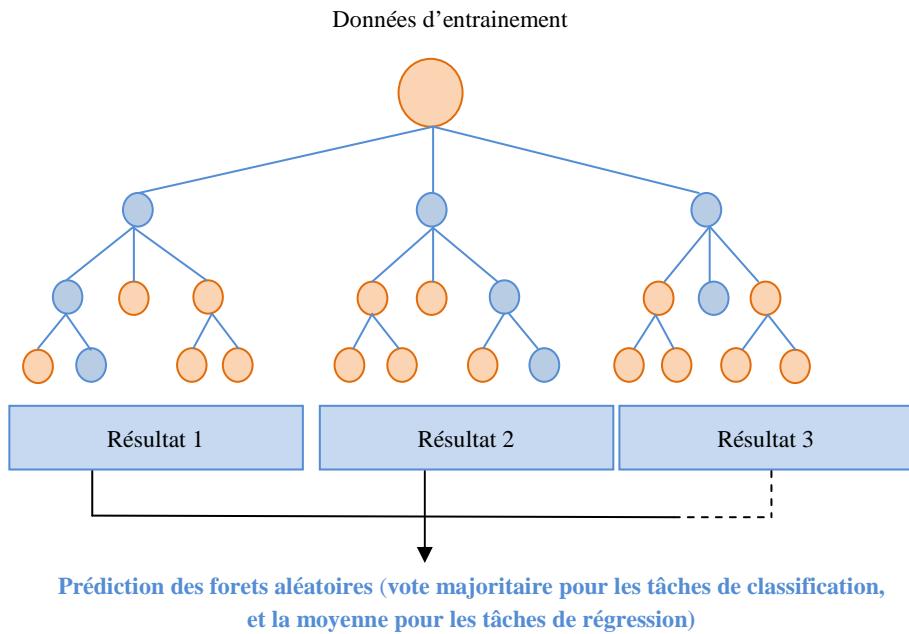


Figure II.6 Schéma de classification par Forêts aléatoires (RF)

- **Extreme Gradient Boosting (XGBoost)**

XGBoost est un algorithme d'apprentissage supervisé fondé sur le principe du boosting, où chaque nouvel arbre est entraîné pour corriger les erreurs commises par les prédecesseurs. Le modèle final correspond à une somme pondérée d'arbres de décision faibles, optimisés pour minimiser une fonction de perte. Proposé par **Chen et Guestrin (2016)**, XGBoost s'est rapidement imposé dans les tâches de classification complexes grâce à sa performance et sa flexibilité, bien qu'il puisse être sujet au surapprentissage en cas de mauvais réglage des hyperparamètres. Plusieurs travaux, notamment celui de **Ndiaye et al,(2025)**, ont démontré son efficacité dans le domaine de la classification des sols.

$$y_i = \sum_{k=1}^K f_k(x_i) \quad (24)$$

où y_i représente la prédiction associée à l'échantillon i , k désigne le nombre total d'arbres, et f_k correspond au k -ième arbre du modèle.

XGBoost optimise une fonction de coût qui combine une mesure de perte empirique avec un terme de régularisation, dans le but de réduire le risque de surapprentissage (overfitting).

$$L(\theta) = \sum_{i=1}^n l(\hat{y}_i, y_i) + \sum_{k=1}^K \Omega(f_k) \quad (25)$$

où $l(\hat{y}_i, y_i)$ représente la fonction de perte (telle que l'erreur quadratique, par exemple), désigne le $\Omega(f_k)$ terme de régularisation appliqué à l'arbre f_k .

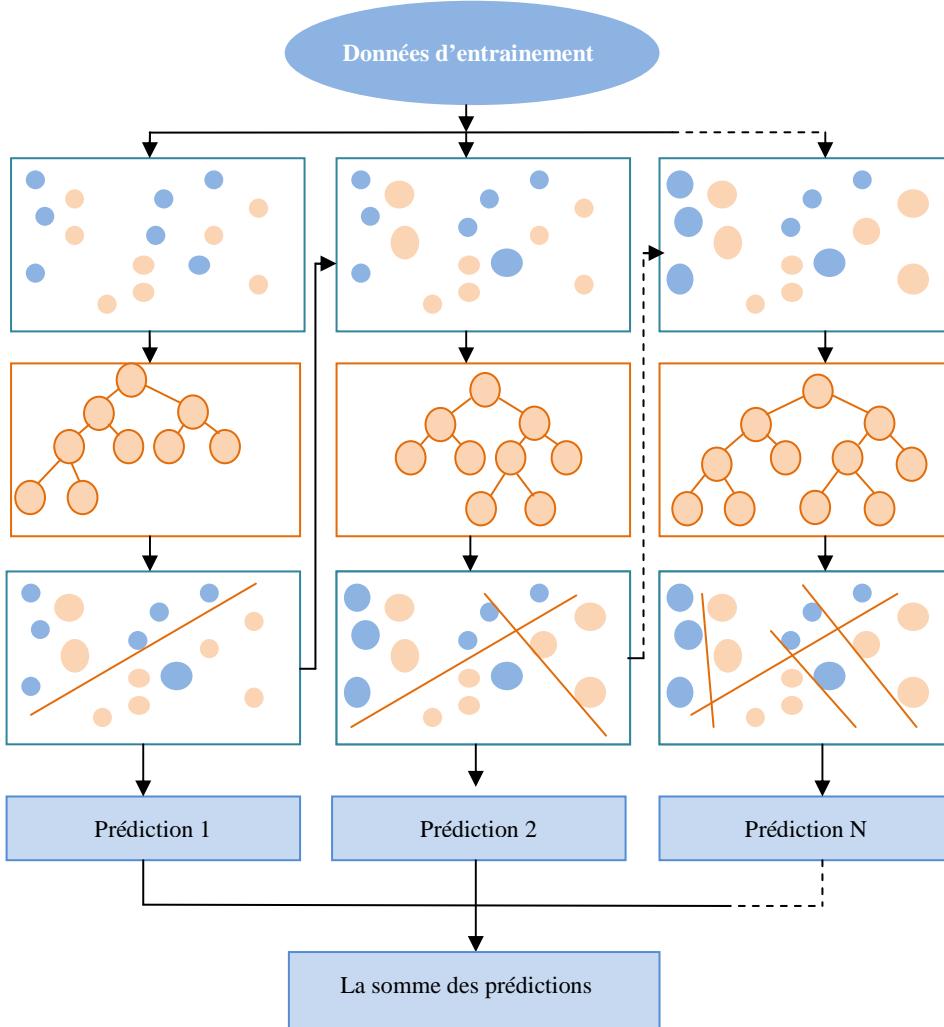


Figure II.7 Schéma de classification par XGBoost (XGB)

- **Méthode de vecteurs de support (SVM)**

Un algorithme d'apprentissage supervisé largement reconnu pour sa capacité à maximiser la marge de séparation entre les classes. Il vise à identifier l'hyperplan optimal qui sépare les catégories en maximisant la distance entre cet hyperplan et les observations les plus proches, appelées *vecteurs de support*. Introduit et popularisé par **Cortes et Vapnik** (1995), le SVM s'avère particulièrement performant dans les contextes où les classes sont linéairement séparables. Il présente également une grande efficacité dans les espaces de haute dimension et s'adapte bien aux ensembles de données de petite taille, ce qui en fait un outil pertinent pour les analyses pédologiques dans lesquelles les données sont souvent limitées. **Ghaemi et al. (2017)** ont souligné l'intérêt de SVM comme alternative fiable aux arbres de décision dans la classification des sols.

La marge correspond à la distance entre les vecteurs de support et l'hyperplan séparateur optimal. Dans le cas d'une séparation linéaire, cet hyperplan est défini par l'équation

$$\mathbf{w} \cdot \mathbf{X} + \mathbf{b} = 0 \quad (26)$$

où \mathbf{w} est le vecteur normal à l'hyperplan et \mathbf{b} le biais. La marge maximale, que l'algorithme SVM cherche à optimiser, est alors donnée par la formule :

$$marge = \frac{2}{\|\mathbf{w}\|} \quad (27)$$

Pour traiter les problèmes non linéaires, le SVM utilise une fonction noyau permettant de projeter les données dans un espace de dimension supérieure, où une séparation linéaire devient possible. Cette approche, connue sous le nom de *kernel trick*, évite le calcul explicite de la transformation tout en conservant l'efficacité du modèle.

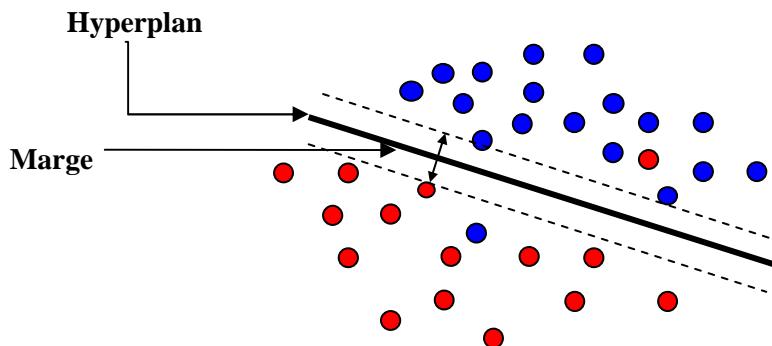


Figure II.8 Schéma de classification par machine à vecteurs de support (SVM)

Conclusion

Ce chapitre a établi les fondements théoriques et méthodologiques indispensables à l'évaluation du potentiel en ressources en eaux souterraines. Il a d'abord introduit les principaux concepts de la télédétection, en abordant les types de capteurs, les étapes de prétraitement des images et les plateformes d'acquisition de données. Le rôle central des Systèmes d'Information Géographique (SIG) dans l'analyse spatiale a également été souligné. Par ailleurs, les différentes méthodes de classification — classiques (supervisées et non supervisées) et avancées (basées sur l'apprentissage automatique) — ont été présentées, accompagnées des indicateurs couramment utilisés pour évaluer leur performance.

La seconde partie du chapitre s'est focalisée sur les méthodes opérationnelles mobilisées dans le cadre de cette étude : la classification supervisée par maximum de vraisemblance, les techniques d'aide à la décision multicritères (notamment la méthode AHP), ainsi que trois algorithmes d'apprentissage automatique (Random Forest, XGBoost et SVM). Une analyse comparative entre ces approches a permis de mettre en évidence leur complémentarité : les premières reposant sur l'expertise humaine et la hiérarchisation des critères, les secondes sur la capacité d'apprentissage à partir des données.

En somme, ce chapitre pose les jalons d'une démarche intégrée articulant données géospatiales, intelligence artificielle et méthodes décisionnelles, en vue d'une meilleure compréhension et d'une gestion durable des ressources en eaux souterraines. Les résultats issus de l'application de ces méthodes seront détaillés dans les chapitres suivants.

Partie II : Application à la zone d'étude

Chapitre I :**Analyse Morphométrique et Hydrologique du Bassin Versant d'Étude****Introduction**

Le bassin versant de la Tafna est situé au nord-ouest de l'Algérie et fait partie des principaux bassins hydrographiques de la région, couvrant une superficie d'environ **7245 km²**. Ce bassin est caractérisé par une topographie variée, allant des reliefs montagneux dans les régions amont, notamment au niveau des Monts de Tlemcen et du massif de Traras, à des zones de plaines et de vallées en aval, où s'écoulent les principaux cours d'eau.

L'hydrographie du bassin est dominée par l'oued Tafna, un cours d'eau majeur (117 Km) qui prend sa source dans les Monts de Tlemcen et s'écoule vers la mer Méditerranée. Il est alimenté par plusieurs affluents, dont l'Oued Isser et l'Oued Boukiou. Le climat de la région est de type méditerranéen semi-aride, caractérisé par des précipitations irrégulières et une forte évapotranspiration, ce qui influence considérablement la disponibilité des ressources en eau.

Les formations géologiques du bassin sont diversifiées, allant des calcaires jurassiques aux dépôts alluvionnaires quaternaires dans les plaines. La présence d'aquifères dans ces formations joue un rôle crucial dans l'approvisionnement en eau potable et agricole. La nappe phréatique et les aquifères profonds, bien que relativement riches en ressources, sont soumis à une exploitation intensive, notamment pour l'irrigation, qui représente la principale activité économique du bassin.

L'agriculture constitue en effet un secteur clé dans cette région, avec une importante surface irriguée, notamment dans les plaines de Maghnia et de Remchi. Cependant, la rareté des eaux de surface, combinée à une demande croissante en eau, impose une forte pression sur les ressources souterraines. Cette surexploitation des aquifères entraîne une baisse des niveaux piézométriques et parfois une détérioration de la qualité de l'eau, en raison des infiltrations salines ou de la pollution d'origine agricole.

D'un point de vue environnemental, le bassin de la Tafna est confronté à des défis majeurs liés à l'érosion des sols, à la déforestation et à l'impact des activités humaines sur les ressources en eau. La gestion durable du bassin est donc essentielle pour préserver cet

équilibre fragile et garantir une exploitation rationnelle des ressources hydriques, tout en répondant aux besoins croissants de la population et du secteur agricole.

I. Localisation géographique

Le bassin versant de la Tafna, identifié sous le code 16 parmi les 17 bassins hydrographiques de l'Algérie, appartient à la région hydrographique de l'Oranie Chott Chergui. Situé au nord-ouest de l'Algérie, il s'étend entre latitude $34^{\circ}47'$ et $35^{\circ}10'$ Nord et longitudes $2^{\circ}14'$ Ouest et $0^{\circ}50'$ Est, couvrant une superficie totale de 7 245 km². Une partie significative du bassin, représentant environ 1 950 km² (soit près d'un tiers de sa superficie), s'étend sur le territoire marocain. Ce bassin est subdivisé en huit sous-bassins, chacun présentant des caractéristiques hydrologiques et géomorphologiques spécifiques. (**Figure I.1**)

Les limites du bassin versant de la Tafna sont définies comme suit :

- Au nord-ouest : les communes de Bâb Al Assa, Djebala, Nedroma, Beni Khelad et Honaine.
- Au nord : la mer Méditerranée.
- Au nord-est : la wilaya d'Ain Temouchent.
- Au sud : les quatre communes steppiques de Bouihi, El Gor, Sidi Djillali et El Aricha.
- À l'ouest : le Maroc.
- À l'est : la wilaya de Sidi Bel Abbess, avec la commune d'Ain Tellout.

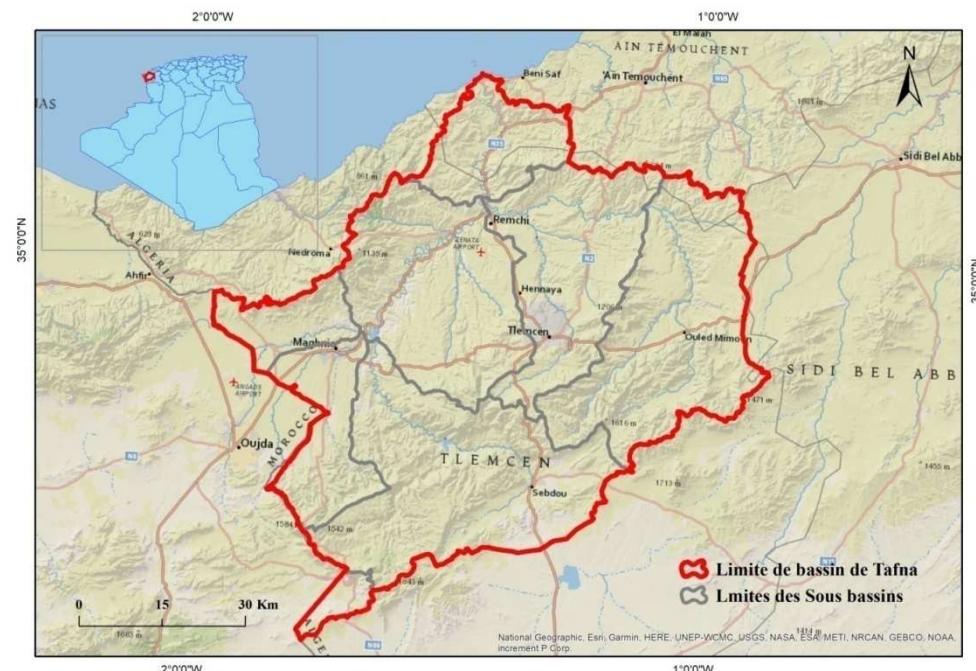


Figure I.1 Situation géographique du bassin versant de la Tafna et des sous bassin

I.2. Géomorphologie générale

La géomorphologie du bassin de l'Oued Tafna est marquée par une grande diversité de reliefs qui influencent son hydrologie, comme le souligne **Benest (1986)**. Ce bassin est situé dans le domaine tellien de l'Algérie, et se distingue par plusieurs éléments géographiques notables :

- **Monts des Traras et Sebâa-Chioukh** au nord : ces montagnes dépassent les 1000 mètres d'altitude, résultant des mouvements alpins (**Benest et al., 1987**).
- **Monts de Tlemcen** à l'est et au sud-est : ces montagnes, parfois élevées jusqu'à 1800 mètres, constituent un point culminant de la région (**Benest, 1986**).
- **Monts de Ghar-Roubane** au sud-ouest : ces montagnes marquent la frontière entre l'Algérie et le Maroc et délimitent la terminaison des monts de Tlemcen (**Benest et al., 1987**).
- **Plaines de Maghnia** : la plus grande plaine du bassin, couvrant environ 52 km², est formée de dépôts alluvionnaires provenant de l'Oued Tafna (**Elmi, 1972; Mekahli, 1988**).

Le bassin de l'Oued Tafna est divisé en trois zones géomorphologiques selon **Benest (1990)** :

1. **Haute Tafna** : avec des altitudes dépassant 1000 mètres et des pentes très abruptes.

2. **Moyenne Tafna** : une zone intermédiaire présentant des altitudes modérées.
3. **Basse Tafna** : une zone plane avec des altitudes avoisinant les 200 mètres et des pentes plus douces.

I.3.Réseau hydrographique

Le bassin versant de l'Oued Tafna se compose de six affluents, comme l'a indiqué **Zettam (2018) (Figure I.2)** :

- **Sous-bassin de Sebdou** : S'étendant sur 602 km² dans le sud du bassin, il prend sa source à Ghar Boumaaza et se jette dans le barrage de Beni-Bahdel. En 2009, il comptait environ 44 868 habitants. Il joue un rôle essentiel dans l'alimentation en eau de la région.
- **Sous-bassin de Khémis** : Ce sous-bassin, d'une superficie de 378 km², rejoint également le barrage de Beni-Bahdel. Sa population était estimée à 11 318 habitants en 2009. Il est un élément clé pour la gestion de l'eau dans la zone sud du bassin.
- **Sous-bassin de Chouly** : Localisé à l'est, il couvre 326 km² et se déverse dans la commune d'Oued Lakhdar. En 2009, il comptait 5 262 habitants. Il contribue à l'alimentation en eau de la région, malgré sa population plus réduite.
- **Sous-bassin d'Isser** : Avec une superficie de 1 140 km², il est situé à l'est du bassin. La construction du barrage de Sidi Abdelli a réduit l'approvisionnement en eau dans ce sous-bassin, affectant l'agriculture et l'écosystème local. Son impact a été étudié par **Taleb et al. (2008)**.
- **Sous-bassin de Sikkak** : S'étendant sur 463 km² à l'est du bassin, il se rejoint avec l'Oued Tafna à Remchi. Ce sous-bassin est en état de vieillissement avancé, limitant les apports en eau dus à l'érosion, comme noté par **Zettam (2018)** et **Bakreti (2014)**.

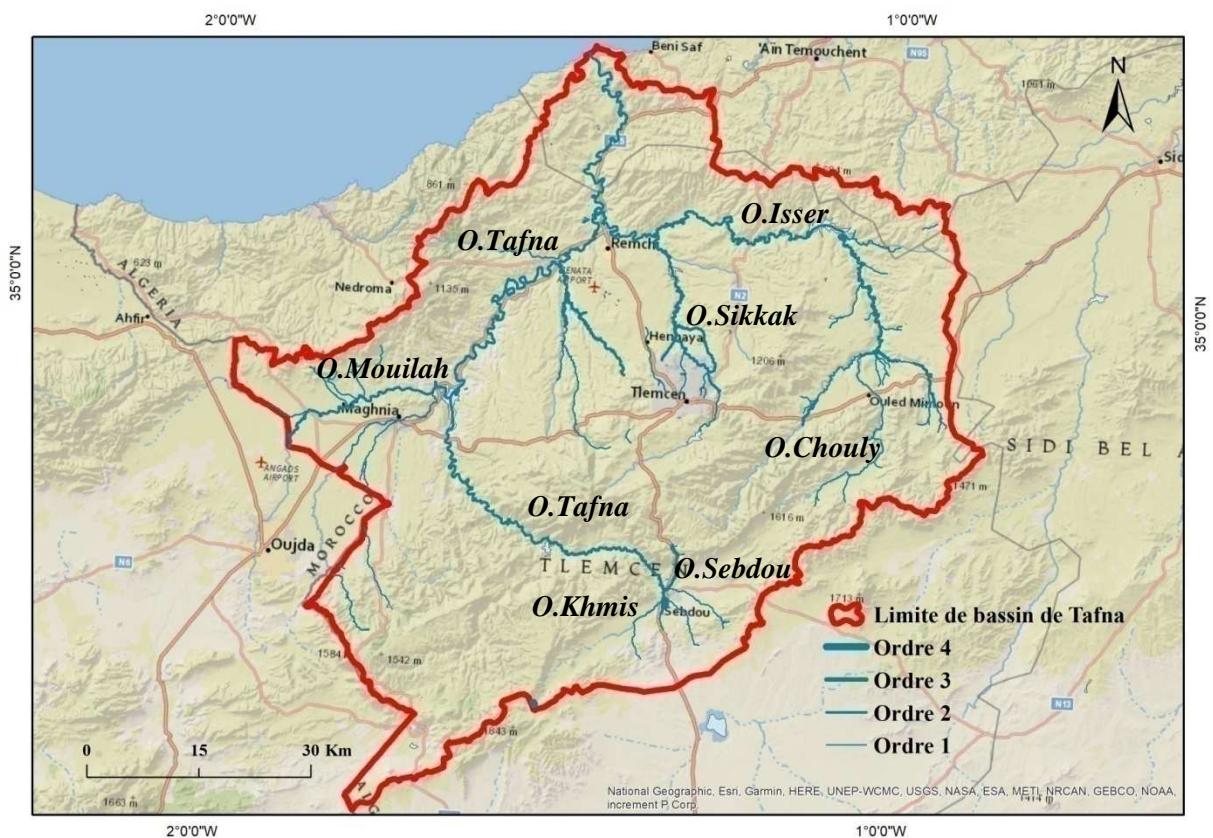


Figure I.2 Principaux oueds dans le bassin versant de la Tafna

II. Le Choix d'un Sous-Bassin représentatif pour l'application de la méthodologie d'étude

Dans cette section, nous avons sélectionné le sous-bassin d'Oued Isser-Sikkak parmi les huit sous-bassins du bassin de la Tafna pour appliquer la méthodologie de délimitation des zones favorables à la recharge des eaux souterraines. Ce choix est motivé par plusieurs facteurs, dont la disponibilité de données pertinentes telles que les précipitations, les cartes topographiques, et la productivité des puits. Le sous-bassin d'Oued Isser-Sikkak, en raison de ses caractéristiques géographiques et hydrologiques, offre une base solide pour l'application de notre méthodologie. Les résultats obtenus ici sont jugés représentatifs et peuvent être généralisés aux autres sous-bassins du bassin de la Tafna. Nous présenterons par la suite les caractéristiques spécifiques de ce sous-bassin.

II.1. Localisation géographique

Le bassin versant d'Oued Isser-Sikkak, d'une superficie de 825,3 km² et un périmètre de 175,8 km, est délimité par des reliefs géographiques variés : au sud, les montagnes de Djebel Nadour et Bouladour ; à l'est, les Djebel Ramlya, Ouakrim et Tabeldaout ; à l'ouest, le Djebel Tafatisset et le plateau de Zenata ; et au nord, le Djebel Touillait. Ce bassin est caractérisé par une configuration géographique qui affecte son temps de réponse aux précipitations et l'écoulement de l'eau. (**Figure I.3**)

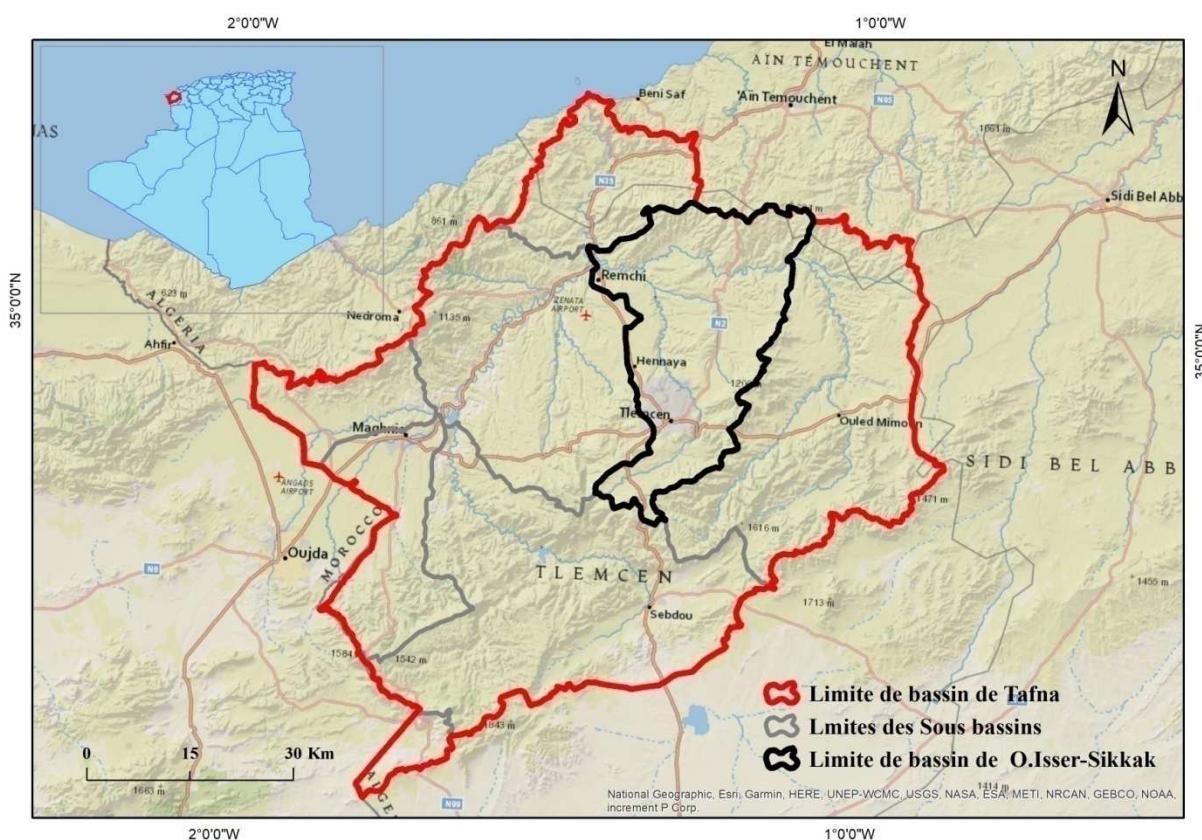


Figure I.3 Localisation géographique du bassin de Oued Isser-Sikkak

Le cours d'eau principal de ce bassin est un affluent rive gauche de l'Oued Isser, lui-même un affluent rive droite de la Tafna (**Figure I.4**). Cette dernière confluence avec l'Oued Tafna au nord d'Aïn Youcef. L'Oued Isser prend sa source sur le plateau de Terny, situé au sud de Tlemcen, précisément à la source d'Aïn Rhannous. Cette configuration hydrologique fait du bassin versant d'Oued Isser-Sikkak un élément clé du réseau hydrographique régional, jouant un rôle crucial dans l'alimentation en eau de la région.

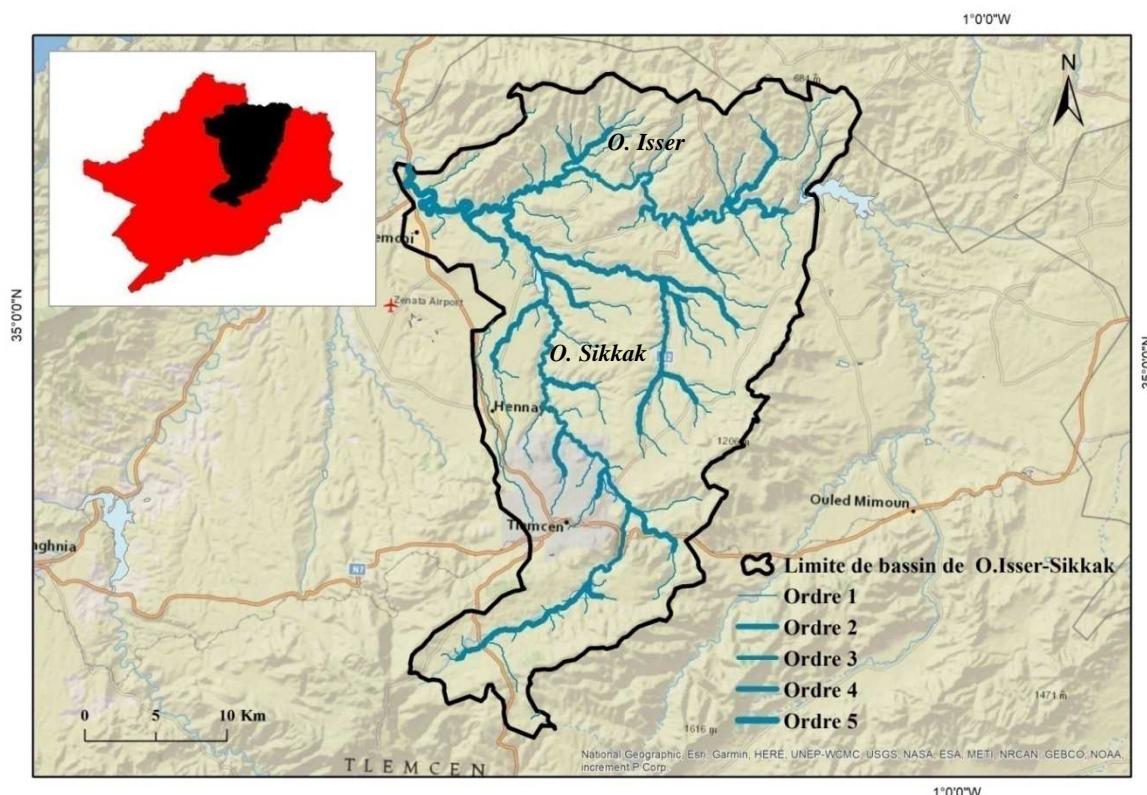


Figure I.4 principaux oueds dans le bassin de Oued Isser-Sikkak

II.2. Caractéristiques Physiographiques

La configuration d'un bassin versant influe directement sur la forme de l'hydrogramme observé à son exutoire. Un bassin allongé, par exemple, entraîne des débits de pointe plus faibles pour une même précipitation, en raison d'un temps d'acheminement plus long de l'eau vers l'exutoire. Ce phénomène est étroitement lié au concept de temps de concentration. À l'inverse, les bassins en forme d'éventail présentent un temps de concentration plus court, ce qui se traduit par des débits de pointe plus élevés. Divers indices morphologiques permettent non seulement de caractériser ces milieux, mais aussi de comparer les bassins versants entre eux.

II.2.1. Caractéristiques Géométriques

II.2.1.1. Surface (A) et périmètre (P)

La superficie du bassin versant, correspondant à la zone de collecte des précipitations et d'alimentation des cours d'eau, influence directement les débits. Son calcul, effectué à l'aide du logiciel ArcGIS 10.8, a permis d'estimer la surface . De même, le périmètre du bassin

versant a été déterminé avec précision grâce au même logiciel, permettant une meilleure caractérisation de l'étendue de la zone étudiée.

Tableau I.1 Superficie et périmètre du bassin de Oued Isser-Sikkak

Bassin	Superficie (A) Km ²	Périmètre (P) Km
Oued Isser-Sikkak	825.3	175.8

II.2.1.2. Caractéristiques De Forme

Quatre principaux indices morphologiques permettent de caractériser les écoulements et de comparer les bassins versants :

- **L'indice de compacité,**
- **La courbe hypsométrique**
- **Le rectangle équivalent,**
- **L'indice de pente.**

II.2.1.2.1. Coefficient de Gravelius (K_G)

L'indice de compacité de Gravelius (K_G) est un paramètre morphologique utilisé pour caractériser le milieu physique d'un bassin versant et comparer différents bassins entre eux. Il est défini comme le rapport entre le périmètre du bassin versant étudié (P) et le périmètre d'un cercle (P') ayant la même superficie (A) . (**Boudjebieur, 2022**).

Si A représente la superficie du bassin (en km²) et P son périmètre (en km), le coefficient K_G est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$K_G = \frac{P}{P'} = \frac{P}{2\sqrt{\pi \times A}} = 0.28 \times \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (28)$$

Où : K_G : indice de compacité de Gravélius,

A : Surface du bassin versant en km

P : Périmètre du bassin en km

Le coefficient de compacité K_G est toujours supérieur à 1. Plus sa valeur est proche de 1, plus le bassin est compact. L'interprétation de cet indice se fait comme suit :

- Si $K_G > 1.12$ le bassin versant est allongé.
- Si $K_G < 1.12$ le bassin a une forme proche d'un carré.
- Si $K_G = 1.12$ le bassin est compact.

Dans le cas du bassin de la moyenne Seybouse, l'indice de compacité calculé est $K_G = 1.73$ ce qui est supérieur à 1.12. Cela indique que le bassin est allongé, favorisant ainsi un écoulement lent des eaux de ruissellement.

II.2.1.2.2. Répartition altimétrique du bassin versant

Afin d'analyser et d'expliquer les formes du relief du bassin versant de l'Oued Isser-Sikkak, une courbe hypsométrique a été réalisée. Pour ce faire, une carte topographique a été utilisée afin de répartir la superficie du bassin en tranches d'altitude (Tableau I.2). Ensuite, en reportant le cumul des aires élémentaires et les valeurs altimétriques sur une échelle arithmétique, il a été possible de tracer la courbe hypsométrique du bassin (Figure I.5).

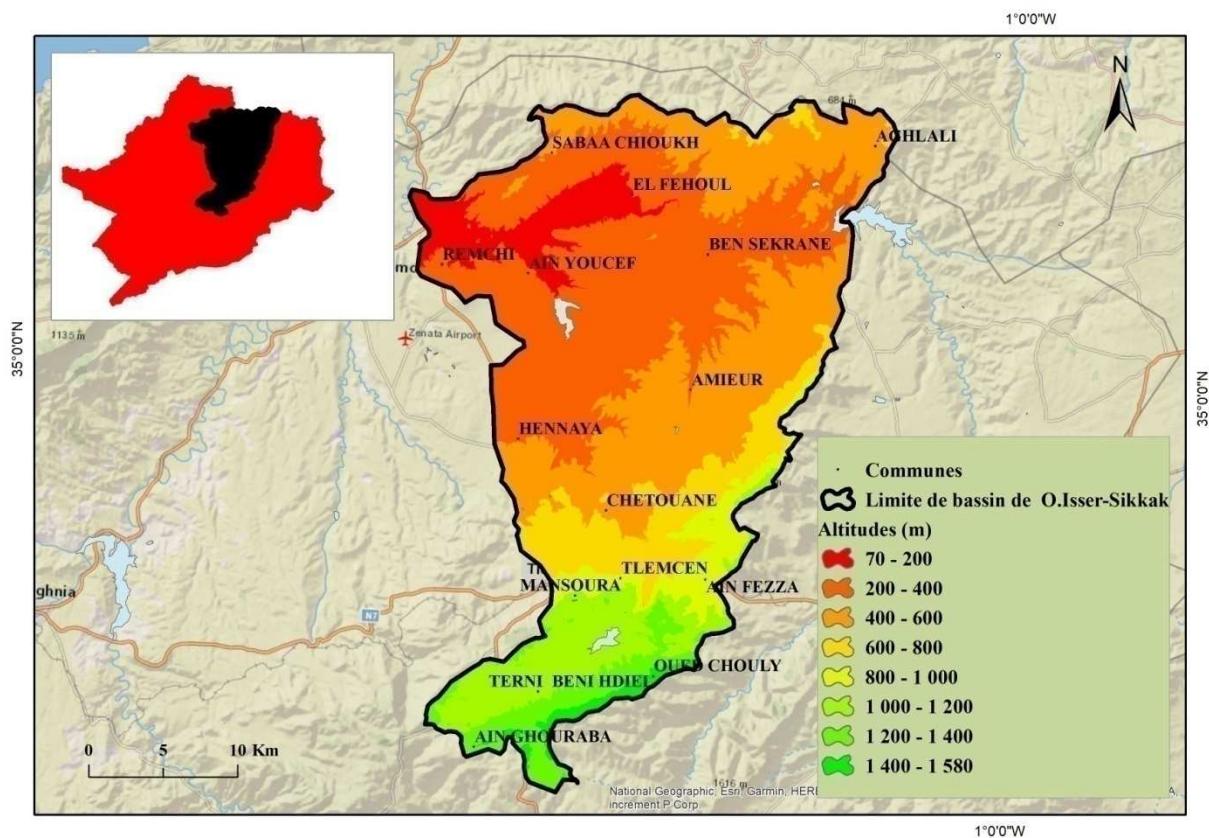
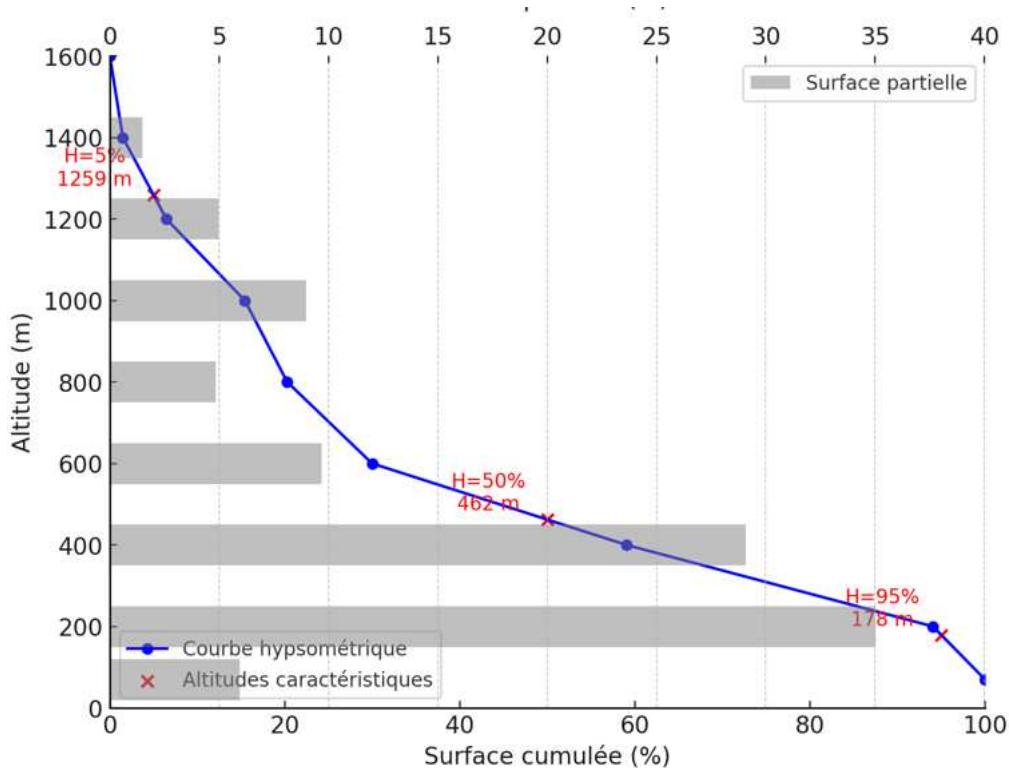


Figure I.5 Carte hypsométrique du bassin de Oued Isser-Sikkak

Tableau I.2. Répartition altimétrique du bassin de l'oued Isser- Sikkak

Tranche d'altitudes (m)		surface partielle (km ²)	surface partielle (%)	surface cumulée (%)
70	200	49	5.94	100.00
200	400	289	35.02	94.06
400	600	240	29.08	59.05
600	800	80	9.69	29.97
800	1000	40	4.85	20.27
1000	1200	74	8.97	15.43
1200	1400	41	4.97	6.46
1400	1600	12	1.49	1.49

**Figure I.6** Courbe hypsométrique du bassin versant de l'Oued Isser-Sikkak

La courbe hypsométrique du bassin de l'Oued Isser-Sikkak (**Figure I.6**) met en évidence la présence du plateau de Terny et des falaises d'El Ourit aux altitudes élevées, tandis que la plaine d'Hennaya est située dans les zones de basses altitudes. De plus, la forme de cette courbe reflète un état d'équilibre vieillissant du bassin, indiquant un potentiel érosif moyen

Hauteurs caractéristiques

a) Altitudes minimale et maximale

Les altitudes sont extraites directement des cartes topographiques. L'altitude maximale correspond au point le plus élevé, tandis que l'altitude minimale désigne le point le plus bas, souvent situé près de l'exutoire. Dans le cadre de notre étude, les valeurs obtenues sont les suivantes :

- L'altitude minimale est de 70 m.
- L'altitude maximale est de 1580 m.

b) L'altitude moyenne

Elle est calculée par la formule suivante

$$H_{moy} = \frac{\sum A_i \cdot h}{A} \quad (29)$$

Avec :

A_i : Aire comprise entre deux courbes de niveau en (Km^2)

h : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau en (m)

A : Surface totale du bassin versant en (Km^2)

L'altitude moyenne, bien qu'elle ne reflète pas toujours parfaitement la réalité du terrain, est parfois utilisée pour évaluer certains paramètres hydrométéorologiques ou dans la modélisation hydrologique. Elle peut offrir une estimation simplifiée de l'altitude générale d'un bassin, facilitant ainsi l'application de certains modèles, malgré sa représentation approximative du relief.

c) L'altitude médiane

L'altitude médiane correspond à l'altitude située au point où 50 % de la surface totale du bassin est située en dessous, selon la courbe hypsométrique. Cette valeur est souvent proche de l'altitude moyenne, surtout lorsque la courbe hypsométrique du bassin présente une pente

régulière. Dans le cas du bassin de l'Oued Isser-Sikkak, l'altitude médiane est d'environ 462 m.

II.2.1.2.3. Rectangle équivalent

Cette notion permet de comparer les bassins versants en fonction de l'influence de leur forme sur l'écoulement. Elle repose sur l'hypothèse qu'un bassin peut être assimilé à un rectangle de même superficie, périmètre et caractéristiques hydrologiques (indice de Gravelius, répartition hypsométrique, densité de drainage, etc.). Dans cette transformation géométrique, les courbes de niveau deviennent parallèles aux petits côtés du rectangle, et l'exutoire se situe sur l'un d'eux.

La longueur (L)

$$L = \frac{K_c \sqrt{A}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right] \quad (30)$$

La largeur (l) :

$$l = \frac{K_c \sqrt{A}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right] \quad (31)$$

Avec: L : Longueur du rectangle équivalent (Km).

I : Largeur du rectangle équivalent (Km).

A : Surface du bassin versant (Km²).

Kc : Indice de compacité de GRAVILIUS.

Pour le bassin versant de l'Oued Isser-Sikkak, les dimensions du rectangle équivalent sont de **78,19 km** de longueur et **10,68 km** de largeur, indiquant que la longueur est environ **7,22 fois** supérieure à la largeur. Ces proportions permettent de représenter la zone d'étude sous forme de rectangle équivalent (**Figure I.7**), en s'appuyant sur les données cartographiques et l'analyse de la courbe hypsométrique (**Figure I.5**).

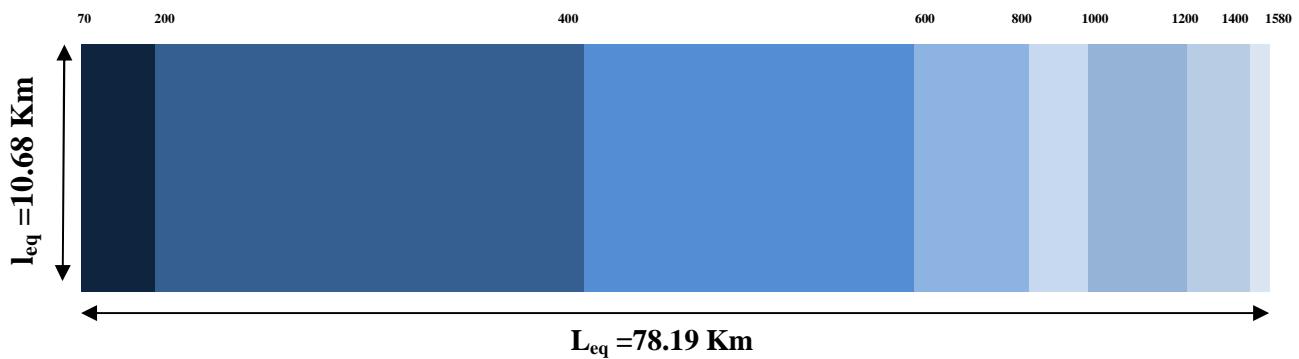


Figure I.7 Rectangle équivalent avec tranches d'altitudes (m) du bassin versant de l'Oued Isser-Sikkak

II.2.1.2.4. Indices des pentes

- **Indice de pente de Roche**

L'indice de pente global I_p est calculé en prenant la moyenne de la racine carrée des pentes mesurées sur le rectangle équivalent, tout en tenant compte des surfaces comprises entre deux courbes de niveau successives H_i et H_{i-1} . La formule permettant de calculer cet indice est la suivante :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_i^n \sqrt{A_i D_i} \quad (32)$$

Avec : L : longueur de rectangle équivalent (m).

A_i : surface partielle (%) comprise entre 2 courbes de niveau consécutives H_i et H_{i+1}

Tableau I.3 Détermination de la pente de Roche I_p .

$H_i - H_{i-1}$	$D_i = H_i - H_{i-1}$	A_i	$A_i = S_i / S (\%)$	$\sqrt{A_i \times D_i}$
1580-1400	180	49.02	0.06	3.27
1400-1200	200	289.47	0.35	8.38
1200-1000	200	240.75	0.29	7.64
1000-800	200	80.06	0.10	4.40
800-600	200	40.37	0.05	3.13
600-400	200	74.72	0.09	4.26
400-200	200	40.07	0.05	3.15

200-70	130	11.12	0.01	1.38
Somme		825.3	1.00	35.61

- **Indice de pente globale Ig**

A partir de la courbe hypsométrique, nous déduisons les altitudes de fréquence 5% et 95% de la surface du bassin versant. L'indice de pente global sera :

$$I_g = (H_{5\%} - H_{95\%}) / L \quad (33)$$

Avec : L : longueur du rectangle équivalent

Pour la classification du relief, celle d'O.R.S.T.O.M sera prise comme référence, elle est donnée dans le tableau suivant.

Tableau I.4 Classification O.R.S.T.O.M du relief à partir de l'indice de pente global

	Relief	Valeur de I_g
1	Très faible	$I_g < 0.002$
2	Faible	$0.002 < I_g < 0.005$
3	Assez faible	$0.005 < I_g < 0.01$
4	Modéré	$0.01 < I_g < 0.02$
5	Assez modéré	$0.02 < I_g < 0.05$
6	Fort	$0.05 < I_g < 0.1$
7	Très fort	$0.1 < I_g$

$I_g = 0.13$, donc le relief du bassin versant de l'Oued Isser-Sikkak est Très fort

- **Indice de pente moyenne**

L'indice de pente moyenne est le rapport entre la dénivellation et la longueur de rectangle équivalent (L).

$$I_{pm} = \Delta H / L = (H_{max} - H_{min}) / L \quad (34)$$

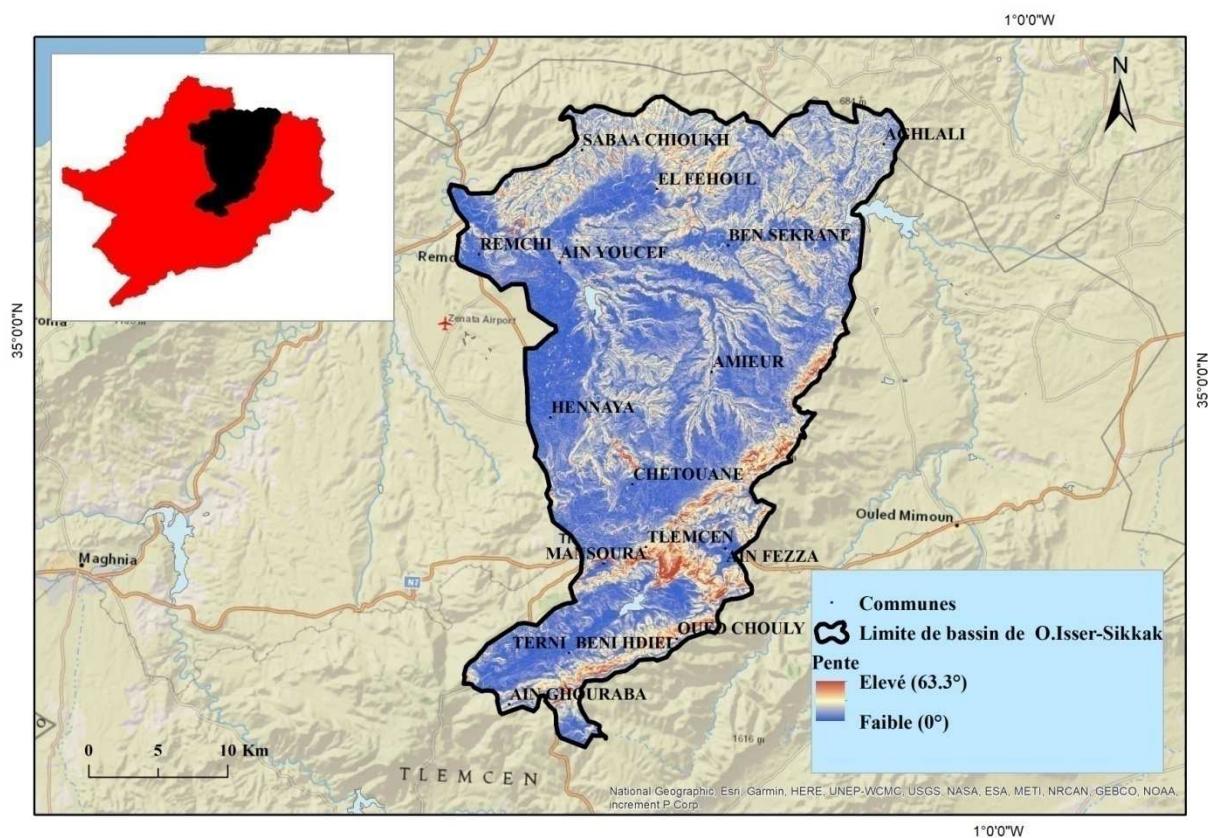


Figure I.8 Carte des pentes du bassin versant de Oued Isser-Sikkak

- **La dénivellation**

La dénivellation est déterminée à partir de l'analyse des données altimétriques. Elle correspond à la différence d'altitude entre la côte représentant 5 % de la surface du bassin versant et celle représentant 95 % de cette même surface.

- **La dénivellation spécifique (Ds)**

La dénivellation spécifique (Ds) peut être obtenue à partir de l'indice de pente global (I_g) et de la superficie (A) en utilisant la relation suivante :

$$D_s = I_g \sqrt{A} \quad (35)$$

II.2.3. Caractéristiques hydrographiques du bassin versant

Le réseau hydrographique correspond à l'ensemble des voies naturelles de drainage où circulent les eaux issues du ruissellement de surface ou des apports souterrains, que ce soit sous forme de sources ou de restitution progressive le long du lit du cours d'eau. Il se

distingue par trois principales caractéristiques : sa structure hiérarchique, qui classe les cours d'eau selon leur importance, son étendue, déterminée par le nombre et la longueur des tronçons, ainsi que son profil en long, qui reflète les variations altimétriques influençant la dynamique des écoulements.

II.2.3.1. Hiérarchisation du réseau

La classification de Strahler est une méthode largement utilisée pour quantifier la ramifications d'un réseau hydrographique en attribuant un ordre à chaque cours d'eau en fonction de son importance. Cette numérotation permet de décrire avec précision le développement du réseau de drainage d'un bassin versant, de l'amont vers l'aval. Elle repose sur les principes suivants :

- Un cours d'eau sans affluent est classé comme un cours d'ordre 1.
- Lorsque deux cours d'eau d'ordres différents confluent, le cours résultant conserve l'ordre du plus élevé des deux.
- Lorsqu'une confluence implique deux cours d'eau de même ordre, l'ordre du cours d'eau résultant est augmenté d'une unité.

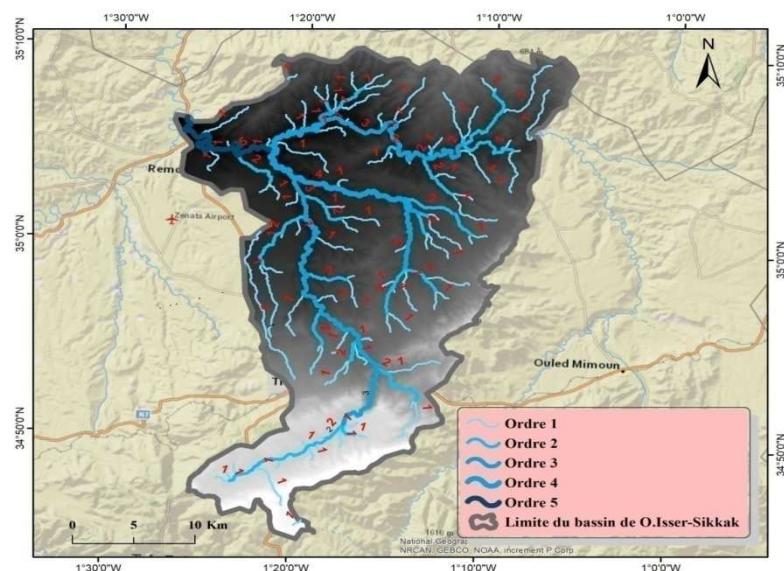


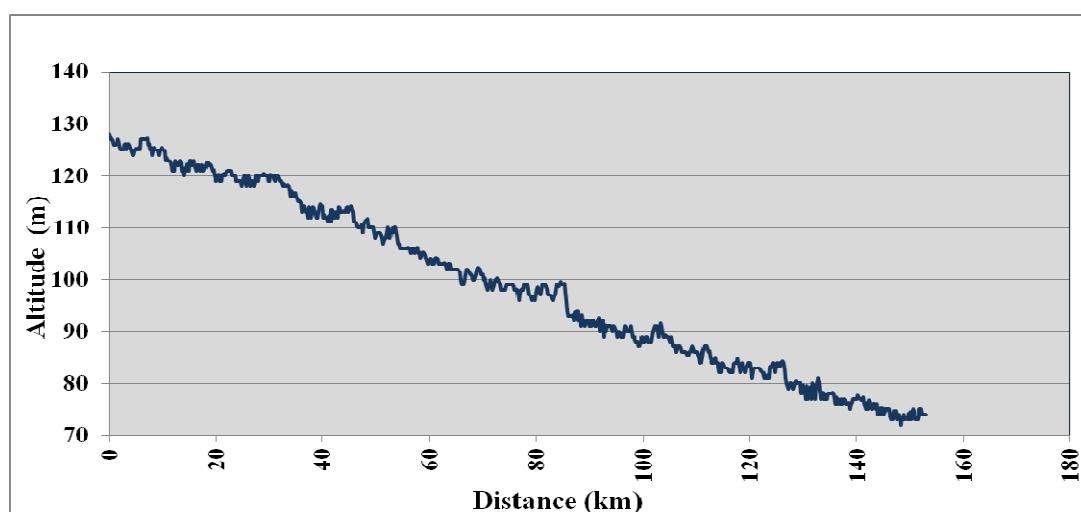
Figure I.9 Carte du réseau hydrographique du bassin De O.Isser-Sikkak

Tableau I.5 Hiérarchisation du réseau hydrographique du Bassin de O.Isser-Sikkak

Ordre	Nombre	Longueur (Km)
1	140	431.1
2	66	415.9
3	40	318.4
4	10	135.1
5	9	43.2
Total	265	1343.9

II.2.3.2 Profil en long

L'Oued Isser-Sikkak présente un profil en long assez régulier interrompu par quelques légères ruptures en pente que l'on peut expliquer autrement que par des captures ou par des seuils rocheux particulièrement résistant à l'érosion.

**Figure I.10** Profil en long du cours d'eau principal

- **Pente moyenne du cours d'eau principal I_c :**

Représente le rapport entre la dénivellation totale et la longueur du tronçon étudié du cours d'eau principal. La formule pour calculer cette pente est la suivante :

$$I_c = \Delta H / \Delta L \quad (36)$$

Avec : ΔH : dénivellation entre deux points suffisamment distants (m).

ΔL : distance entre ces deux points (km).

II.2.3.3. Densité de drainage Dd

Le calcul de la densité de drainage (D_d) est essentiel pour évaluer la morphologie du réseau hydrographique d'un bassin versant. Cette mesure permet de déterminer la longueur totale des cours d'eau, indépendamment de leur ordre, et ainsi renseigner sur le degré de drainage du bassin. La formule utilisée pour calculer la densité de drainage est la suivante :

$$D_d = \frac{\sum L_i}{A} \quad (37)$$

Où D_d est la densité de drainage (km/km^2)

L_i La longueur de cours d'eau i (km)

A La surface du bassin versant (km^2).

La densité de drainage est influencée par plusieurs facteurs, notamment la géologie, les caractéristiques morphométriques du bassin, ainsi que les conditions climatiques et anthropiques. Dans le cas du bassin versant étudié, les résultats montrent que le sous-bassin est bien drainé. Ce phénomène est principalement dû à la nature des formations géologiques du bassin et aux pentes relativement fortes des versants. De plus, le régime climatique de la région, caractérisé par des précipitations irrégulières et violentes, joue également un rôle important dans ce drainage.

Cependant, la densité de drainage est relativement faible dans les zones de plaines. Cela est dû à des pentes faibles, associées à une faible abondance des précipitations et à une évapotranspiration élevée. Par ailleurs, la perméabilité des formations lithologiques présentes dans ces zones contribue également à une moindre densité de drainage.

II.2.3.4. Fréquence des thalwegs d'ordre 1 (F1)

C'est le nombre total des thalwegs d'ordre 1 à la surface de bassin versant :

$$F_1 = \frac{N_1}{A} \quad (38)$$

- **Fréquence des cours d'eau (Fs)**

La fréquence des cours d'eau (Fs) correspond au nombre total de cours d'eau N_t rapporté à l'unité de surface du bassin versant (A en km^2). Cet indice permet d'évaluer la densité du réseau hydrographique et son degré de fragmentation.

$$F_s = \frac{N_t}{A} \quad (39)$$

II.2.3.5. Coefficient de torrentialité (Ct)

Est un paramètre qui évalue la capacité d'un bassin versant à produire des écoulements de type torrentiel. Il est influencé par plusieurs facteurs, notamment le nombre de talwags élémentaires de premier ordre et la densité de drainage du bassin versant. Ce coefficient est calculé selon la formule suivante :

$$C_t = D_d \cdot F_1 \quad (40)$$

Dans cette relation D_d est la densité de drainage (km/km^2) et F_1 est la densité des talwags élémentaires

II.2.3.6. Rapport de confluence (Rc)

Il s'agit du rapport entre le nombre de thalwags d'ordre x et celui des thalwags d'ordre supérieur, $x + 1$.

Il est défini par :

$$R_c = \frac{N(x)}{N(x+1)} \quad (41)$$

Il est préférable d'estimer la valeur moyenne des rapports de confluence par méthode graphique, sur un papier semi-log ou, on porte

- En ordonnées logarithmique, le nombre de thalwags
- En abscisse arithmétique l'ordre des thalwags.

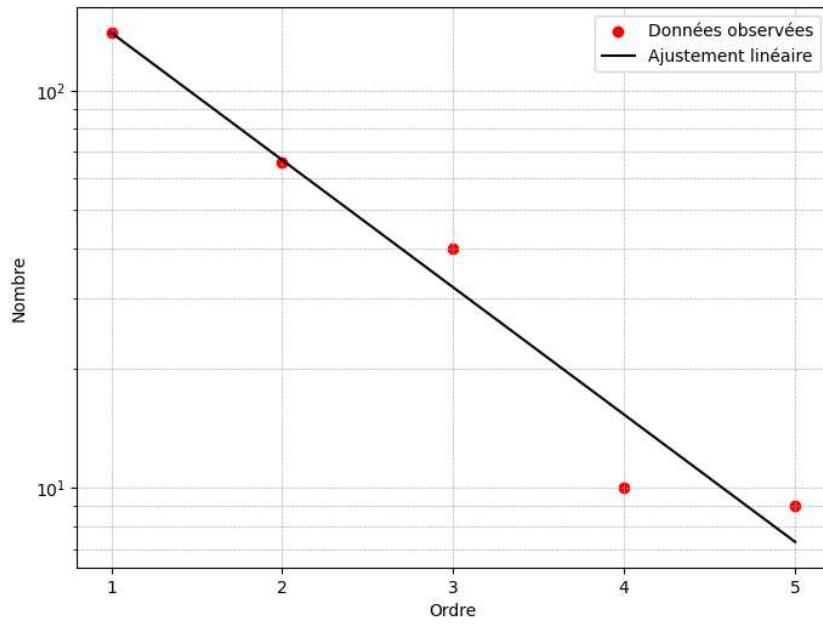


Figure I.11 Rapport de confluence

On obtient une droite d'équation : $\log N = a.x + b$ (42)

$$a = \frac{\log N(x) - \log N(x+1)}{x - (x+1)} \quad (43)$$

Tableau I.6 Rapport de confluence du bassin de Oued Isser-Sikkak

Ordre x	N(x)	N(x+1)	$R_C(x, x+1) = \frac{N(x)}{N(x+1)}$
1	140	66	2.12
2	66	40	1.65
3	40	10	4
4	10	9	1.11

Pour le bassin de l'oued Isser-Sikkak : $R_{C_{moy}} = 2.22$

Le réseau est bien organisé, le nombre de cours d'eau d'ordre successifs forme une progression géométrique d'ordre inverse.

II.2.3.7. Rapport des longueurs (R_L)

Il s'agit du rapport entre la longueur moyenne des thalwegs d'ordre (x+1) et celle des thalwegs d'ordre x.

$$R_L = \frac{l(x+1)}{l(x)} \quad (44)$$

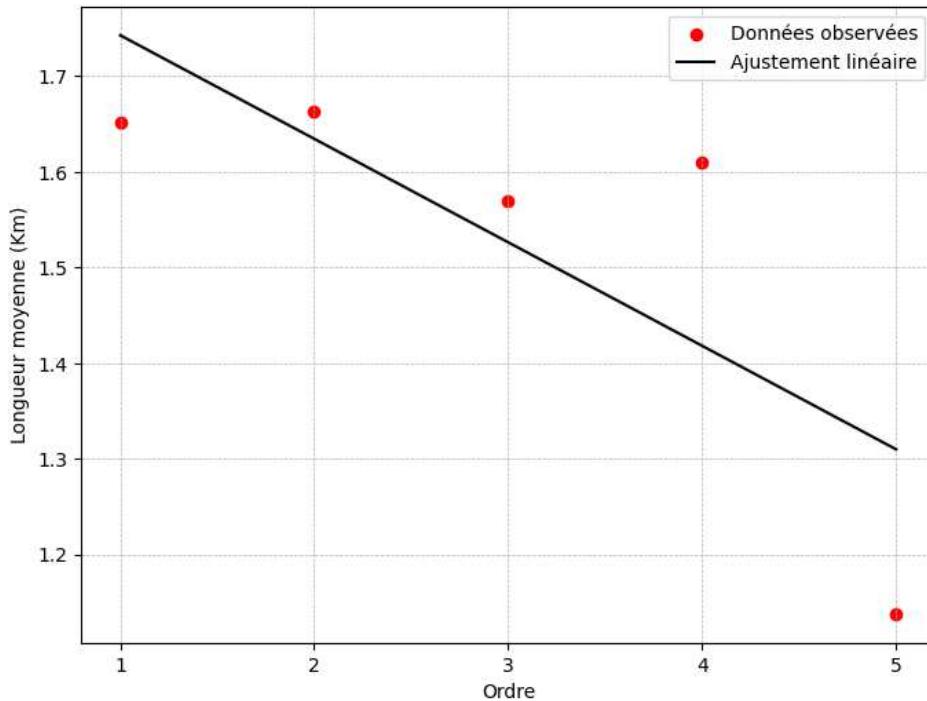


Figure I.12 Rapport de la longueur

Tableau I.7 Rapport de la longueur du bassin de Oued Isser-Sikkak

Ordre x	l(x)	l(x+1)	R _C (x,x+1) = $\frac{l(x)}{l(x+1)}$
1	1.65	1.66	1.01
2	1.66	1.56	0.94
3	1.56	1.61	1.03
4	1.61	1.14	0.71

Graphiquement, nous obtenons une valeur moyenne de **RL = 0.92**

La longueur moyenne de thalwegs d'ordres successifs croissants forme une série géométrique inverse.

II.2.3.8. Temps de concentration des eaux (T_c) :

Le temps de concentration représente la durée nécessaire pour qu'une particule d'eau provenant de la partie la plus éloignée d'un bassin versant atteigne l'exutoire. Pour le calcul de

ce temps, on utilise la formule de Giandotti, qui permet d'estimer ce délai en fonction des caractéristiques géographiques et hydrologiques du bassin.

$$T_c = 4(A + 1.5L)^{1/2}/0.8(H_{moy} - H_{min})^{1/2} \quad (45)$$

Où,

T_c : temps de concentration (heures)

A : superficie du bassin (km^2)

L : longueur du thalweg principal (km)

H_{moy} : Altitude moyenne (m)

H_{max} : Altitude minimale (m)

Les valeurs élevées du coefficient de torrentialité issues d'un secteur montagneux et pluvieux.

Par contre, les basses valeurs sont liées soit à la faiblesse des précipitations, ou encore à la forte perméabilité des formations lithologiques.

II.2.3.9. Vitesse de ruissellement

La vitesse de propagation moyenne dans le bassin versant est :

$$V_r = \frac{L}{T_c} \quad (46)$$

Avec : L : Longueur du cours d'eau principal (Km)

T_c : Temps de concentration (h).

Interprétation et récapitulation des résultats

Le bassin versant d'oued Isser-Sikkak présente une morphologie contrastée influençant fortement sa dynamique hydrologique. Avec une superficie de 825.3 km^2 et un indice de compacité de 1.73, il se caractérise par une forme relativement allongée, impactant la concentration des écoulements. Son relief est marqué par une altitude maximale de 1580 m et une minimale de 70 m, générant une forte amplitude topographique (1510 m) qui favorise des écoulements différenciés et potentiellement une érosion accentuée. L'analyse de l'hydrographie révèle une densité de drainage de 1.62 km/km^2 , indiquant un réseau hydrographique bien structuré, bien que modérément dense. Le coefficient de torrentialité (0.84) et la vitesse de ruissellement (8.14 km/h) suggèrent un écoulement relativement dynamique, influencé par des pentes marquées (indice de pente moyenne de 19.56 %). Le

temps de concentration de 5 h 31 min témoigne d'une capacité d'absorption des eaux relativement importante, limitant les risques de crues rapides. Toutefois, la pente du thalweg principal (-0.4 %) ainsi que l'indice de pente de M. Roche (4.05) indiquent des conditions de ruissellement hétérogènes pouvant affecter la recharge des nappes. L'ensemble de ces paramètres souligne l'importance d'une gestion adaptée des ressources en eau, notamment pour la prévention de l'érosion et l'optimisation de l'infiltration.

Tableau I.8 Tableau récapitulatif des paramètres physiques du BV d'oued Isser-Sikkak.

Désignation		Symbol	Unités	Valeur
Superficie		S	km ²	825.3
Périmètre		P	Km	175.8
longueur du thalweg principal		L	Km	43.24
Pente du thalweg principal		I	%	-0.4
Indice de compacité		K _G	-	1,73
Rectangle équivalent	Longueur	L _r	Km	78.19
	largeur	I _r	Km	10.7
Altitudes	Maximale	H _{max}	m	1580
	Moyenne	H _{moy}	m	1046.2
	médiane	H _{med}	m	462
	minimale	H _{min}	m	70
Indice de pente global		I _g	%	0.1382
Indice de pente moyenne		I _m	%	19.56
Indice de pente de M Roche		I _p	-	4.05
Densité de drainage		D _d	Km/km ²	1.62
Coefficient de torrentialité		C _t	-	0.84
Temps de concentration		T _c	H	5h 31min
Vitesse de ruissellement		V _r	Km/H	8.14
La dénivélée spécifique		D _s	m	3.82
La fréquence des thalwegs d'ordre 1		F ₁	Km ⁻²	0.52
Rapport de confluence		R _C	-	2.22
Rapport de longueur		R _L	-	0.92

Conclusion

La présentation détaillée du bassin de oued Isser-Sikkak constitue une étape essentielle dans cette démarche scientifique, en particulier lorsqu'il s'agit d'analyser des phénomènes liés à l'environnement ou aux ressources naturelles. À travers ce chapitre, nous avons mis en évidence les principales caractéristiques géographiques de la région étudiée. Ces éléments permettent de mieux comprendre le fonctionnement du milieu naturel et les facteurs influençant la dynamique des ressources en eau.

La connaissance du contexte physique et humain de la zone d'étude est fondamentale pour la suite du travail, notamment dans l'identification des critères pertinents pour la délimitation des zones à fort potentiel en eaux souterraines. Elle constitue également un socle de référence pour l'analyse multicritère qui sera menée ultérieurement à l'aide d'outils de télédétection et de systèmes d'information géographique (SIG).

Chapitre II**Contexte géologique et hydrogéologique****Introduction**

La compréhension de la géologie d'un bassin versant est d'une importance majeure pour évaluer l'impact des caractéristiques physiographiques sur le comportement hydrologique de la région. La description géologie détaillée a un rôle significatif non seulement dans la dynamique de l'écoulement des eaux souterraines, mais également dans le processus de ruissellement de surface. Dans ce dernier cas, deux aspects géologiques majeurs sont à prendre en considération : l'aspect lithologique (nature de la roche) et l'aspect structural.

Le bassin de la Tafna a fait l'objet de nombreuses études géologique et hydrogéologiques approfondies par des chercheurs tels qu' **Auclair et Biehler en 1967, Hayane en 1983, Benest en 1985 et Collignon en 1986**. À partir de ces recherches, nous sommes en mesure de retracer les principaux éléments de l'histoire géologique de notre zone d'étude.

La région de la Tafna se caractérise par une morphologie contrastée, dominée par des formations géologiques d'âge varié et structurées selon des directions tectoniques héritées des phases alpines. Elle est encadrée par des reliefs accidentés composés essentiellement de terrains jurassiques et crétacés, fortement plissés et faillés. À l'ouest, les formations du massif des Traras présentent des séries calcaires intensément fracturées, témoignant d'une tectonique compressive (**Boukli Hacene, 2014**). Au sud, les chaînes des monts de Tlemcen se prolongent avec des terrains marno-calcaires du Crétacé inférieur, montrant des structures en plis serrés (**Beun, 1977 ; Wildi et Wernli, 1977**). La vallée de la Tafna elle-même repose sur un substratum plus récent, composé de dépôts quaternaires et de formations alluviales qui remplissent les dépressions (**Remini et al., 2012**). À l'est, le relief s'abaisse progressivement vers les plaines pré-sahariennes, marqué par des collines de marnes et de grès tertiaires, soulignant la transition vers les hauts plateaux (**Hani, 2010**).

II.1 Contexte géologique

II.1.1. Historiques des travaux

L'Oranie a été l'objet de diverses études géologiques, couvrant des aspects stratigraphiques, paléontologiques et pétrographiques.

- **Pouyanne (1877)** signale la présence de basalte dans la moyenne Tafna, observation confirmée ultérieurement par les travaux de Curie et Flamand (1890–1899). Ces derniers ont également apporté des précisions pétrographiques sur la région de Tifaraouine ainsi que sur les îles Habibas.
- **Gentil (1903)**, dans le cadre de ses travaux sur le bassin de la Tafna, a publié une étude approfondie des massifs volcaniques de la moyenne et basse Tafna, incluant les régions de Tifaraouine, des îles Habibas et d'Aïn Témouchent. Cette contribution a été enrichie par la réalisation d'une dizaine de cartes géologiques détaillées de la province d'Oran, établies aux échelles 1/50 000 et 1/20 000.
- Les travaux de **Thomas et Meyer (1984)** ont porté sur l'analyse géodynamique du bassin intramontagnard du bas Chélif ainsi que sur l'extrémité orientale de la Moyenne Tafna, apportant des éclairages sur les mécanismes tectoniques et les dynamiques de ces régions.
- **Benest (1985)** a mené des études approfondies sur la tectonique et la microtectonique des monts de Tlemcen, contribuant ainsi à la compréhension des déformations géologiques à l'échelle locale.
- **Megartsi (1985)** a précisé les données volcanologiques et pétrologiques relatives au volcanisme de l'Oranie Nord-Occidentale. Il a notamment étudié le volcanisme calcoalcalin miocène dans la zone de Tifaraouine-Bouzedjar, ainsi que le volcanisme alcalin mioplio-quaternaire de la basse Tafna, des Souhaita et d'Aïn Témouchent.
- **Lemou et Koudil (1993)** ont démontré que les laves miocènes des secteurs d'Aïn Roumana et de Hadjrat El Kahla (Moyenne Tafna) appartiennent à la série calco-alcaline avec une tendance alcaline.
- **Abad (1993)**, à travers son étude des laves quaternaires de la région de Ghazaouet, a élaboré une carte géologique à l'échelle 1/25 000 et a confirmé le caractère alcalin des laves présentes dans cette région.

- Les travaux de **M. Guendouz (1994)** sont centrés sur l'étude de l'évolution géomorphologique et géodynamique des monts des Traras.
- **Louni (2002)** a mis en évidence le passage du volcanisme calco-alcalin au volcanisme alcalin à travers des analyses géochimiques. Ces travaux sont complétés par les études menées par plusieurs sociétés industrielles sur les gisements d'argile bentonitique présents dans les milieux volcanogènes de la région.
- **En 1971, puis en 1978, l'ORGM et la SONAREM** ont réalisé une évaluation économique des gisements de bentonite de Hammam Bougrara.
- **En 1979, la SIDAM** (Société Industrielle Canadienne) a réévalué les réserves d'argiles bentonitiques de la région de Maghnia et a publié des rapports détaillant leurs qualités.
- **En 1992, l'ORGM**, division de Sidi-Bel-Abbès, a rédigé un rapport sur les travaux de révision des argiles bentonitiques de Hammam Bougrara, spécifiquement pour le site de Dar Embarek.
- **En 1994, la SIDAM** a élaboré des cartes de distribution des paramètres chimiques et physiques des bentonites du secteur de Maghnia.
- **En 2000, Khadidja GRAINE** a identifié les divers facteurs responsables de la bentonitisation dans les milieux volcanogènes de la région de Hammam Bougrara.
- **En 2002, le groupe ENOF de BENTAL** publie le projet de développement des gisements d'argiles bentonitiques de Maghnia et Mostaganem.

II.1.2. Configuration Lithostratigraphique de la région d'étude

La succession stratigraphique de la région étudier inclut plusieurs ensembles géologiques allant de primaire au plio-quaternaire, comprend notamment :

- **Plio-Quaternaire**

Cette formation est constituée principalement d'une séquence de dépôts intermittents formés par des éléments variés. Le Plio-Quaternaire est constitué particulièrement par des marnes, épaisses dominant dans la plaine de Maghnia, et des limons, des sables et des graviers plus récents qui s'étendent de l'oued MeHaguène jusqu'à la partie nord-est de la frontière entre l'Algérie et le Maroc.

- **Tertiaire**

La période du Tertiaire est représentée dans cette région par les formations suivantes :

Miocène inférieur (Burdigalien) : Cette couche est constituée par deux niveaux distincts. Le premier niveau, se manifestent à la base avec des poudingues très résistants accompagnés de blocs de calcaires dolomitiques ayant un ciment de nature calcaire et gréseuse. Tandis que, le deuxième niveau est composée d'argiles marneuses atteignant une épaisseur de 100 m. Ces ensembles sont localisés entre la vallée de l'oued Zitoun et le Djebel Fillaoucène, situés au nord du bassin étudié.

Miocène moyen (Serravallien) : Ce dernier repose principalement en discordance sur le Miocène inférieur. Il se compose d'une série d'argiles marneuses, atteignant jusqu'à 300 m d'épaisseur. Ces formations se trouvent particulièrement dans les parties centrales du bassin.

Miocène supérieur (Tortonien) : Cette couche est constituée de dépôts de grès jaunes peu consolidés, ayant une épaisseur variant de 20 à 30 m. Ces dépôts recouvrent généralement les marnes du Serravallien, bien que parfois ils puissent surmonter directement sur les formations jurassiques. Cette particularité est observée au niveau du sous-bassin de Mouileh.

• Crétacé

Le crétacé, la formation la moins rependu dans la région, il est caractérisé par la prédominance des argiles de Lamoricière et des grès de Berthelot qui sont matérialisés dans la région de Sebdou ,

• Le secondaire

La période du Crétacé débute avec les formations appelées les "argiles de Saida", qui sont attribuées au Callovo-Oxfordien. Ces couches peuvent avoir une épaisseur de plus de 300 mètres. Les argiles de Saida sont surmontées par les "grès de Boumediene", qui sont d'âge Oxfordien inférieur/Kimméridgien supérieur. Ces grès présentent un faciès de grès avec un ciment calcaire, entrecoupé de fines couches argileuses. Ils peuvent atteindre une épaisseur de 500 mètres.

Les formations qui suivent sont appelées les "calcaires de Zarifet", datant du Kimméridgien. Leur épaisseur est d'environ 25 mètres. En continuant vers le haut de la séquence, on trouve les "dolomies de Tlemcen", qui sont abondantes dans le bassin de la Tafna. Ces formations dolomitiques fortement karstifiées peuvent atteindre jusqu'à 300 mètres d'épaisseur.

Au-dessus des dolomies de Tlemcen, une autre série de formations est présente. Tout d'abord, il y a les niveaux marno-calcaires appelés les "formations de Raourai", suivis des "calcaires du lato". Ensuite, on rencontre les "dolomies de Terni", d'âge Tithonique inférieur. Finalement, la séquence est couronnée par les "marno-calcaires d'Hariga", attribués au Tithonique supérieur.

- **Primaire**

La période du Primaire est caractérisée par la présence de formations schisto-quartziques datant du Silurien au Dévonien. Ces couches constituent les noyaux des plissements et se trouvent en surface dans la région des monts de Ghar-Roubane, au sud du village de Khemis.

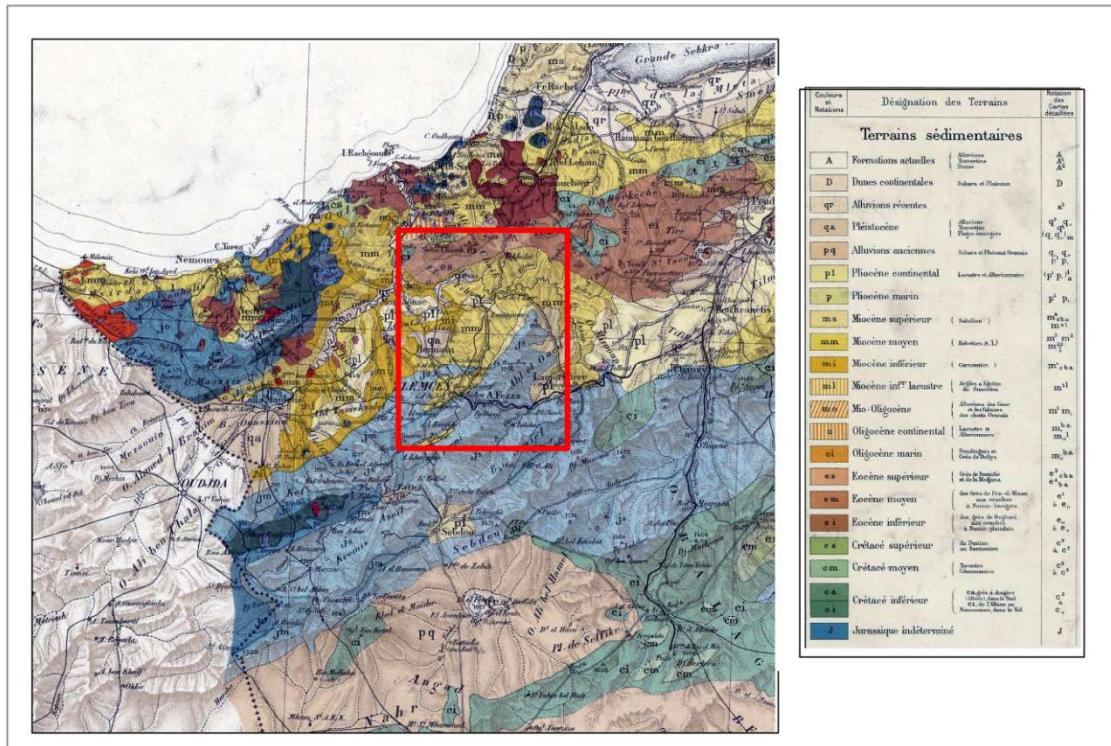


Figure II.1. Cadre géologique du l'Oranie (Extrait de la carte géologique de l'Algérie au 1/500.000, in Boucif, 2006).

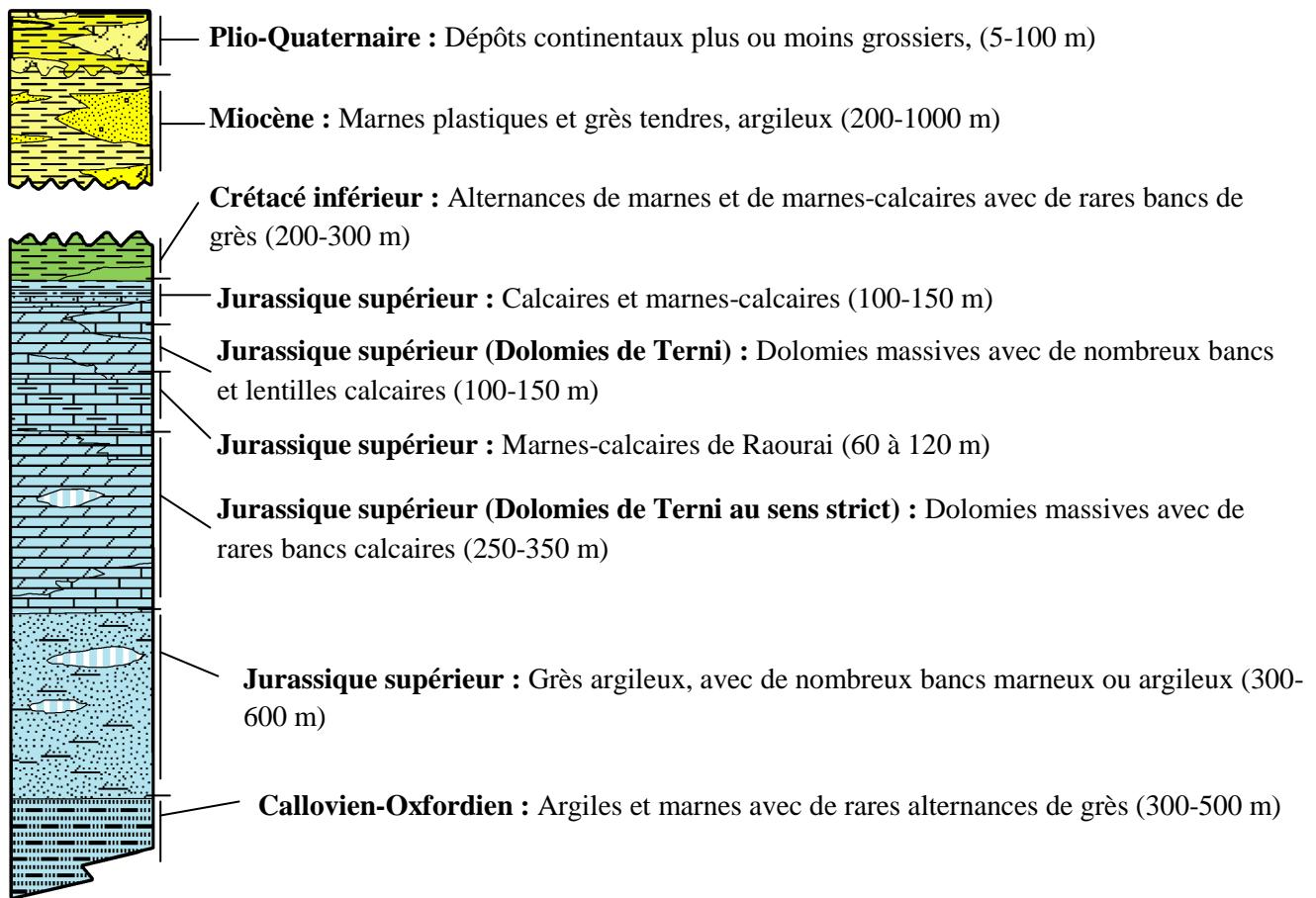


Figure II.2 Log stratigraphique des différentes formations géologiques dans le bassin de la Tafna Bensert (1986)

II. 2. Contexte structural

II.2.1. Contexte géodynamique régional

La région ibéro-maghrébine s'inscrit dans le vaste ensemble de l'orogène alpin périméditerranéen, né de la convergence entre les plaques africaine et eurasienne. Cet orogène s'étend depuis les Cordillères bétiques en Espagne, traverse le Rif au Maroc, le Tell algérien, la Tunisie, et se prolonge jusqu'aux Apennins en Italie, formant l'arc calabro-sicilien (**Durand-Delga, 1980**).

Dans ce cadre, le nord de l'Algérie représente la partie méridionale de cette chaîne alpine, où l'on distingue traditionnellement deux grands domaines structuraux :

- **Les zones internes**, formées de massifs paléozoïques associés à des éléments de la chaîne calcaire sur leur bordure méridionale.
- **Les zones externes**, constituées de nappes de charriage reposant sur des unités autochtones ou para-autochtones. Ces nappes ont migré vers le sud dans des bassins miocènes.

Entre ces deux domaines s'intercalent des unités de flysch, parfois métamorphisées, recouvrant localement les autres ensembles

II.2.2. Subdivisions structurales de l'Oranie

L'Oranie, au nord-ouest de l'Algérie, appartient au domaine externe de la chaîne alpine. Selon Guardia (1975), cette région se divise en deux grandes zones géologiquement distinctes :

- **La zone tellienne**, constituée de terrains néogènes sublittoraux s'étendant parallèlement à la côte méditerranéenne, depuis la frontière algéro-marocaine jusqu'au méridien d'Alger.
- **La zone atlasique**, représentée par des reliefs plus élevés, comme la chaîne de Fillaoussène et le massif des Traras, dans le prolongement du Moyen Atlas marocain.

II.2.3. Structure géologique du bassin de la Tafna

Le bassin de la Tafna, situé dans l'ouest de l'Oranie, présente une configuration structurale complexe. Il est caractérisé par une alternance de dépressions relativement peu profondes encadrées par des chaînes plissées. L'orientation générale des structures est WSW-ENE (ouest-sud-ouest à est-nord-est), selon **Perrodon (1957)**.

Ce bassin est subdivisé en deux domaines paléogéographiques majeurs, Le domaine alpin ou tello-rifain, localisé dans les chaînes des Traras et de Sebâa Chioukh, d'orientation grossièrement est-ouest, où la phase finale de déformation tectonique s'étend sur la majeure partie du Miocène et Le domaine atlasique ou tlemcénien, qui comprend les monts de Tlemcen et les Traras occidentaux, correspondant à des reliefs plus tabulaires et moins plissés. Selon **Guardia (1975)**, la structuration du bassin est fortement influencée par deux grands systèmes de failles, la faille Tafna-Magoura, orientée SSW-NNE, qui traverse la région et les failles décrochantes des monts de Tlemcen, également orientées SSW-NNE, traduisant une activité tectonique significative.

Enfin, **Perrodon (1957)** distingue deux grandes unités géologiques dans le bassin, Une zone plissée, occupant principalement la chaîne des Sebâa Chioukh et la rive gauche de la Tafna et une zone tabulaire, localisée au sud, dans les monts de Tlemcen et leur prolongement occidental.

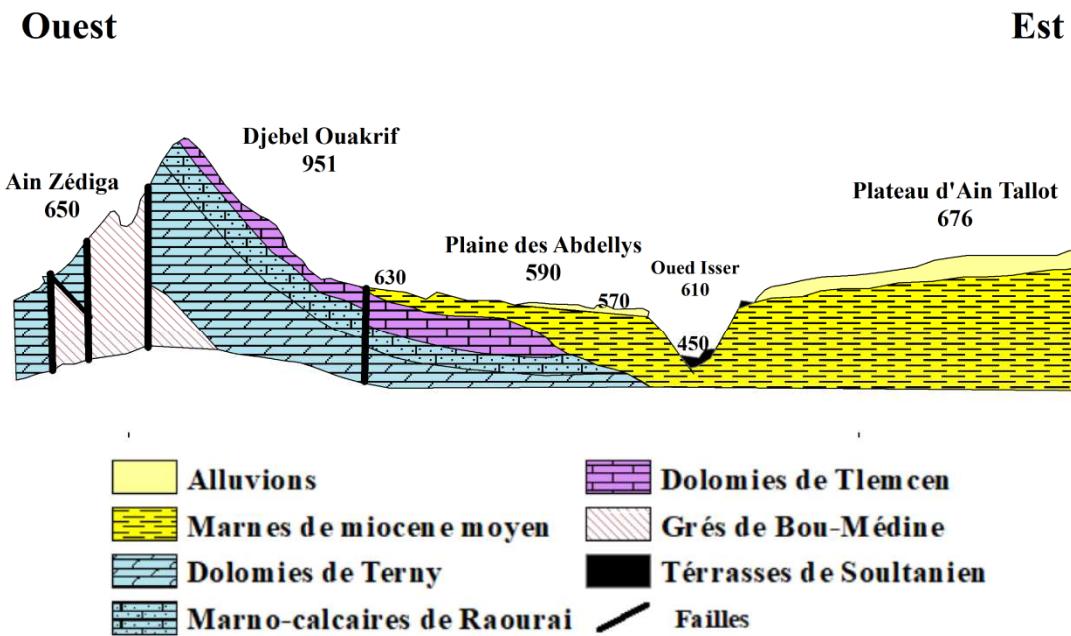


Figure II .3. coupe schématique au niveau d’Oued Isser (**Bouanani A , 2004**) modifié

II.3. Aspect hydrogéologique

De points de vue hydrogéologiques, le bassin de la Tafna est très connu. En effet, il a fait l’objet de plusieurs études qui ont terminé par tracé la carte hydrogéologique de la région. D’après les travaux antérieurs menés principalement par **Hayane 1983** et **Collignon, 1986**, les principales formations lithologiques qui présentent un grand intérêt hydrogéologique occupant la moyenne et basse Tafna, seront décrites ici, dans l’intention de déterminer les potentialités des aquifères.

II.3.1. Caractéristiques hydrogéologiques des formations

Afin de mieux comprendre le comportement hydrogéologique de la région, nous avons identifié et caractérisé les différentes formations à potentiel réservoir présentes dans la zone d’étude, en nous basant sur leur nature lithologique, leur structure, ainsi que leur perméabilité.

Cette démarche vise à mieux évaluer leur capacité de stockage et de circulation des eaux souterraines,

A. Aquifères très karstiques

A.1. Dolomies de Tlemcen

La majeure partie des massifs de la région est constituée par les calcaires de Zerifet, formations d'âge Kimméridgien présentant une karstification et une diaclase très développées, ce qui leur confère un intérêt hydrogéologique considérable (Hayane, 1983). Ces calcaires servent de réservoirs aquifères majeurs, comme en témoigne l'émergence de nombreuses sources, notamment la source de Aïn Fouara supérieure. Cette dernière, exploitée principalement pour l'alimentation en eau potable de la ville de Tlemcen, présente un débit moyen estimé à 60 l/s ainsi, la source de Ain Bendou avec un débit estimé de 15 l/s.

L'alimentation de cette source résulterait d'un contact lithologique « anormal » entre les grès de Boumèdiène et les dolomies de Tlemcen, probablement lié à un jeu tectonique ancien ou à une faille cachée. Ce contact joue le rôle d'un drain structurant favorisant la concentration des écoulements souterrains vers les exutoires naturels (Figure II.4).

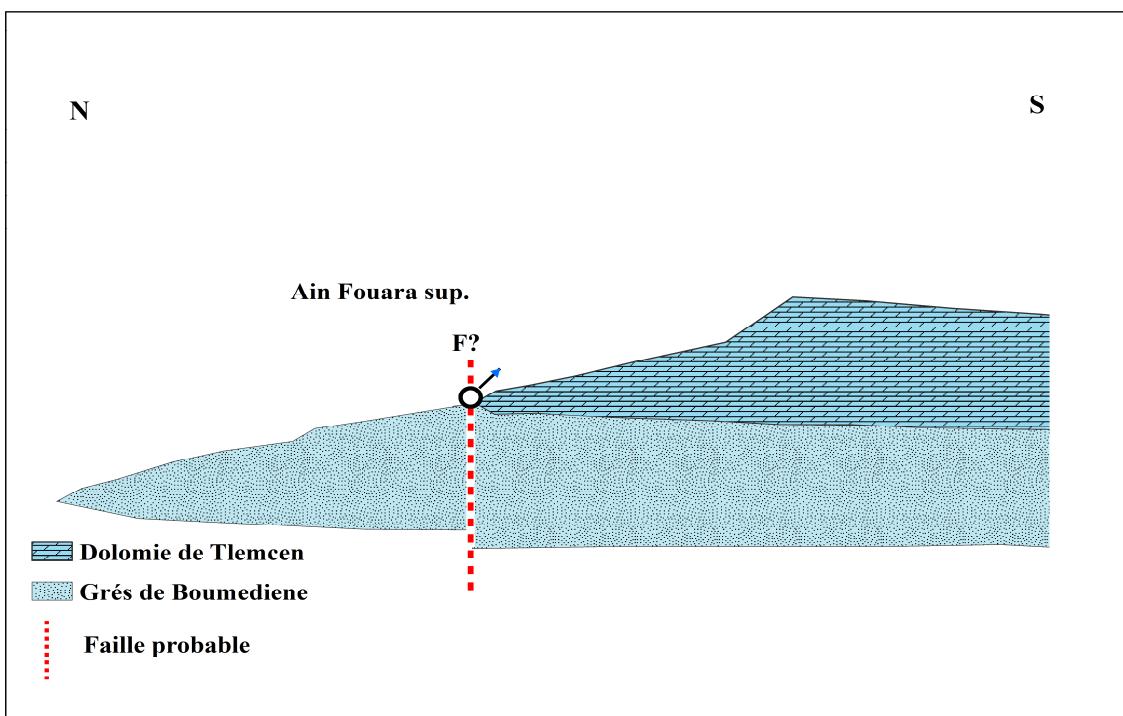


Figure II.4. Coupe schématique d'Ain Fouara Supérieure (Hayane, 1983)

A.2. Dolomies de Terni

Selon **Collignon (1986)**, l'importance des couches calcaires, souvent surmontées par des niveaux dolomitiques, joue un rôle déterminant dans le comportement hydrogéologique de la région. Ces formations contrôlent en grande partie l'efficacité du drainage global du système aquifère. Les niveaux calcaires, notamment ceux fortement karstifiés, présentent d'excellentes propriétés de transmissivité. Cette karstification, en développant un réseau dense de fractures et de conduits de grande dimension, favorise une circulation rapide et des débits soutenus des eaux souterraines (**Bensaoula, 2008**). Ces formations constituent ainsi les principaux réservoirs aquifères de la région. En revanche, les dolomies, bien qu'également affectées par une fracturation significative, présentent un réseau de drainage plus diffus, généralement moins développé et moins efficace.

B. Aquifères fissurés et poreux

B.1 . Grés du Serravalien

La Direction des Ressources en Eau (DRE) de Tlemcen a entrepris une série de forages dans la région de Remchi, ayant permis de traverser une importante succession de formations gréseuses et marneuses attribuées au Miocène moyen. Le toit des premiers niveaux aquifères gréseux y a été intercepté à des profondeurs variant entre 95 et 270 mètres, en fonction des conditions topographiques locales et de l'épaisseur des formations sus-jacentes. Les grès rencontrés présentent une fracturation intense, ce qui contribue significativement à leur capacité de stockage et à leur transmissivité. Néanmoins, ces formations sont faiblement karstifiées, ce qui indique que le fonctionnement hydrodynamique de ces aquifères est principalement contrôlé par une porosité secondaire, dominée par les micro-fissures et les réseaux de fractures, plutôt que par la présence de conduits karstiques bien développés.

B.2. Grés du Tortonien (Miocene Supérieur)

Les grès du Tortonien, correspondant au Miocène supérieur, présentent une perméabilité combinée de type fissural et interstitiel. Cette double porosité permet une circulation limitée mais réelle des eaux souterraines à travers ces formations. Bien que leur productivité reste modeste, quelques sources émergent de ces niveaux gréseux. Leurs débits sont généralement faibles, allant de 0,5 litre par seconde — comme observé à la source de Aïn Bou Azzoune — jusqu'à un maximum de 4 litres par seconde à la source de Aïn Deheb. Ces écoulements traduisent une alimentation souterraine relativement réduite (**Hayane ,1983**)

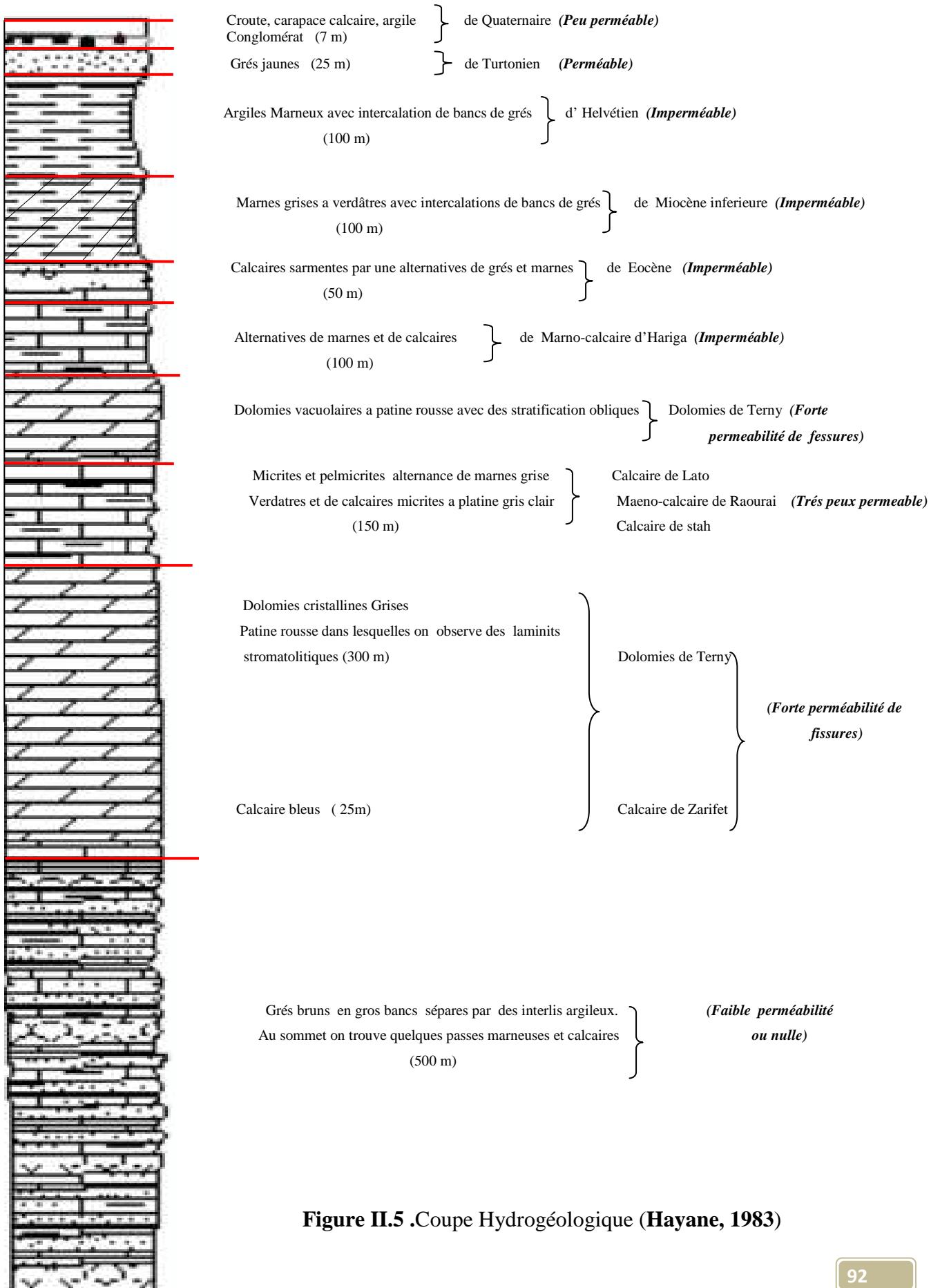
C. Aquifères moyennement poreux et peu fissurés**C.1. Grés de Boumediene**

Les formations constituées de marnes interstratifiées de bancs de grès n'assurent qu'un faible drainage direct des eaux souterraines. Toutefois, leur structure interne, marquée par l'insertion de niveaux gréseux suffisamment épais et fréquemment fracturés, leur confère une certaine importance du point de vue hydrogéologique. Les diaclases qui affectent ces grès favorisent une meilleure perméabilité, permettant à l'eau de circuler plus aisément dans ces zones localisées. En parallèle, le contexte tectonique, caractérisé par la présence de failles, joue un rôle fondamental dans la mobilisation des eaux profondes, notamment celles issues d'impluviums développés dans les formations calcaires et dolomitiques avoisinantes. Dans ce système, les grès ne constituent pas une véritable source d'eau, mais interviennent comme des structures de transition, agissant à la manière d'un filtre naturel entre les réservoirs profonds et les exutoires de surface. Les sources qui émergent de ces niveaux gréseux présentent généralement des débits modestes, variant entre 0,1 et 2 litres par seconde. (Hayane, 1983)

D. Formation non aquifère**D.1. Marno-calcaires de Raourai et Marnes du Serravalien (Miocene moyen)**

Selon (Hayane, 1983), ces formations sont globalement caractérisées par une faible perméabilité. Bien que certains niveaux calcaires puissent localement présenter une perméabilité modérée, l'ensemble du complexe reste globalement imperméable, notamment dans le sens vertical. Les marnes du Serravalien, en particulier, constituent une série peu perméable, voire imperméable, jouant ainsi un rôle de barrière à la circulation verticale des eaux souterraines. Toutefois, la présence d'intercalations gréseuses au sein de ces marnes peut localement permettre une certaine accumulation d'eau, bien que souvent en quantités limitées.

Ces niveaux gréseux, lorsqu'ils sont suffisamment fracturés ou discontinus, peuvent constituer de petits réservoirs secondaires d'eaux souterraines, mais leur contribution au système aquifère régional demeure marginale.



Conclusion

L'analyse géologique et hydrogéologique du bassin de la Tafna met en évidence la richesse et la complexité structurale de cette région. Les formations géologiques variées, allant du Primaire au Plio-Quaternaire, témoignent d'une longue et dynamique histoire géologique, marquée par des épisodes tectoniques majeurs et un volcanisme intense. La diversité lithologique, combinée à une structuration marquée par des failles et des plis, influence fortement la circulation des eaux souterraines et les modalités de recharge de la nappe. De plus, la présence de formations perméables comme les calcaires fracturés ou les alluvions récentes joue un rôle clé dans la dynamique hydrogéologique du bassin. Ce contexte géologique et hydrogéologique constitue une base indispensable pour toute évaluation du potentiel en eau souterraine et oriente les futures investigations relatives à la gestion durable des ressources en eau dans la région.

Chapitre III**Contexte hydro-climatique****Introduction**

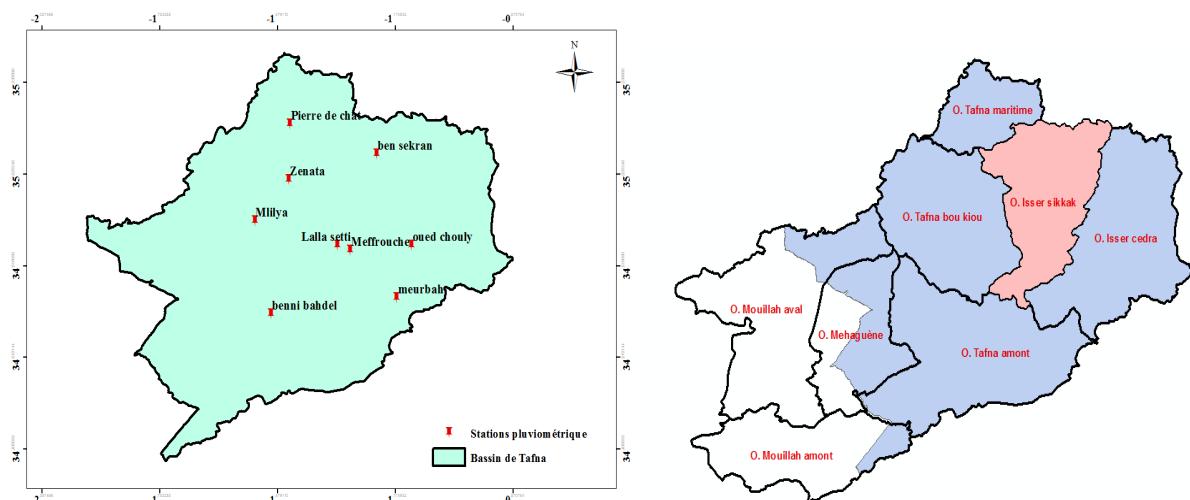
La compréhension des dynamiques climatiques et hydrologiques constitue une étape essentielle pour la gestion intégrée des ressources en eau, particulièrement en régions semi-arides comme le bassin versant de l’Oued Isser-Sikkak (Nord-Ouest algérien). Ce territoire, soumis à de fortes pressions anthropiques et environnementales, présente une variabilité interannuelle marquée des précipitations et des régimes hydrologiques irréguliers, typiques des milieux méditerranéens. Dans ce contexte, ce chapitre analyse les paramètres climatiques (précipitations, températures) et hydrologiques (débits, coefficients mensuels) à partir de séries consolidées et homogénéisées par des méthodes statistiques éprouvées. Il vise à identifier les tendances climatiques, détecter d’éventuelles ruptures, et évaluer leurs impacts sur les écoulements de surface, tout en caractérisant le cadre bioclimatique via les diagrammes de Gaußen et d’Emberger. Par une analyse croisée des données, ce travail pose les bases d’une compréhension fine des mécanismes de recharge, de ruissellement et de vulnérabilité hydrique – socle indispensable aux chapitres suivants dédiés à la modélisation des écoulements et à la délimitation des zones de recharge des aquifères.

III.1. Précipitations**III.1.1. Contrôle de la fiabilité des séries pluviométriques**

Plusieurs chercheurs se sont intéressés à l’étude de la pluviométrie dans la région étudiée. Parmi les plus notables, on peut citer **Seltzer (1913–1938)**, **Gaußen (1918–1947)**, **Medinger (1913–1953)**, ainsi que **Chaumont et Paquin (1913–1963)**. Plus récemment, **Bouanani (2004)** a également contribué à cette thématique. Une étude hydro-climatique rigoureuse repose sur une exploitation optimale des séries de données recueillies auprès des services administratifs compétents (ONM/ANRH) sur une période d’au moins 35 ans. Cependant, les séries pluviométriques des stations situées dans la région étudiée présentent des lacunes variables à l’échelle annuelle et mensuelle. Après analyse, nous avons retenu 9 stations sur les 15 initialement disponibles (**Figure III.1 et Tableau III.1**). Les stations retenues ont toutes un taux de lacunes inférieur à 10%.

Tableau III. 1. Stations pluviométriques retenues

Bassin versant	Station	Code	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Période
la Tafna (Sous bassin O.Isser-Sikkak)	Hennaya	160516	01°23'17"	34°55'20"	515	1973-2010
	Lalla setti	160705	01°19'29"	34°51'58"	1007	1973-2010
	Meffrouche	160701	01°17'31"	34°51'19"	1110	1973-2010
	Chouly	160601	01°07'60"	34°02'00"	747	1973-2010
	Pierre de chat	160802	01°26'46"	35°08'41"	60	1973-2010
	Beni bahdel	160403	01°29'48"	34°42'33"	660	1973-2010
	meurbah	160602	01°10'19"	34°44'46"	875	1973-2010
	ben sekran	160702	01°13'26"	35°04'28"	247	1973-2010
	zenata	160518	01°27'00"	35°01'00"	249	1973-2010

**Figure III.1** La répartition spatiale des stations pluviométrique

L'analyse statistique de séries temporelles exige l'homogénéité des données, sans laquelle leur qualité est compromise. Cette défaillance empêche de distinguer les variations climatiques réelles des artefacts induits par des biais systématiques. Un contrôle rigoureux de la qualité s'avère donc indispensable pour asseoir la fiabilité des résultats et interpréter avec précision les tendances hydroclimatiques de la région.

III.1.2. Comblement des lacunes d'observations

Les données manquantes constituent l'un des principaux problèmes rencontrés dans l'analyse des séries pluviométriques. Dans cette étude, leur traitement a été assuré par la

méthode de la régression linéaire, qui consiste à estimer les valeurs manquantes à partir des observations d'une ou plusieurs stations explicatives. Toutefois, si le taux de lacunes dépasse 10 %, la série a été écartée.

L'estimation repose sur l'établissement d'une relation entre la station lacunaire Y et une station de référence X sur une période suffisamment longue. Une fois cette relation validée, les précipitations manquantes P_Y sont estimées à l'aide de l'équation de la droite de régression

$$Y = AX + B \quad (47)$$

Si la station lacunaire Y est située à proximité de plusieurs stations X_i , une régression linéaire multiple peut être appliquée selon la formule :

$$Y = A_1 X_1 + A_2 X_2 + A_3 X_3 + \dots + A_i X_i \quad (48)$$

où les coefficients A_i sont déterminés par la méthode des moindres carrés.

Enfin, il est essentiel que les stations utilisées pour l'estimation présentent des similitudes climatiques et géographiques. La distance généralement admise entre la station lacunaire et la (ou les) station(s) de référence est inférieure à 80 km.

III.1.3.1. Correction préalable par méthode des doubles cumuls

Principe et application

La méthode du double cumul a été appliquée aux séries annuelles de précipitations des 6 stations retenues, avec la station de Lalla Setti sélectionnée comme référence pour sa complétude temporelle (98.7% sur 1973-2010) et sa position centrale dans le bassin d'étude (**Figure. III.2**). Les coefficients de correction (k) ont été déterminés par régression linéaire segmentée :

$$P_{corrigé} = k \times P_{observé} \quad (49)$$

Avec

$$k = \frac{\text{Pente}_{référence}}{\text{Pente}_{station}} \quad (50)$$

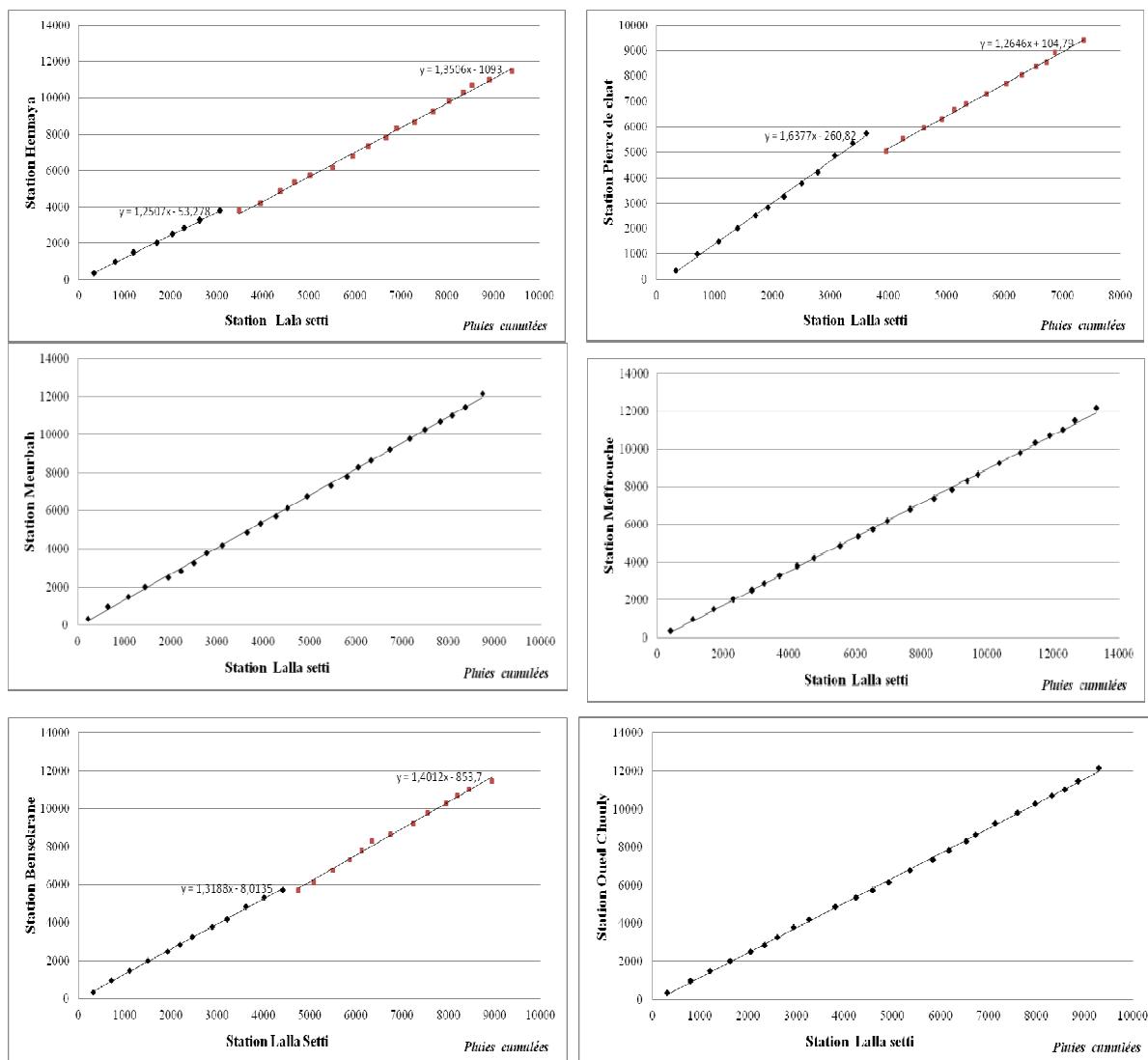


Figure III.2.a Corrélation avant la correction – la méthode de double cumul- (Lalla Setti –Stations)

L'analyse des graphiques de double cumul (**Figure.III.2.a**) a révélé des ruptures d'homogénéité significatives dans 3 stations sur 6, principalement concentrées sur les périodes 1989-1999. Ces discontinuités, matérialisées par des changements de pente, corrèlent avec des modifications documentées des instruments de mesure (**ANRH, 1990**).

Afin d'optimiser l'homogénéité entre la station de Lalla Setti (station de référence) et les trois autres stations, il est nécessaire de multiplier les valeurs annuelles des précipitations par le coefficient de correction k obtenu à partir des équations linéaires présentées dans les graphes de la **figure (III.2.a)**. Après correction des totaux annuels des précipitations par la méthode du double cumul, les résultats du test d'homogénéité sont illustrés dans la **figure (III.2.b)**.

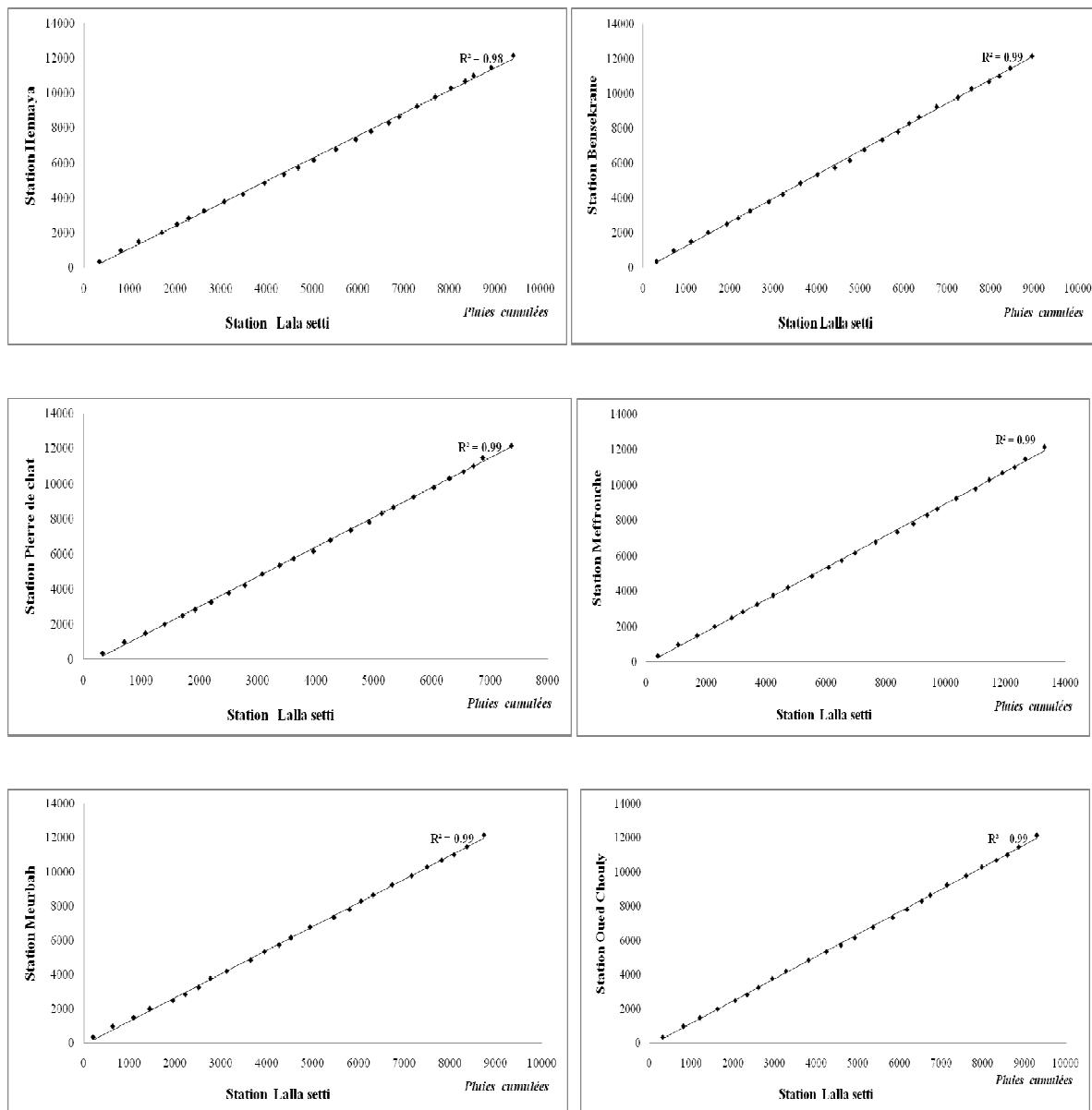


Figure III.2.b Test de double cumul entre la station de Lalla setti et les six stations (après correction)

III.1.3.2. Test de Pettitt

L'homogénéité des séries pluviométriques annuelles a été également évaluée à l'aide du test de **Pettitt (1979)**, une méthode non paramétrique adaptée à l'analyse des chroniques hydroclimatiques. Ce test permet de détecter un point de rupture potentiel, indiquant un changement significatif de la tendance centrale (médiane) des données, tout en excluant les discontinuités artificielles telles que les biais instrumentaux (**Bodian, 2014**).

L'analyse a été réalisée à l'aide du logiciel KhronoStat (**IRD, 1998**), qui implémente plusieurs tests statistiques robustes. Conformément à la définition **d'Ardoïn-Bardin (2004)**, une rupture est identifiée comme une modification significative ($p < 0.05$) de la distribution sous-jacente à un instant t inconnu. Le test de Pettitt, fondé sur les rangs de Mann-Whitney, permet de détecter une éventuelle rupture dans une série chronologique

Le test repose sur l'hypothèse nulle (**H₀**) d'absence de rupture. Il calcule la statistique U_t (mesurant le déséquilibre des rangs avant/après chaque t) et la probabilité p associée. Si **H₀** est maintenue (**p-valeurs** ≥ 0.05), la série est homogène. Si **H₀** est rejetée (**p-valeurs** < 0.05), la date de rupture correspond au t maximisant $|U_t|$.

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^n D_{ij} \quad (51)$$

$$\text{Où } D_{ij} = \text{sgn} (x_i - x_j)$$

Avec $\text{sgn}(d) = 1 \text{ si } d > 0$

$$0 \text{ si } d = 0$$

Et $-1 \text{ si } d < 0$ **où** ($d = x_i - x_j$).

La statistique de rupture U_t est définie comme

$$U_t = \max |U_{t,N}| \quad (52)$$

Les résultats obtenus mettent en évidence une année de rupture dominante, à savoir 1980, identifiée dans huit des neuf stations analysées (soit 89 % des cas). Cette cohérence spatiale suggère l'existence d'un signal hydrologique commun à l'échelle du bassin versant. Seule la station de Meurbah présente une rupture plus précoce en 1977, probablement liée à une sensibilité locale accrue aux changements climatiques ou à une singularité microclimatique. Ces résultats confirment les observations de **Ouis et Azzaz (2024)**, qui identifient également 1980 comme une année charnière dans l'évolution pluviométrique régionale.

Les valeurs de la statistique U_t varient de 91 à 157, tandis que les p-valeurs associées s'étendent de 0,05 (Pierre de Chat) à 0,534 (Beni Bahdel). Bien que certaines p-valeurs dépassent le seuil conventionnel de 0,05, la majorité des stations présentent des résultats indiquant une tendance significative à la rupture, en particulier lorsque les p-valeurs sont inférieures à 0,20.

Le déficit pluviométrique postérieur à la rupture varie entre 17 % (Ben Sekrane) et 26 % (Pierre de Chat). Cette baisse généralisée reflète une diminution notable des précipitations annuelles à partir de 1980, en cohérence avec le processus d'aridification progressive observé dans le nord-ouest algérien depuis le milieu des années 1970, comme l'ont montré plusieurs travaux, notamment celui de **Taibi (2016)**.

Tableau III.2 Les résultats de test de Pettitt

Bassin versant	Station	U_t	p-valeurs	Années de rupture la plus significative	Déficit pluviométrique (%)
la Tafna (Sous bassin O.Isser-Sikkak)	Hennaya	131	0.143	1980	24
	Lalla setti	137	0.116	1980	22
	Meffrouche	141	0.101	1980	25
	Chouly	127	0.173	1980	22
	Pierre de chat	157	0.05	1980	26
	Beni bahdel	91	0.534	1980	19
	meurbah	102	0.385	1977	23
	ben sekran	156	0.136	1980	17
	zenata	105	0.06	1980	19

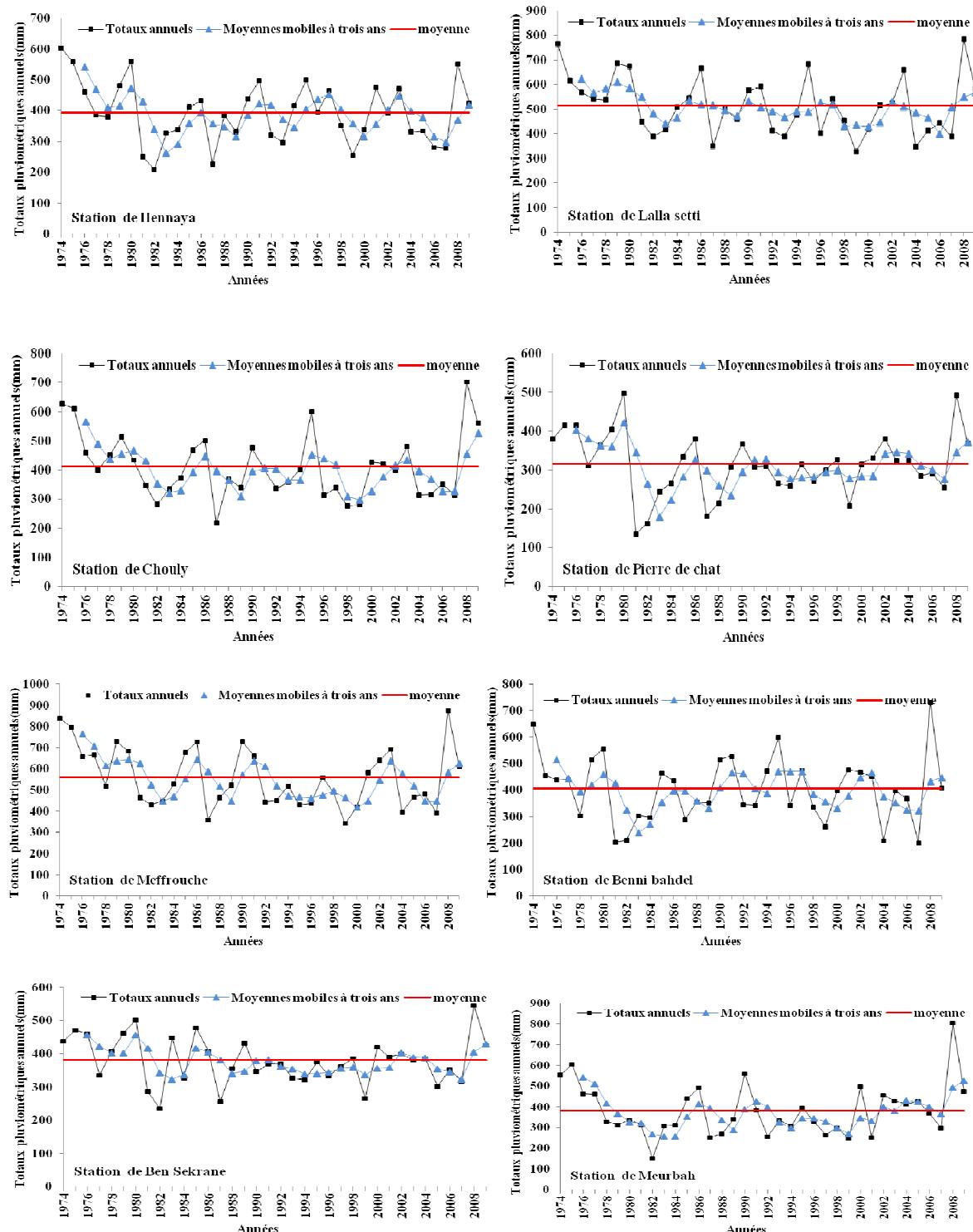
III.1.4. Variabilité spatio-temporelle des précipitations

III.1.4.1. Variabilité spatio-temporelle des précipitations moyennes annuelles

Les graphiques (**Figure III.3**) montrent que les quantités annuelles de précipitations présentent une tendance générale similaire entre les stations étudiées, reflétant une dynamique régionale relativement homogène. Toutefois, certaines stations, comme Pierre de Chat et Zenata, se distinguent par des écarts légers mais persistants, suggérant des variations locales du régime pluviométrique.

L'analyse des tendances pluviométriques, fondée sur la méthode de la moyenne mobile sur trois ans, met en évidence des fluctuations interannuelles dont l'intensité peut varier d'une station à l'autre. Malgré ces différences locales, une évolution pluviométrique globale similaire se dégage pour l'ensemble de la période étudiée, marquée par :

- une hausse progressive des précipitations jusqu'à la fin des années 1980,
- puis une baisse notable entre 1980 et 2009, interrompue par quelques années excédentaires, notamment en 1990 et 1995.



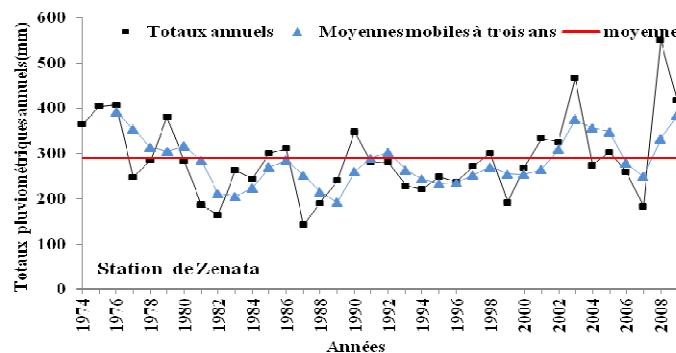


Figure III.3 Évolution des précipitations annuelles dans diverses stations (1974-2008)

III.1.4.2. Variabilité spatio-temporelle des précipitations moyennes mensuelles

Le **tableau III.3** présente les précipitations moyennes mensuelles enregistrées dans les sept stations pluviométriques étudiées sur une période de 37 ans. Il met en évidence les contrastes saisonniers caractéristiques du régime climatique local.

Tableau III.3 Les précipitations mensuelles

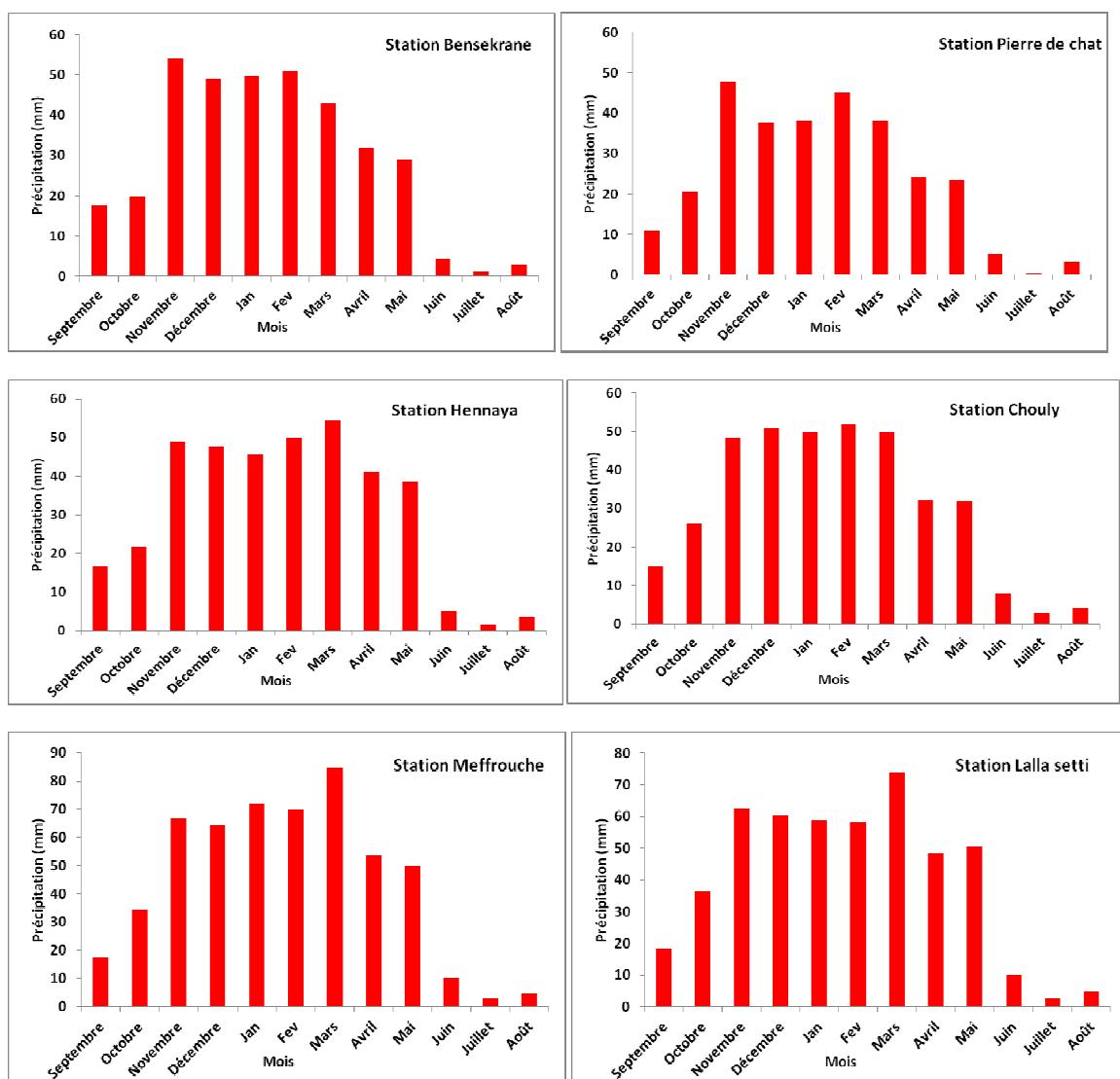
	Ben sekran	Pierre du chat	Mlilya	Lala setti	Meffrouche	Meurbah	Oued Chouly
Sep	17,684	11,028	16,636	18,512	17,256	15,32	15,068
Oct	19,844	20,644	21,584	36,34	34,264	28,62	26
Nov	54,152	47,848	49,052	62,496	67,04	45,852	48,588
Déc	49,132	37,772	47,752	60,496	64,22	46,516	50,832
Jan	49,864	38,284	45,648	58,888	71,8	43,604	49,82
Fev	50,856	45,324	50,008	58,332	70,028	47,664	51,812
Mar	42,9216	38,2196	54,34	73,788	84,632	43,8816	49,72
Avr	31,928	24,192	41,008	48,548	53,744	31,1552	32,2024
Mai	29,02	23,55	38,6632	50,62	49,932	26,752	32,008
Jui	4,224	4,964	5,18	10,008	10,2	7,5428	7,972
Juil	1,152	0,312	1,484	2,64	3,004	1,988	2,796
Août	3,08	3,3	3,66	4,704	4,836	9,892	4,108
P.ann	353.86	295.44	375.02	485.37	530.96	348.79	370.93

Les histogrammes de la **Figure III.4** illustrent la répartition mensuelle des précipitations pour les sept stations. Ils révèlent un régime pluviométrique typiquement méditerranéen, caractérisé par :

- Des hivers humides, avec des maxima pluviométriques observés entre novembre et février. Ce pic est particulièrement marqué dans les stations situées en altitude comme Meffrouche (84,632 mm) et Lalla Setti (73,788 mm).

- Des printemps modérément pluvieux, en particulier en mars et avril, poursuivant les apports hydriques significatifs de l'hiver.
- Des étés secs, avec des précipitations très faibles voire négligeables entre juin et août, ce qui est conforme aux conditions arides de la saison estivale dans cette région.
- Un automne de transition, notamment en septembre et octobre, où les précipitations amorcent une reprise progressive après le minimum estival. Bien que les cumuls restent inférieurs à ceux de l'hiver, ils demeurent climatiquement importants pour la reconstitution des réserves hydriques.

Cette répartition saisonnière souligne l'importance des précipitations hivernales et printanières dans l'alimentation des ressources en eau de surface et souterraine, et met en évidence la vulnérabilité du territoire face aux sécheresses estivales.



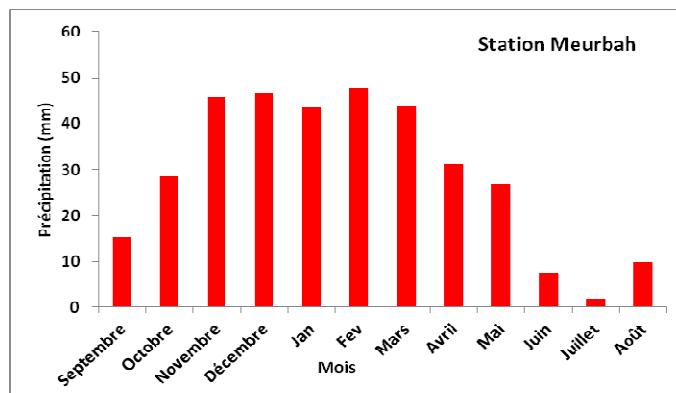


Figure III.4 Précipitations mensuelles des 7 stations.

III.1.4.3. Analyse des sécheresses (SPI)

Afin de classifier les années selon leur niveau de sécheresse ou d'humidité, nous avons utilisé l'Indice Pluviométrique Standardisé (SPI) annuel. Cet indicateur permet d'analyser la variabilité temporelle des précipitations à l'échelle locale ou régionale, dans le but d'identifier les périodes de déficit ou d'excès pluviométrique. Il constitue également un outil d'alerte précoce efficace pour la détection des sécheresses (**Chaouche, 2018**). Le SPI repose sur la transformation probabiliste des précipitations en un indice standardisé, exprimé en nombre d'écart-types par rapport à la moyenne. Cet indice, largement validé dans la littérature scientifique, est aujourd'hui utilisé dans plus de 70 pays (**McKee et al., 1993**).

Le calcul du SPI a été appliqué aux données pluviométriques annuelles des différentes stations de la zone d'étude (**Figure III.5**). L'analyse des histogrammes interannuels met en évidence deux grandes sous-périodes :

- Une période relativement humide (1974–1980), marquée par des valeurs de SPI globalement positives, traduisant des conditions pluviométriques supérieures à la normale ;
- Une période sèche (1980–2006), caractérisée par une succession d'années à SPI négatif, traduisant une baisse significative des précipitations, souvent proche de -1 ou inférieure.

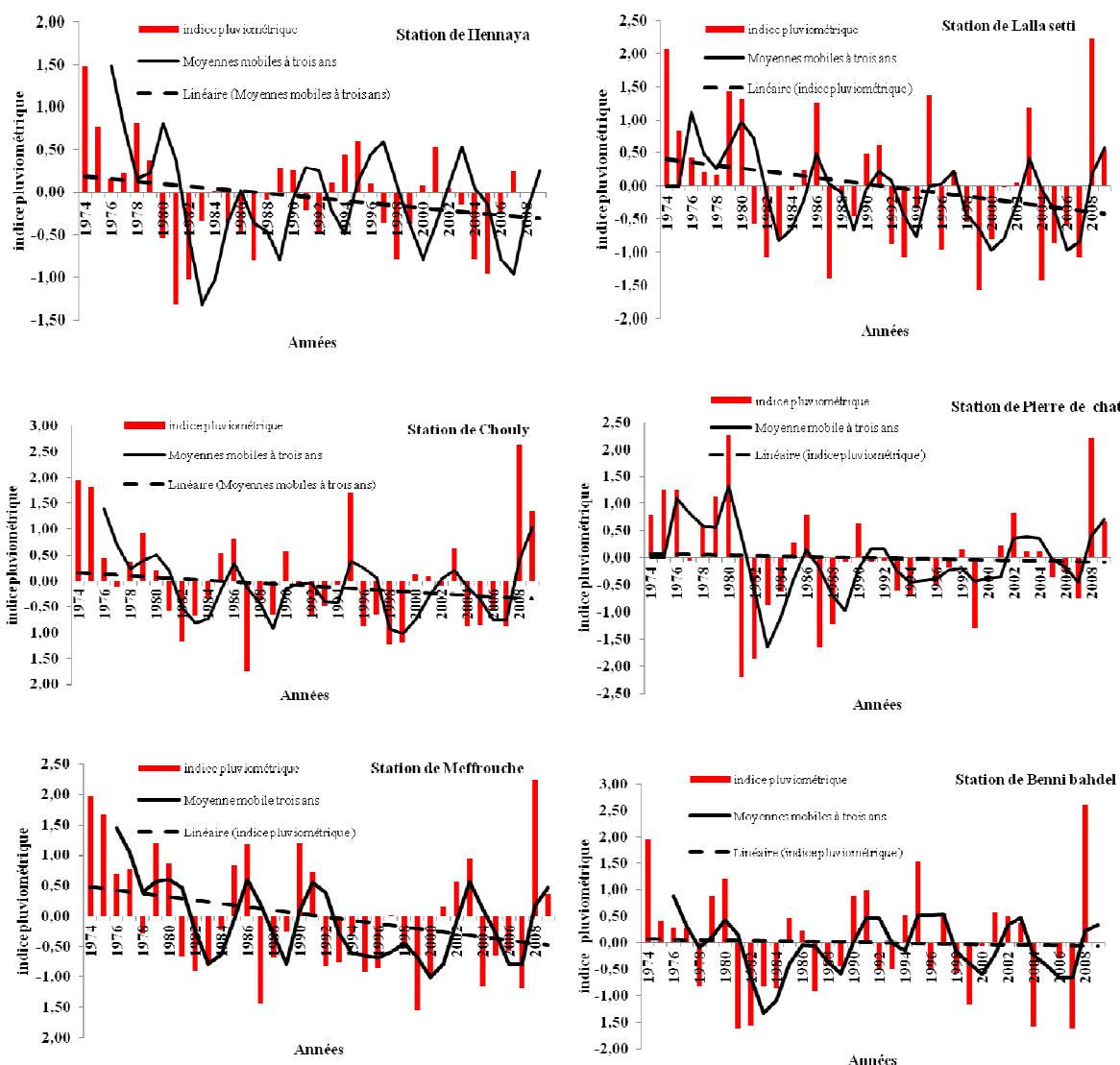
Des années exceptionnellement humides ressortent néanmoins dans cette période sèche, notamment 1990 et 1995, où des SPI supérieurs à 1 ont été enregistrés, indiquant des précipitations excédentaires ponctuelles.

Par ailleurs, l'année 1982 a été particulièrement critique dans plusieurs stations : celles de Ben Sekrane, Chouly et Pierre du Chat présentent un SPI inférieur à -2, correspondant à une sécheresse extrême selon la classification de McKee. Cette situation est confirmée par les

déficits pluviométriques sévères enregistrés cette année-là dans l'ensemble du nord-ouest algérien.

Enfin, à partir de l'année 2008, une nouvelle dynamique humide semble émerger, marquée par une remontée progressive des indices SPI dans la majorité des stations. Cette tendance est observée de manière cohérente dans presque toute la zone étudiée, à l'exception notable de la station de Hennaya, qui continue d'enregistrer des valeurs déficitaires.

L'ensemble de ces résultats met en évidence une variabilité spatio-temporelle importante des conditions pluviométriques dans le bassin, avec une alternance de phases sèches et humides susceptibles d'impacter durablement la recharge des nappes souterraines. La forte corrélation entre les tendances observées à travers les différentes stations témoigne d'un comportement pluviométrique régional cohérent, probablement influencé par des mécanismes climatiques de grande échelle.



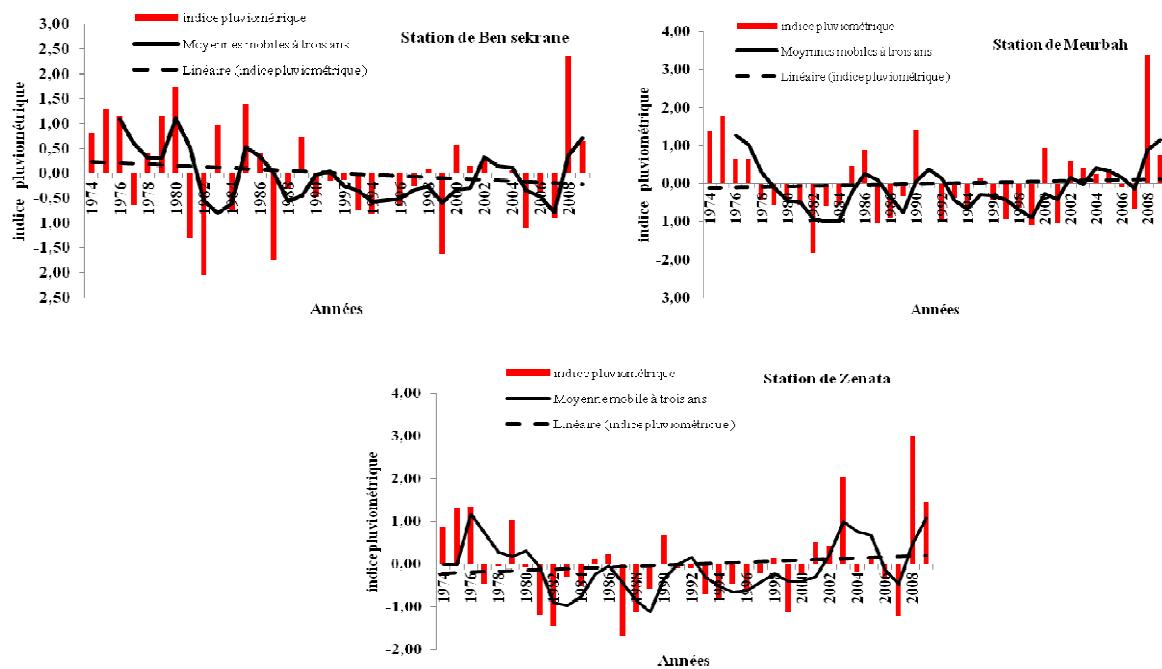


Figure III.5 l’Indice Pluviométrique Standardisé (SPI) des 9 stations

III.2. Température

- **Analyse des variations saisonnières et annuelles**

L’analyse des données thermiques issues de la station météorologique de Zenata, couvrant la période 1981–2010, met en évidence des variations annuelles et saisonnières caractéristiques d’un climat méditerranéen à tendance semi-aride. Les températures représentent un facteur climatique majeur qui influence directement l’évaporation, l’évapotranspiration, la dynamique de l’humidité des sols et, par conséquent, les processus de recharge des nappes phréatiques.

Tableau III.4 Température moyenne mensuelle (°C) à la station de Zenata (1981-2010)

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Jui	Aout	Annuelle
<i>Tmoy</i>	23,7	19,8	15,3	12,2	10,8	11,9	13,8	15,7	18,7	22,7	26,0	26,6	18,1
<i>Tmax</i>	30,0	26	20,9	17,6	16,5	17,6	20	22	24,9	29,1	32,8	33,3	24,2
<i>Tmin</i>	17,51	13,66	9,66	6,78	5,12	6,21	7,69	9,41	12,56	16,34	19,28	19,95	12,0
A	12,5	12,3	11,2	10,8	11,4	11,4	12,3	12,6	12,3	12,8	13,5	13,3	12,2

Tmax : Température mensuelle maximale (°C)

Tmin : Température mensuelle minimale (°C)

A : Amplitude thermique mensuelle (écart entre Tmax et Tmin, exprimé en °C)

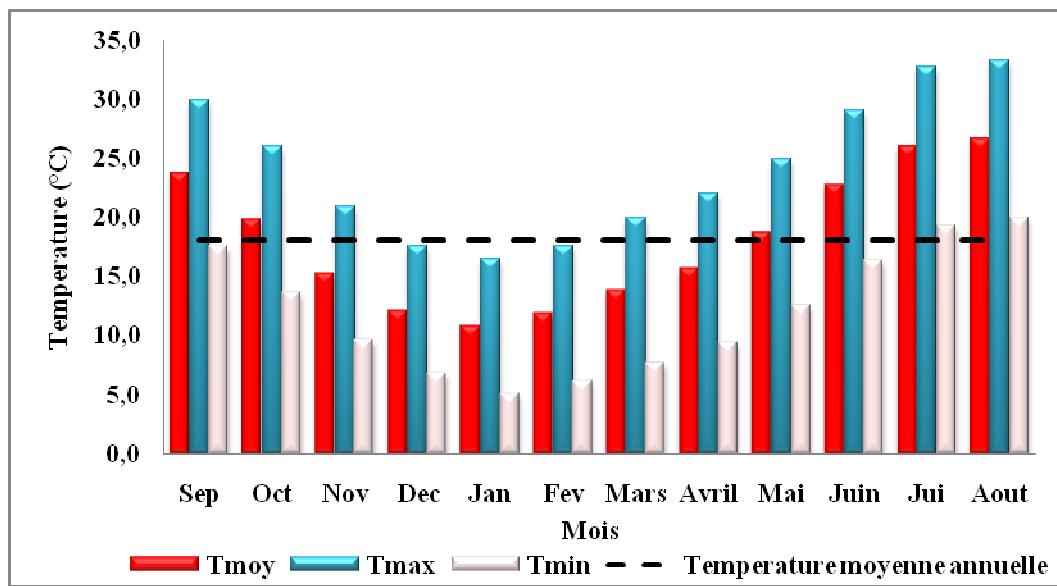


Figure III.6 Température moyenne mensuelle (°C) à la station de Zenata (1981-2010)

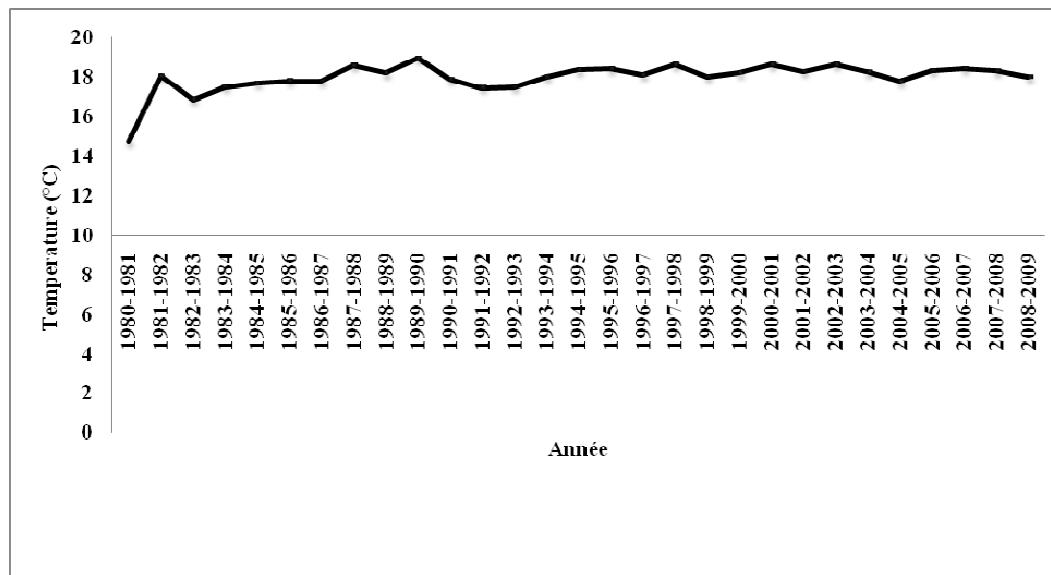


Figure III.7 Température moyenne annuelle (°C) à la station de Zenata (1981-2009)

L'examen de la répartition mensuelle des températures (**Tableau III.4** et **Figure III.6**) permet de distinguer deux grandes périodes thermiques. La première, correspondant à la saison chaude, s'étend de mai à octobre, période durant laquelle les températures mensuelles sont systématiquement supérieures à la moyenne annuelle. La seconde, assimilée à la saison froide, couvre les mois de novembre à avril, et se caractérise par des températures mensuelles inférieures à cette moyenne.

Le mois d'août constitue le pic thermique de l'année, avec une température maximale moyenne atteignant 33,3 °C, tandis que le mois de janvier enregistre la température minimale moyenne la plus basse, estimée à 5,12 °C. Ces écarts de température traduisent une variabilité thermique saisonnière bien marquée, typique des régions à climat méditerranéen à tendance semi-aride.

L'amplitude thermique mensuelle, exprimée par la différence entre les températures maximales et minimales, varie de 10,8 °C (en décembre) à 13,5 °C (en juillet), avec une moyenne annuelle de 12,2 °C. Cette amplitude relativement élevée, particulièrement durant la saison estivale, révèle une forte différenciation entre températures diurnes et nocturnes, phénomène caractéristique des milieux à continentalité modérée ou des zones soumises à une influence semi-aride.

Sur le plan hydrologique, cette dynamique thermique exerce une influence non négligeable. Durant l'été, les températures diurnes élevées intensifient l'évaporation des eaux superficielles et de l'humidité du sol, tandis que les températures nocturnes plus fraîches permettent une évaporation résiduelle. Ce cycle quotidien entraîne une réduction de la capacité d'infiltration des précipitations, avec des pertes estimées à environ 15 %, compromettant ainsi partiellement le rechargeement des nappes phréatiques. Néanmoins, en zones montagneuses, un microclimat nocturne plus humide favorise les processus de condensation, pouvant compenser en partie les pertes hydriques par évaporation.

L'analyse de la **Figure III.7**, représentant l'évolution de la température moyenne annuelle entre 1980 et 2009, révèle une variabilité interannuelle modérée, avec des températures comprises entre 17 °C et 19 °C. Une hausse rapide est observée au début de la période, suivie d'une tendance relativement stable tout au long des décennies suivantes, sans manifestation claire d'un réchauffement climatique significatif à long terme. Cette stabilité thermique masque toutefois quelques fluctuations ponctuelles, notamment au début des années 1990 et à la fin des années 2000.

Ces résultats soulignent le caractère contrasté mais modéré du régime thermique local, façonné par une double influence méditerranéenne et semi-aride. Ainsi, les variations hydrologiques observées dans la région semblent davantage liées à la distribution spatio-temporelle des précipitations qu'à l'évolution thermique interannuelle.

III.3. Étude de l'évapotranspiration potentielle (ETP)

L'évapotranspiration potentielle (ETP) représente la quantité totale d'eau qui pourrait être évaporée et transpirée par une surface donnée sur une période déterminée, en supposant un apport hydrique suffisant. Elle est généralement exprimée en millimètres de lame d'eau ou en volume d'eau (**Boudjebieur, 2022**).

Pour estimer l'ETP, nous avons utilisé la formule de Thornthwaite, qui établit une relation entre la température moyenne mensuelle et l'évapotranspiration mensuelle (**Boudjebieur, 2022**). La méthode s'articule en plusieurs étapes

- **Indice thermique mensuel (i)**

$$i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1.514} \quad (53)$$

- **Indice thermique annuel (I)**

$$I = \sum_{1}^{12} i \quad (54)$$

- **Coefficient "a" lié à la température**

$$a = \frac{1.6}{100} I + 0.5 \quad (55)$$

- **Évapotranspiration potentielle mensuelle (ETP)**

$$ETP = 16 \cdot \left(10 \frac{T}{I}\right)^a \quad (56)$$

- **ETP corrigée**

$$ETP_c = ETP \cdot K \quad (57)$$

Avec : ETP : Evapotranspiration potentielle mensuelle en mm.

ETP_c : Evapotranspiration potentielle corrigé (mm).

T : Température moyenne du mois considéré en °C.

i : Indice thermique mensuel.

I : indice thermique annuel.

a : indice lié à la température calculé par la relation proposées par SERRA 1. 1954

(Lakhdari, 2022)

K : Coefficient d'ajustement mensuel

III.1. Déficit agricole (D_a) et les pluies efficaces (P_{eff})

- **Pluie efficace**

Correspond à la fraction des précipitations réellement disponible pour les plantes, après déduction des pertes par ruissellement, évaporation directe et infiltration profonde.

En climat méditerranéen, une approximation courante est :

- si $P < ETP$, alors $P_{eff} = 0$ (toute l'eau est évaporée).
- $P_{eff} = P - ETP$ si $P > ETP$ (l'excès est disponible ou stocké).

- **Déficit agricole (Da)**

Le déficit agricole (Da) représente la quantité d'eau manquante pour satisfaire les besoins hydriques des cultures. C'est la différence entre l'évapotranspiration potentielle (ETP) et les précipitations effectives (ou totales, si les précipitations sont inférieures à l'ETP).

$$D_a = ETP_c - P_{eff} \quad (58)$$

Tableau III.5 La variation mensuelle de Température, précipitation et évapotranspiration potentielle (ETP) au niveau de la station de Zenata

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Jui	Aout	TOTAL
T	23.74	19.83	15.28	12.19	10.81	11.9	13.85	15.7	18.73	22.72	26.04	26.63	18.1
i	10.57	8.05	5.43	3.85	3.21	3.72	4.67	5.66	7.38	9.89	12.16	12.58	87.19
I							87.18						
A							1.89						
ETP (mm)	106.25	75.64	46.22	30.15	24.02	28.83	38.35	48.66	67.88	97.8	126.56	132.01	822.35
K	1.03	0.97	0.86	0.85	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	

ETPc (mm)	109.43	73.37	39.75	25.62	20.9	24.5	39.5	53.03	82.14	118.34	155.66	153.13	895.38
P(mm)	18	19	53	49	50	51	43	32	29	4	1	3	352
Peff(mm)	0	0	6.78	18.85	25.98	22.17	4.65	0	0	0	0	0	78.43
Da (mm)	109.43	73.37	32.97	6.77	-5.08	2.33	34.85	53.03	82.14	118.34	155.66	153.13	814.94

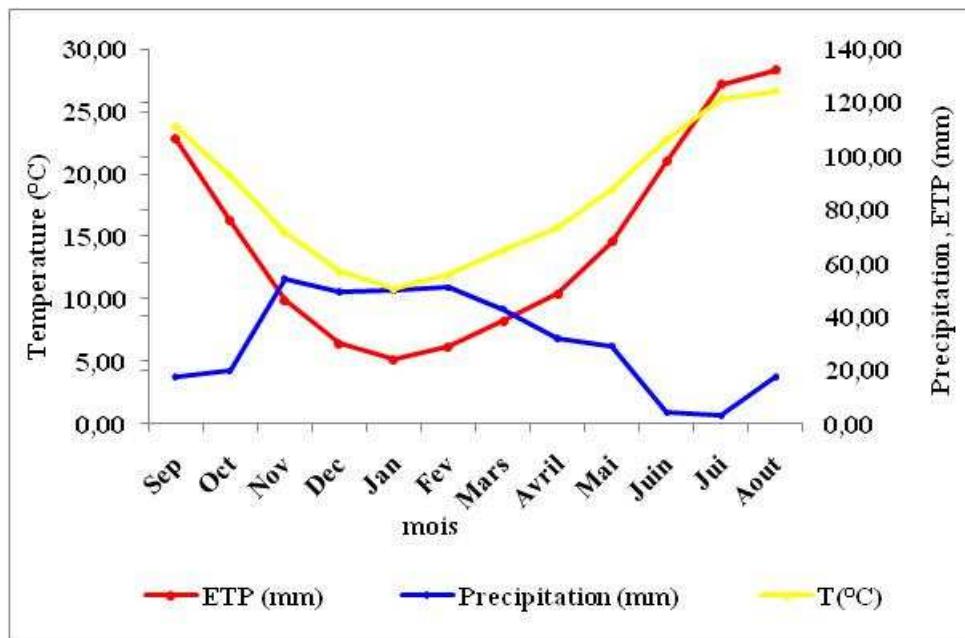


Figure III.8 Variation saisonnière des précipitations, de l'évapotranspiration potentielle et de la température

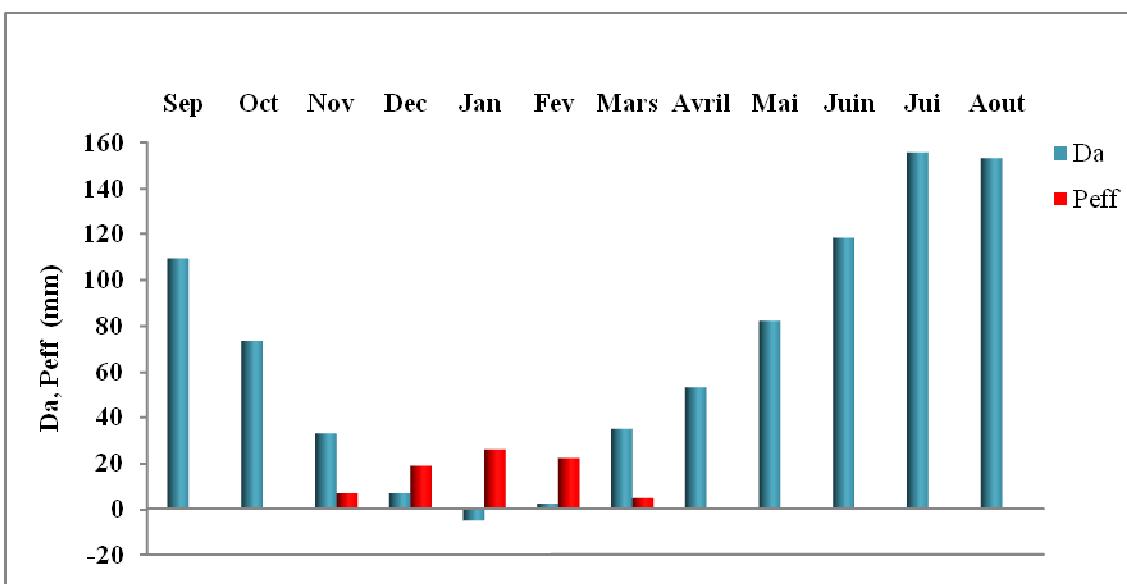


Figure III.9 Représentation graphique de déficit agricole pour la période (1996-2015) la station de Zenata

L'analyse du **tableau III.5 et la Figure III.8 et III.9** met en évidence un déséquilibre hydrique significatif tout au long de l'année dans la région de Zenata. Les précipitations mensuelles (P) sont très largement inférieures à l'évapotranspiration potentielle corrigée (ETP_c), ce qui se traduit par une pluie efficace (Peff) quasi nulle pendant la majeure partie de l'année. Seuls les mois de novembre à mars présentent des valeurs de Peff supérieures à 0, avec un maximum en janvier (25,98 mm). Cela indique que les précipitations dépassent rarement les pertes par évaporation, limitant ainsi la recharge des nappes.

Le déficit hydrique agricole (D_a) est élevé sur l'ensemble de l'année, atteignant un pic en juillet (-155,66 mm) et août (-153,13 mm), périodes caractérisées par des températures maximales et une sécheresse accrue. Même durant les mois plus humides, tels que mars et novembre, un déficit persiste, révélant l'insuffisance des précipitations pour répondre aux besoins hydriques des cultures.

Le déficit hydrique cumulé annuel, estimé à environ 815 mm, témoigne de la sévérité du stress hydrique dans cette région à climat semi-aride. Cette situation rend l'agriculture fortement dépendante de l'irrigation, soulignant la nécessité urgente de mettre en œuvre des stratégies de gestion durable des ressources en eau.

III.4. Hydrologie

L'analyse du comportement hydrologique d'un bassin versant face aux précipitations nécessite une étude approfondie du bilan hydrologique sur une période d'observation représentative. Cette démarche vise à caractériser le régime d'écoulement de l'Oued Isser-Sikkak et à évaluer sa sensibilité aux fluctuations climatiques. L'étude s'attache particulièrement à la quantification des apports liquides moyens, tant à l'échelle annuelle que mensuelle, afin de mieux comprendre la dynamique hydrologique du bassin.

Dans ce cadre, l'analyse repose sur l'exploitation de séries hydrométriques enregistrées à huit stations réparties dans le bassin versant. Ces données couvrent des périodes d'observation variables, allant de 27 à 48 ans, entre 1968 et 2015 (**Tableau III.6**). Elles constituent une base fiable pour étudier la dynamique des écoulements et leur variabilité temporelle

Tableau III.6 Les périodes de disponibilité des données pour les stations hydrométriques retenus.

Station hydrométrique	Années disponibles
Zenata	1971–2014
Remchi	1970–2005
Hennaya	1972–2006

Chouly	1971–2014
Ain youcef	1972–1998
Mefrouche	1971–1997
Pierre de chat	1968–2015
Sidi aissa	1985–2012

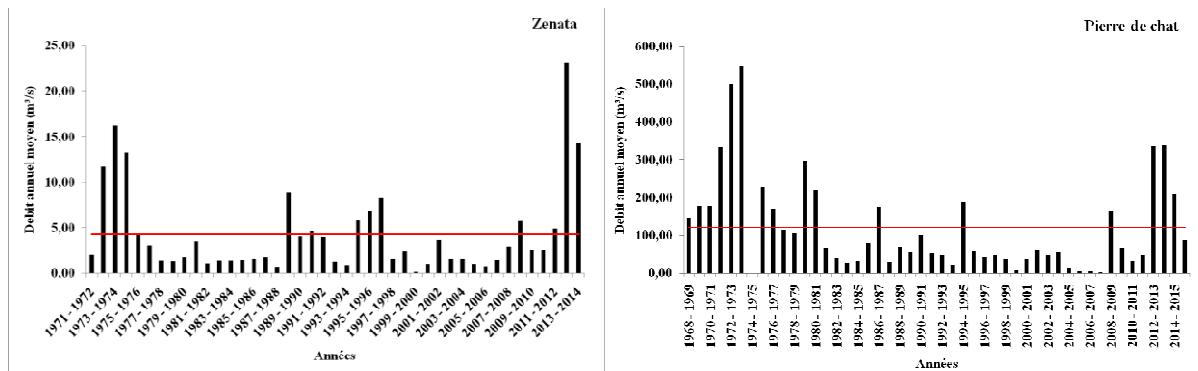
III.4.1. Variation annuelle, mensuelle et saisonnière moyenne des débits

III.4.1.1. Variation des débits annuels moyens (m³/s)

Les débits enregistrés aux huit stations hydrométriques entre 1970 et 2010 révèlent une forte variabilité interannuelle. Selon les données présentées dans le **tableau III.7** et illustrées par la **figure III.10**, les débits moyens varient de 1,78 m³/s à la station de Hennaya à 121,2 m³/s à la station de Pierre de Chat. Au cours des périodes 1971–1976 et 2007–2010, les stations de Zenata, Pierre de Chat, Mefrouche et Chouly ont enregistré des débits particulièrement élevés. En revanche, les stations d'Aïn Youcef, Remchi et Hennaya n'ont présenté des valeurs élevées qu'entre 1972 et 1974. Quant à la station de Sidi Aïssa, les débits les plus importants ont été observés entre 2007 et 2010, ce qui corrobore les résultats obtenus par **Osmani (2023)**. À titre d'exemple, l'oued Isser, à la station de Sidi Aïssa, enregistre un débit moyen de 16,54 m³/s, tandis que l'oued Sikkak présente une moyenne de 17,14 m³/s. Ce débit relativement modeste s'explique notamment par la présence du barrage de Mefrouche, situé en aval de l'oued Nached, mais également par la nature karstique dominante dans les zones amont, qui favorise l'infiltration des eaux et limite, de ce fait, les écoulements de surface.

Tableau III.7 Le débit moyen annuel des 8 stations

Station	Zenata	pierre de chat	Mefrouche	Ain youcf	Remchi	Hennaya	Chouly	Sidi aissa
<i>Debit moyen annuel</i>	4.28	121.2	2.61	17.14	49.35	1.78	8.66	16.54



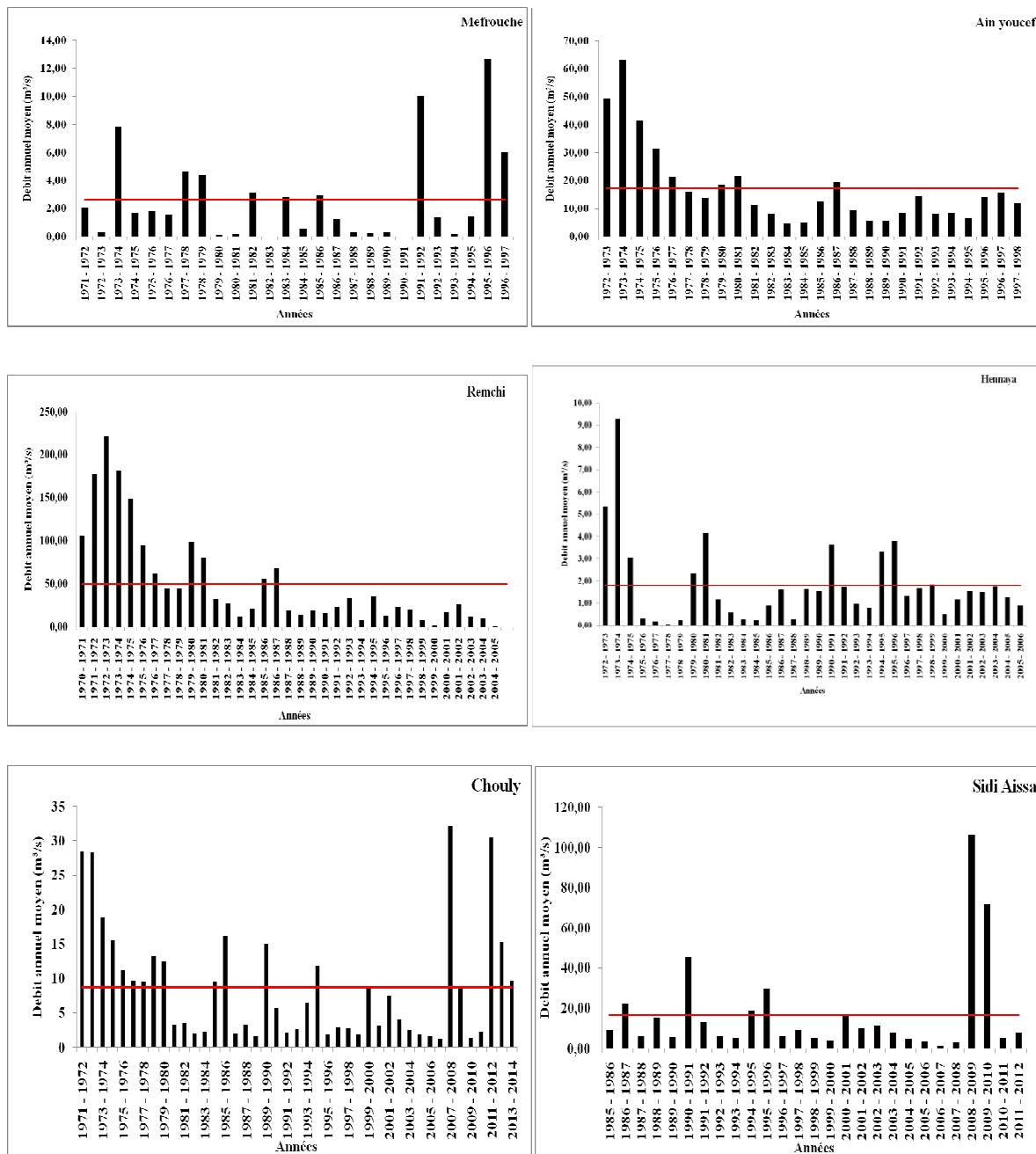


Figure III.10 La variation annuelle des débits au niveau des 8 stations

II.4.1.2. Variation mensuelle moyenne des débits

La **figure III.11** et le **tableau III.5** présentent les variations mensuelles moyennes des débits observés à huit stations hydrométriques. L’analyse de ces données révèle la présence de deux phases hydrologiques bien distinctes : une phase ascendante des débits débutant en septembre et culminant en mars, suivie d’une phase descendante s’étendant de mars à août. Ce schéma saisonnier est caractéristique du régime hydrologique méditerranéen, fortement influencé par la distribution annuelle des précipitations.

Les stations de Pierre de Chat et Remchi se distinguent par des débits mensuels particulièrement élevés, notamment entre novembre et avril. La station de Pierre de Chat enregistre les valeurs les plus importantes, avec un maximum de 370,73 m³/s en mars. Remchi, située également sur le cours principal, présente des débits notables, atteignant 124,26 m³/s durant le même mois.

À un niveau intermédiaire, les stations d'Aïn Youcef et de Sidi Aïssa affichent des débits modérés, avec des pics enregistrés en mars, respectivement de 44,96 m³/s et 73,76 m³/s. En revanche, les stations de Zenata, Hennaya et Mefrouche montrent des valeurs très faibles tout au long de l'année. Les débits maximaux mensuels y restent généralement inférieurs à 10 m³/s, témoignant d'un contexte hydrologique sec, typique des zones à tendance aride.

L'analyse comparative des débits entre les stations confirme que Pierre de Chat enregistre les apports les plus importants, ce qui peut s'expliquer par la confluence des oueds Sikkak et Isser en amont immédiat de cette station. À l'opposé, les faibles débits observés à Mefrouche résultent probablement de la présence du barrage de Mefrouche, situé sur l'oued Nached, qui retient une grande partie des eaux en amont, réduisant ainsi les écoulements à l'aval.

Les débits particulièrement faibles mesurés à Zenata et Hennaya s'expliquent par un déficit pluviométrique persistant et une géomorphologie limitant la génération des écoulements. La combinaison de précipitations annuelles modestes et d'une perméabilité élevée des sols privilégie fortement l'infiltration au ruissellement direct, minimisant ainsi les apports aux exutoires et justifiant les faibles volumes enregistrés.

Tableau III.8 La variation mensuelle des débits au niveau des 8 stations

<i>Années</i>	<i>Sep</i>	<i>Oct</i>	<i>Nov</i>	<i>Dec</i>	<i>Jan</i>	<i>Fev</i>	<i>Mars</i>	<i>Avril</i>	<i>Mai</i>	<i>Juin</i>	<i>Jui</i>	<i>Aout</i>
<i>Zenata</i>	1.68	2.93	7.42	4.06	4.58	4.90	10.40	7.55	3.42	1.61	0.98	0.73
<i>Remchi</i>	10.35	18.67	38.86	39.98	54.81	71.14	124.26	75.85	43.63	17.43	8.87	4.54
<i>Hennaya</i>	0.44	0.84	1.14	1.80	1.94	2.43	6.57	3.04	1.51	0.47	0.22	0.22
<i>Chouly</i>	1.69	2.35	5.32	6.41	11.60	19.64	28.56	12.33	6.37	2.58	1.87	1.29
<i>Ain youcef</i>	6.80	8.82	12.71	20.10	22.45	27.54	44.96	25.96	17.65	6.25	3.19	1.94
<i>Mefrouche</i>	0.04	0.20	2.67	2.70	5.83	5.28	10.27	1.70	1.61	0.05	0.00	0.00
<i>Pierre de chat</i>	32.00	72.33	96.69	113.08	138.71	204.54	370.73	189.57	102.79	44.01	23.97	14.18
<i>Sidi aissa</i>	5.34	6.28	19.50	15.34	25.78	36.40	73.76	15.74	11.01	3.88	1.08	1.07

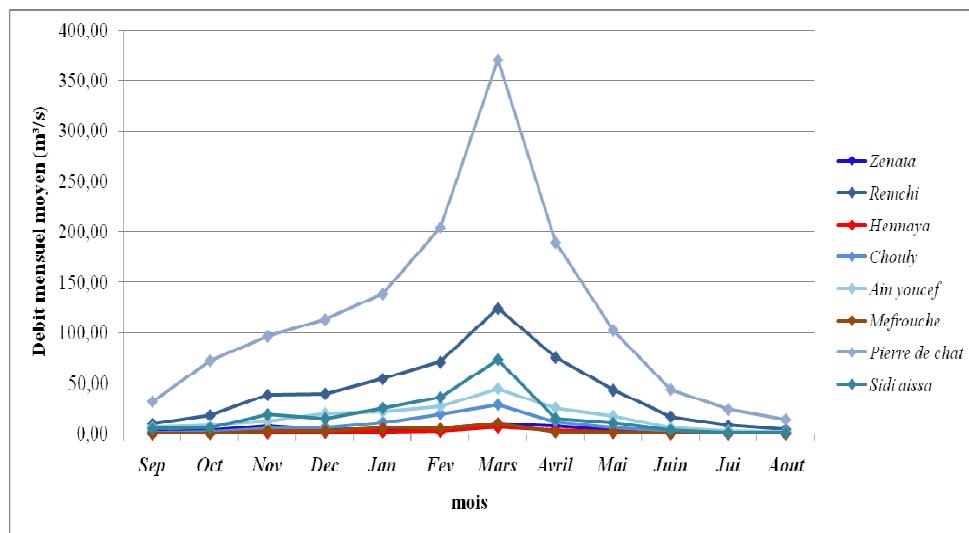


Figure III.11 La variation mensuelle des débits au niveau des 8 stations

III.4.1.3. Variation saisonnière des débits

L’analyse saisonnière des débits (**Tableau III.8 et Figure III. 12**) révèle une variabilité intra-annuelle marquée, caractéristique des régimes hydrologiques de type méditerranéen. Le printemps s’impose comme la saison la plus active hydrologiquement, avec un débit moyen de 49,55 m³/s, résultant des précipitations résiduelles de fin d’hiver et, dans certains cas, de la fonte nivale. L’hiver, avec un débit moyen de 35,04 m³/s, constitue une période de contribution hydrique importante, en raison de la fréquence des précipitations et de l’évapotranspiration réduite, qui favorisent les écoulements de surface. L’automne marque la transition entre l’étiage estival et la reprise des écoulements, avec un débit moyen plus modéré de 14,80 m³/s, les premières pluies étant souvent absorbées par des sols desséchés. À l’opposé, l’été se caractérise par un tarissement marqué des cours d’eau, avec un débit moyen très faible de 5,85 m³/s, lié à la quasi-absence de précipitations, à une évapotranspiration maximale et à une faible alimentation des écoulements superficiels.

Tableau III.9 La variation saisonnière des débits au niveau des 8 stations

Station	Automne	Hiver	Printemps	Eté
Zenata	4.01	4.51	7.12	1.10
Remchi	22.63	55.31	81.25	10.28
Hennaya	0.81	2.05	3.71	0.31
Chouly	3.12	12.55	15.75	1.91
Ain youcef	9.45	23.36	29.52	3.79
Mefrouche	0.97	4.60	4.52	0.02

Pierre de chat	67.01	152.11	221.03	27.38
Sidi aissa	10.38	25.84	33.50	2.01
	14.80	35.04	49.55	5.85

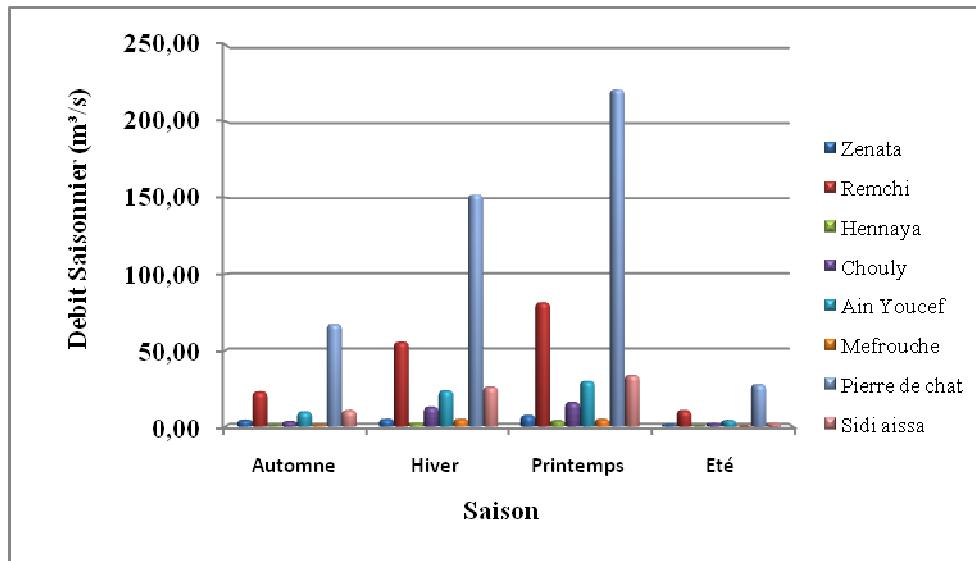


Figure III.12 La variation saisonnière des débits au niveau des 8 stations

III.4.1.4. Variation du coefficient mensuel de débit (CMD)

Le coefficient mensuel de débit (CMD) constitue un indicateur essentiel de la dynamique hydrologique d'un bassin versant. Il est défini comme le rapport entre le débit moyen mensuel (Q_m) et le module interannuel (Q_{moy}), exprimé par la formule suivante :

$$CMD = \frac{Q_m}{Q_{moy}} \quad (59)$$

où :

- Q_m : débit moyen du mois donné (en m^3/s),
- Q_{moy} : module interannuel (moyenne des débits mensuels sur toute la période d'étude, en m^3/s).

Cet indicateur permet de normaliser les débits mensuels afin de comparer les fluctuations saisonnières, indépendamment des volumes absolus. Ainsi, un CMD supérieur à 1 indique une période de hautes eaux, tandis qu'un CMD inférieur à 1 signale une période d'étiage (Yles, 2014).

L'évaluation du CMD (**Tableau III.9 et figure III.13**) sur les huit stations hydrométriques analysées met en évidence une variabilité saisonnière marquée, caractéristique des régimes hydrologiques méditerranéens. Les valeurs maximales sont enregistrées entre janvier et avril, avec un pic prononcé en mars, notamment à la station de Sidi Aïssa où le CMD atteint 4,46, suivie de Mefrouche (3,93) et Hennaya (3,69). Ces valeurs élevées traduisent l'influence combinée des précipitations hivernales et des apports issus de la fonte nivale dans les zones de montagne (**Meddi & Hubert, 2003 ; Boudhar et al., 2009**).

En revanche, la période estivale (de juin à octobre) est marquée par une baisse significative du CMD, atteignant des valeurs proches de zéro à certaines stations (Mefrouche et Sidi Aïssa), témoignant de l'intensité de l'étiage et de la faiblesse des apports en cette saison.

Certaines stations, telles que Zenata, Remchi et Aïn Youcef, présentent toutefois des variations plus modérées du CMD, suggérant une alimentation plus régulière du réseau hydrographique, possiblement liée à une infiltration efficace ou à la présence d'aquifères plus actifs (**Remini & Achour, 2008**).

Tableau III.10 La variation de coefficient mensuel de débit (CMD) au niveau des 8 stations

Station	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Jui	Aout
Zenata	0.39	0.68	1.73	0.95	1.07	1.14	2.43	1.76	0.80	0.38	0.23	0.17
Remchi	0.21	0.38	0.79	0.81	1.11	1.44	2.52	1.54	0.88	0.35	0.18	0.09
Hennaya	0.25	0	0.64	1.01	1.09	1.37	3.69	1.71	0.85	0.27	0.13	0.12
Chouly	0.19	0.27	0.61	0.74	1.34	2.27	3.30	1.42	0.74	0.30	0.22	0.15
Ain youcef	0.40	0.51	0.74	1.17	1.31	1.61	2.62	1.51	1.03	0.36	0.19	0.11
Mefrouche	0.02	0.08	1.02	1.04	2.23	2.02	3.93	0.65	0.62	0.02	0.00	0.00
Pierre de chat	0.26	0.60	0.80	0.93	1.14	1.69	3.06	1.56	0.85	0.36	0.20	0.12
Sidi aissa	0.32	0.38	1.18	0.93	1.56	2.20	4.46	0.95	0.67	0.23	0.07	0.06

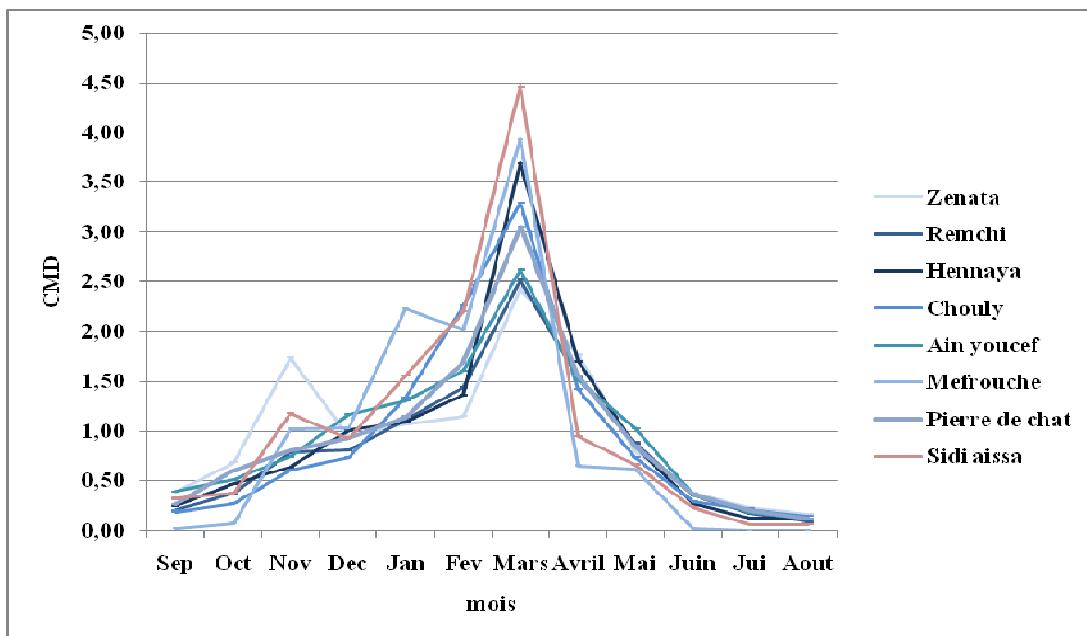


Figure III.13 La variation de coefficient moyen de débit (CMD) au niveau des 8 stations

III.5. Diagrammes intégrateurs

III.5.1. Ombrathermique de GausSEN

Le diagramme ombrathermique de GausSEN constitue un outil fondamental pour l'analyse du régime climatique d'une région. Il repose sur la confrontation des températures et des précipitations mensuelles moyennes afin de délimiter les périodes sèches et humides. Selon la méthode de GausSEN, une période est considérée comme sèche lorsque la hauteur des précipitations mensuelles (P), exprimée en millimètres, est inférieure au double de la température moyenne mensuelle (T) exprimée en degrés Celsius (Chaouche, 2018):

$$\text{Période sèche si : } P < 2 \times T$$

Cette méthode permet de mettre en évidence la saisonnalité des précipitations, essentielle dans les zones à climat méditerranéen.

Dans le cas de la station de Zenata (Figure III.14), l'application de cette méthode a permis d'identifier une période humide de cinq mois, s'étendant de novembre à mars, où les précipitations excèdent les seuils définis. En revanche, la période sèche couvre les sept mois restants, soit de mai à septembre, période durant laquelle l'insuffisance pluviométrique est manifeste.

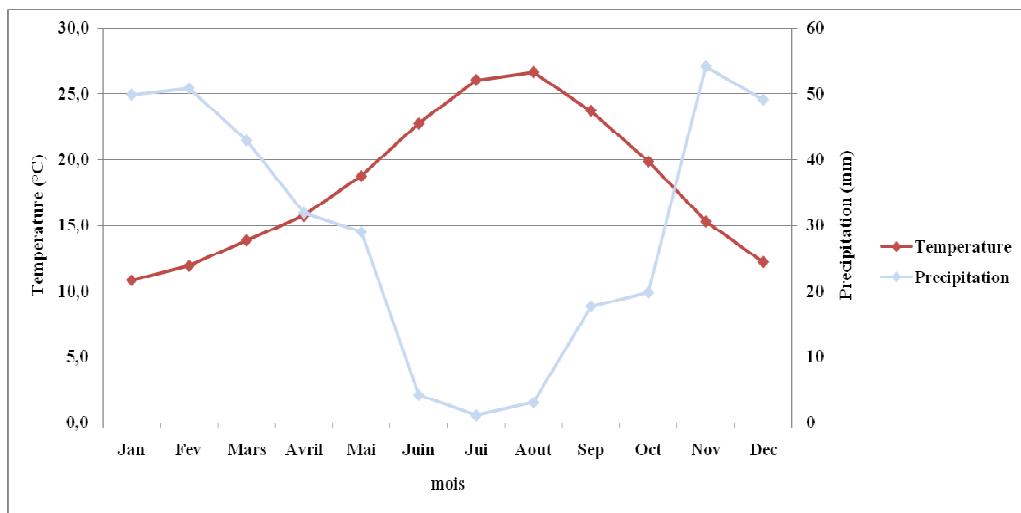


Figure III.14 Diagramme Ombrothermique de Zenata

III.5.2. Climagramme d'Emberger : Détermination des étages bioclimatiques

Le climagramme d'Emberger permet de caractériser les étages bioclimatiques à partir d'un quotient pluviothermique (Q). Ce quotient met en relation la moyenne annuelle des précipitations et les températures extrêmes des mois les plus froids et les plus chauds de l'année. Il est défini par la formule suivante (**Chaouche, 2018**).

$$Q = 1000 \times \frac{P}{\frac{(M + m)(M - m)}{2}} \quad (60)$$

Avec : Q : l'indice climatique d'Emberger.

P : précipitation moyenne annuelle (mm)

M : moyenne des maxima du mois le plus chaud (degrés/kelvin).

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

Afin de caractériser le climat de la région de l'Oued Isser-Sikkak, le quotient pluviothermique d'Emberger (Q) a été utilisé. Ce dernier permet de situer la station de Zenata dans un étage bioclimatique précis, en se fondant sur les précipitations annuelles ainsi que sur les températures extrêmes saisonnières.

La station de Zenata : **P = 485,37** **Q = 58,94**

M = 306,3°k **m = 278,12°k**

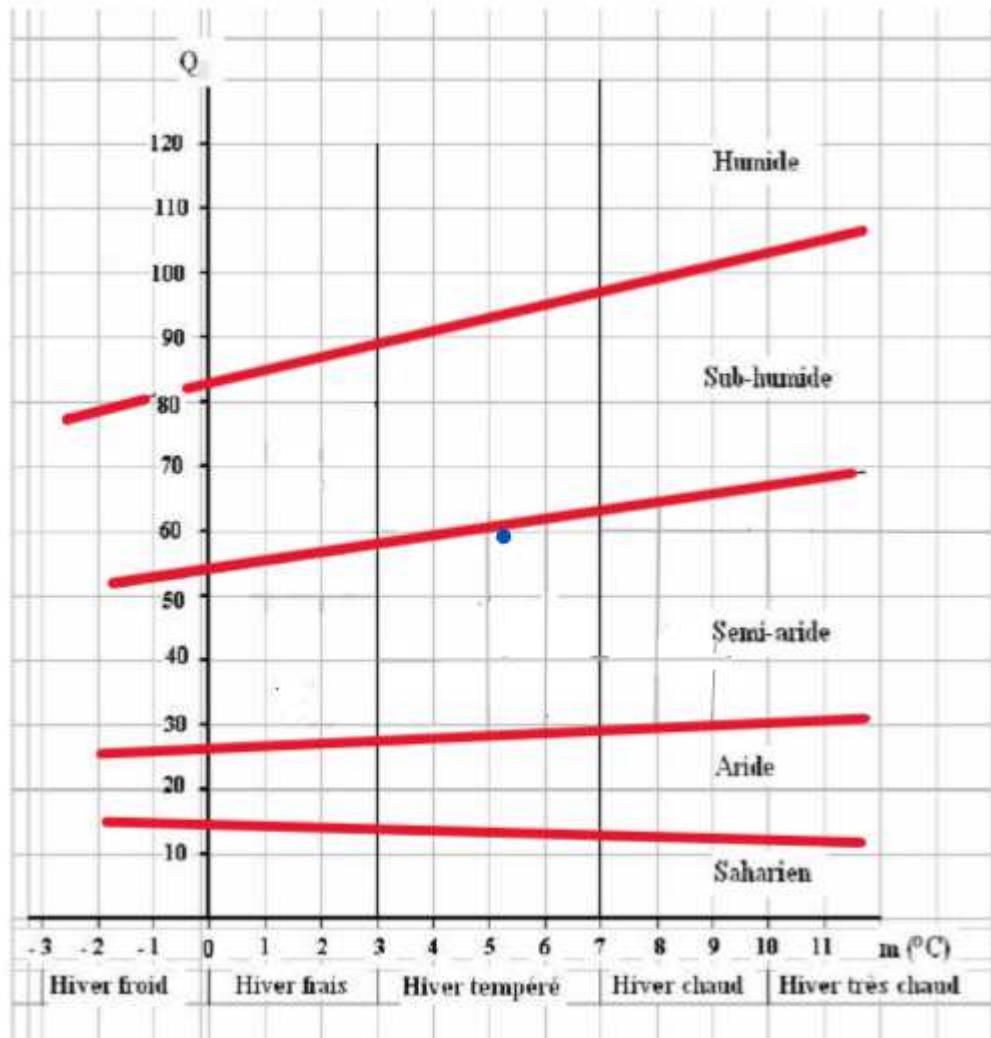


Figure III.15 Climagramme d'Emberger

La valeur obtenue ($Q=58,94$) situe la station de Zenata dans un *étage bioclimatique semi-aride* (Figure III.15), avec une influence méditerranéenne modérée. Ce type de climat est généralement associé à des hivers doux et pluvieux, et des étés secs, traduisant un régime climatique caractéristique des régions de transition entre le climat méditerranéen humide et les zones arides.

Conclusion

Ce chapitre établit un diagnostic précis du climat et du régime hydrologique du bassin versant de l'Oued Isser-Sikkak, fondé sur l'analyse de séries homogénéisées. Les résultats révèlent

une rupture climatique majeure en 1980, amorçant une aridification régionale. Le régime pluviométrique, à forte saisonnalité (85% des pluies en novembre-avril), et le stress thermique semi-aride génèrent un déficit hydrique structurel, limitant la recharge des nappes. L'étude des débits met en lumière une hétérogénéité spatiale prononcée (liée à l'altitude, la karsticité et l'impact des barrages) et des étiages estivaux critiques, exacerbés par les prélevements agricoles. Les indices bioclimatiques (Gaussin, Emberger) confirment un étage semi-aride à hiver tempéré. Ces dynamiques appellent une gestion adaptative des ressources en eau, intégrant les spécificités locales et la projection climatique. Ce diagnostic constitue un socle solide pour l'étude future des eaux souterraines et des stratégies de résilience

Chapitre IV**Intégration des SIG, de la télédétection, des méthodes d'aide à la décision et du Machine Learning pour la délimitation des zones de recharge****Introduction**

Au cours des dernières décennies, la cartographie du potentiel en eaux souterraines s'est imposée comme un outil essentiel pour appuyer les études hydrogéologiques, en particulier dans les régions arides et semi-arides où les ressources en surface sont rares ou inexistantes, et où les eaux souterraines constituent souvent la seule source d'approvisionnement en eau pour la population (**Grönwall et Danert, 2020**). Cette cartographie vise principalement à identifier les zones favorables à la présence et à l'exploitation des ressources en eaux souterraines, en s'appuyant sur l'intégration de plusieurs critères environnementaux, géologiques et hydrologiques (**Díaz-Alcaide et Martínez-Santos, 2019**).

Pour atteindre cet objectif, différentes approches méthodologiques ont été développées. Parmi elles, les méthodes basées sur l'expertise, telles que le Processus Analytique Hiérarchique (AHP), occupent une place importante. L'approche AHP permet de hiérarchiser les facteurs influençant la recharge et la disponibilité des eaux souterraines, en attribuant à chacun un poids selon son importance relative. Cette méthode, robuste et bien éprouvée, permet une intégration structurée et transparente de l'expertise dans la prise de décision multicritère (**Al-Djazouli et al., 2021**).

En parallèle, l'essor des technologies de l'information a ouvert la voie à l'application de méthodes d'apprentissage automatique (machine learning) dans la cartographie du potentiel en eaux souterraines. Contrairement aux approches classiques, ces techniques ont la capacité d'analyser automatiquement de grandes quantités de données spatiales et environnementales afin d'identifier des relations complexes entre les variables prédictives et la présence d'eaux souterraines (**Géron, 2022**). L'apprentissage automatique représente ainsi une avancée majeure dans la modélisation spatiale de phénomènes complexes, notamment en milieux hétérogènes.

Dans ce travail, les deux approches – AHP et apprentissage automatique – ont été combinées afin d'obtenir une cartographie plus fiable et précise du potentiel en eaux souterraines. Cette démarche comparative vise à évaluer les performances respectives de ces méthodes dans le

contexte spécifique du bassin versant étudié, en tenant compte des conditions climatiques, géologiques, topographiques et anthropiques qui influencent la recharge et l'accessibilité des aquifères

IV.1. Matériels

IV.1.1. Collecte des données

Les données disponibles et collectées dans la zone d'étude ont été méticuleusement préparées pour inclure plusieurs informations pertinentes concernant les critères liés à l'identification des zones favorables à la recharge (**Tableau IV.1**). Ces données ont subi une analyse approfondie et ont été intégrées dans un Système d'Information Géographique (SIG) afin de constituer une base de données exploitable pour notre évaluation multicritère.

- **Données cartographiques** : Ces données comprennent les cartes géologiques, hydrologiques et topographiques.... Elles permettent la visualisation de la zone d'étude dans son ensemble. Dans notre cas, nous avons utilisé la carte géologique de la région nord-ouest de l'Algérie à l'échelle 1/200000, elle fournit des informations détaillées sur la distribution des différentes formations rocheuses dans la zone d'étude.
- **Données de télédétection** : Les données de télédétection utilisées dans le cadre de cette étude proviennent des capteurs multi spectraux Landsat-8 OLI, acquises le 04/09/2021. L'image satellite sélectionnée doit présenter une couverture nuageuse inférieure à 10 % sur l'ensemble de la zone d'étude, ou idéalement, être complètement dégagée de nuages (**Djorfi et al ., 2018.**)
- **Données altimétriques** : Les données altimétriques décrivent les hauteurs et les reliefs de la zone d'étude. Elles sont généralement obtenues à partir de relevés sur le terrain, de systèmes de positionnement global (GPS) ou de modèles numériques d'élévation (MNT) tels que les données SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) fournies par l'USGS avec une résolution de 30 mètres, qui sont utilisées dans notre étude, ou d'autres sources similaires
- **Données du terrain** : Se réfèrent aux informations collectées directement sur le terrain, généralement à l'aide d'observations, de mesures et d'échantillonnages. Parmi les données du terrain utilisées, la productivité mesurée durant l'année 2019 de 43 puits réalisés entre **2005 et 2015**. Ces données sont très importantes. En effet,

cette mesure qui comprend le débit ou le volume d'eau pompé par unité de temps, fournit des informations précieuses sur la disponibilité des ressources en eau souterraine dans la zone d'étude. D'autres données du terrain ont été utilisées, en occurrence, les précipitations journalières, mensuelles et annuelles issues de 9 stations pluviométriques.

Données	Source	Échelle / Résolution	Taille	Usage
ALOS Digital Elevation Model (DEM)	https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/data/index.htm	30m Band 1 a 7 et 9 (30 m)	2	Cartographie de la pente et la densité de drainage
Image de Landsat-8 OLI	USGS - Earth Explorer https://earthexplorer.usgs.gov/ Of 09.04.2021	Band 8 (Panchromatique) (15 m)	1	Cartographie des fracturations et de l'occupation du sol
Carte géologique	Le Service Géologique d'Algérie	1:200000		Cartographie de la géologie
Données de précipitations	Office national de météorologie (ONM) de 1973-2010		9 stations	Cartographie des précipitations Evaluation de la carte des zones potentielles de recharge (AHP)
Données sur la productivité des puits	Direction des Ressources en Eau de Tlemcen		72 Puits	Entrainement et validation des modèles (Apprentissage automatique).

Tableau IV. 1. Données collectées, leurs sources et leur utilisation

IV .1.2. Logiciel utilisés

Plusieurs logiciels ont été utilisés pour la réalisation de ce travail. Le principal outil utilisé est **ArcGIS 10.8**, une suite SIG développée par **Esri** (Environmental Systems Research Institute), qui comprend des modules intégrés comme *ArcMap*, *ArcCatalog* et *ArcToolbox*, permettant de réaliser l'ensemble des traitements spatiaux nécessaires, du plus simple au plus avancé (**Boulabéiz et al., 2017**). Pour l'extraction des couches relatives à l'occupation du sol et à la densité des linéaments, le logiciel **ENVI 5.1** a été privilégié en raison de ses performances dans le traitement et l'analyse des images satellites, notamment multispectrales, hyperspectrales et radar, même en présence de nuages (**Guerinial, 2012**). **Google Earth** a été

utilisé comme outil complémentaire pour la visualisation et la localisation précise des zones d'intérêt à partir d'images aériennes et satellitaires gratuites. Pour le traitement approfondi des images satellitaires et l'extraction des linéaments, le logiciel **PCI Geomatica 2015** a également été employé. Il offre une large gamme d'outils adaptés à l'analyse géospatiale, développée initialement par le Centre Canadien de Télédétection (**Guerinial, 2012**). Enfin, pour l'analyse et la visualisation des données géologiques souterraines, **RockWorks 16** a été utilisé, notamment pour réaliser l'analyse statistique des linéaments .

IV.2 Méthodologie

Dans le cadre de cette étude, six facteurs déterminants ont été sélectionnés pour évaluer leur influence sur le processus de recharge des nappes souterraines. Il s'agit de : la pente du terrain, les précipitations, la densité de drainage, la densité des linéaments, la géologie et l'occupation du sol (LULC). Ces paramètres ont été largement adoptés dans la littérature scientifique pour l'évaluation du potentiel en eaux souterraines, en raison de leur rôle direct dans la dynamique d'infiltration et de percolation de l'eau.

IV.2.1. La génération des cartes thématiques

La génération des cartes thématiques constitue une étape essentielle dans le processus de délimitation des zones potentielles de recharge des nappes. Elle permet de spatialiser les facteurs influents et de fournir une base d'analyse intégrée.

IV.2.1.1. Carte d'occupation du sol et carte des fracturations

Pour l'utilisation des images de télédétection dans la génération de la carte d'occupation du sol et l'extraction des linéaments, nous avons suivi trois étapes principales : les prétraitements des images, la classification supervisée pour la carte d'occupation du sol, et le filtrage directionnel pour les linéaments. (**Bouzekri et Benmessaoud,2014**)

IV.2.1.1.A. Carte de l'occupation du sol

La génération de la carte d'occupation du sol repose sur un processus rigoureux de traitement des images satellites, combiné à des observations de terrain et à une validation statistique. Dans un premier temps, les images satellites ont été soumises à des prétraitements géométriques et radiométriques visant à corriger les distorsions et à améliorer le contraste

pour faciliter l'interprétation visuelle. Une mosaïque des scènes satellites couvrant la zone d'étude a été réalisée, suivie de l'application d'un masque basé sur les limites administratives pour extraire uniquement la région ciblée. Une composition colorée en fausses couleurs a été générée à partir de bandes spectrales sélectionnées (infrarouge, rouge, vert) afin de mieux distinguer les différentes unités de couverture terrestre. Sept classes d'occupation du sol (forêt dense, forêt claire, Agriculture, Broussaille, sols nus, plans d'eau et centre urbain.) ont été identifiées à l'aide d'observations via Google Earth.

Validation de la classification

Une analyse de classification a été réalisée sur une image composite en utilisant la méthode de classification supervisée assistée par maximum de vraisemblance. Cette approche consiste à attribuer à chaque pixel une classe en fonction de sa similitude avec des comptes numériques d'objets géographiques de référence préalablement déterminés sur l'image (Zones d'intérêt), appelés parcelles d'entraînement, et validés en utilisant GOOGLE EARTH.

La matrice de confusion fournit une vue détaillée des erreurs de classification pour chaque classe. Elles présentent le nombre de pixels correctement classés le long de la diagonale, et en dehors de celle-ci, le nombre de pixels incorrectement classés. L'indice de kappa (0.99) obtenus indique que la performance de la classification est statistiquement acceptable.

Tableau IV.2 Matrice de confusion de la classification par maximum de vraisemblance

Classes	Agglomération	Agriculture	Forêt claire	Forêt dense	Broussailles	Plan d'eau	Sol nue	Total
Agglomération	1621	0	0	0	0	0	0	1621
Agriculture	0	1215	0	0	0	0	0	1215
Forêt claire	0	0	50	0	0	0	0	50
Forêt dense	0	0	6	364	0	0	0	372
Broussailles	0	0	3	0	453	0	0	456
Plan d'eau	0	0	0	0	0	1354	0	1354
Sol nu	0	1	0	0	0	0	215	216
Total	1621	1216	59	364	453	1354	215	5284

Tableau IV.3 Matrice de confusion de la classification par maximum de vraisemblance (en pourcentage)

Classes	Agglomération	Agriculture	Foret claire	Foret dense	Broussailles	Plan d'eau	Sol nue	Total
Agglomération	100	0	0	0	0	0	0	30.68
Agriculture	0	92.02	0	0	0	0	0	22.99
Foret claire	0	0	84.75	0	0	0	0	0.95
Foret dense	0	0	10.17	100	0	0	0	7.04
Broussailles	0	0	5.08	0	100	0	0	8.63
Plan d'eau	0	0	0	0	0	100	0	25.62
Sol nue	0	0.08	0	0	0	0	100	4.09
Total	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

L'objectif optimal serait d'obtenir une matrice où les valeurs sur la diagonale sont de 100 %. Cela indiquerait que pour chaque classe, tous les pixels observés dans les zones d'entraînement ont été correctement attribués à la classe appropriée lors de la classification.

Fréquemment, des valeurs dépassant les 80 % sur la diagonale sont généralement considérées comme excellentes en ce qui concerne la précision de la classification. Cependant, une confusion thématique très marquée est observée entre (**Tableau IV.2 et IV.3**)

- Forêt dense et la forêt claire.
- Broussailles et la forêt claire.

IV.2.1.1.B. Extraction et analyse des linéaments à partir d'images satellitaires

Les linéaments sont des structures linéaires visibles en surface, correspondant souvent à des fractures, failles ou discontinuités géologiques profondes. Ils jouent un rôle crucial dans les études de Recharge, notamment en tant qu'indicateurs indirects des zones de perméabilité accrue et donc de la présence potentielle d'eau souterraine (**Rahmani et al., 2017**).

Dans le cadre de cette recherche, les linéaments ont été extraits à partir d'images satellitaires à l'aide de méthodes automatiques et manuelles, en combinant plusieurs techniques de traitement d'image et en exploitant des logiciels spécialisés (ENVI, ArcMap et PCI Geomatica).

1. Méthodologie d'extraction automatique

L'extraction automatique repose sur une succession d'opérations (**Figure IV.1**) : prétraitement, rehaussement, filtrage, et vectorisation. Des techniques telles que :

- **L'Analyse en Composantes Principales (ACP)**, permettant de synthétiser les informations spectrales et d'améliorer le contraste géologique ;
- **Les compositions colorées (RVB et fausses couleurs)**, facilitant l'interprétation visuelle des structures ;
- **Les rapports de bandes (band ratios)**, réduisant l'effet topographique et accentuant les contrastes entre les surfaces ;
- **Les filtres directionnels**, appliqués selon différentes orientations ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$), pour mettre en évidence les linéaments selon leur orientation principale.

Ces traitements ont été appliqués sur les images issues de satellites comme Landsat et ASTER. Le module LINE de Geomatica PCI a été utilisé pour générer automatiquement une carte vectorielle des linéaments.

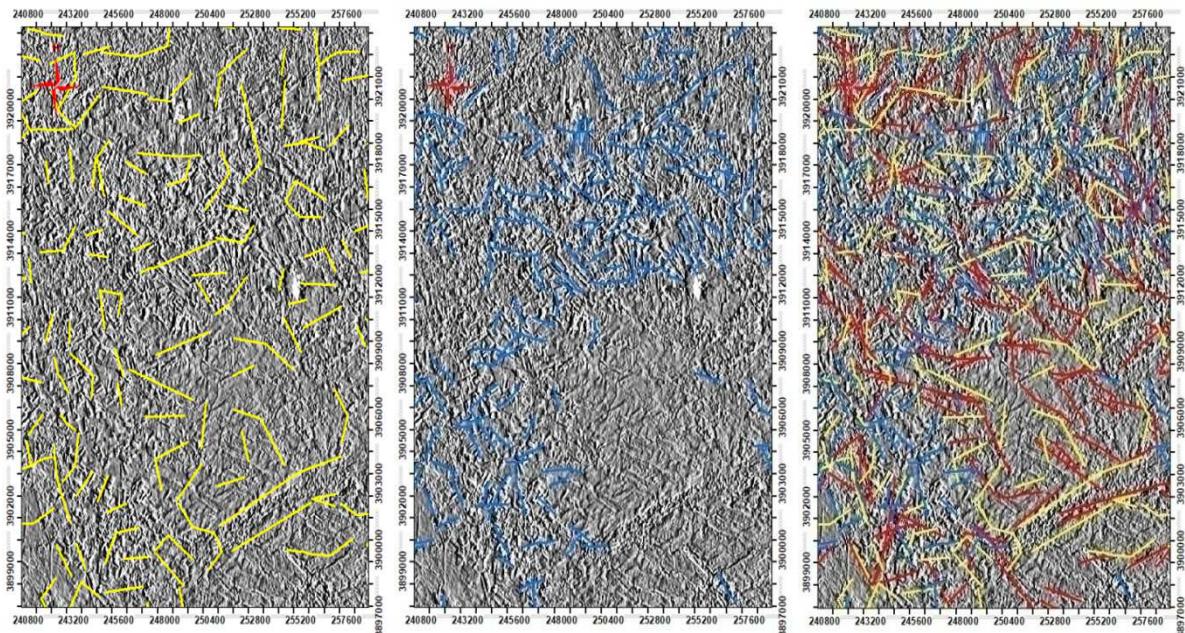


Figure IV.1 Extraction automatique des linéaments

2. Extraction manuelle des linéaments

Parallèlement, une extraction manuelle a été effectuée en interprétant visuellement les images traitées (**Figure IV.2**). Cette approche permet de compléter et valider les résultats

automatiques. Une étape préalable de vectorisation des éléments anthropiques (routes, rivières, etc.) a été nécessaire pour éviter les confusions.

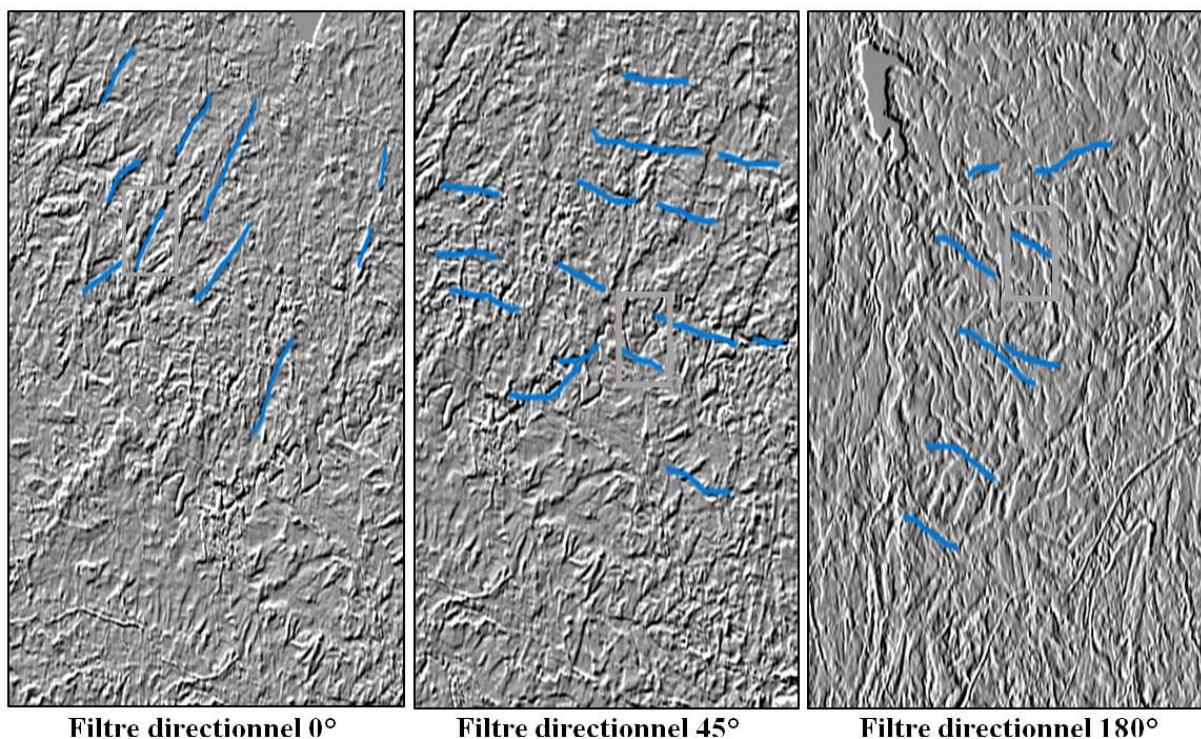


Figure IV.2 Extraction manuelle des linéaments.

3. Analyse statistique et cartographie

Les linéaments extraits ont été analysés statistiquement à l'aide du logiciel **RockWorks**, permettant d'identifier les orientations dominantes. Enfin, la carte de densité des linéaments a été réalisée sous ArcMap à l'aide de l'outil Spatial Analyst, fournissant une représentation spatiale des zones à forte concentration en structures linéaires. Cette carte constitue une information géologique clé dans le processus de la délimitation des zones à forte perméabilité ou influencées par les structures tectoniques.

IV.2.1.1.C. Carte de précipitation

Les précipitations jouent un rôle crucial dans la délimitation des zones potentielles de recharge des eaux souterraines, étant la principale source naturelle de recharge qui alimente les aquifères. La carte des précipitations a été élaborée sur ArcMap 10.8 à partir des données de précipitations moyennes enregistrées dans neuf stations pluviométriques situées dans et autour du bassin de Oued Isser-Sikkak sur une période allant de 1970 à 2010. La méthode de

krigeage a été employé pour interpoler les données et générer la carte des précipitations en utilisant l'outil "Kriging" de la barre d'outils "Spatial Analyst"

IV.2.1.1.D. Carte Lithologique

La lithologie du terrain joue un rôle déterminant dans la capacité de stockage des eaux souterraine (**Aju et al., 2021**). Afin d'obtenir la carte lithologique numériquement vectorisés du bassin de Oued Isser-Sikkak, une digitalisation manuelle de la carte géologique de la région d'Oran, établie par **Louis Gentil en 1902** à une échelle de 1/200000, a été réalisée. Les données lithologiques ont été converties en vecteurs et polygones, facilitant ainsi la classification des différentes unités géologiques dans ArcMap (version 10.8) d'ArcGIS.

Pour simplifier la tâche de numérisation et d'attribution des données lithologiques, un outil spécifique appelé ArcToolbox a été développé dans ArcGIS. Cet outil offre un ensemble de fonctionnalités accessibles via des menus, des barres d'outils ou des raccourcis, dédiées à la numérisation, l'attribution et la symbolisation des données. Il permet également de mettre à jour et de traiter facilement les tables d'attributs. Les symboles géologiques orientés et non orientés sont gérés de manière simple et efficace grâce à l'utilisation de fonctionnalités spécifiques et de polices cartographiques

IV.2.1.1.E. Carte de la densité de drainage

La densité de drainage constitue l'un des indicateurs essentiels pour évaluer la recharge des eaux souterraines (**Magesh et al., 2012**) elle représente la mesure de la densité des cours d'eau dans une zone donnée, exprimée en kilomètres de cours d'eau par kilomètre carré de superficie. (**Mcmurtry et al., 1973**) La création et la représentation graphique de la carte de densité de drainage ont été effectuées en utilisant l'outil "densité de ligne" dans le logiciel arcGIS, en se basant sur le réseau hydrographique de la zone d'étude.

IV.2.1.1.F. Carte de la pente

Le Modèle Numérique de Terrain (MNT), généralement sous forme de fichier raster au format TIFF, contient des données d'altitude pour chaque cellule, ce qui nous permet d'avoir une représentation détaillée du relief de la zone d'étude. En utilisant le module "Slope" de la barre d'outils "3D Analyst" dans le logiciel ArcMap 10.8, nous avons pu calculer l'inclinaison

de la pente à partir du MNT. Ces calculs nous ont fourni des valeurs exprimées en degrés, offrant ainsi une mesure quantitative de la pente du terrain. (**Saouli, 2018**).

IV .2.2. Génération des cartes de potentielle de recharge

IV.2.2.1. Délimitation des zones potentielles de recharge par la méthode AHP

Le processus de la méthode AHP pour la délimitation des zones potentielles de recharge est représenté par l'organigramme de la **Figure IV.3**. Il illustre l'approche analytique adoptée pour intégrer et hiérarchiser les critères influents dans un cadre décisionnel structuré.

IV.2.2.1.1. Détermination des coefficients de pondération

Les poids ou coefficients de pondération ont été calculés en utilisant la méthode des comparaisons par paire, mise au point par **Saaty (1977)**, dans le contexte du processus d'analyse hiérarchique (Analytical Hierarchy Process, AHP). Il permet de produire des coefficients de pondération standardisés dont la somme totale est égale à 1. La procédure se présente comme suit (**Kamznan, 2021**) :

Il consiste à évaluer l'importance relative de chaque élément au sein d'un même niveau de la hiérarchie en les comparant deux par deux par rapport à l'élément du niveau supérieur immédiat.

Ensuite, une matrice carrée réciproque composée des évaluations des rapports de poids ($K \times K$) a été créée, où K exprime le nombre des critères comparés, dans le cadre de cette étude $K=6$. Dans cette matrice, chaque élément est représenté par a_{ij} , où i et j indiquent respectivement les lignes et les colonnes. Il est important de noter que la diagonale principale de la matrice (a_{ij}) est égale à 1, et que la valeur réciproque de chaque élément (a_{ij}) est égale à $1/a_{ij}$.

Les coefficients de pondération des six facteurs sont estimés en appliquant une série de comparaisons par paire, où l'importance de chaque critère lors de la génération de la carte des zones potentielles de recharge est prise en considération. **Saaty** a défini une échelle numérique de neuf niveaux pour évaluer l'importance d'un critère par rapport à un autre.

Tableau IV.4 Matrice de comparaison par paires et poids normalisés en pourcentage des critères utilisés

Facteurs	L	DL	P	S	OS	DD	Poids
Lithologie L	1	3	4	4	3	5	0.410
Densité des lineaments DL	1/3	1	1	1	2	3	0.141
Precipitation P	1/4	1	1	2	4	4	0.188
Pente S	1/4	1	½	1	3	3	0.139
Occupation des sols OS	1/3	1/2	¼	1/3	1	2	0.0739
Densité de drainage DD	1/5	1/3	¼	¼	1/2	1	0.0465

Par la suite, ces valeurs de comparaison ont été utilisées dans un calcul de vecteur propre afin de déterminer les coefficients de pondération de chaque critère (**Doumouya et al., 2012**)

L'analyse du **tableau IV.4** révèle que le facteur ayant le poids le plus important est la lithologie (0.410). Ensuite viennent respectivement les précipitations (0.188), la densité des linéaments (0.141), la pente (0.139), l'occupation du sol (0.0739) et la densité de drainage (0.0465). Le coefficient de cohérence (CR) de la matrice de comparaison par paire de la présente étude est de 0,04. Cela signifie qu'il est acceptable pour effectuer l'analyse. Si ce coefficient est supérieur à 0,1, la comparaison doit être revue.

L'évaluation des cotes associe au sous classes

L'évaluation des cotes des sous-classes de chaque critère est une étape délicate nécessitant une approche judicieuse. À cette fin, une échelle de cotes a été utilisée pour assurer une détermination homogène de ces derniers. Le **tableau IV.5** présente les valeurs de cotes attribuées à toutes les sous-classes des différents critères pris en considération dans cette étude.

Tableau IV.5 Classification des critères d'influence pour les zones de potentiel des eaux souterraines

Les facteurs influençant	Sous -classes	Rang	Notation	Le poids normalisé (%)
Lithologie	Quaternaire (Alluvions)	9	Très élevé	41.3%
	Pliocène (calcaire lacustre et alluvions pierreuses)	8		
	Jurassique supérieur (calcaire et dolomies)	7	Elevé	
	Miocène moyen (grès)	6		
	Éocène supérieur (calcaire recouvert de grès et de marne)	5	Moderate	
	Miocène supérieur (calcaire)	4	Faible	
	Éocène moyen (grès et marnes)	3		
Occupation du sol	Miocène inférieur (marnes grises)	2	Très faible	
	Centre urbain	1	Très faible	7.3%
	Sol nu	1	Très faible	
	Forêt dense	3	Faible	
	Broussailles	3	Faible	
	Forêt claire	5	Moyen	
	Agriculture	7	Elevé	
Pente	Plan d'eau	8	Très élevé	
	0-3	7	Très élevé	14%
	3-9	6	Elevé	
	9-15	4	Moyen	
	15-23	2	Faible	
Densité des linéaments	23-67	1	Très faible	
	0-0,6	1	Très faible	13.9%
	0,6-1,3	2	Faible	
	1,3-1,9	3	Moyen	
	1,9-2,6	4	Elevé	
Densité de drainage	0-0,3	6	Très élevé	4.6%
	0,3-0,7	5	Elevé	
	0,7-1	4	Moyen	
	1-1,5	3	Faible	
	1,5-2,6	2	Très faible	

Précipitation	299-351	2	Très faible	18.9%
	351-403	4	Faible	
	403-455	5	Moyen	
	455-506	6	Elevé	
	506-558	7	Très élevé	

IV.2.2.1.2. Agrégation des facteurs par pondération

Dans cette étude, pour l'agrégation des critères, nous avons utilisé la méthode d'agrégation par pondération. Cette méthode implique la sommation des valeurs standardisées et pondérées de chaque critère qui contribue à l'élaboration de l'indicateur GWPZ (**Youan et al., 2011**). L'équation **61** illustre parfaitement cette approche.

$$GWPZ = W_L \cdot X_L + W_P \cdot X_P + W_{DL} \cdot X_{DL} + W_S \cdot X_S + W_{OS} \cdot X_{OS} + W_{DD} \cdot X_{DD} \quad (61)$$

Où

GWPZ : Les zones favorable a la recharge potentiel (Groundwater potential zones)

wi : Le poids du critère i et **Xi** : valeur standardisée du critère de facteur i

L : lithologie, **P**: précipitation, **DL** : Densité des linéaments, **S** : Pente, **OS** : Occupation du sol, **DD** : densité de drainage

Toutes les cartes thématiques à savoir lithologie, précipitation, densité des linéaments, densité de drainage, densité de drainage et occupation du sol ont été générées dans Arcgis 10.8 , ensuite ces couches ont été converti en format raster (résolution de 30 m) et superposé , l'outil « weighted overlay » de modèle « spatial analysis tool » a été utilise pour la superposition des 6 couches thématiques.

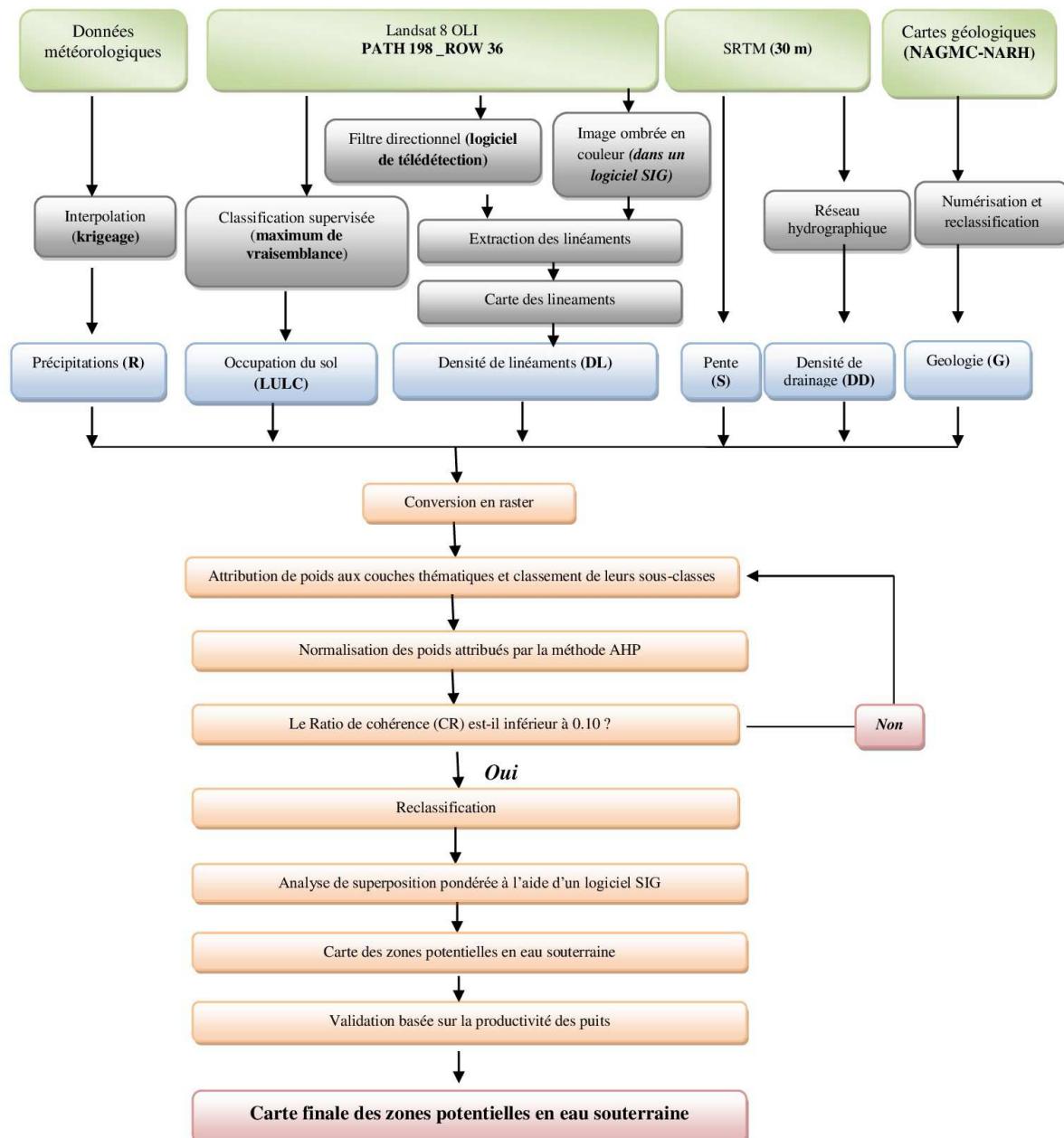


Figure IV.3 Organigramme méthodologique adapté pour la délimitation des zones potentielles en eau souterraine

IV.2.2.2. Délimitation des zones potentielles de recharge par L'apprentissage automatique

La génération d'une carte des potentialités en eau souterraine à l'aide de techniques d'apprentissage automatique repose sur l'intégration de deux types fondamentaux de données

d'entrée. D'une part, une base de données géoréférencée des points d'eau (forages, puits, etc.) est requise, comprenant des informations géologiques et hydrogéologiques complètes et précises. D'autre part, un ensemble de variables explicatives, élaborées à partir de couches thématiques représentatives des caractéristiques environnementales, géomorphologiques, géologiques et géophysiques du terrain, constitue les prédicteurs du modèle. La variable cible, définissant le potentiel en eau souterraine, est modélisée de manière multicatégorielle, à travers une classification en cinq niveaux : très faible, faible, moyen, élevé et très élevé. Cette approche permet d'estimer, pour chaque point spatial, la probabilité d'obtenir un forage productif, c'est-à-dire susceptible d'atteindre la nappe phréatique avec un rendement satisfaisant.

IV.2.2.2.1. Variable cibles : données des puits d'eau

Dans cette étude, nous avons exploité une base de données constituée de 72 puits répartis sur l'ensemble du sous-bassin de l'Oued Isser-Sikkak, tel que délimité et analysé dans les chapitres précédents (**Figure IV.4**). Ces points d'eau ont été utilisés à la fois pour l'entraînement (70%) et la validation (30%) du modèle d'apprentissage automatique. La classification du potentiel en eau souterraine repose sur le débit d'exploitation observé au niveau des puits : les sites dont le débit est inférieur ou égal à 10 l/s sont considérés comme présentant un potentiel très faible ; ceux dont le débit est compris entre 10 et 20 l/s sont classés comme à faible potentiel ; entre 20 et 30 l/s, le potentiel est jugé moyen ; entre 30 et 40 l/s, il est élevé ; enfin, les débits supérieurs ou égaux à 40 l/s correspondent à un potentiel très élevé

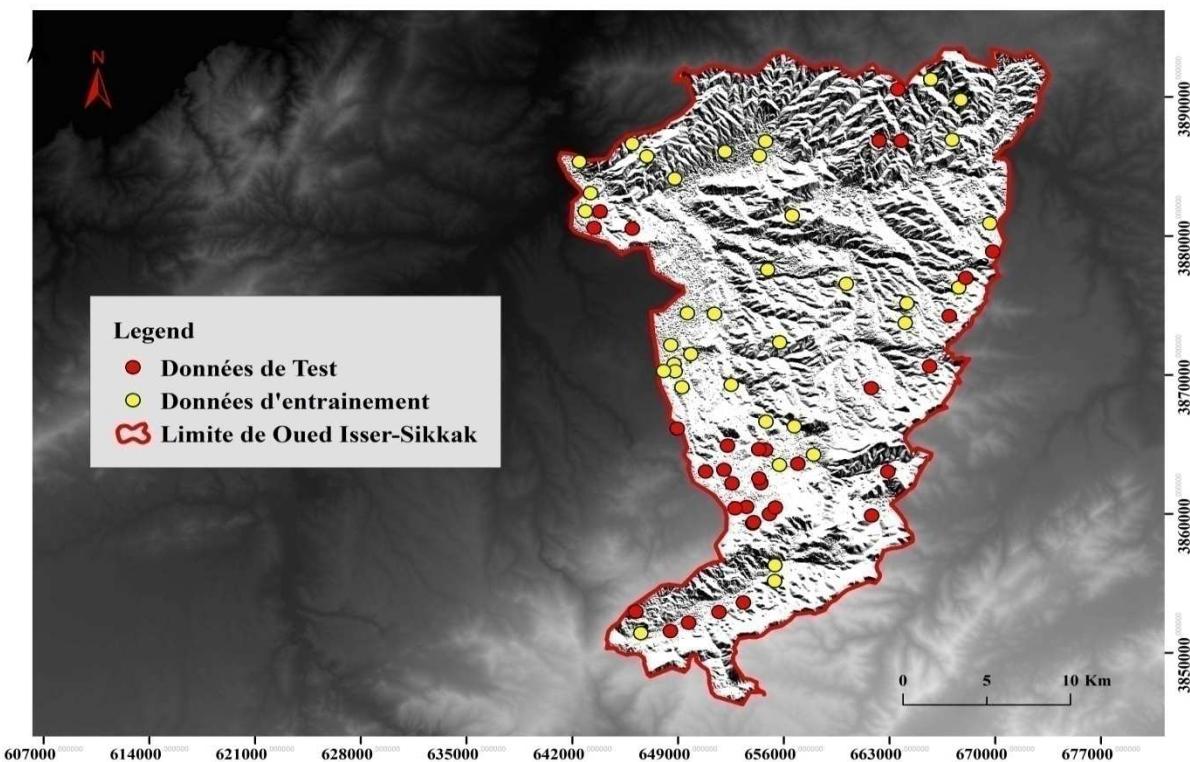


Figure IV.4 Répartition géographique des points d'eau exploités dans le cadre de cette étude.

VI.2.2.2. Procédure de cartographie prédictive basée sur le Machine Learning

Les démarches adoptées pour la cartographie prédictive des potentialités en eau souterraine sont décrites ci-après, et leur synthèse est illustrée dans la **Figure IV.5**.

La première étape consiste à constituer la base de données d'apprentissage et de validation. Pour cela, une base de 72 puits géoréférencés, répartis dans l'ensemble du sous-bassin, a été utilisée. À chaque point d'eau sont associées les valeurs extraites des différentes cartes thématiques (lithologie, pente, densité des linéaments, densité de drainage, occupation du sol, précipitation). Cette base constitue l'ensemble des données d'entrée nécessaires à la modélisation.

Le jeu de données est ensuite subdivisé en deux ensembles :

- **70 %** affectés à l'apprentissage (données d'entraînement),
- **30 %** à la validation (données de test).

Les modèles sont construits à partir des données d'entraînement afin d'identifier les relations entre les variables explicatives (facteurs environnementaux) et la variable cible (classe des forages). Une fois les algorithmes entraînés et ajustés, ils sont appliqués aux données de test pour évaluer leur capacité à prédire correctement la classe des points.

L'efficacité des modèles est mesurée à l'aide de deux indicateurs principaux :

- **Le score de test**, qui représente la proportion de prédictions correctes par rapport au nombre total de cas testés (il varie entre 0 et 1).
- **L'aire sous la courbe ROC (AUC)**, qui permet d'évaluer la capacité du modèle à discriminer entre les différentes classes. La courbe ROC (Receiver Operating Characteristic) trace le taux de vrais positifs (TVP) en fonction du taux de faux positifs (TFP) pour différents seuils de classification.

Dans ce contexte, les seuils de classification sont établis selon des classes de probabilité correspondant aux niveaux suivants : très faible (0), faible (1), moyen (2), élevé (3) et très élevé (4). L'AUC fournit une mesure synthétique des performances du modèle : une AUC de 0,5 indique une absence de discrimination, tandis que des valeurs supérieures à 0,7, 0,8 ou 0,9 sont respectivement considérées comme acceptables, excellentes, voire exceptionnelles (**Hosmer et Lemeshow, 2000**).

À l'issue de cette phase d'évaluation, seuls les modèles ayant obtenu les meilleures performances sont retenues pour la génération des cartes finales. Pour ce faire, un maillage régulier couvrant l'ensemble de la zone d'étude est généré (sous forme raster à 30 m de résolution). Chaque pixel reçoit les valeurs des variables explicatives, et les modèles appliquent les relations apprises pour prédire la classe de chaque pixel. Si un modèle détecte, pour un pixel donné, une configuration de variables semblable à celle d'un point d'apprentissage associé à une classe élevée de la variable cible, ce pixel sera également classé dans une catégorie élevée.

Le résultat final est une carte prédictive continue, où chaque pixel est associé à une classe allant de 0 à 4, traduite visuellement à travers une carte à cinq couleurs représentant les niveaux de potentialité en eau souterraine.

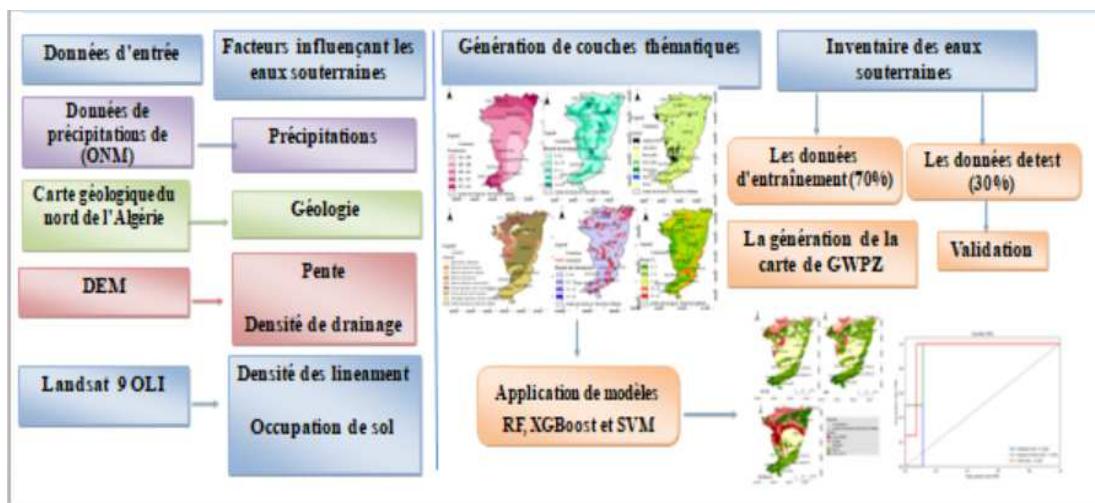


Figure IV.5 Méthodologie pour la cartographie du potentiel en eau souterraine en basant sur l'apprentissage automatique.

IV.3. Résultats

IV.3.1. Génération des cartes thématiques

IV.3.1.1. Carte d'occupation du sol

Au niveau du bassin versant de l'Oued Isser-Sikkak, la répartition spatiale de l'occupation du sol montre plusieurs domaines. Les terrains agricoles dominent la zone étudiée, couvrant 623 km², soit environ 75 % du bassin (**figure IV.6**).

Les formations forestières, comprenant des forêts denses et claires, couvrent environ 3 % de la superficie totale, concentrées principalement dans la partie Sud-Ouest du bassin. Les zones de broussaille totalisent une superficie de 72,7 km², représentant 8,8 % du bassin, et sont réparties sur des pentes fortes à très fortes. Le reste de la superficie du bassin est occupé par des domaines improductifs, comprenant des terrains nus, les plans d'eau et des zones urbaines. Les terrains nus sont observés dans la partie Nord-Ouest et centrale du bassin, occupant 9,92 % de sa surface. Les plans d'eau du bassin, tels que le barrage de Meffrouche et le barrage de Sid Abdele, ne couvrent que 0,32 % de sa superficie totale. Enfin, les zones urbaines sont nettement concentrées dans la partie du centre-Ouest du bassin, couvrant une superficie estimée à 39,7 km², soit environ 4,8

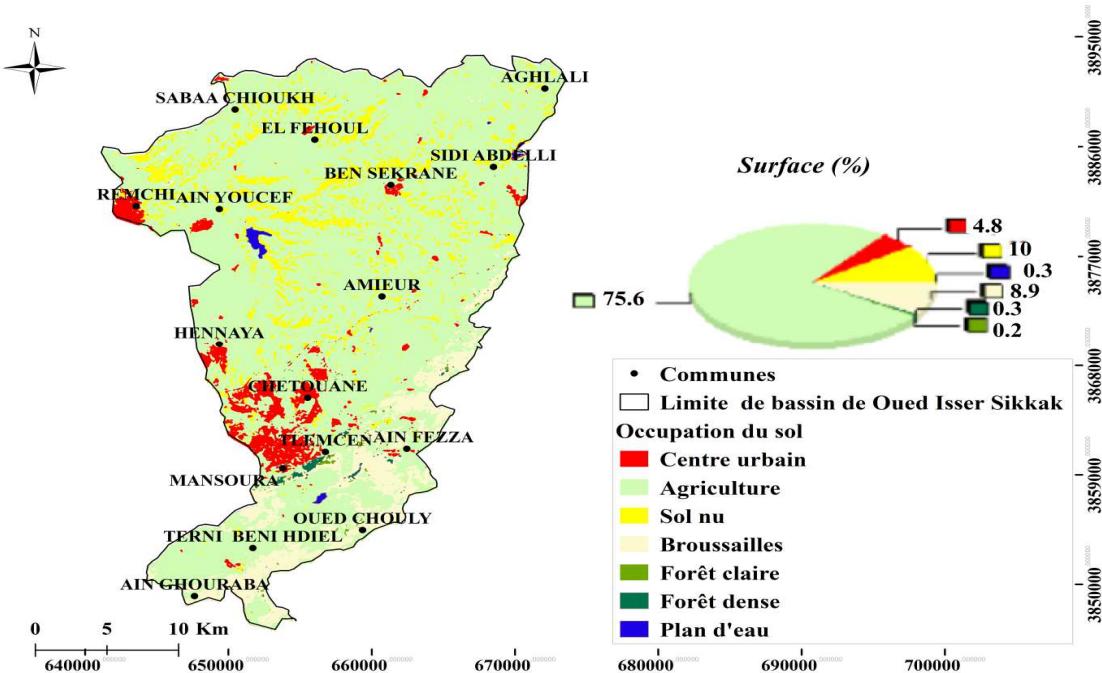


Figure IV.6 La carte d'Occupation du sol de bassin de oued Isser-Sikkak

IV.3.1.2. Carte de précipitation

Cette étude a analysé les données de précipitations recueillies au cours des 40 années (1970 à 2010) auprès de neuf stations météorologiques situées dans et autour du sous-bassin versant. Les précipitations annuelles moyennes variaient de 299 mm à 558 mm et ont été regroupées en cinq catégories : très faible (299-351 mm), faible (351-404 mm), modéré (403-455 mm), élevé (455-506 mm) et très élevé (506-558 mm) (**Figure IV.7**). La distribution des précipitations dans la région étudiée est principalement influencée par l'altitude, avec généralement des niveaux plus élevés dans les régions montagneuses et des niveaux plus faibles dans les zones de basse altitude. Cette relation entre l'altitude et les précipitations est intimement liée à la topographie locale. Ainsi, une tendance à une augmentation des précipitations du Nord vers le Sud a été généralement observée.

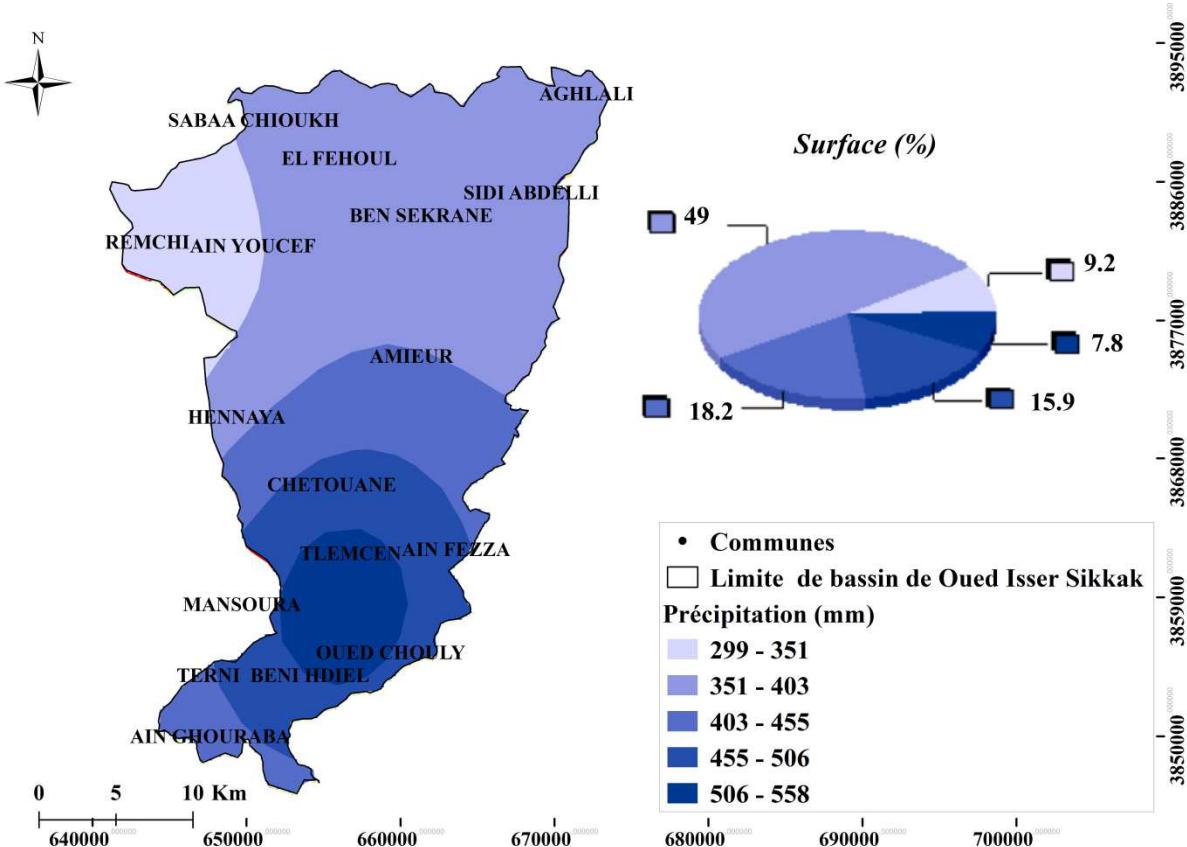


Figure IV.7 La carte de précipitation de bassin de oued Isser-Sikkak

IV. 3.1.3. Carte lithologique

Le bassin versant de l'oued Isser-Sikkak comprend une variété de formations géologiques, principalement constituées d'alluvions, de calcaires lacustres et alluvions caillouteux, de calcaires et dolomites, de grès et de marnes, couvrant une période allant du quaternaire au jurassique supérieur (**Figure IV.8 et IV.9**).

Les formations à forte perméabilité, comme les alluvions quaternaires, les calcaires lacustres et alluvions caillouteux du pliocène, les calcaires et dolomies du jurassique supérieur, ainsi que les grès du miocène moyen, sont principalement situées dans les parties Nord-Ouest, centrale et sud du bassin, occupant une grande partie de sa superficie (78,1%).

Quant aux zones à perméabilité moyenne, elles comprennent les calcaires surmontés de grès et de marnes de l'Éocène supérieur, ainsi que les calcaires du miocène supérieur observés dans les parties Nord et Nord-Ouest du bassin, occupant environ 10,5 % de sa superficie.

Enfin, les zones à faible perméabilité, telles que les grès et les marnes de l'Éocène moyen, ainsi que les marnes grises du Miocène inférieur, se trouvent au Nord et Nord-Est du bassin, occupant 11,3 % de sa superficie totale et ne favorisant pas la recharge des eaux souterraines.

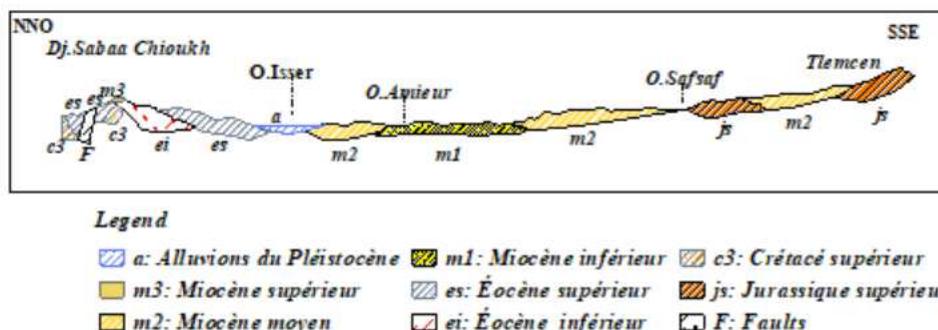


Figure IV.8 Coupe géologique du bassin de l'Oued Isser-Sikkak (1/200.000) (Gentil, 1902)

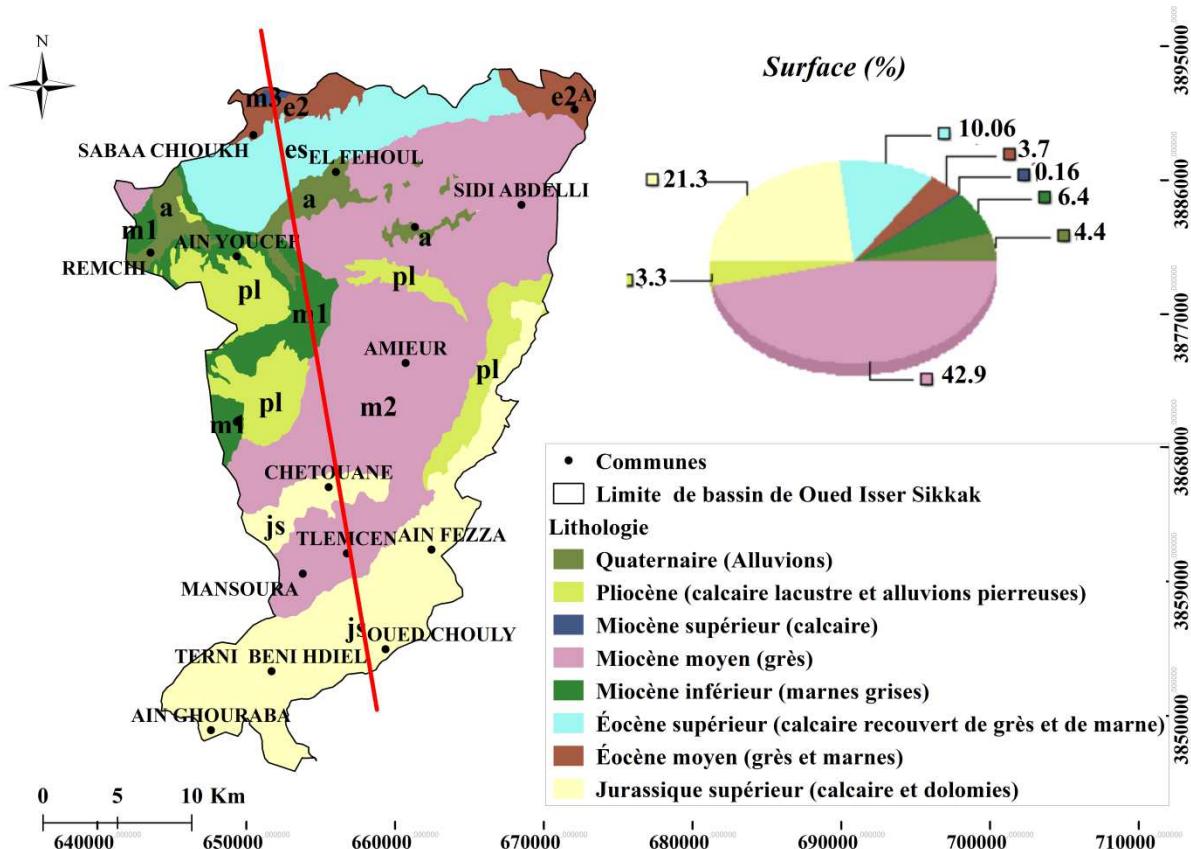


Figure IV.9 Répartition des ensembles lithologiques sur le bassin versant de l'oued Isser-Sikkak

IV.3.1.4. Carte de la densité des linéaments

L'analyse de cette carte met en évidence quatre classes de répartition des densités de linéaments sur le territoire (**Figure IV.10**). Les zones présentant une densité de fracturation très élevée (1,9 à 2,6 km/km²) sont presque rares et occupent seulement 0,7 % du territoire, principalement concentrées dans la partie centrale du domaine. Les zones à densité élevée (1,3 à 1,9 km/km²) se trouvent principalement au nord et au centre du bassin, couvrant 13,8 % du territoire. Les densités moyennes de fracturation (0,6 à 1,3 km/km²) sont observées un peu partout dans le domaine et occupent 33,3 % du territoire. Elles se trouvent exclusivement dans les formations calcaires et dolomitiques du jurassique supérieur, dans les calcaires du miocène et dans les calcaires surmontés de grès et de marnes de l'Éocène moyen supérieur. Le reste du domaine, représentant 52,4 %, est couvert par une faible densité de linéaments (0 à 0,6 km/km²) (**Figure IV.11**). L'analyse de la fracturation indique que celle-ci est généralement de niveau moyen dans cette région et affecte la majorité des formations géologiques du secteur.

Les linéaments ont été analysés de manière statistique en utilisant le développement de rosaces directionnelles, qui représentent le nombre de linéaments dans chaque direction. Un certain nombre de chercheurs ont exploré l'analyse statistique des linéaments pour étudier la géométrie du réseau de linéaments et déterminer les directions dominantes à l'échelle régionale (Pretorius et Partridge, 1974). Le diagramme en rose des linéaments résultants affiche leur direction principale comme étant Est-Ouest, ce qui est probablement dû à l'allongement des affleurements dans la direction Nord-Sud.

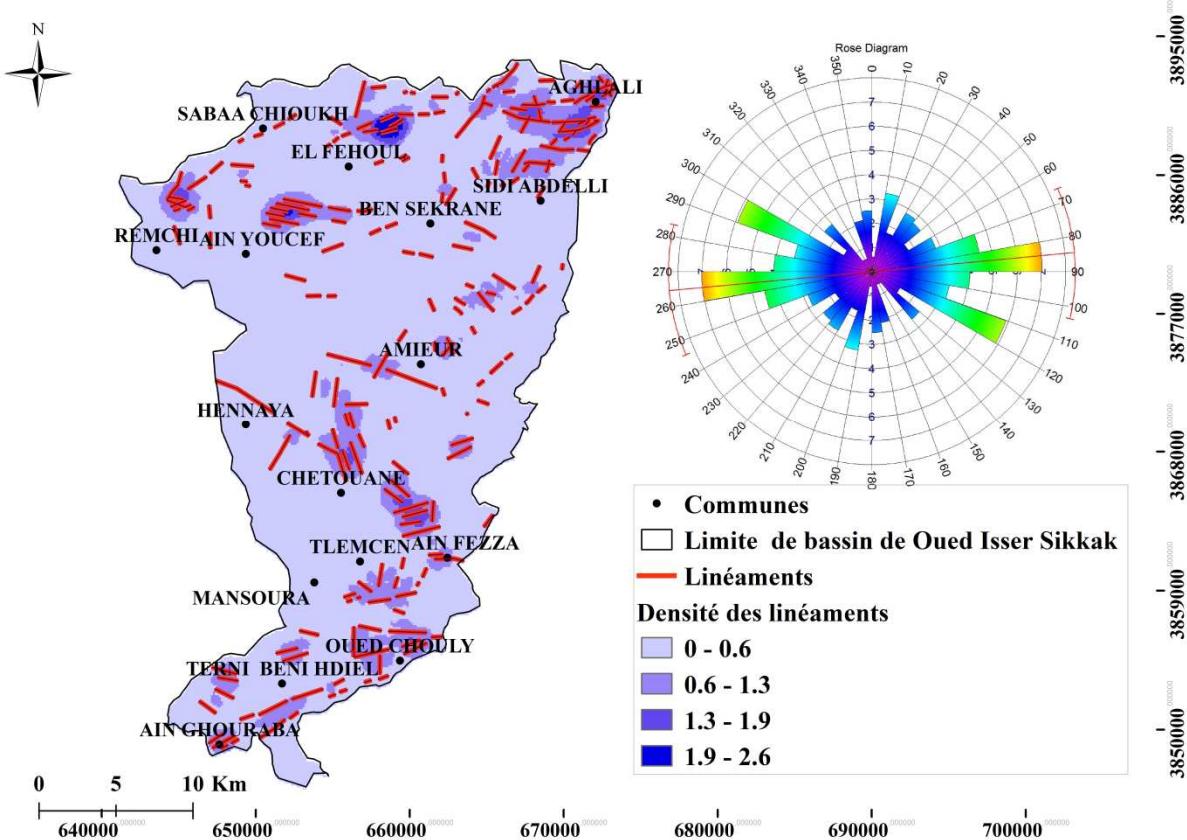


Figure IV.10 La carte de densité des linéaments du bassin d'oued Isser-Sikkak

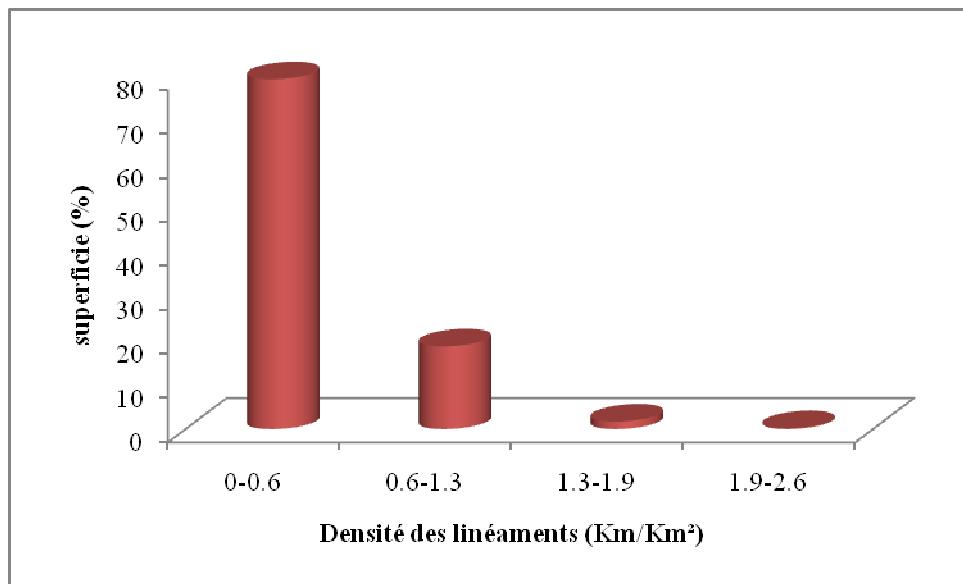


Figure IV.11 Distribution des classes densité des linéaments dans le bassin versant de l'Oued Isser-Sikkak

IV.3.1.5. Carte de densité de drainage

Dans cette étude, les valeurs de densité de drainage obtenues ont été classées en cinq catégories (Figure IV.12) : très faible ($<0,3 \text{ km/km}^2$), faible ($0,3-0,7 \text{ km/km}^2$), modérée ($0,7-1 \text{ km/km}^2$), élevée ($1-1,5 \text{ km/km}^2$) et très élevée ($1,5-2,5 \text{ km/km}^2$). Le poids le plus élevé est attribué à la classe de densité de drainage inférieure à $0,3 \text{ km/km}^2$, laquelle couvre plus de 30 % de la superficie du bassin.

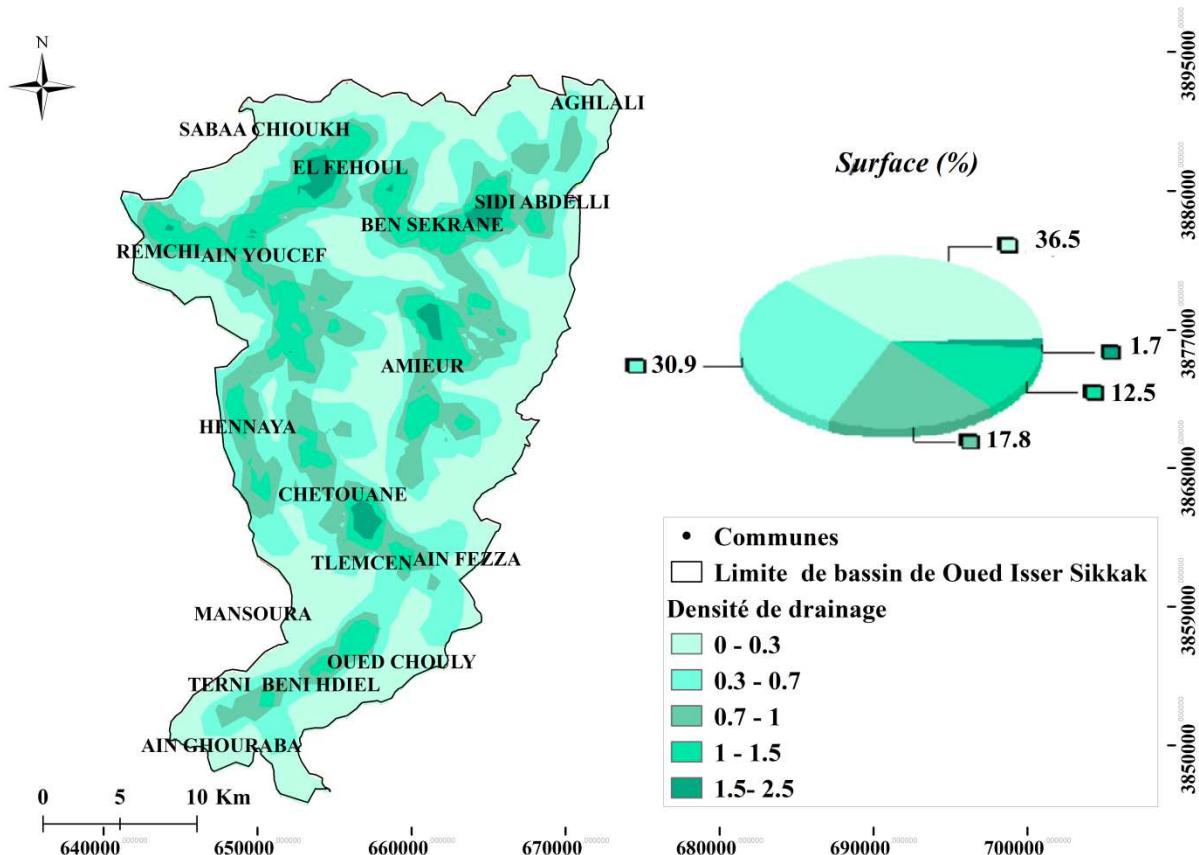


Figure IV.12 .La carte de densité de drainage de bassin de Oued Isser-Sikkak

IV.3.1.6. Carte de pente

Dans le bassin versant de l'Oued Isser-Sikkak, les pentes varient selon plusieurs catégories : très faible (0-3), faible (3 -9), modérée (9 -15), élevée (15 -23), et très élevée (> 23) (Figure IV.13). La classe prédominante est celle des pentes faibles ($3^\circ-9^\circ$), couvrant une superficie de $375,4 \text{ km}^2$, soit 45 % de la région étudiée. Les zones avec des pentes de 0-3 et de 9-15 représentent respectivement $176,7 \text{ km}^2$ (21,4 %) et $190,6 \text{ km}^2$ (23,1 %) de la zone. Les zones restantes (11 %) sont réparties entre les deux dernières catégories. Les régions au sud-est et au nord du bassin présentent des pentes très prononcées (fortes à très fortes), correspondant à des

zones montagneuses. En revanche, la partie nord-ouest du bassin se caractérise par un relief plus doux, avec des pentes généralement inférieures à 9%.

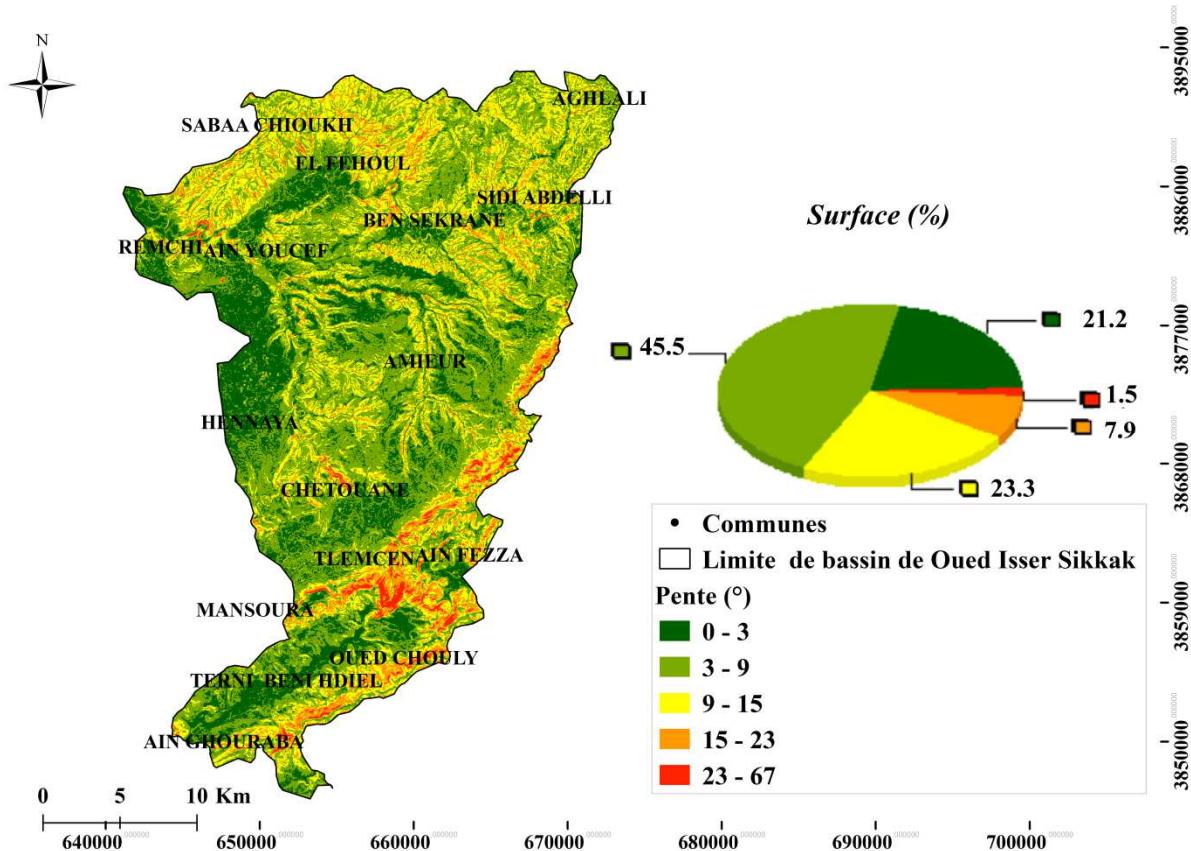


Figure IV.13 .La carte des pentes du bassin de oued Isser-Sikkak

IV.3.2. Délimitation des zones potentielles de recharge par AHP

Dans les zones arides à semi-arides, les précipitations annuelles sont extrêmement limitées. Dans cette situation, les eaux souterraines deviennent la meilleure option en tant que source d'eau exploitable. Cela souligne l'importance d'identifier les zones potentielles de recharge et d'adopter une gestion stricte et efficace pour garantir la durabilité de cette ressource, qui diminue progressivement.

Dans le travail qui suit, les facteurs influençant l'existence de ces zones ont été déterminés avec une grande précision. Il s'agit de la lithologie, des précipitations, de la densité des linéaments, de la densité de drainage, de l'occupation du sol et de la pente. Un nouveau modèle empirique a été développé via l'intégration synergique des systèmes d'information géographique (SIG), de la télédétection (RS) et du processus d'analyse hiérarchique (AHP),

permettant la fusion des cartes thématiques des facteurs contrôlant la recharge. Son implémentation standardise l'estimation des zones potentielles de recharge par la génération systématique et l'intégration pondérée des couches thématiques correspondantes.

Suite à l'agrégation et à l'intégration des cartes thématiques des six facteurs, nous avons obtenu la carte illustrée dans **la figure IV.14**. Cette carte met en évidence les zones potentielles des eaux souterraines dans le bassin de l'Oued Isser-Sikkak. Cette carte a été divisée en 5 classes : Très faible, faible, moyen, élevé et très élevé (**Tableau IV.6**)

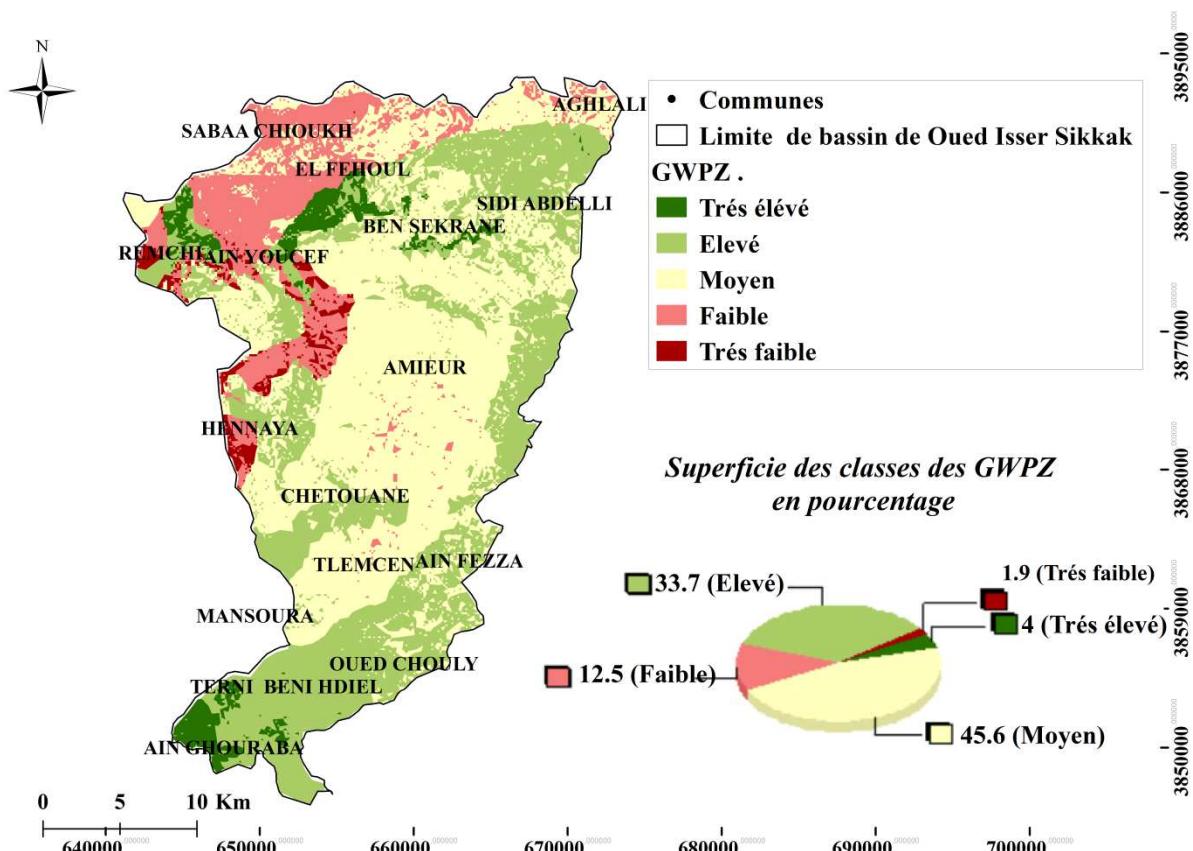


Figure IV.14 La cartes des zones potentiel de recharge générées par la méthode AHP

Tableau. IV.6 Les classes du potentiel de la recharge du bassin de Oued Isser-Sikkak selon la méthode AHP

Les classes de potentiel de recharge	Superficie (Km ²)	Pourcentage de superficie (%)
Très élevé	34.65	4.2
Elevé	322.1625	39.05
Moyen	334.125	40.5

Faible	102.3	12.4
Très Faible	14.025	3.7

Seulement 3.7% de la superficie du bassin est occupée par des zones à très faible potentiel, principalement situées dans la partie nord-ouest du bassin. Ces régions sont couvertes par des formations géologiques à faible perméabilité, notamment les marnes grises du Miocène inférieur, caractérisées par des pentes relativement élevées. Dans cette zone, une densité très faible de linéaments et une densité de drainage très élevée ont été enregistrées, ce qui entrave l'infiltration des eaux de précipitations à travers ces terrains.

Les zones à faible potentiel représentent 12.4% de la superficie totale, s'étendant également dans la partie nord et nord-ouest de la région étudiée. Cette partie se caractérise par une faible densité de linéaments et une densité de drainage relativement élevée, ainsi que par l'affleurement des calcaires surmontés de grès et de marnes de l'Éocène supérieur sur des pentes élevées.

Le bassin est principalement dominé par des zones à potentiel moyen, couvrant 40,5% de la superficie totale (km^2), et occupant principalement la partie centrale du bassin où affleurent les grès du Miocène moyen. Cette partie est caractérisée par une densité de drainage élevée, une densité de linéaments relativement élevée et des pentes relativement élevées.

Une quatrième catégorie, les zones à potentiel élevé, couvre 39.05% du bassin, soit environ un tiers de sa superficie totale (km^2). Ces zones sont observées dans la partie nord-est, nord-ouest et sud, où affleurent des formations géologiques à perméabilité élevée telles que les calcaires et dolomies du Jurassique supérieur. Cette région se caractérise par une densité élevée de linéaments et des précipitations importante.

Enfin, les zones à potentiel très élevé ne représentent que 4.2% de la superficie totale, soit (km^2), observées dans l'extrême sud et une région limitée du nord. Dans cette partie, des précipitations élevées sont enregistrées, et des formations géologiques telles que les alluvions, les calcaires et les dolomies, caractérisées par une haute perméabilité, surmontent des terrains agricoles à faible pente, expliquant ainsi leur très haute potentialité.

La validation de la carte des zones de potentiel des eaux souterraines

Pour garantir l'exactitude et la fiabilité de la carte des zones potentielles d'eaux souterraines, il est essentiel de la valider par des observations et des mesures sur le terrain. Cette validation

permet de confirmer si les zones potentielles prédictes correspondent aux conditions réelles sur le terrain, renforçant ainsi la validité des résultats obtenus. La vérification du modèle GWPZ a reposé sur l'analyse de concordance spatiale entre les classes de débit observées en 43 sites et les classes de potentiel cartographiées. (Figure IV.15). Cette comparaison permet d'évaluer l'exactitude du modèle en examinant l'accord ou le désaccord entre les classes des deux sources.

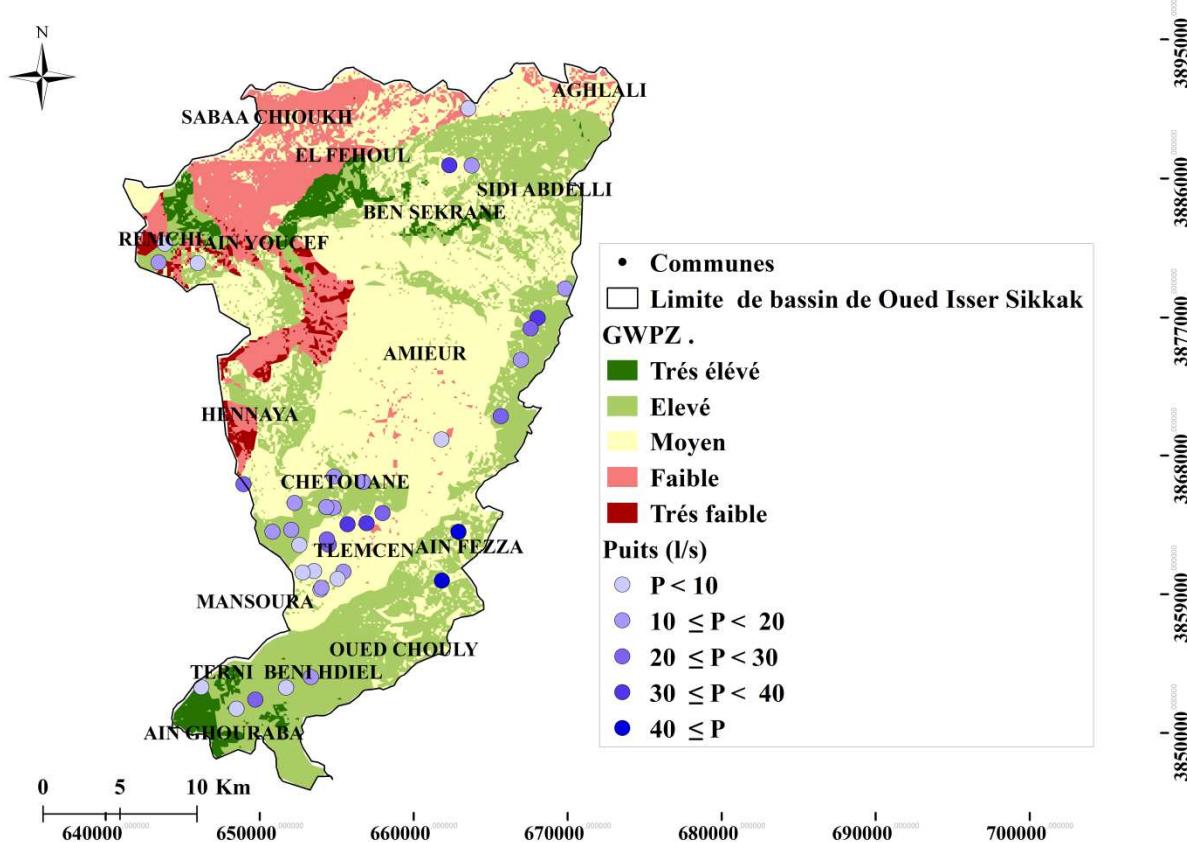


Figure IV.15 Répartition des puits sur la zone d'étude

Les débits des points d'eau variaient de 0 à 74 litres/s, et les taux de productivité des puits étaient classés en cinq catégories : très faible ($P < 10$ l/s), faible ($10 \leq P < 20$ l/s), modérée ($20 \leq P < 30$ l/s), élevée ($30 \leq P < 40$ l/s) et très élevée ($40 \leq P$). Pour évaluer la précision du modèle, la carte des puits localisés a été superposée à la carte principale des GWPZ. Le tableau IV.7 décrit les catégories de productivité des puits ainsi que les attentes en matière d'eau souterraine correspondantes. Parmi les 43 puits considérés, 36 (83.7 %) ont montré un accord partiel ou complet entre les débits observés et les zones de potentiel des eaux souterraines attribuées, ce qui indique une concordance élevée entre les données réelles des puits et la carte des GWPZ. Cependant, pour 7 puits (16.2 %), un désaccord évident entre les

débits observés et les zones potentielles d'eau souterraine attribuées a été observé, suggérant des écarts entre la productivité réelle de ces puits et les prédictions du modèle.

Malgré leur emplacement dans des zones à fort potentiel, les sept puits (numérotés 1, 3, 5, 8, 10, 11 et 12) affichent des niveaux de productivité inférieurs aux attentes. Ces puits sont utilisés à des fins urbaines (puits 1, 10, 11) ou agricoles (puits 3, 5, 8, 12). Plusieurs facteurs peuvent expliquer cet écart, notamment des problèmes liées à un dysfonctionnement local du puits (filtres obstrué, tubage défectueux, problème hydraulique...), surexploitation régionale des ressources en eaux souterraines, hétérogénéité géologique entraînant des variations localisées des propriétés des aquifères...

Tableau IV.7. Comparaison de la carte de la zone potentielle des eaux souterraines avec la productivité des 43 puits étudié

Puits N°	Rendement réel (l/s)	Classe de rendement réel	Classe estimée	Agrément des rendements réels et estimés
1	6	Très faible	Moyen	Disagree
2	17	Faible	Moyen	Partially agree
3	11	Faible	Elevé	Disagree
4	30	Elevé	Très élevé	Partially agree
5	8	Très faible	Très élevé	Disagree
6	13	Faible	Très élevé	Partially agree
7	10	Faible	Moyen	Partially Agree
8	11	Faible	Elevé	Disagree
9	5	Très faible	Faible	Partially agree
10	5	Très faible	Moyen	Disagree
11	9	Très faible	Moyen	Disagree
12	16	Faible	Elevé	Disagree
13	18	Faible	Faible	Agree
14	21	Moyen	Moyen	Agree
15	23	Moyen	Moyen	Agree
16	30	Moyen	Moyen	Agree
17	10	Faible	Faible	Agree
18	36	Elevé	Elevé	Agree
19	14	Faible	Moyen	Partially agree
20	20	Moyen	Moyen	Agree
21	32	Elevé	Elevé	Agree
22	30	Elevé	Elevé	Agree

23	15	Faible	Moyen	Partially agree
24	20	Moyen	Moyen	Agree
25	3.5	Faible	Faible	Agree
26	32	Elevé	Elevé	Agree
27	31	Elevé	Moyen	Partially agree
28	20	Moyen	Elevé	Partially agree
29	55	Très élevé	Elevé	Partially agree
30	74	Très élevé	Elevé	Partially agree
31	7	Très faible	Très faible	Agree
32	20	Moyen	Moyen	Agree
33	30	Elevé	Très élevé	Partially agree
34	5	Très faible	Faible	Partially agree
35	4	Très faible	Faible	Partially agree
36	30	Elevé	Elevé	Agree
37	15	Faible	Moyen	Partially agree
38	4	Très faible	Faible	Partially agree
39	11	Faible	Faible	Agree
40	49	Très élevé	Très élevé	Agree
41	10	Faible	Faible	Agree
42	22	Moyen	Moyen	Agree
43	5	Très faible	Faible	Partially agree

Dans la région caractérisée par un très fort potentiel en eaux souterraines, on observe notamment une productivité très élevée pour un puits, tandis que deux puits présentent une productivité élevée et un puits affiche une productivité très faible. De même, au sein de la zone identifiée à fort potentiel, on observe respectivement 2, 5, 1 et 3 puits montrant une productivité très élevée, élevée, modérée et faible. Dans la zone délimitée avec un potentiel modéré en eaux souterraines, parmi les 16 puits, 7 présentent une productivité modérée, tandis que les autres puits présentent une variété de productivités allant de élevée à faible. La zone désignée à faible potentiel en eau souterraine comprend 11 puits, dont 5 à faible productivité, 5 à très faible productivité et 2 à très forte productivité. Enfin, la zone désignée à très faible potentiel en eau souterraine comprend 2 puits, dont 1 à faible productivité et 1 à très forte productivité. L'évaluation réalisée sur les débits des puits indique que le modèle développé est effectivement fiable et pleinement opérationnel.

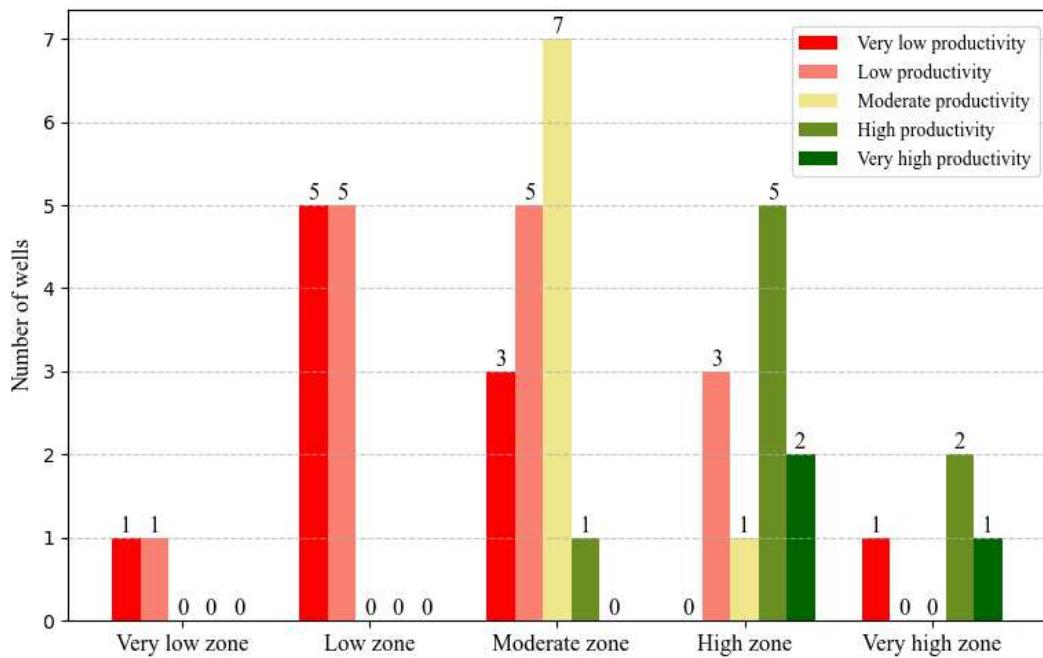


Figure IV.16 Schéma montrant la situation des points d'eau dans le Modèle ; *A : Superficie, P : Productivité.*

La carte des zones potentielles en eau souterraine (GWPZ) du bassin versant de l'Oued Isser-Sikkak a été également validée à l'aide des données piézométriques (**Figure IV.17**). L'analyse révèle une correspondance marquée entre les zones classées à potentiel « très élevé » et « élevé » et les formations géologiques constituées de calcaires et dolomies fortement karstifiés, notamment dans les secteurs du Jurassique supérieur (au Nord est et au sud du bassin) et du Miocène supérieur et moyen (au centre du bassin, entre El Fehoul, Remchi et Amieur). Ces formations offrent une perméabilité élevée grâce à la présence de réseaux de fractures et de cavités, favorisant l'infiltration des eaux et constituant ainsi des zones de recharge majeures. La superposition avec les courbes isopièzes montre que ces secteurs correspondent aux hauteurs piézométriques les plus élevées, confirmant leur rôle actif dans l'alimentation des nappes.

En revanche, les zones classées comme « faibles » et « très faibles » coïncident avec les unités géologiques à faible perméabilité, telles que les marnes et grès de l'Éocène et les argiles du Miocène inférieur, localisées principalement dans la partie Nord Ouest du bassin. Ces formations peu perméables limitent l'infiltration et sont situées en aval des gradients piézométriques, ce qui indique des zones de décharge, où l'eau souterraine converge et peut resurgir sous forme de sources ou de suintements.

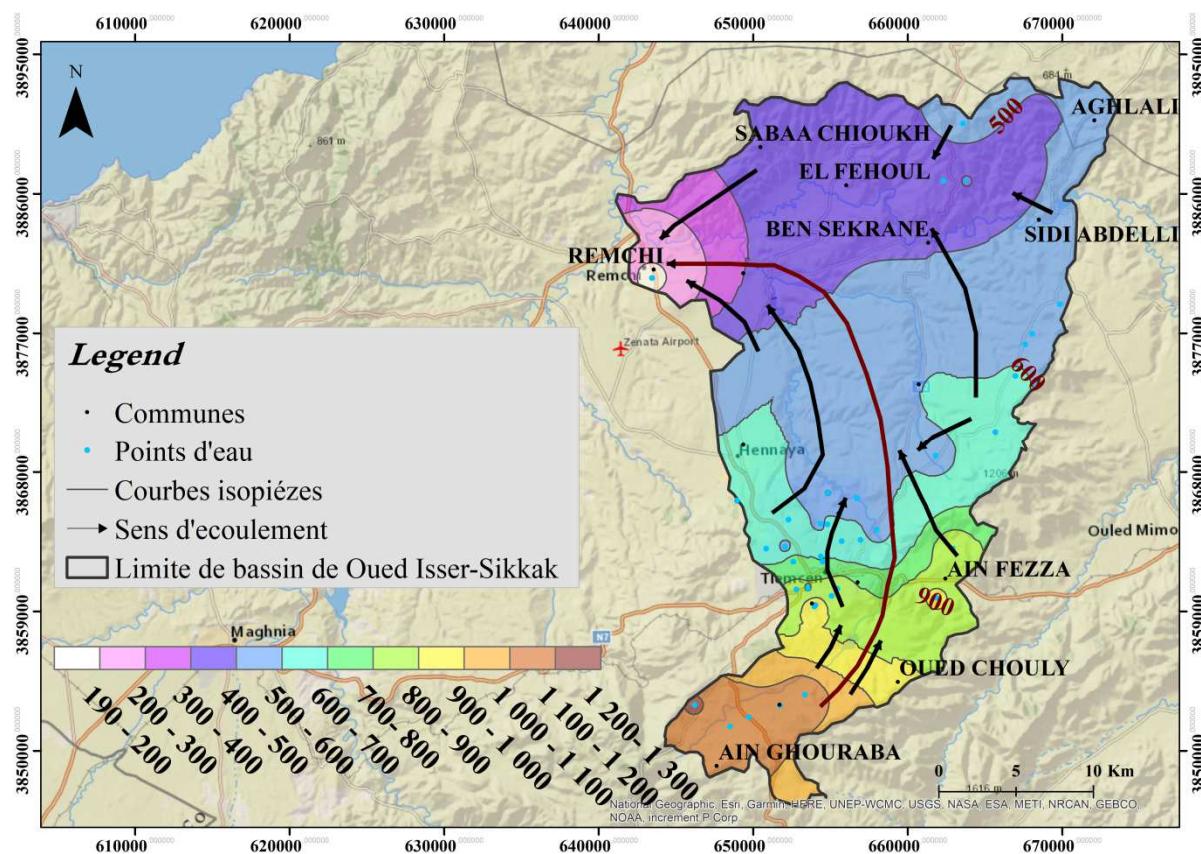


Figure IV.17 Carte piézométrique du bassin de Oued Isser-Sikkak

Les résultats du modèle AHP ont également été validés en utilisant l'analyse de la courbe ROC (**Figure IV.18**) ainsi que plusieurs métriques de performance (**Tableau IV.8**). La courbe ROC a révélé une Aire Sous la Courbe (AUC) de 0.89, témoignant d'une excellente capacité du modèle à prédire les différentes classes de potentiel en eau souterraine. En complément, les indicateurs quantitatifs issus de la validation terrain confirment la robustesse du modèle, avec une précision (Accuracy) de 81 %, un coefficient Kappa de 0.76, un F-score de 0.81, une erreur quadratique moyenne (RMSE) de 0.98, une erreur absolue moyenne (MAE) de 0.40, ainsi qu'un coefficient de détermination (R^2) de 0.78. Ces résultats démontrent que la méthode AHP constitue un outil fiable et performant pour la cartographie des zones potentielles d'eau souterraine dans le bassin d'étude.

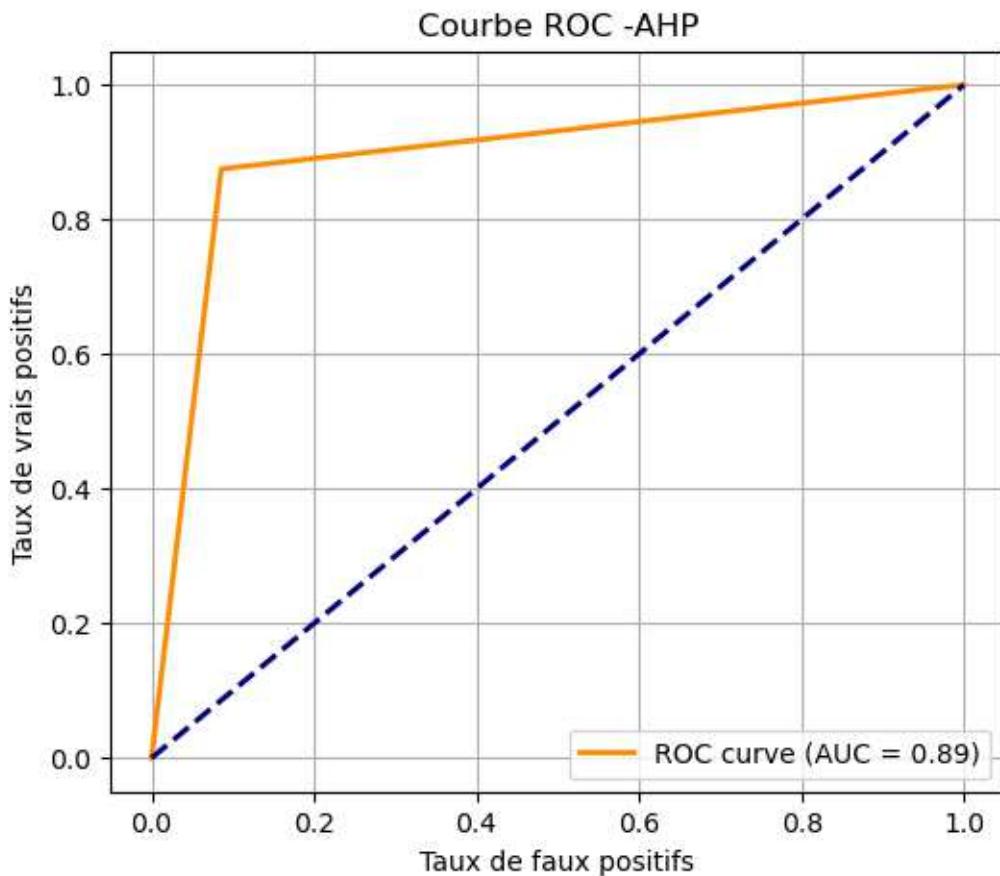


Figure IV.18 Analyse de la courbe ROC pour le modèle AHP.

Tableau IV.8. Les métriques de performance de modèle (AHP).

Measure	AHP
Accuracy	81%
Kappa	0.76
F-score	0.81
RMSE	0.98
MAE	0.40
R ²	0.78

IV.3.3. Délimitation des zones potentielles de recharge par L'apprentissage automatique

IV.3.3.1. Analyse de colinéarité

Les modèles ont été entraînés à partir d'un ensemble de critères thématiques géospatiaux, comprenant notamment la géologie, l'occupation du sol, les précipitations, la densité de drainage, la densité de linéaments et la pente. Afin de vérifier l'indépendance des variables utilisées et d'éviter toute redondance pouvant mener à un surapprentissage, une matrice de

corrélation a été établie. Cette étape a permis de s'assurer de l'absence de corrélations fortes entre les variables d'entrée, garantissant ainsi une meilleure robustesse des modèles.

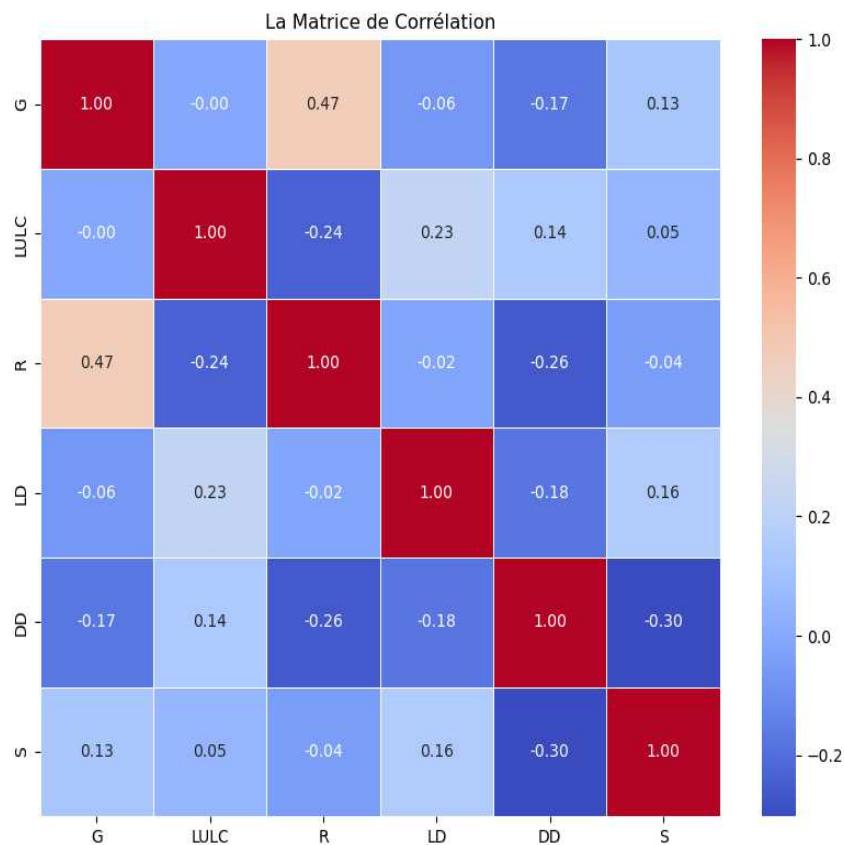


Figure IV.19 Matrice de corrélation entre les 6 paramètres.

La **figure IV.19** ci-dessus présente la matrice de corrélation entre les différents facteurs utilisés pour la délimitation des zones potentielles de recharge des eaux souterraines. L'analyse des corrélations entre les différentes variables explicatives a été visualisée à l'aide d'une échelle colorimétrique allant du bleu foncé, indiquant une forte corrélation négative (-1.00), au rouge foncé, correspondant à une corrélation positive maximale (1.00). Il convient de noter qu'il n'existe pas de seuil strictement établi pour juger de la pertinence ou de l'acceptabilité d'un coefficient de corrélation. Toutefois, selon les recommandations de la littérature scientifique, notamment celles de **Dormann et al. (2013)**, des coefficients compris entre 0.40 et 0.85 peuvent généralement être considérés comme reflétant une relation statistiquement acceptable entre deux variables, sans indiquer une redondance excessive. Il ressort de cette matrice que tous les coefficients de corrélation sont inférieurs à 0.5, ce qui indique l'absence de corrélation forte entre les variables considérées. Par exemple, la corrélation maximale observée est de 0.47 entre la précipitation (R) et la géologie (G), ce qui

reste modéré. Cette faible interdépendance entre les facteurs signifie que chacun apporte une information spécifique et non redondante au modèle. Ce constat est particulièrement important dans le cadre de l'apprentissage automatique, car il réduit le risque de surapprentissage (*overfitting*), qui peut survenir lorsque plusieurs variables fortement corrélées sont introduites. Ainsi, l'utilisation conjointe de ces facteurs permet de renforcer la robustesse et la performance des modèles prédictifs appliqués (RF, XGBoost, SVM) pour la cartographie des zones potentielles de recharge.

IV.3.3.2. La performance des modèles

La validation des modèles prédictifs constitue une étape cruciale dans l'évaluation de la fiabilité des cartes de potentiel en eau souterraine. Dans cette étude, l'efficacité de trois algorithmes d'apprentissage automatique — Random Forest (RF), Support Vector Machine (SVM) et XGBoost — a été évaluée à l'aide de la courbe ROC (Receiver Operating Characteristic) (**Figure IV.20**), couramment utilisée pour mesurer la performance des modèles de classification. Les résultats montrent que le modèle SVM présente la meilleure capacité de prédiction, avec une aire sous la courbe (AUC) de 0.93, suivi du modèle RF (AUC = 0.89) et enfin XGBoost (AUC = 0.84). Cette tendance est confirmée par d'autres métriques de performance (**Tableau IV.9**), telles que l'accuracy 88.89 % pour le SVM), le coefficient de Kappa (0.8599) et le F-score (0.8855), mettant en évidence la robustesse du SVM dans la délimitation des zones potentielles de recharge. Le modèle RF, bien qu'un peu moins performant, a également démontré une bonne stabilité avec un R^2 de 0.85. En revanche, XGBoost, malgré sa popularité, a affiché des performances inférieures, probablement en raison d'une sensibilité accrue au déséquilibre des classes.

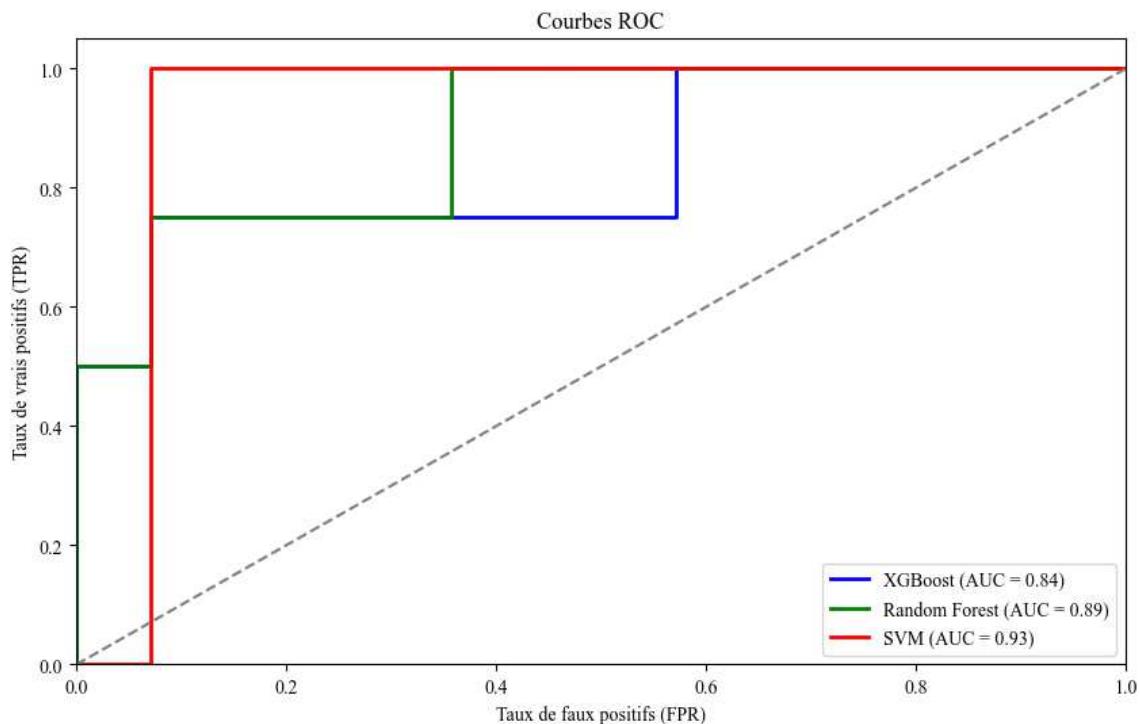


Figure IV.20 Analyse de la courbe ROC pour les modèles d'apprentissage automatique.

Tableau IV.9. Les métriques de performance des modèles (XGBoost, Forêt Aléatoire et SVM).

Measure	XGBoost	RF	SVM
Accuracy	63.64%	72.73%	88.89%
Kappa	0.5319	0.6526	0.8599
F-score	0.5076	0.658	0.8855
RMSE	0.603	0.5222	0.3718
MAE	0.3636	0.2727	0.2778
R ²	0.6	0.85	0.8035

IV.3.3.3. Importance des variables explicatives

L'évaluation de l'importance relative des six facteurs influençant le potentiel en eau souterraine, réalisée à l'aide de la fonction d'« importance des variables » du modèle SVM, a révélé des disparités notables entre les contributions respectives de chaque critère. La géologie s'est imposée comme le facteur prédominant avec une importance de 0.27, suivie par la précipitation (0.22), la pente (0.18), la densité de drainage (DD) (0.14), la densité de linéament (DL) (0.13), tandis que l'occupation du sol (OS) a montré une influence plus marginale avec une valeur de 0.06 (**Figure IV. 21**). Ce classement corrobore les conclusions de **Siziba et Chifamba (2023)**, selon lesquelles les caractéristiques géologiques constituent

un déterminant majeur du potentiel hydrogéologique et sont en concordance avec la méthode AHP. Dans le bassin versant de l'Oued Isser-Sikkak, la diversité lithologique, allant des calcaires jurassiques aux alluvions quaternaires, influe directement sur la distribution spatiale des ressources en eau souterraine. Les formations carbonatées, fortement fracturées, favorisent l'infiltration et la circulation de l'eau, propices au développement d'aquifères karstiques à haut rendement, tandis que les unités argileuses agissent comme des barrières imperméables, freinant les processus de recharge. Par ailleurs, les précipitations jouent un rôle fondamental dans l'alimentation des nappes, une relation proportionnelle étant généralement observée entre l'intensité des pluies et le volume d'eau infiltré. Cette hiérarchisation des facteurs met en évidence l'importance de l'intégration des données géologiques et climatiques dans la modélisation du potentiel en eau souterraine.

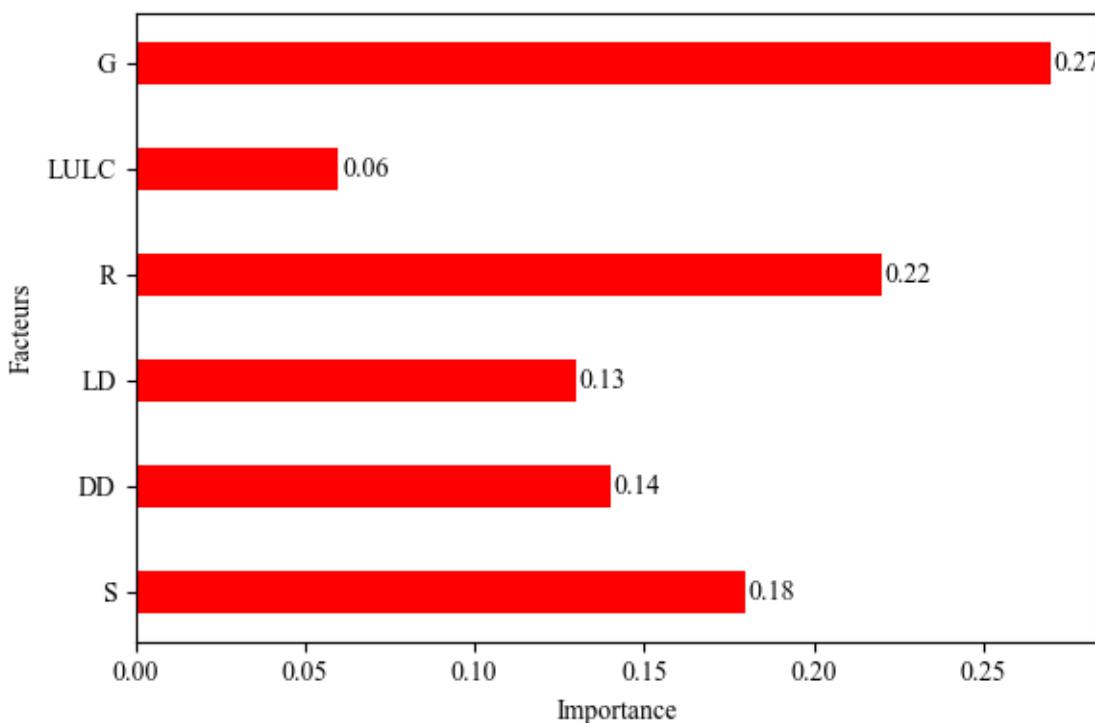


Figure IV.21 Poids relatifs des variables selon le modèle SVM. (La somme des poids attribués à l'ensemble des caractéristiques est égale à un).

IV.3.3.4. La génération des cartes des potentielles en eaux souterraine en utilisant les trois Modèles

Les algorithmes d'apprentissage automatique Random Forest (RF), XGBoost et Support Vector Machine (SVM) ont été utilisés pour générer des cartes de potentiel des eaux souterraines. Le potentiel prédict a été classé en cinq catégories : très faible, faible, moyen, élevé et très élevé. La répartition spatiale du potentiel des eaux souterraines, telle que prédictée par les trois modèles, est illustrée dans **la figure IV.22 et le tableau IV.10**.

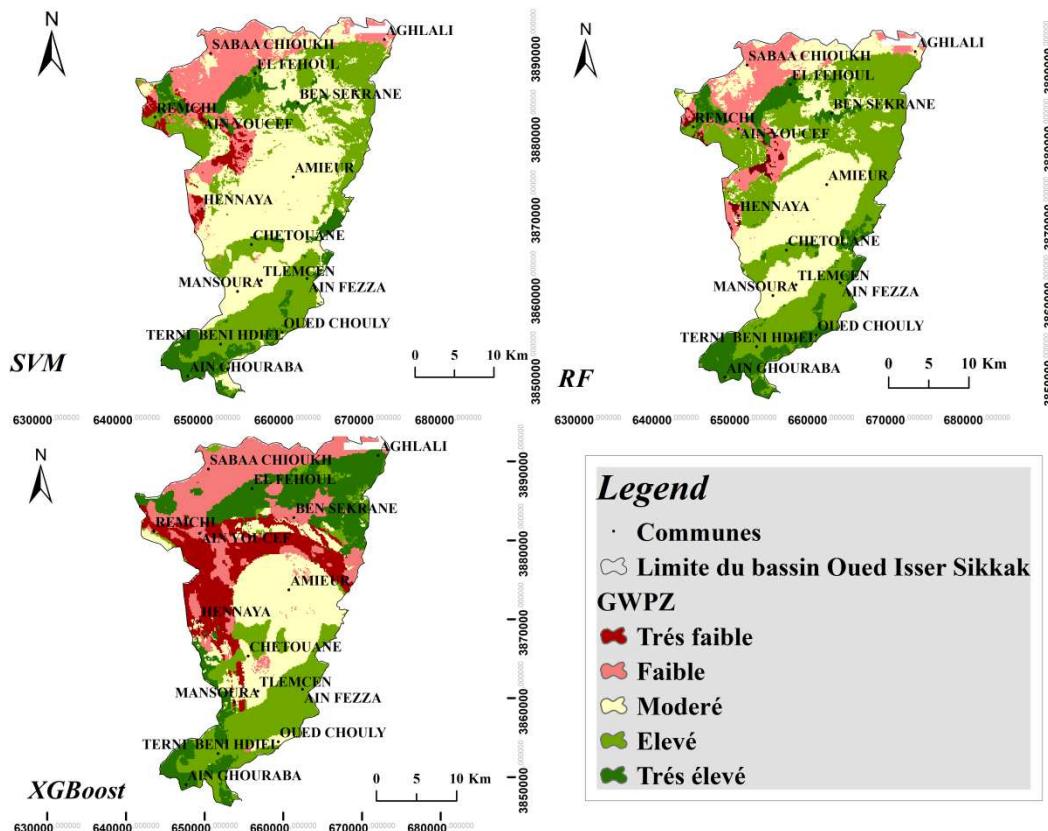


Figure IV.22 Cartes du potentiel d'eau souterraine générées par les modèles RF, XGBoost et SVM

Tableau IV.10 Pourcentage des superficies correspondant aux cinq classes de potentiel de recharge, selon les trois modèles (XGBoost, Forêt Aléatoire et SVM).

Classe	Superficies (%)		
	XGBoost	RF	SVM
Très élevé	19.73	12.13	9.33
Elevé	19.06	40.37	29.53
Moyen	23.35	33.64	43.29
Faible	20.59	11.16	13.78
Très faible	15.81	1.24	2.53

IV.4. Discussion

Les critères sélectionnés pour la hiérarchisation dans le cadre de l'Analyse Hiérarchique des Processus (AHP) incluent la précipitation, la géologie, la densité de linéaments (LD), la pente, la densité de drainage (DD) et l'occupation du sol (LULC). Cette sélection est conforme à plusieurs travaux antérieurs menés dans des contextes géographiques similaires (**Magesh et al., 2012 ; Uc Castillo et al., 2022 ; Diriba et al., 2024**), où des critères hydrogéologiques et morphométriques ont été identifiés comme déterminants pour la recharge des eaux souterraines. La validation croisée par superposition des cartes de potentiel obtenues avec les données de forages disponibles a confirmé la pertinence de ces facteurs, démontrant une bonne cohérence spatiale entre les zones identifiées comme à fort potentiel et la présence effective de ressources en eau souterraine.

L'évaluation des performances des modèles utilisés (AHP, Random Forest, XGBoost et SVM) s'est appuyée sur des métriques telles que la courbe ROC (Receiver Operating Characteristic) et l'AUC (Area Under Curve), ainsi que l'accuracy globale. Le modèle SVM a affiché une AUC de **0.93** et une précision de **89 %**, surpassant les résultats rapportés dans des études similaires : par exemple, **Rahmati et al. (2016)** ont obtenu une AUC de 0.89 avec SVM, tandis que **Naghibi et al. (2017)** ont rapporté une précision de 84 %. Ces résultats témoignent de la robustesse de l'approche employée dans le bassin de l'Oued Isser-Sikkak et valident l'adéquation des variables retenues.

Une comparaison a été réalisée entre l'approche multicritère AHP (Analytic Hierarchy Process) et les modèles d'apprentissage automatique (RF, XGBoost et SVM) afin d'évaluer leur efficacité dans la délimitation des zones potentielles d'eau souterraine (GWPZ). L'approche AHP, fondée sur des jugements experts et des pondérations subjectives, a présenté une performance globale satisfaisante, avec une précision de validation de 0.89, ce qui confirme sa pertinence dans les contextes à données limitées.

En revanche, les modèles d'apprentissage automatique ont affiché des performances supérieures, tirant parti de leur capacité à modéliser des relations complexes entre les variables (SVM(0.93), RF(0.89) et XGBoost (0.84)). Ces résultats soulignent la supériorité globale des approches d'apprentissage automatique en termes de capacité prédictive, tout en mettant en évidence que l'AHP demeure un outil fiable et accessible, notamment dans les contextes nécessitant une interprétation transparente et des ressources computationnelles limitées.

La figure (Figure IV.23) illustre une comparaison spatiale des zones potentielles de recharge des eaux souterraines (GWPZ) dans le bassin de l'Oued Isser-Sikkak, obtenue à partir de deux approches : l'Analyse Hiérarchique des Procès (AHP), et les méthodes d'Apprentissage Automatique (ML).

Dans les deux cartes, cinq classes de potentiel ont été définies : *Très faible*, *Faible*, *Moyen*, *Élevé* et *Très élevé*. Bien que les deux méthodes présentent des tendances globales similaires, plusieurs différences significatives émergent.

IV.4.1. Moyenne arithmétique des modèles ML

Afin de mieux comparer les résultats issus de l'approche AHP avec ceux de l'apprentissage automatique, et puisque trois modèles ML ont été utilisé (*SVM*, *XGBoost* et *Forêt Aléatoire*), nous avons généré une carte moyenne arithmétique à partir des trois sorties de modèles. Cette carte représente une intégration équilibrée des résultats et permet de réduire les biais spécifiques à chaque algorithme.

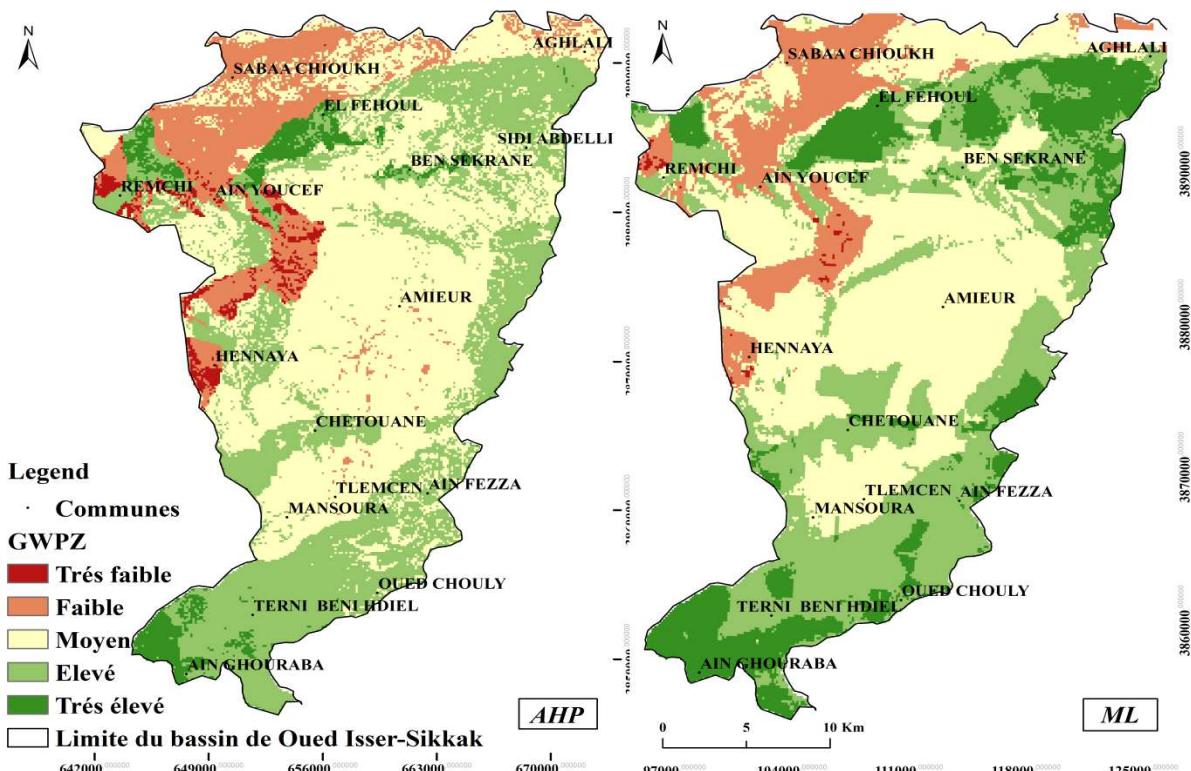


Figure IV.23 Cartes comparatives des zones potentielles de recharge des eaux souterraines dans le bassin de l'Oued Isser-Sikkak, obtenues par les approches AHP (à gauche) et Apprentissage automatique (ML, à droite).

La comparaison des cartes de potentiel de recharge issues des approches AHP et ML (moyenne des modèles SVM, XGBoost et Forêt Aléatoire) met en évidence à la fois des similitudes et des divergences notables. Les deux méthodes s'accordent globalement sur la répartition des classes intermédiaires, en particulier dans la zone centrale du bassin où le potentiel est majoritairement estimé comme moyen à élevé. Ces correspondances traduisent une cohérence dans l'influence relative de certains facteurs déterminants tels que la densité de drainage, la géologie ou l'occupation du sol. Toutefois, des différences apparaissent sur les extrêmes du gradient de potentiel. L'approche ML identifie davantage de zones à fort potentiel, notamment dans la moitié sud du bassin (autour de Terni Beni Houel, Ain Choraba et Oued Chouly), tandis que la méthode AHP, plus conservatrice, attribue à ces régions un potentiel moyen à élevé, mais très rarement très élevé. À l'inverse, AHP détecte une plus grande proportion de zones à faible et très faible potentiel dans la partie nord (Sabra Chouikh, Sidi Abdelli, Beni Ououf), là où les modèles ML suggèrent plutôt un potentiel moyen. Ces divergences traduisent la différence fondamentale entre les deux approches : l'AHP repose sur des pondérations fixes, alors que les algorithmes ML captent des interactions complexes et non linéaires entre les variables. Ainsi, la carte ML présente une transition spatiale plus progressive et une meilleure sensibilité à l'hétérogénéité des conditions environnementales, tandis que la carte AHP affiche des ruptures plus marquées. Ces résultats soulignent l'intérêt de combiner des approches fondées sur l'expertise humaine (comme l'AHP) avec des techniques d'apprentissage automatique, pour améliorer la fiabilité et la précision de la cartographie du potentiel de recharge des eaux souterraines.

IV.4.2.Comparaison de l'importance des facteurs selon le modèle SVM et la méthode AHP

La comparaison des poids des facteurs influençant le potentiel en eau souterraine, obtenus respectivement par l'apprentissage automatique (modèle SVM) et par la méthode AHP, met en évidence à la fois des similitudes et des divergences (**Figure IV.24**). D'après le modèle SVM, les facteurs les plus déterminants sont la géologie (0.27), suivie de la précipitation (0.22), la pente (0.18), la densité de drainage (0.14), la densité de linéaments (0.13), et enfin l'occupation du sol (0.06). En comparaison, la méthode AHP attribue une importance beaucoup plus marquée à la lithologie (0.410), suivie par la précipitation (0.188), la densité de linéaments (0.141), la pente (0.139), l'occupation du sol (0.0739), et la densité de drainage

(0.0465). On constate ainsi que les deux approches s'accordent sur le rôle dominant de la géologie et de la précipitation ce qui coïncide avec les résultats de (Mussa et al., 2024), bien que l'AHP accentue davantage l'importance de la lithologie. L'ordre d'importance des autres critères varie légèrement, reflétant les différences méthodologiques : l'AHP repose sur des jugements experts structurés, tandis que le SVM extrait les relations directement à partir des données. Cette analyse croisée permet de renforcer la compréhension globale des facteurs influents dans la recharge des aquifères.

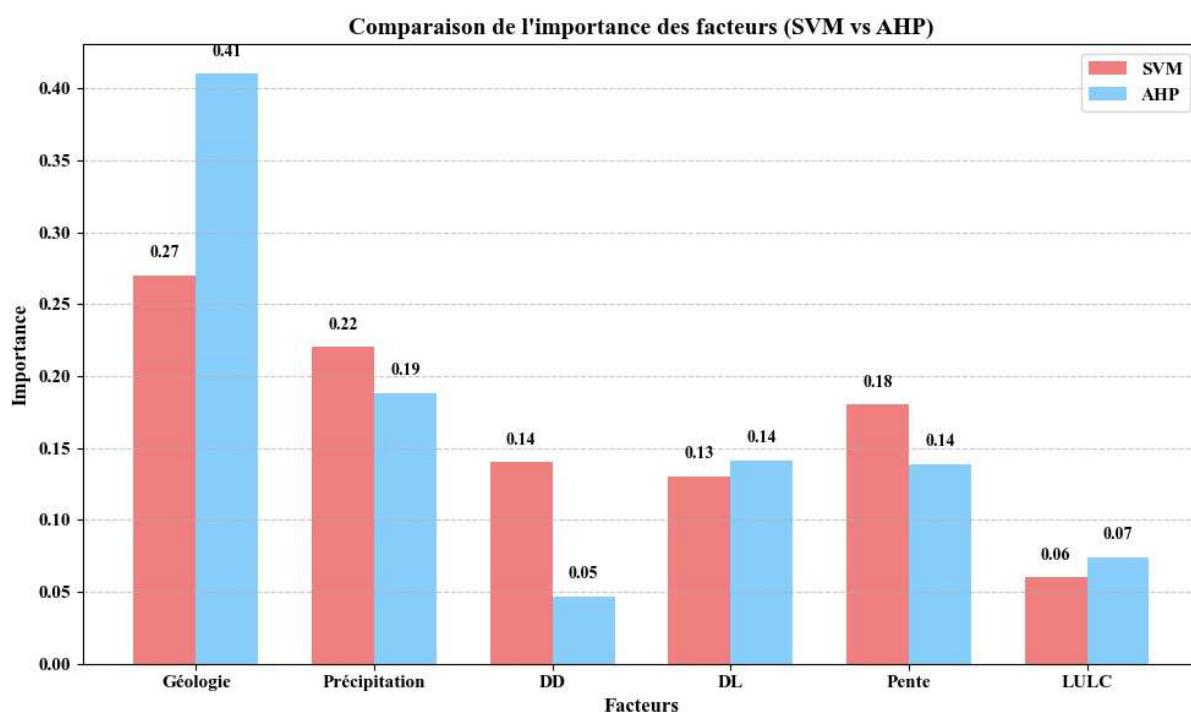


Figure IV.24 Comparaison de l'importance des facteurs (SVM Vs AHP)

IV.4.3. Limite de des méthodes ML (Machines Learning) et AHP

Malgré les résultats satisfaisants obtenus, certaines limites doivent être soulignées. Premièrement, l'absence de données hydrogéologiques directes (conductivité hydraulique, coefficient d'infiltration, porosité...) a limité l'analyse à des variables indirectes dérivées de données de télédétection et de SIG. Deuxièmement, la qualité des résultats dépend fortement de la résolution spatiale et de l'exactitude des couches thématiques utilisées. Troisièmement, bien que le modèle Random Forest soit performant, il reste une "boîte noire" difficilement interprétable sur le plan physique, contrairement aux approches multicritères comme l'AHP. Enfin, les poids attribués dans l'AHP peuvent être sujets à un certain degré de subjectivité, ce qui nécessite une validation rigoureuse par des données de terrain. L'intégration future de

données de recharge mesurées et de paramètres hydrogéologiques spécifiques permettrait d'améliorer davantage la précision et la fiabilité des résultats.

IV.4.4.Perspectives

Les résultats prometteurs obtenus dans cette étude ouvrent plusieurs pistes de recherche et d'application futures. Tout d'abord, l'intégration d'autres modèles d'apprentissage automatique avancés, tels que les réseaux de neurones, pourrait permettre une amélioration supplémentaire de la précision des prédictions et une meilleure compréhension des interactions complexes entre les facteurs influençant la présence de ressources en eau souterraine.

Par ailleurs, l'exploitation de données temporelles (séries de précipitations, évolution de l'occupation du sol, variations saisonnières de la nappe) permettrait de développer des modèles dynamiques capables de suivre les changements spatio-temporels des potentialités en eau. L'utilisation de techniques d'apprentissage profond (deep learning), en lien avec l'imagerie satellite à haute résolution, représente également une voie prometteuse pour automatiser et affiner la cartographie hydrogéologique.

Enfin, une collaboration plus étroite avec les acteurs locaux (hydrogéologues, décideurs, gestionnaires de l'eau) serait essentielle pour intégrer ces outils dans les stratégies de gestion durable des ressources en eau, notamment dans les zones arides et semi-arides fortement exposées au stress hydrique.

Conclusion

Cette étude a démontré l'efficacité de la combinaison de l'approche multicritère AHP et des algorithmes d'apprentissage automatique, en particulier le modèle SVM pour la cartographie des potentialités en eau souterraine dans le bassin versant de l'Oued Isser-Sikkak. La comparaison entre ces deux approches a permis de croiser l'expertise humaine, à savoir l'AHP, avec la capacité de la machine learning à analyser objectivement de vastes ensembles de données.

Les résultats issus des trois modèles ont montré de bonnes performances de classification avec une aire sous la courbe ROC (AUC) comprise entre 0.84 et 0.93, indiquant une capacité acceptable à prédire les zones à potentiel. Les résultats de l'AHP ont également été validés avec une précision de 83.7% et un AUC= 0.89, confirmant la fiabilité de cette méthode fondée sur les jugements d'experts. La convergence des résultats entre les deux approches

souligne leur robustesse et leur complémentarité dans l'identification des zones favorables à l'exploitation des eaux souterraines.

Conclusion générale

Cette thèse a mené une exploration approfondie de la dynamique, de l'évaluation et de la gestion des ressources en eaux souterraines dans les bassins versants de l'Oued Isser-Sikkak. En adoptant une approche interdisciplinaire novatrice, les travaux réalisés ont répondu à des enjeux scientifiques et opérationnels cruciaux liés à la disponibilité, à la cartographie et à la pérennité de cette ressource vitale, dans un contexte marqué par les changements climatiques et les pressions anthropiques croissantes.

La caractérisation détaillée des systèmes hydrogéologiques a permis de révéler la complexité structurale du bassin étudié, notamment à travers la diversité lithologique et l'influence déterminante des structures tectoniques sur la circulation et la recharge des eaux souterraines. L'analyse hydroclimatique a mis en lumière une variabilité interannuelle marquée des précipitations, avec une rupture climatique significative entre 1977 et 1980. Cette période excédentaire (1974–1980) a été suivie d'une phase déficitaire prolongée jusqu'en 2006, soulignant la vulnérabilité du système aquifère face aux aléas climatiques.

Sur le plan méthodologique, cette recherche a démontré la pertinence d'une approche hybride combinant l'analyse multicritère (AHP) et des algorithmes d'apprentissage automatique, notamment Random Forest, XGBoost et SVM. Cette synergie méthodologique a permis d'allier la rigueur de l'expertise humaine, dont les résultats ont atteint une précision de 83,7 %, à la puissance prédictive des modèles de machine learning, dont les performances se sont traduites par des scores AUC allant jusqu'à 0,93. La complémentarité entre ces deux approches a abouti à une cartographie fiable et robuste des potentialités en eau souterraine, validée par la convergence des résultats.

Les cartes de potentialité produites constituent des outils d'aide à la décision d'une grande valeur stratégique. Elles offrent aux gestionnaires et décideurs des références scientifiques utiles pour optimiser l'implantation des forages, cibler les zones prioritaires et réduire les coûts d'exploration. Cependant, l'étude met en évidence que les zones favorables à la recharge sont particulièrement vulnérables à la pollution en raison de la perméabilité des formations et des pressions anthropiques. Cette vulnérabilité souligne la nécessité de mesures de protection immédiates pour préserver la qualité de l'eau et garantir la durabilité des ressources exploitées.

Conclusion générale

La portée scientifique de cette recherche réside dans la validation d'une méthodologie intégrée et reproductible, applicable à d'autres contextes hydrogéologiques, notamment dans les régions arides et semi-arides d'Afrique du Nord. Elle met également en lumière les interactions entre dynamiques climatiques, mécanismes de recharge et risques de pollution, offrant une contribution significative aux stratégies de gestion durable et à l'adaptation aux changements globaux.

Les perspectives de recherche ouvertes par cette étude incluent le suivi renforcé des variables climatiques et de la recharge pour anticiper les évolutions futures, l'extension de l'approche à d'autres bassins versants, et l'intégration de données complémentaires telles que les analyses isotopiques, les mesures piézométriques à haute fréquence ou les images de télédétection à très haute résolution. Ces extensions permettront d'affiner les modèles existants, de mieux caractériser la vulnérabilité des zones favorables à la recharge et de renforcer la précision des cartographies produites.

En définitive, cette thèse démontre que la **préservation, la valorisation et la protection des eaux souterraines face à la pollution** nécessitent une alliance entre innovation technologique, expertise locale et vision prospective. La vulnérabilité des zones favorables à la recharge impose des **mesures de protection à court terme**, constituant un impératif pour assurer une gestion adaptative et durable des ressources hydriques, essentielle pour la sécurité hydrique et la qualité de l'eau dans un contexte de changements rapides et de pressions anthropiques croissantes.

Evaluation scientifique

Publications scientifiques

Titre de l'article : *Delineating groundwater recharge zones: semi-arid NW Algeria case study*

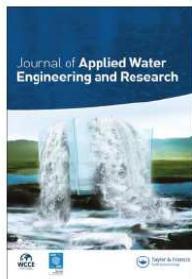
Revue : *Journal of Applied Water Engineering and Research*

Catégorie : B

Date de soumission : 24 août 2024

Date de publication : 13 mai 2025

URL : <https://doi.org/10.1080/23249676.2025.2503317>



Delineating groundwater recharge zones: semi-arid NW Algeria case study

Oum eldjilali Soumia Mehella, Bekkoussa Samir Belkacem, Mahi Habib, Taupin Jean-Denis, Patris Nicolas, Talia Amel & Benadela Laouni

To cite this article: Oum eldjilali Soumia Mehella, Bekkoussa Samir Belkacem, Mahi Habib, Taupin Jean-Denis, Patris Nicolas, Talia Amel & Benadela Laouni (13 May 2025): Delineating groundwater recharge zones: semi-arid NW Algeria case study, *Journal of Applied Water Engineering and Research*, DOI: [10.1080/23249676.2025.2503317](https://doi.org/10.1080/23249676.2025.2503317)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/23249676.2025.2503317>



Published online: 13 May 2025.



Submit your article to this journal 



View related articles 



View Crossmark data 

Full Terms & Conditions of access and use can be found at
<https://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=tjaw20>

Delineating groundwater recharge zones: semi-arid NW Algeria case study

Oum eldjilali Soumia Mehella  ^a, Bekkoussa Samir Belkacem^a, Mahi Habib^b, Taupin Jean-Denis^c,
Patris Nicolas^c, Talia Amel^a and Benadela Laouni^a

^aLaboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau, Université Mustapha Stambouli de Mascara, BP 305 route de Mamounia, 29000, Mascara, Algérie; ^bCentre des Techniques Spatiales, Agence Spatiale Algérienne, Arzew Oran, Algeria; ^cHydrosciences, Université de Montpellier, IRD, CNRS, IMT Mines d'Ales, Montpellier, France

ABSTRACT

In arid and semi-arid regions, groundwater is a vital resource increasingly impacted by population growth and agricultural demands. This study identifies potential groundwater recharge zones in the Oued Isser-Sikkak Basin, northwestern Algeria, using the Analytic Hierarchy Process (AHP) integrated with Geographic Information Systems (GIS). Six thematic layers—land use, slope, geology, drainage density, lineament density, and rainfall—were weighted and combined to produce a recharge potential map. The basin was classified into five categories: very high (4%), high (33.7%), moderate (45.6%), low (12.5%), and very low (1.9%) recharge potential. The highest potential zones were found in the south and east, where limestone and dolomite formations prevail. Validation with field observations and previous research showed an 83.7% match, confirming the model's reliability. The study demonstrates the effectiveness of integrating AHP and GIS in assessing groundwater potential, offering a valuable tool for sustainable water resource management in data-limited, dryland areas.

ARTICLE HISTORY

Received 24 August 2024
Accepted 5 May 2025

KEYWORDS

Oued Isser-Sikkak basin;
recharge zone; groundwater;
GIS (Geographic Information
Systems); remote sensing

1. Introduction

Meeting the escalating demand for water resources for domestic, agricultural, and industrial uses solely from surface water sources presents significant challenges. This challenge is exacerbated by population growth, rapid urbanization, and the intensifying impacts of climate change, characterized by rising temperatures and more frequent droughts. Global water use is steadily increasing, with projections of a 20-30% rise by 2050. This will impact over two billion people, leading to severe water shortages (UNEP, 2019). This situation poses significant challenges to the development of many countries, particularly those experiencing water scarcity (Sekar and Randhir 2007). Algeria is among the thirteen African countries most severely affected by water scarcity, possessing less than half of the resources required for long-term water security (Mouhouche 2012). Northern Algeria, in particular, is experiencing increasing aridity, characterized by declining precipitation and more frequent drought events (Krim and Moulay idriss, 2024). The Isser-Sikkak basin, a vital water source for the major industrial cities of Oran and

Tlemcen, is particularly vulnerable to these challenges. Despite the presence of permanent watercourses, the region continues to experience water scarcity.

Groundwater, a significant component of the global freshwater resource, offers a crucial alternative to dwindling surface water supplies. Representing approximately 30% of the Earth's total freshwater reserves, compared to only 0.3% for surface waters, groundwater plays a vital role in sustaining human activities and ecosystems. Therefore, thorough investigation and sustainable management of groundwater resources are imperative. Recent years have witnessed a surge in the application of Geographic Information Systems (GIS) and remote sensing techniques in hydrogeological studies worldwide (Aravinthasamy et al. 2021; Megahed et al. 2022; Megahed et al. 2023; Sankar et al. 2023). Numerous studies have successfully employed these technologies to delineate groundwater recharge areas (Ake et al. 2018; Duguma 2023; Prapanchan et al. 2024; Shinde et al. 2024). These studies demonstrate the effectiveness of integrating spatial data with remote sensing imagery in identifying areas with high groundwater

potential. The integration of multi-criteria evaluation frameworks, incorporating geographic, geologic, hydroclimatic, and land use parameters, has emerged as a robust approach for assessing groundwater potential (Megahed et al. 2023). This approach, based on the systematic evaluation of various factors, provides reliable estimates of groundwater potential and facilitates decision-making in groundwater management. The Analytic Hierarchy Process (AHP) has proven to be a valuable tool in such evaluations. Studies conducted in India (Arulbalaji et al. 2019; Das et al. 2022; Rather et al. 2022) and Iraq (Mohammed and Sayl 2021; Sulaiman and Mustafa 2023) have demonstrated the effectiveness of AHP in assessing aquifer potential by objectively weighting and integrating various factors such as lithology, precipitation, and land use.

In Algeria, several studies have utilized GIS and remote sensing techniques to delineate groundwater recharge potential zones. For example, Boufekane et al. (2022) combined GIS and remote sensing to identify the most suitable areas for groundwater recharge within the Mitidja Plain. In the Upper Wadi Namous Basin, Ain Sefra, Derdour et al. (2022) delineated groundwater potential zones using GIS, remote sensing, and AHP, with a particular focus on low cretaceous locations. In the Mostaganem Plateau, Hanene (2024) assessed the evolution of these zones under changing climate conditions. Kessar et al. (2021) identified high groundwater potential in the southern part of the Wadi Saida Watershed using GIS, RS, and AHP, with 71% validation accuracy.

While numerous studies have investigated groundwater recharge potential in Algeria, limited research has specifically focused on the complex karst systems of the Oued Isser-Sikkak basin. This study aims to address this gap by employing a multi-criteria evaluation approach, combining hydrological and geological factors with rigorous field validation. The primary objective is to create a comprehensive map of potential groundwater recharge zones within the Oued Isser-Sikkak basin by leveraging remote sensing and GIS technology. Six key thematic layers will be integrated in the analysis: rainfall, land use, lineament density, slope, drainage density, and geology. This study will provide valuable insights into the intricate dynamics of groundwater resources in this region, supporting sustainable water resource management and informed decision-making regarding groundwater extraction and utilization.

2. Materials and methods

2.1. Study area

The Oued Isser-Sikkak basin (Figure 1), a sub-basin of the Tafna basin with the code 1607, covers an area of 825 km². It extends between latitudes 35°10' N and 34°44' N, and longitudes 1° 05' W and 1° 27' W, with an average elevation of 475 meters. The basin encompasses two main watercourses: The Oued Sikkak, originating from the Terny plateau at the Ain Rhannous source and extending for 56 km. The Oued Isser, originating from Ain Isser south of Ouled Mimoun and extending for 81 km (Bouanani 2004). These watercourses converge north of Ain Youcef (Hayane 1983). The Oued Isser-Sikkak basin, located in the middle Tafna region, has an arid to semi-arid climate. Based on data from nine pluviometric stations within and around the watershed from 1975 to 2006, the mean annual rainfall is approximately 410 mm (Belarbi et al. 2022). The sub-basin is prone to surface water shortages, particularly during the dry season. A severe drought episode occurred in this region from 1979 to 1999 (Collignon and Bensaoula 2019). Temperatures at the Zenata station exhibit significant seasonal variations. January is the coldest month with an average temperature of 10.8°C, while August is the hottest month with an average temperature of 26.6°C (Bemmoussat et al. 2017). The average annual temperature is estimated to be 18°C. Monthly precipitation variations are significant, with March and April typically experiencing the highest rainfall and June, July, and August being the driest months (Bouanani 2010). The average flow rate of the Oued Isser-Sikkak basin varies significantly. It ranges from 0.001 cubic meters per second at the Meffrouche station to 1.409 cubic meters per second at the Pierre de Chat station, located at the basin outlet (Zettam et al. 2017). Potential evapotranspiration (PET) in the region is estimated at 1266.6 mm (Bouanani et al. 2012). Approximately 60% of the basin area is utilized for agricultural purposes.

2.1.1. Geological and hydrogeology context

The studied region exhibits two distinct geological formations. To the northwest, a depression is filled with Miocene and Quaternary formations, creating a vast aquifer. To the south and east, the Tlemcen Mountains, composed of karstified limestone and dolomite from the Upper Jurassic, serve as natural reservoirs with excellent transmissivity. Geological faults contribute to the formation of numerous small aquifers.

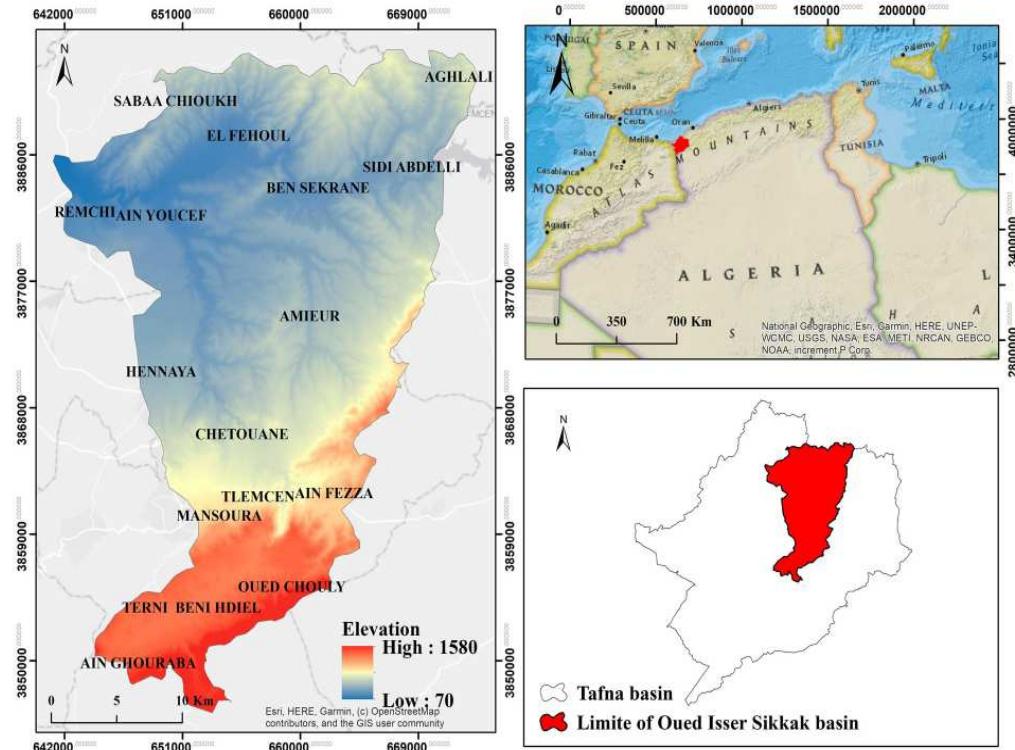


Figure 1. Geographical location of the study area.

Table 1. Collected data, their sources, and usage.

Data	Source	Scale / Resolution	size	Usage
ALOS Digital Elevation Model (DEM)	(https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/data/index.htm)	30 m	-	Slope and drainage density mapping
Landsat-8 OLI imagery	USGS – Earth Explorer (https://earthexplorer.usgs.gov/) Of 04.09.2021	Band 1 to 7 and 9 (30 m)	-	Lineament and land use/land cover mapping
Geological map	The Geological Service of Algeria	Band 8 (Panchromatic) (15 m)	-	Geological mapping
Precipitation data	National Meteorological Office (ONM) de 1975–2006	1:200,000	9 stations	Rainfall mapping
Well productivity data	Tlemcen Water Resources Directorate	-	43 wells	Evaluation of groundwater potential

The Hennaya Plain, part of the Oued Isser-Sikkak basin, is primarily covered by Quaternary sediments. However, in the Hennaya region, Tortonian sandstones and clayey gravels outcrop. These formations exhibit relatively low transmissivity, ranging from 1.1×10^{-4} to 2.8×10^{-5} m²/s, and low permeability, ranging from 2×10^{-5} to 4.9×10^{-5} m/s (Hayane 1983).

2.2. Materials and data

Data acquisition is the pivotal foundation for the success of any GWPZ project. In this context, we conducted an extensive review of relevant literature and leveraged our knowledge of the region to meticulously

choose the data needed for this study, with a focus on identifying the essential factors influencing groundwater flow and recharge (Danso and Ma 2023). The methodology adopted for the present study is illustrated in the following flowchart (Figure 2). The study incorporated six components to generate the groundwater potential zone map, namely slope, drainage density, geology, lineament density, land use, and rainfall, which were collected from multiple sources (Table 1).

2.3. Method

This study employed a methodology to analyze and integrate spatial information related to factors influencing

aquifer recharge. Firstly, each factor was individually assessed based on its role in infiltration. Thematic maps were then created for each factor, classifying them according to their infiltration capabilities. Ratings were assigned to each class within these thematic maps. Next, weights were assigned to the factors based on their relative influence on infiltration. The Analytic Hierarchy Process (AHP), introduced by Saaty (1980), was utilized for this purpose. Described by Sener et al. (2011) as an extensive technique, AHP integrates practical and subjective expert opinions to facilitate decision-making by assessing multiple factors (Mohseni et al. 2025). Within the AHP framework, each factor is ranked on a scale from one (equal significance) to nine (extreme significance) through pairwise comparisons. This process allows for the evaluation of each element's influence on groundwater potential (Razandi et al. 2015). Resultant layers were subsequently assigned weights derived from the AHP analysis and subjected to a weighted overlay analysis. The pairwise comparison matrix follows a specific format where rows represent the reciprocal value of each parameter relative to its importance concerning the second parameter. A generic pairwise comparison matrix is derived by normalizing the initial matrix. Subsequently, weights are estimated using the arithmetic mean. The consistency index (CI) is computed using corresponding expressions (Eq.(1),(2)) as outlined by Saaty (1980).

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (1)$$

Where CR represents the Consistency Ratio, CI represents the Consistency Index, and RI represents the Random Index. If the CR value exceeds 0.1, the matrix must be reevaluated. The Consistency Index (CI) is calculated using the following formula 2:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

where λ_{max} represents the principle matrix eigenvalue, n represents the number of factors, it is a benchmark value derived from Saaty's 1980 paper, that varies according to the number of components considered within the Analytic Hierarchy Process (AHP). The validity of the weights derived from the matrix is assured only if the Consistency Ratio (CR) is less than or equal to 0.1 (Abijith et al. 2020).

By employing the AHP method and determining the weights for each thematic map, the study was able to evaluate the interactions between the different factors involved in aquifer recharge. This approach provided a systematic and objective framework for decision-making regarding groundwater potential mapping.

In this study, six factors were evaluated to assess their contribution to the aquifer recharge process: slope, land use/land cover map, geology, rainfall, drainage density, and lineament density. Each factor was assigned a weighted value, based on its impact on groundwater potential, using Saaty's scale of 1–9 for pairwise comparison.

Factors with higher weights were considered to have a greater impact on groundwater potential, while those with lower weights had a smaller impact. It is important to consider previous studies and field experience when assigning weights to ensure accuracy.

To integrate these factors, all six vector layers were converted into raster layers. The weighted overlay analysis method was then applied in GIS software, using equation (3), to generate the groundwater potential zone map of the Oued Isser-Sikkak basin. This analysis combined the weighted values of each factor to identify areas with higher groundwater potential based on the integrated information.

λ_{max} represents the principal eigenvalue of the matrix. n represents the number of factors. RI is a benchmark value derived from Saaty's 1980 paper. This value varies depending on the number of components considered within the Analytic Hierarchy Process (AHP). The validity of the derived weights is ensured only if the Consistency Ratio (CR) is less than or equal to 0.1 (Abijith et al. 2020).

By employing the AHP method and determining the weights for each thematic map, the study evaluated the interactions between the different factors influencing aquifer recharge. This approach provided a systematic and objective framework for decision-making in groundwater potential mapping.

Six factors were evaluated to assess their contribution to the aquifer recharge process: slope, land use/land cover, geology, rainfall, drainage density, and lineament density. Each factor was assigned a weighted value, based on its relative importance to groundwater potential, using Saaty's 1–9 scale for pairwise comparisons.

Factors with higher weights were deemed to have a greater influence on groundwater potential, while those with lower weights had a lesser influence. Accurate weight assignment requires careful consideration of previous studies and field experience.

To integrate these factors, all six vector layers were converted into raster layers. The weighted overlay analysis method was then applied in GIS software, using equation (3), to generate the groundwater potential zone map of the Oued Isser-Sikkak basin. This analysis combined the weighted values of each factor to identify areas with higher groundwater potential.

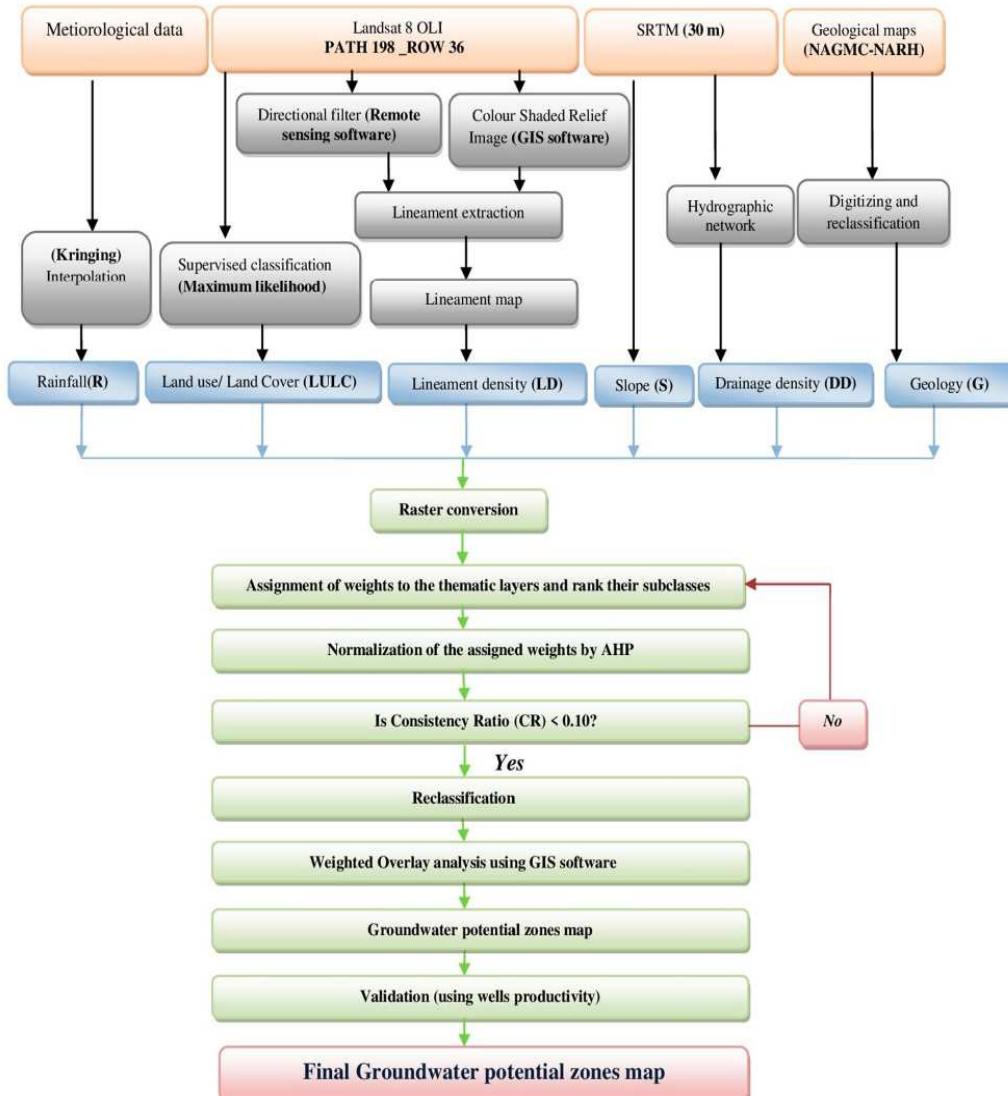


Figure 2. Adapted methodology flowchart for delineation of groundwater potential zones.

$$GWPZ = \sum_{i=1}^n (W_i \times CV_i) \quad (3)$$

Where: GWPZ groundwater potential index, W_i normalized thematic layer weight and CV_i capability value.

Validation of groundwater potential mapping using GIS and remote sensing is crucial to ensure the accuracy and reliability of the results. Field verifications and observations are essential. These steps verify the predictions made based on the integrated data and assess the actual groundwater conditions on site. During the validation process, field data relating to groundwater availability is collected, such as well flow data. Samples were

collected during the dry season (May – July 2023) to minimize the interference of surface water in the analysis of groundwater potential. These measurements are then compared to the predicted groundwater potential areas derived from the GIS analysis.

3. Results

3.1. Thematic layers

3.1.1. Geology

The studied region exhibits diverse lithological formations. These include Quaternary (Alluvium) and Pliocene (Lacustrine limestone and stony Alluvium).

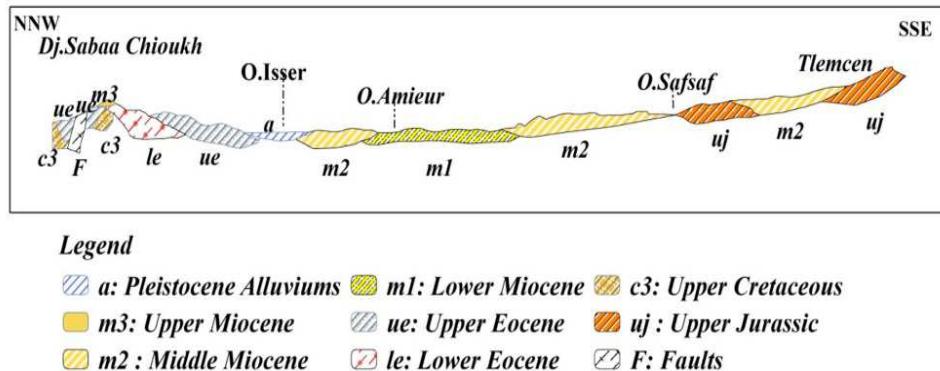


Figure 3. Geological cross-section of the Oued Isser-Sikkak basin (1/200.000)(Gentil 1902).

These formations are characterized by a successive accumulation of rounded pebbles, gravel, sands, and silts, typically exhibiting high permeability. Other formations include Upper Jurassic (Limestone and dolomites), Middle Miocene (Sandstone), Upper Eocene (Limestone overlain by sandstone and marl), Upper Miocene (limestone), Middle Eocene (sandstone and marl), and Lower Miocene (gray marl) (Figures 3 and 4). It should be noted that Upper Cretaceous formations, observed in the Geological cross-section, do not outcrop within the study area. Quaternary alluvium, occupying approximately 4.4% of the total area, is a highly permeable formation primarily located in the northern part of the basin. This formation was assigned a high weight due to its significant groundwater storage capacity (Mohammadi-Behzad et al. 2019). Gray marl, constituting approximately 6.4% of the land, is not suitable for groundwater recharge and was assigned a lower weight. The assigned weight for each lithological unit was determined based on its permeability, with higher weights assigned to formations with greater permeability and vice versa.

3.1.2. Lineament density

Lineament is another important factor widely considered for delineating groundwater potential zones (Muthumaniraja et al. 2019). A lineament can be defined as a linear feature in a landscape. Lineaments are typically related to faults and linear fracturing zones, bending deformation, and increased permeability of the crust (Florinsky 2016). These weaker zones often exhibit higher porosity, facilitating groundwater recharge (Goitsemang et al. 2020).

In hard rock terrain, the presence of permeability and secondary porosity indicates the occurrence and movement of groundwater. Groundwater occurrence and movement increase with higher lineament density

values. Furthermore, the probability of groundwater occurrence increases with decreasing distance from lineaments (Kom et al. 2024). As shown in Figure 5, the obtained lineament density values vary from 0 to 2.6 km/km². They were classified as very low, low, moderate, and high, with corresponding ranges of 0–0.6 km/km² (52.4%), 0.6–1.3 km/km² (33.3%), 1.3–1.9 km/km² (13.8%), and 1.9–2.6 km/km² (0.7%), respectively. The study area is dominated by a very low lineament density, with a concentrated stretch of high lineament density in the northern and central parts.

Lineament orientations were analyzed using directional rosettes to determine the number of lineaments in each direction. Numerous researchers have explored the statistical analysis of lineaments to study lineament network geometry and determine dominant regional directions (Pretorius and Partridge 1974). The rose diagram of the resulting lineaments displays their main direction as East–West, likely due to the elongation of the outcrops in the North–South direction.

3.1.3. Drainage density

Drainage density is calculated by dividing the total length of all stream segments by the total area of the drainage basin. It serves as an indicator of the proximity of stream channel spacing. Higher drainage density values imply closer spacing of stream channels. This leads to enhanced infiltration. Consequently, it boosts the groundwater recharge potential of the area. Conversely, lower drainage density values indicate the opposite.

In this study, the obtained drainage density values have been classified into four categories (Figure 6): very low (< 0.3 km/km²), low (0.3–0.7 km/km²), moderate (0.7–1 km/km²), high (1–1.5 km/km²), very high (1.5–2.5 km/km²). The drainage density class with the minimum weight is assigned to values less

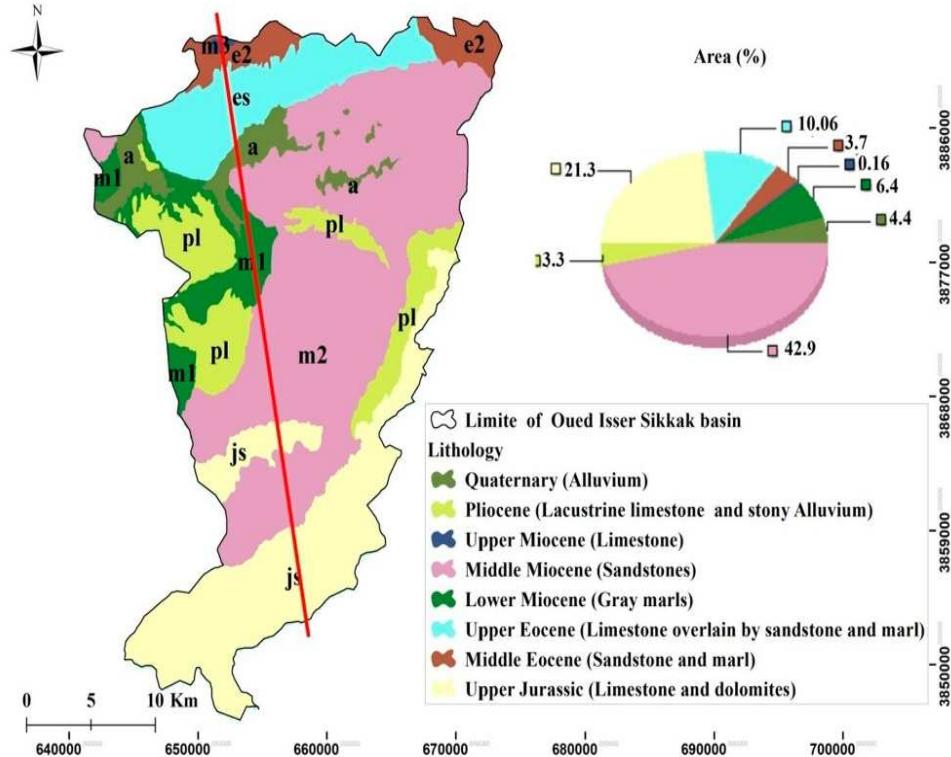


Figure 4. Geological map of Oued Isser-Sikkak watershed.

than 0.3 km/km², which covers over 30% of the basin area.

3.1.4. Slope

The slope of the studied area plays a direct role in the infiltration of rainfall into under - lying aquifers (Das and Pal 2019). Higher slope angles result in a steeper hydraulic gradient, which in turn leads to lower infiltration rates. Consequently, recharge of groundwater aquifers may be limited due to insufficient time for infiltration. On the other hand, areas with flatter slopes have increased surface water infiltration capacity (Abdalla et al. 2020).

In the case of the Oued Isser-Sikkak watershed, the slope varies across different categories: very low (0-3), low (3-9), moderate (9-15), high (15-23), and very high (23-67)(Figure 7). The near level category (0-3) received higher weighting as it promotes high infiltration. A significant portion of the study area falls within this category.

3.1.5. Rainfall

The potential for groundwater recharge is significantly influenced by the distribution of rainfall. Therefore,

this study analyzed rainfall data collected over the past 35years from nine rain gauge stations situated in and around the sub-watershed. The average annual precipitation ranged between 299 and 558 mm. The values were categorized into five groups: very low (299-351), low (351-403), moderate (403-455), high (455-506) and very high (506-558) (Figure 8). The spatial variation in precipitation within this region is primarily influenced by elevation. Generally, high-altitude regions tend to receive higher levels of precipitation, while low-altitude areas experience lower precipitation levels. This relationship between elevation and precipitation is closely tied to the topography of the terrain. Consequently, a great weight is assigned to high rainfall events due to their significant contribution to the groundwater potential in the respective zones (Kom et al. 2024).

3.1.6. Land use and land cover

Land use and land cover are factors that significantly influence the availability of aquifers and the identification of groundwater occurrence (Pande et al. 2018). In this study, seven categories were identified in the study area using GIS technology and remote sensing based on satellite images. These categories include urban center,

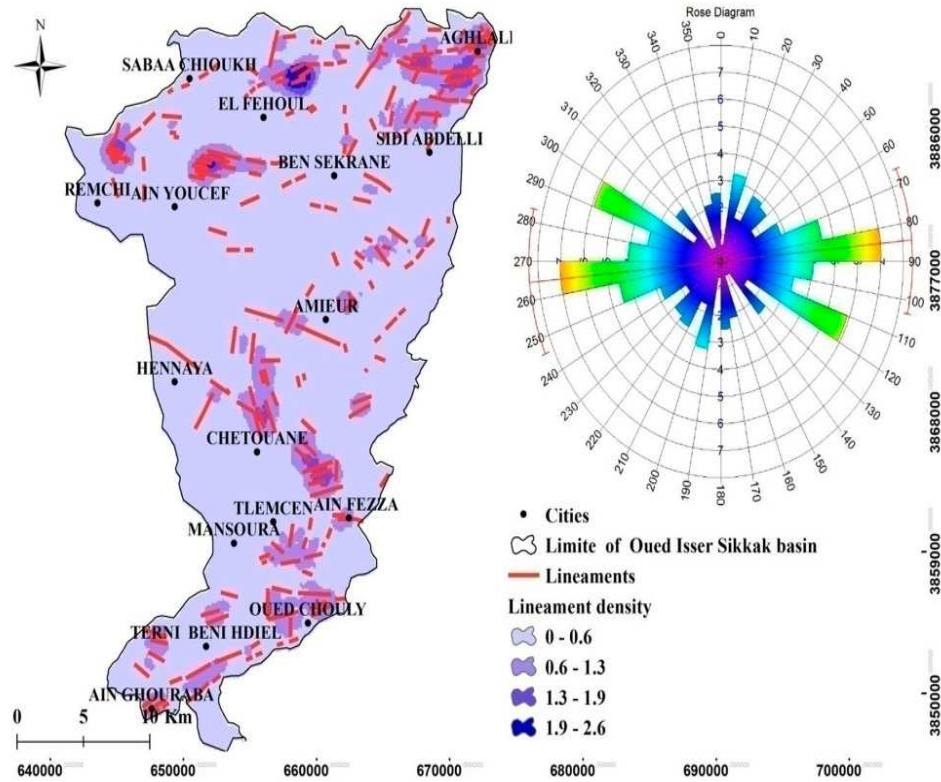


Figure 5. Lineaments density map of Oued Isser-Sikkak watershed.

agriculture, Barren ground, bush, clear forest, dense forest, and water bodies.

Considering the ground conditions, the distribution of these land cover classes varied across different maps. The majority of the study area (Figure 9) is characterized by agricultural land. The southern and western parts of the basin are dominated by bush land. The eastern and central parts are predominantly occupied by urban areas and agriculture. Additionally, a small percentage of the basin area is covered by water bodies (0.3%), which had the highest overlay weighted value.

3.2. Assignment and normalization of weights

The AHP method was used to assign weights to influencing parameters. This facilitated the mapping of potential groundwater areas in raster format using GIS software (Kessar et al. 2021). Table 2 presents the pairwise comparison matrix, demonstrating the reciprocal influence of the criteria. The consistency ratio (CR) of 0.06 is considered acceptable.

The weights assigned to different thematic layers and their individual features were normalized, taking

into account the potentiality of groundwater, as shown in table 3. The calculated normalized weights reveal that lithology has the highest weight (0.414). This is supported by the presence of a karst aquifer in the study area, where fracturing plays an important role in groundwater recharge. In addition, precipitation is assigned a significant weight (0.19).

The 'Rank' is used to quantify the relative importance of each class of influential factor in estimating GWPZ based on data synthesis and literature review. An initial value is assigned to each class. These values can be reasonably adjusted to optimize results, similar to the calibration done for mathematical modeling.

3.3. Groundwater potential zones map and validation

The potential groundwater zones map of the study area was generated using a weighted overlay analysis in GIS, considering the cumulative effect of six influencing factors (Agarwal and Garg 2016). The map classified the area into five categories (Figure 10): very high (4%), high (33.7%), Moderate (45.6%), low (12.5%), and very low (1.9%) in terms of groundwater potential.

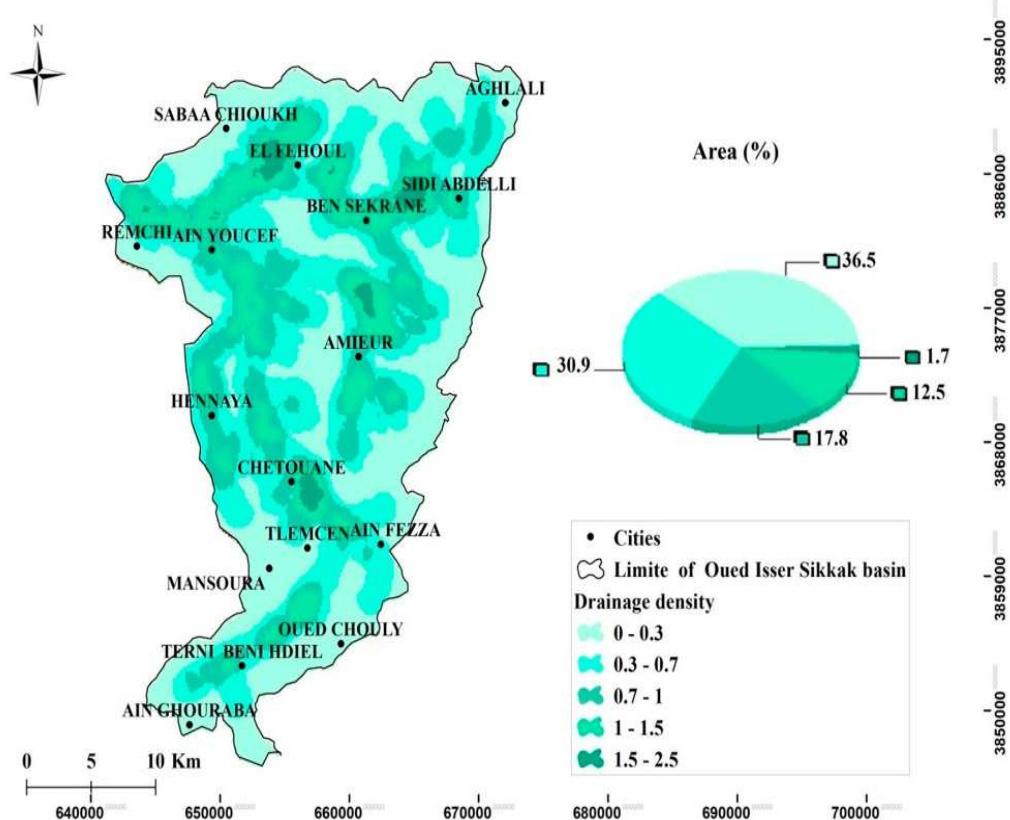


Figure 6. Drainage density map of Oued Isser-Sikkak watershed.

Table 2. Pairwise comparison matrix.

Factors	Li	R	LD	S	LULC	DD	Normalized weighted
Lithology Li	1	4	3	4	3	5	0.414
Rainfall R	1/4	1	1	2	4	4	0.190
Lineament density LD	1/3	1	1	1	2	3	0.141
Slope S	1/4	1/2	1	1	3	3	0.133
Land use/Land cover LULC	1/3	1/4	1/2	1/3	1	2	0.075
Drainage density DD	1/5	1/4	1/3	1/4	1/2	1	0.048

In the mapping process, lithology was given higher priority due to its significant influence on groundwater availability. On the other hand, drainage density was given relatively lower priority in determining potential groundwater areas.

3.4. Validation of groundwater potential zone map

The accuracy and reliability of the map of potential groundwater zones require validation. This validation must be conducted through field observations and measurements (Figure 11). Field validation confirms the correspondence between predicted potential areas and actual groundwater conditions in the field. This process ensures the robustness of the mapping methodology.

It also builds confidence in the obtained results.

The flow rates of the water points ranged from 0 to 74 l/s. The productivity rates of the wells were categorized into five classes: Very low ($P \leq 10$ l/s), low ($10 \leq P < 20$ l/s), moderate ($20 \leq P < 30$ l/s), high ($30 \leq P < 40$ l/s), and very high ($40 \leq P$). To assess the precision of the model, the located wells map was overlaid onto the main GWPZs map. Table 4 provides a description of the wells' productivity classes along with the corresponding groundwater expectations. Among the 43 wells considered in the analysis, 36 wells (83.7% of the total) showed a partial or complete agreement between the observed flow rates and the assigned groundwater potential zones. This indicates a high level of agreement between the real wells and the

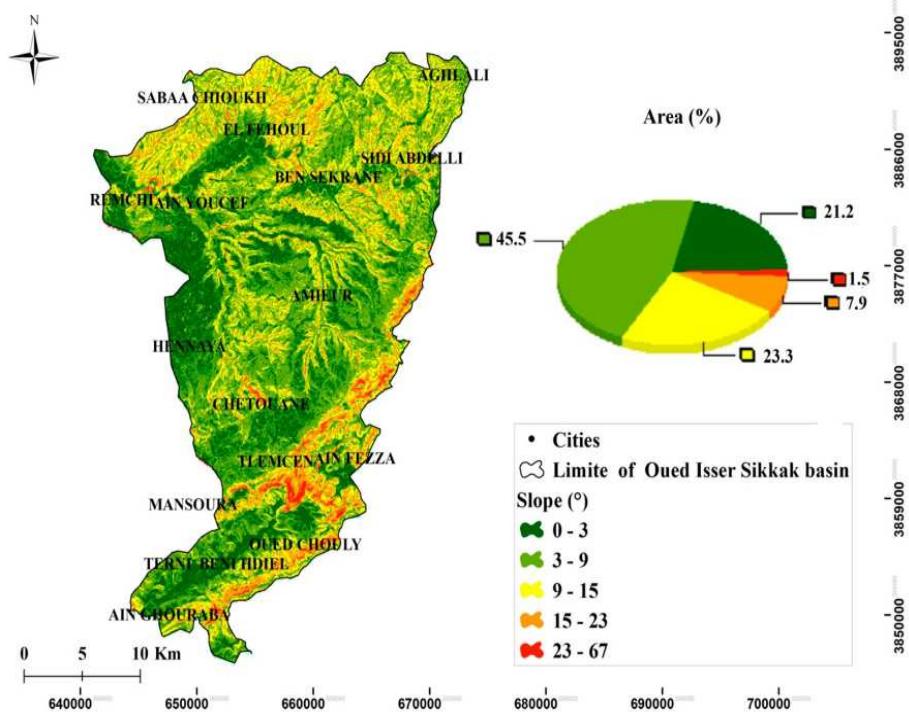


Figure 7. Slope map of Oued Isser-Sikkak watershed.

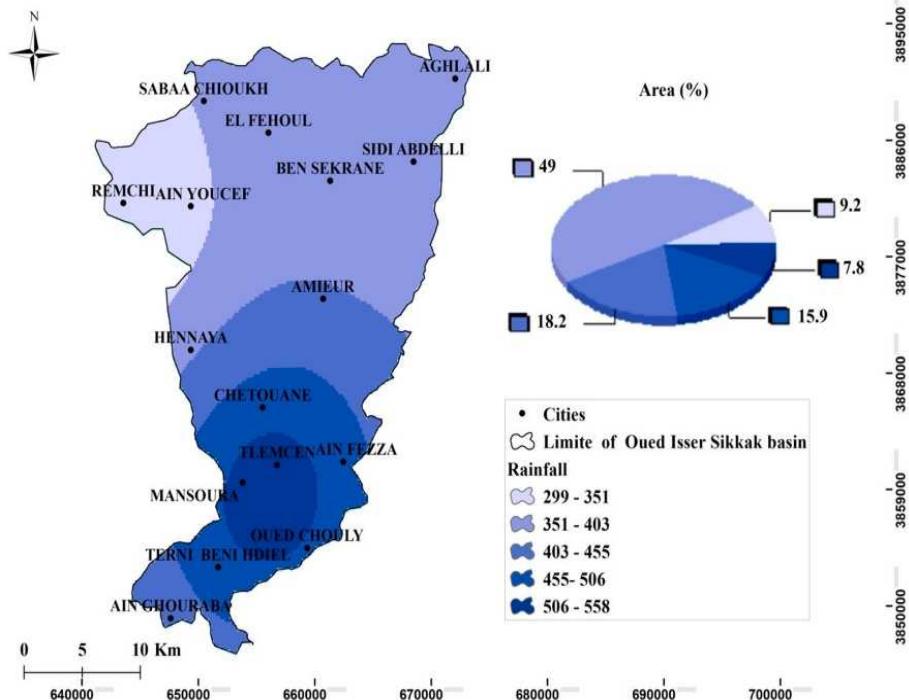


Figure 8. Rainfall map of Oued Isser-Sikkak watershed.

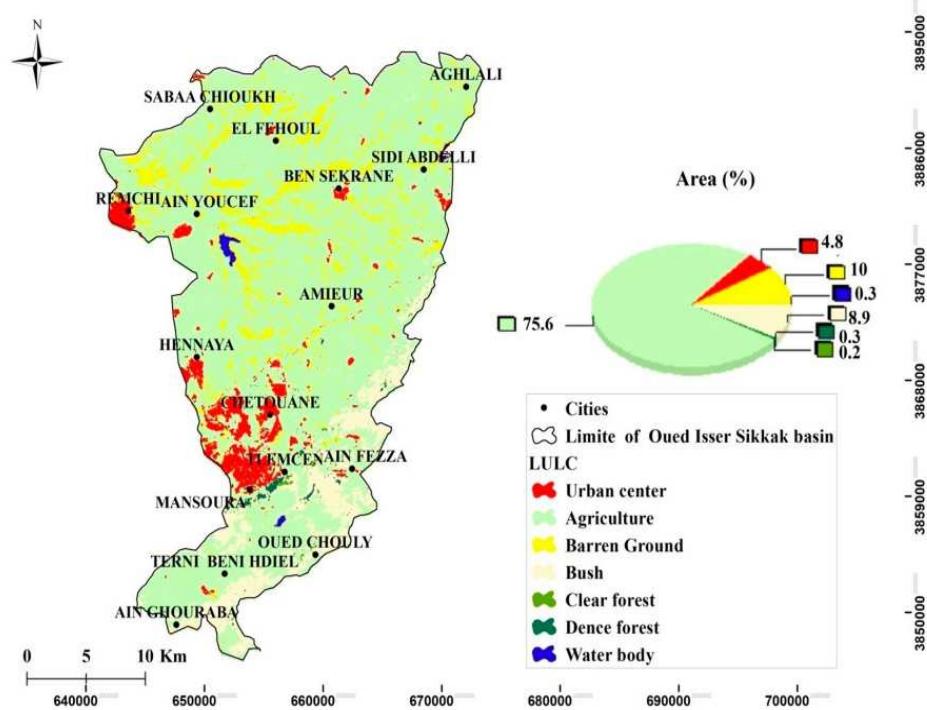


Figure 9. Land use/land cover map of Oued Isser-Sikkak watershed.

GWPZs map. However, 7 wells (16.2% of the total) displayed a clear disagreement between the observed flow rates and the assigned groundwater potential zones.

Despite being situated in high-potential zones, the seven wells (numbered 1, 3, 5, 8, 10, 11, and 12) exhibit lower productivity levels than expected. These wells are utilized for either urban (wells 1, 10, 11) or agricultural purposes (wells 3, 5, 8, 12). Several factors may contribute to this discrepancy, including inefficient well construction, over-exploitation of groundwater resources, or geological heterogeneity resulting in localized variations in aquifer properties.

The analysis of the wells in Figure 12 reveals the following concordance between the productivity of the wells and the assigned groundwater potential zones:

In the region characterized by a very high groundwater potential, one well displays notably very high productivity. Two wells exhibit high productivity, and one well shows very low productivity. Similarly, within the zone identified with high potential: Two wells show very high productivity. Five wells exhibit high productivity. One well exhibits moderate productivity. Three wells exhibit low productivity. Within the area demarcated with moderate groundwater potential, among the 16 wells, 7 exhibit moderate productivity. The remaining wells demonstrate a spectrum ranging from high

to low productivity. The zone designated with low groundwater potential comprises 10 wells. Five of these wells exhibit low productivity, and five exhibit very low productivity. Finally, the zone designated with very low groundwater potential comprises 2 wells. One well exhibits low productivity, and the other exhibits very low productivity.

4. Discussion

This study emphasizes the critical role of lithology and precipitation in controlling groundwater potential within the Oued Isser-Sikkak basin. High to very high potential zones are concentrated in the southern and eastern regions, coinciding with the Tlemcen Mountains, where highly fractured Jurassic limestones at elevations between 300 and 600 meters exhibit high permeability and serve as significant recharge areas, as confirmed by Collignon (2019). These findings align with previous research (Alem et al. 2017; Berthelin et al. 2023; González et al. 2024; Nanou et al. 2024), which has highlighted the influence of lithological characteristics and fracture systems in karst aquifers. Conversely, low potential zones are prevalent in the northwest, characterized by low-permeability formations such as Miocene marls and Eocene sandstones,

Table 3. Classification of influencing factors for groundwater potential zones.

Influencing factors	Category class	Rank	Rating	Normalized weight (%)
Lithology	Quaternary (Alluvium)	9	Very high	41.4%
	Pliocene (Lacustrine limestone and stony alluvium)	8		
	Upper Jurassic (Limestone and dolomites)	7	High	
	Middle Miocene (Gres)	6		
	Upper Eocene (Limestone overlain by sandstone and marl)	5	Moderate	
	Upper Miocene (Limestone)	4	Low	
	Middle Eocene (Sandstone and marl)	3		
	Lower Miocene (Gray marls)	2	Very low	
Rainfall	537–613	7	Very high	19%
	461–537	6	High	
	385–461	5	Moderate	
	309–385	4	Low	
	233–309	3	Very low	
Lineament Density	1.9–2.6	4	Very high	14.1%
	1.3–1.9	3	High	
	0.6–1.3	2	Moderate	
	0–0.6	1	Very low	
Slope	0–3	7	Very high	13.3%
	3–9	6	High	
	9–15	4	Moderate	
	15–23	2	Low	
	23–67	1	Very low	
Land use/ Land cover	Water body	8	Very high	7.5%
	Agriculture	7	Very high	
	Cleat forest	5	High	
	Bush	3	Moderate	
	Dense forest	3	Moderate	
	Barren ground	2	Low	
	Urban center	1	Very low	
Drainage density	1.5–2.5	6	Very high	4.8%
	1–1.5	5	High	
	0.7–1	4	Moderate	
	0.3–0.7	3	Low	
	0–0.3	2	Very low	

coupled with steep slopes that promote high surface runoff, consistent with the findings of Badmus et al. (2024). Moderate potential zones are observed in central and northern regions, where relatively permeable Miocene sandstones are present, however, their potential is constrained by urbanization and gentle to moderate slopes.

The results of this study can be contextualized within research on pluvial flooding, which represents the opposite phenomenon to groundwater recharge. Mohseni et al. (2025) applied the AHP method to

Table 4. The comparison of the groundwater potential area map with optimal productivity of 43 wells.

Wells N°	Actual yield (l/h)	Actual yield class	Estimated class	Agreement actual-estimated yields description
1	6	Very low	Moderate	Disagree
2	17	Low	Moderate	Partially agree
3	11	Low	High	Disagree
4	30	High	Very high	Partially agree
5	8	Very low	Very high	Disagree
6	13	Low	Very low	Partially agree
7	10	Low	Moderate	Partially agree
8	11	Low	High	Disagree
9	5	Very low	Low	Partially agree
10	5	Very low	Moderate	Disagree
11	9	Very low	Moderate	Disagree
12	16	Low	High	Disagree
13	18	Low	Low	Agree
14	21	Moderate	Moderate	Agree
15	23	Moderate	Moderate	Agree
16	30	Moderate	Moderate	Agree
17	10	Low	Low	Agree
18	36	High	High	Agree
19	14	Low	Moderate	Partially agree
20	20	Moderate	Moderate	Agree
21	32	High	High	Agree
22	31	High	High	Agree
23	15	Low	Moderate	Partially agree
24	20	Moderate	Moderate	Agree
25	3.5	Very low	Low	Partially agree
26	32	High	High	Agree
27	31	High	Moderate	Partially agree
28	20	Moderate	High	Partially agree
29	55	Very high	High	Partially agree
30	74	Very high	High	Partially agree
31	7	Very low	Very low	Agree
32	20	Moderate	Moderate	Agree
33	30	High	High	Agree
34	5	Very low	Low	Partially agree
35	4	Very low	Low	Partially agree
36	30	Moderate	Moderate	Agree
37	15	Low	Moderate	Partially agree
38	4	Very low	Low	Partially agree
39	11	Low	Low	Agree
40	49	Very high	Very high	Agree
41	10	Low	Low	Agree
42	22	Moderate	Moderate	Agree
43	5	Very low	Low	Partially agree

assess pluvial flood risk and identified precipitation, altitude, soil type, and drainage density as the most influential factors. These same parameters play a crucial role in groundwater recharge, but with inverse effects: while intense precipitation on low-permeability soils, in steep-slope areas, and with high drainage density promotes pluvial flooding, effective groundwater recharge is generally associated with permeable soils, moderate slopes, and lower drainage density. This finding aligns with our results. This comparison highlights the importance of an integrated water resources management approach, where understanding the factors that enhance groundwater recharge could also contribute to mitigating pluvial flood risks.

Validation of the groundwater potential area map against borehole data demonstrated a high level of agreement,

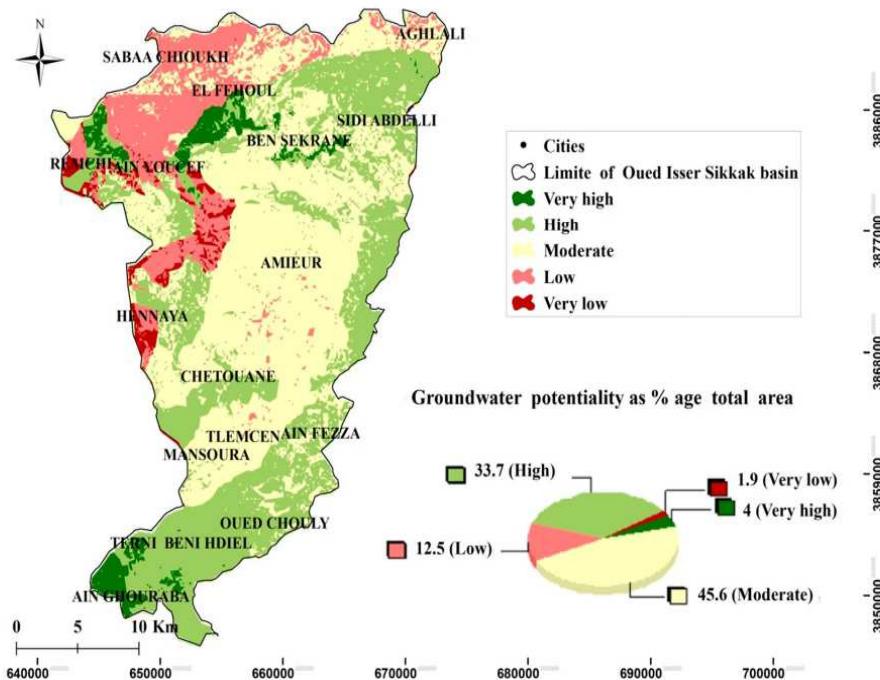


Figure 10. The distribution of wells over the study area.

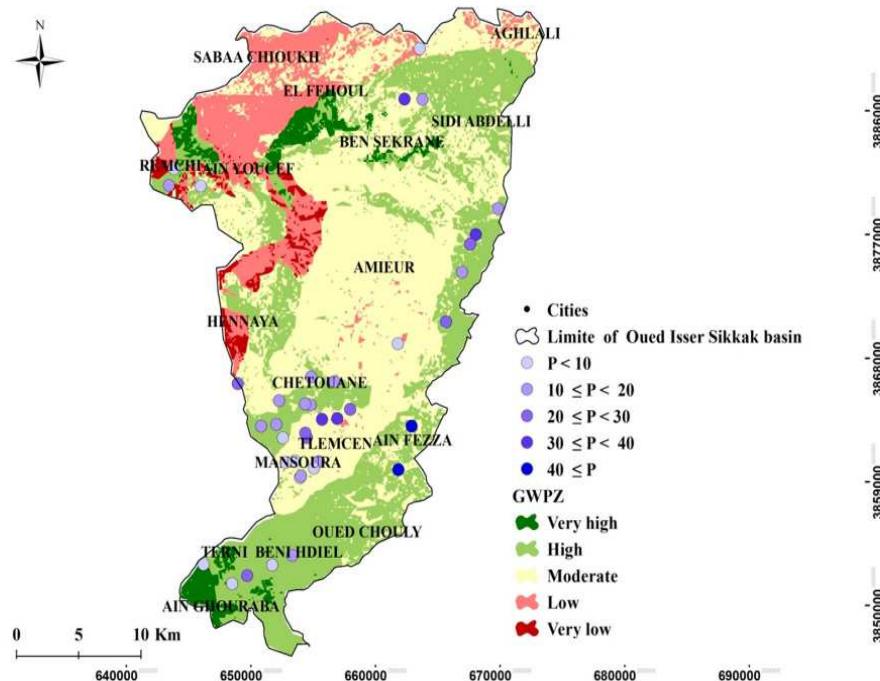


Figure 11. The distribution of wells over the study area.

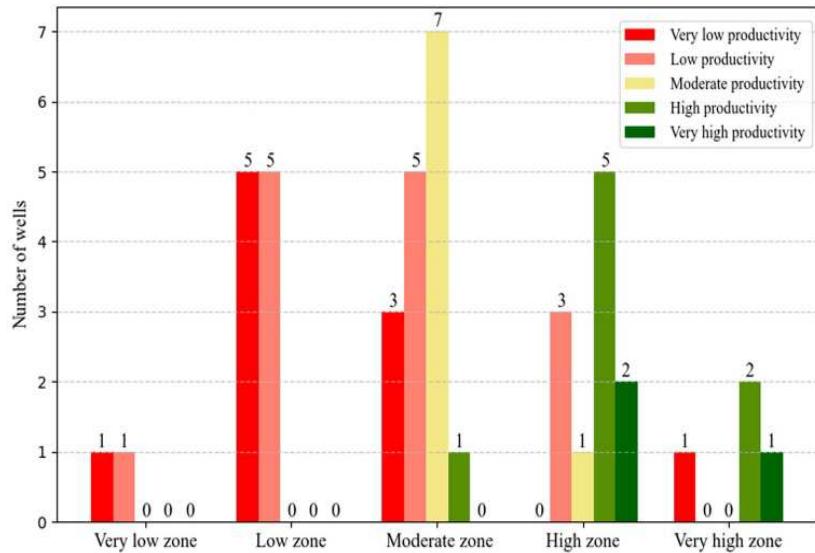


Figure 12. Diagram showing the productivity of water points according to the potential calculated by the Model.

with 83.7% of the 43 wells investigated (36 wells) confirming the overall reliability of the AHP methodology despite inherent subjective weightings. Discrepancies (16.3%) can be attributed to factors such as overexploitation of groundwater resources and unaccounted for local aquifer heterogeneities. Recognizing the vulnerability of recharge zones, primarily located in the Tlemcen Mountains and covering 37.7% of the basin, to pollution and climate change necessitates the implementation of targeted protection measures.

While the mapping of potential groundwater recharge zones through a multi-layered approach has proven valuable, it is not without limitations. Constraints in data availability limited the incorporation of critical factors influencing groundwater recharge processes, such as Terrain permeability, soil moisture, and geophysical data. Future research should prioritize integrating these variables to improve the accuracy and reliability of groundwater potential assessments. Additionally, the methodology does not fully account for aquifer interactions, commonly referred to as drainage relationships. These shortcomings can be mitigated by integrating hydrogeological modeling results, such as those obtained using MODFLOW (Navarro-Farfán et al. 2024), which explicitly consider aquifer interactions. Furthermore, incorporating hydrochemical and isotopic studies can provide deeper insights into groundwater recharge processes, enhancing both the accuracy and reliability of the results. The integration of these advanced tools, along with machine learning algorithms, allows for a more comprehensive understanding of recharge dynamics. This combined

approach not only addresses the limitations of conventional methods but also supports the development of a robust and sustainable framework for groundwater resource management within the basin.

5. Conclusion

Groundwater resources are critical in arid and semi-arid regions. They face increasing pressure from population growth and agricultural demands. This study investigated potential groundwater recharge zones within the Oued Isser-Sikkak Basin, a key region in northwest Algeria. We employed a multi-criteria decision analysis (AHP) framework. We integrated factors such as land use, slope, geology, drainage density, lineament density, and rainfall. The AHP method was then used to assign weights to these factors. Subsequently, we conducted an overlay analysis. This generated a groundwater potential map. The map categorized the study area into five classes: very high (4%), high (33.7%), moderate (45.6%), low (12.5%), and very low (1.9%). Areas characterized by limestone and dolomite formations in the southern and eastern regions exhibited the highest potential for groundwater recharge. Validation against field data from existing wells demonstrated a high accuracy. There was an 83.7% concordance rate. This confirms the effectiveness of the methodology in identifying promising recharge zones. Given Algeria's vast size and the considerable variability among its watersheds ranging from the arid Saharan region in the south to expansive plains and rugged

mountainous areas, this approach is best applied to basins that share similar characteristics.

Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the author(s).

Data availability

All input parameters and formulas in the models are listed in the text. The datasets generated during and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

ORCID

Oum eldjilali Soumia Mehella  <http://orcid.org/0009-0002-3698-0840>

References

- Abdalla F, Moubark K, Abdelkareem M. 2020. Groundwater potential mapping using GIS, linear weighted combination techniques and geochemical processes identification, west of the Qena area, Upper Egypt. *Journal of Taibah University for Science*. 14(1):1350–1362. doi:10.1080/16583655.2020.1822646.
- Abijith D, Saravanan S, Singh L, Jennifer JJ, Saranya T, Parthasarathy K. 2020. Gis based multi-criteria analysis for identification of potential groundwater recharge zones-a case study from Ponnaniyaru watershed, Tamil Nadu, India. *Hydro Research*. 3(1):1–14. doi:10.1016/j.hydres.2020.02.002.
- Agarwal R, Garg PK. 2016. Remote sensing and GIS-based groundwater potential and recharge zones mapping using multicriteria decision-making technique. *Water Resources Management*. 30(1):243–260. doi:10.1007/s11269-015-1159-8.
- Ake GE, Kouame KJ, Koffi AB, Jourda JP. 2018. Cartographie des zones potentielles de recharge de la nappe de Bonoua (sud-est de la Côte d'Ivoire). *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*. 31(2):129–144. doi:10.7202/1051696ar.
- Alem H, Soudejan A, Farmanieh S. 2017. Groundwater Recharge Assessment in the Karstic Aquifers of North Khorasan, Iran in APLIS Method. *Acta Car-sologica*. 46(2-3):283–294. doi:10.3986/ac.v46i2-3.4740.
- Aravindhasamy P, Karunanidhi D, Subramani T, et al. 2021. Demarcation of groundwater quality domains using GIS for best agricultural practices in the drought-prone Shanmuganadhi River basin of South India. *Environmental Science and Pollution Research*. 28:18423–18435. doi:10.1007/s11356-020-08518-5.
- Arulbalaji P, Padmalal D, Sreelash K. 2019. GIS and AHP techniques based delineation of groundwater potential zones: a case study from southern western Ghats, India. *Scientific Reports*. 9(1):2028. doi:10.1038/s41598-019-38567-x.
- Belarbi H, Touaibia B, Boumechra N, Abdelbaki C, Amiar S. 2022. Analysis of the Hydrological behavior of Watersheds in the Context of Climate Change (Northwestern Algeria). In: Sumi T, Kantoush SA, Saber M, editors. In *Wadi Flash Floods*. Singapore: Springer; p. 143–179. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2904-4_5.
- Bemoussat A, Adjim M, Bensaoula F. 2017. Use of the ZYROS Model for the estimation of groundwater recharge in Sikkak watershed (northern west of Algeria). *LARHYSS Journal*. 30:105–119.
- Berthelin R, Olarinoye T, Rinderer M, Mudarra M, Demand D, Scheller M, Hartmann A. 2023. Estimating karst groundwater recharge from soil moisture observations – A new method tested at the Swabian Alb, southwest Germany. *Hydrology and Earth System Sciences*. 27(2):385–400. doi:10.5194/hess-27-385-2023.
- Bouanani A. 2004. Hydrologie, transport solide et modélisation. Étude de quelques sous bassins de la Tafna (NW Algérie). *Doctorat d'Etat en hydrogéologie*. Algérie: Université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen.
- Bouanani R. 2010. Modélisation de la fonction pluie-débit. Application au bassin versant de la Tafna (NW algérien). *Mémoire de Magister*, Université Tlemcen.
- Bouanani R, Baba-Hamed K, Bouanani A. 2012. Utilisation d'un modèle global pour la modélisation pluie-débit: cas du bassin d'oued sikkak (NW algérien). *Revue Nature et Technologie*. 9:61–66.
- Boufekane A, Meddi H, Meddi M. 2022. Delineation of groundwater recharge zones in the Mitidja plain, north Algeria, using multi-criteria analysis. *Journal of Hydroinformatics*. 22(6):1468–1484. doi:10.2166/hydro.2020.082.
- Collignon B, Bensaoula F. 2019. L'exploitation des aquifères karstiques des monts de Tlemcen (Algérie) comme réserve stratégique en cas de sécheresse pluri-annuelle grave. In *Colloque international Sécheresses, étages et déficits en eau UNESCO/SHF Paris*.
- Danso SY, Ma Y. 2023. Geospatial techniques for groundwater potential zones delineation in a coastal municipality, Ghana. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. 26(1):75–84. doi:10.1016/j.ejrs.2022.12.004.
- Das B, Pal SC. 2019. Combination of GIS and fuzzy-AHP for delineating groundwater recharge potential zones in the critical Goghat-II block of west Bengal, India. *Hydro Research*. 2:21–30. doi:10.1016/j.hydres.2019.10.001.
- Das S, Mukherjee J, Bhattacharyya S, Patel PP, Banerjee A. 2022. Detection of groundwater potential zones using analytical hierarchical process (AHP) for a tropical river basin in the Western Ghats of India. *Environmental Earth Sciences*. 81:416. doi:10.1007/s12665-022-10237-w.
- Derdour A, Bouanani A, Kaid N, Mukdasai K, Algelany AM, Ahmad H, Menni Y, Ameur H. 2022. Groundwater Potentiality Assessment of Ain Sefra Region in Upper Wadi Namous Basin, Algeria Using Integrated Geospatial Approaches. *Sustainability*. 14:4450. doi:10.3390/su14084450.
- Duguma TA. 2023. RS and GIS analysis of the groundwater potential zones in the Upper Blue Nile River Basin, Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 46:101344. doi:10.1016/j.ejrh.2023.101344.
- Florinsky IV. 2016. *Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology*, 2nd ed. Amsterdam: Academic Press.
- Goitsemang T, Das D, Raul S, Subudhi C, Panigrahi B. 2020. Assessment of groundwater potential in the Kalahandi district of Odisha (India) using remote sensing, geographic

- information system and analytical hierarchy process. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. 48:1739–1753. doi:10.1007/s12524-020-01188-3.
- González KM, Flores Y, Camacho CO, Szucs P. 2024. Assessment of diffusive recharge at regional scale in karst systems, Amazon Basin, Ecuador. *Acta Carsologica*. 53(1):21–35. doi:10.3986/ac.v53i1.13618.
- Hayane SM. 1983. Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du bassin versant de l'oued Sikkak (région de Tlemcen). *Thèse de Doctorat de 3e cycle, Université d'Oran, Algérie*. 236 p. <https://link.springer.com/book/10.1007978-981-16-2904-4>.
- Kessar C, Benkesmia Y, Blissag B, Kébir LW. 2021. Delineation of groundwater potential zones in Wadi Saida watershed of NW-Algeria using remote sensing, geographic information system based AHP techniques and geostatistical analysis. *Journal of Groundwater Science and Engineering*. 9(1):45–64. doi:10.19637/j.cnki.2305-7068.2021.01.005.
- Kom K, Gurugnanam B, Sunitha V. 2024. Delineation of groundwater potential zones using GIS and AHP techniques in Coimbatore district, south India. *International Journal of Energy and Water Resources*. 8(1):85–109. doi:10.1007/s42108-022-00188-y.
- Megahed HA, Farrag AE-HA, Mohamed AA, D'Antonio P, Scopa A, AbdelRahman MAE. 2023. Groundwater Recharge Potentiality Mapping in Wadi Qena, Eastern Desert Basins of Egypt for Sustainable Agriculture Base Using Geomatics Approaches. *Hydrology*. 10:237. doi:10.3390/hydrology10120237.
- Megahed HA, GabAllah HM, AbdelRahman MAE, D'Antonio P, Scopa A, Darwish MH. 2022. Geomatics-based modeling and hydrochemical analysis for groundwater quality mapping in the Egyptian Western Desert: A case study of El-Dakhla Oasis. *Water*. 14(24):4018. doi:10.3390/w1424018.
- Megahed HA, GabAllah HM, Ramadan RH, AbdelRahman MAE, D'Antonio P, Scopa A, Darwish MH. 2023. Groundwater quality assessment using multi-criteria GIS modeling in drylands: A case study at El-Farafra Oasis, Egyptian Western Desert. *Water*. 15(7):1376. doi:10.3390/w15071376.
- Mohammadi-Behzad H, Charchi A, Kalantari N, Nejad AM, Vardan-Jani HK. 2019. Delineation of groundwater potential zones using remote sensing (RS), geographical information system (GIS) and analytic hierarchy process (AHP) techniques: a case study in the Leylia-Keynow watershed, southwest of Iran. *Carbonates and Evaporites*. 34:1307–1319. doi:10.1007/s13146-018-0420-7.
- Mohammed OA, Sayl KN. 2021. Identification of potential groundwater recharge zones using GIS-based multicriteria decision analysis. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 856:012049. doi:10.1088/1755-1315/856/1/012049.
- Mohseni U, Jat PK, Siriteja V. 2025. Multi-criteria analysis-based mapping of the cyclone-induced pluvial flooding in coastal areas of India. *DYSONA - Applied Science*. 6(2):309–321. doi:10.30493/das.2025.490282.
- Mouhouche B. 2012. Les problèmes du manque d'eau en Algérie: Une réalité qui fait peur. *Djadjid El-iktissad Review*. 7:40–57. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:184920065>.
- Muthumaniraja C, Anbazhagan S, Jothibasu A, Chinna-muthu M. 2019. Remote sensing and fuzzy logic approach for artificial recharge studies in hard rock terrain of south India. In: Senapathi V, Mohan PV, Yong CS, editors. In *GIS and Geostatistical Techniques for Groundwater Science*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier; p. 91–112.
- Nanou E-A, Perdikaris K, Tserolas P, Zagana E. 2024. Recharge assessment in Greek karst systems: Methodological considerations and implications. *Water*. 16(4):568. doi:10.3390/w16040568.
- Navarro-Farfán MdM, García-Romero L, Martínez-Cinco MA, Hernández-Hernández MA, Sánchez-Quispe ST. 2024. Comparison between MODFLOW groundwater modeling with traditional and distributed recharge. *Hydrology*. 11(1):9. doi:10.3390/hydrology11010009.
- Pande CB, Khadri S, Moharir KN, Patode R. 2018. Assessment of groundwater potential zonation of Maheshriver basin Akola and Buldhana districts, Maharashtra, India using remote sensing and GIS techniques. *Sustainable Water Resources Management*. 4:965–979. doi:10.1007/s40899-017-0193-5.
- Prapanchan VN, Subramani T, Karunanidhi D. 2024. GIS and fuzzy analytical hierarchy process to delineate groundwater potential zones in southern parts of India. *Groundwater for Sustainable Development*. 25:101110. doi:10.1016/j.gsd.2024.101110.
- Pretorius JPG, Partridge T. 1974. The analysis of angular atypicality of lineaments as an aid to mineral exploration. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 74(10):367–369. <https://hdl.handle.net/10520/AJA0038223X400>.
- Rather AF, Ahmed R, Wani GF, Ahmad ST, Dar T, Javaid S, Ahmed P. 2022. Mapping of groundwater potential zones in Pohru Watershed of Jhelum Basin-Western Himalaya, India using integrated approach of remote sensing, GIS and AHP. *Earth Science Informatics*. 15:2091–2107. doi:10.1007/s12145-022-00641-6.
- Razandi Y, Pourghasemi HR, Neisani NS, Rahmati O. 2015. Application of analytical hierarchy process, frequency ratio, and certainty factor models for groundwater potential mapping using GIS. *Earth Science Informatics*. 8(6):867–883. doi:10.1007/s12145-015-0220-8.
- Saaty TL. 1980. The analytic hierarchy process. McGraw-Hill, New York. *Agricultural Economics Review*. 70(804): 10–21236.
- Sankar K, Karunanidhi D, Kalaivanan K, Subramani T, Shanthi D, Balamurugan P. 2023. Integrated hydrogeophysical and GIS-based demarcation of groundwater potential and vulnerability zones in a hard rock and sedimentary terrain of Southern India. *Chemosphere*. 316:137305. doi:10.1016/j.chemosphere.2022.137305.
- Sekar I, Randhir T. 2007. Spatial assessment of conjunctive water harvesting potential in watershed systems. *Journal of Hydrology*. 334(1-2):39–52. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.09.024.
- Sener S, Sener E, Karagüzel R. 2011. Solid waste disposal site selection with GIS and AHP methodology: a case study in Senirkent-Uluborlu (Isparta) Basin, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*. 173(1):533–554. doi:10.1007/s10661-010-1403-x.
- Shinde SP, Barai VN, Gavit BK. 2024. Assessment of groundwater potential zone mapping for semi-arid environment

- areas using AHP and MIF techniques. *Environmental Sciences Europe*. 36(1):87. doi:10.1186/s12302-024-00906-9.
- Sulaiman WH, Mustafa YT. 2023. Geospatial multi-criteria evaluation using AHP-GIS to delineate groundwater potential zones in Zakho Basin, Kurdistan Region, Iraq. *Earth*. 4(3):655–675. doi:10.3390/earth4030034.
- Zettam A, Taleb A, Sauvage S, Boithias L, Belaidi N, Sánchez-Pérez JM. 2017. Modelling hydrology and sediment transport in a semi-arid and anthropized catchment using the SWAT model: The case of the Tafna river (northwest Algeria). *Water*. 9(3):216. doi:10.3390/w9030216.

Communications internationales

Variabilité pluviométrique dans le bassin versant d'Oued Sikkak, présentée lors de la **First International Conference on Water and Environment (ICWE'2022)**, à Mascara, Algérie, en 2022.

➤ https://web.univ-mascara.dz/events/pages/pres_evenement_en.php?q3=27

Étude de l'évolution de l'occupation du sol et des ressources en eau superficielle à l'aide de la télédétection : application au bassin versant d'Oued Sikkak, nord-ouest algérien, présentée lors de la **Second International Conference on Geosciences & Environment (ICGSE2022)**, à Mascara, Algérie, en 2022.

➤ https://web.univ-mascara.dz/events/pages/pres_evenement_en.php?q3=26

Intégration des SIG et de l'Apprentissage Automatique pour la Délimitation des Zones Potentielles d'Eau Souterraine : Cas du Bassin de l'Oued Isser-Sikkak, présentée lors de la **International Conference on Water Resources and Environmental Changes (CWREC'25)**, à Béchar, Algérie, en 2025.

➤ <https://cwrec2025.dz>

Communications nationales

Cartographie des linéaments structuraux à partir d'images satellites : Cas du bassin de l'Oued Fekan, présentée lors de la **First National Conference on Water, Soil and Environment Sustainability (NCWSES'2024)**, à Mascara, Algérie, en 2024.

Diagnostic de la situation hydrique du bassin de la Tafna, présentée lors de la **Journée d'étude « Eau, Environnement & Développement Durable » (JEEDD 2022)**, à Mascara, Algérie, en 2024.

Modélisation de la répartition du potentiel en eau souterraine dans un bassin versant de la wilaya de Mascara à l'aide de méthodes de Machine Learning, présentée lors de la **Journée d'Étude et Portes Ouvertes « Hydraulique : Enjeux, Innovations et Perspectives » (HEIP'2025)**, à Mascara, Algérie, en 2025.

Références

- Aju, C. D., Achu, A. L., Raicy, M. C., & Reghunath, R. (2021).** Identification of suitable sites and structures for artificial groundwater recharge for sustainable water resources management in Vamanapuram River Basin, South India. *HydroResearch*, 4, 24-37.
- Akram, M. B. (2015).** Contribution au recalage des images satellitaires de haute résolution pour le suivi à long terme des changements écologiques (Doctoral dissertation, Université Badji Mokhtar).
- Al-Djazouli, M. O., Elmorabiti, K., Rahimi, A., & Elmansour, A. (2021).** Delineating of groundwater potential zones based on remote sensing, GIS and analytical hierarchical process: A case of Waddai, eastern Chad. *GeoJournal*, 86, 1881–1894. <https://doi.org/10.1007/s10708-020-10160-0>
- Ali, I. A., & Konaté, M. (2020).** Identification Et Cartographie Des Zones Potentielles De Recharge Des Eaux Dans La Région De Dosso (Sud-Ouest, Niger) Par Analyse Multicritère.<https://doi.org/10.19044/esj.2020.v16n18p217>
- Alley, W. M. (2009).** *Ground water* (Vol. 47, No. 4). National Ground Water Association.
- Ampim, P. A., Ogbe, M., Obeng, E., Akley, E. K., & MacCarthy, D. S. (2021).** Land cover changes in Ghana over the past 24 years. *Sustainability*, 13(9), 4951.
- ANRH (1990).** Rapport de restructuration du réseau hydrométéorologique national. Direction des Systèmes d'Observation, Alger. 48p.
- Ardoïn-Bardin, S. (2004).** Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne (Doctoral dissertation, Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc).
- Auclair, D., & Biehler, J. (1967).** Etude géologique des Hautes Plaines oranaises entre Tlemcen et Saïda. Publications du Service de la Carte géologique de l'Algérie, 34, 3-45.
- Awasthi, A., & Kannan, G. (2016).** Green supplier development program selection using NGT and VIKOR under fuzzy environment. *Computers & Industrial Engineering*, 91, 100-108.<https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.11.011>
- Bakreti, A. (2014).** Modélisation hydrologique du bassin de la Tafna [Thèse de doctorat, Université d'Oran, Es Sénia]. Université d'Oran.
- Banque mondiale , (2019).** « Rapport sur le développement dans le monde 2019 : le travail en mutation », Washington D.C., <https://www.banquemondiale.org/fr/publication/wdr2019#related> Doi : 10.1596/978-1-4648-1328-3. Licence : Creative Commons AttributionCC BY 3.0 IGO
- Bekhtari, M. C. (2015).** Les méthodes multi-critères pour analyser les aptitudes des terres agricoles : Le cas du blé tendre en Languedoc-Roussillon, analysé avec la méthode AHP
- Belgiu, M., & Drăguț, L. (2016).** Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 114, 24-31.
- Benali, A. (2019).** Identification de zones urbaines à partir d'images satellitaires multi-spectrales [Thèse de doctorat, Université (nom de l'université)]. 117 pages.
- Benest, I. (1986).** Géomorphologie et évolution récente du bassin de la Tafna (Nord-Ouest Algérien) (Thèse de doctorat d'État, Université Paris X-Nanterre).
- Benest, I., Fontes, J.-Ch., et Soulié-Marsche, I. (1987).** Etude hydrogéologique
- Benest, M. (1985).** Évolution de la plate-forme de l'Ouest algérien et du Nord-Est marocain au cours du Jurassique supérieur et au début du Crétacé: stratigraphie, milieux de dépôt et dynamique sédimentaire (fascicule 1). *Travaux et Documents des Laboratoires de Géologie de Lyon*, 95(1), 3-367.
- Benest, M. (1990).** Importance du contrôle tectonique de la sédimentation au Tithonique inférieur dans l'avant-pays oranais (Algérie) : Exemple des monts de Tlemcen et de Saïda. *Société Géologique du Nord, Comptes Rendus*, CVIII, 155–163.
- Bensaoula, F. (2008).** Exportation des carbonates et dissolution spécifique dans le système karstique de Boumaza (Monts de Tlemcen-NO algérien). *Karstologia*, 52(1), 31-38.

Références

- Bernier, S., Duthoit, S., Ladet, S., & Baudet, D. (2014).** Les concepts de base des systèmes d'information géographique (SIG): les données et les fonctions générales. Le Cahier des Techniques de l'INRA, 19-26.
- Besbes, M., & De Marsily, G. (1984).** From infiltration to recharge: Use of a parametric transfer function. Journal of Hydrology, 74(3–4), 271–293. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(84\)90019-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(84)90019-2)
- Beun, N. (1977).** La nappe aquifère superficielle des Bas-Champs de Cayeux. Bulletin de l'Association de Géographes Français, 54(443), 155-158. <https://doi.org/10.3406/bagf.1977.4967>
- Bodian, A. (2014).** Caractérisation de la variabilité temporelle récente des précipitations annuelles au Sénégal (Afrique de l'Ouest). Physio-Géo. Géographie physique et environnement, (Volume 8), 297-312. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.4243>
- Böhlke, J. K. (2002).** Groundwater recharge and agricultural contamination. Hydrogeology Journal, 10, 153-179. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0183-3>
- Bonansea, M., Ledesma, C., Rodriguez, C., & Pinotti, L. (2015).** Water quality assessment using multivariate statistical techniques in Río Tercero Reservoir, Argentina. Hydrology Research, 46(3), 377-388.
- Bouanani, A. (2004).** Hydrologie, transport solide et modélisation: étude de quelques sous bassins de la Tafna (NW-Algérie). Doctorat d'Etat en hydrogéologie, Université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen, Algérie.
- Bouanani, A. (2004).** Hydrologie, transport solide et modélisation Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW Algérie). Thèse, Université d'Oran, 245 p
- Boucif, A. (2006).** Etude de la sismicité du bassin néogène de la Tafna (Doctoral dissertation, Tlemcen, Université Abou Bekr Belkaïd).
- Boudhar, A., Hanich, L., Boulet, G., Er-Raki, S., Chehbouni, A., & Jarlan, L. (2009).** Étude de l'impact de la fonte nivale sur la dynamique hydrologique en climat semi-aride. Revue des Sciences de l'Eau, 22(2), 143–158.
- Boudjebieur, E. (2022).** Modélisation de la gestion des eaux dans la région de Guelma. (Thèse de doctorat). Université Badji Mokhtar-. Annaba. 70–78).
- Boukli Hacene, S. (2014).** Bioécologie des Coléoptères (Arthropodes-Insectes) du marais salé de l'embouchure de la Tafna (Tlemcen).
- Boulabeiz, A., Siam, M., & Bourouis, A. (2017).** Etude comparative et contribution aux techniques de secret réparti appliquée à l'imagerie numérique.
- Bouteldjaoui, F., Kettab, A., & Bessenasse, M. (2017).** Identification of the Hydrogeochemical Process in Zahrez Basin, Algeria. Algerian Journal of Environmental Science and Technology, 3(1).
- Bouzekri, A. (2015).** Evaluation Multicritere Des Situations Critiques Au Risque De La Desertification Dans Les Aures (Algérie) (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).
- Bouzekri, A., & Benmessaoud, H. (2014).** Study and diachronic analysis of changes of ground occupation area of oriental Aures Algeria. Analele Universității Din Oradea, Seria Geografie, 24(2), 180-189.
- Breiman, L. (2001).** Random forests. Machine learning, 45, 5-32.
- Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (2011).** Introduction to remote sensing. Guilford press.
- Chakraborty, S. (2022).** TOPSIS and Modified TOPSIS: A comparative analysis. Decision Analytics Journal, 2, 100021. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2021.100021>
- Chakraborty, S., & Yeh, C. H. (2009).** A simulation comparison of normalization procedures for TOPSIS. In 2009 International Conference on Computers & Industrial Engineering (pp. 1815-1820). IEE
- Chantry, G. (2003).** Estimation des taux de recharge de nappe en zone semi-aride par la méthode du bilan des chlorures (MBC): Impact de la variabilité spatio-temporelle des teneurs en Cl-dans les précipitations et application à deux grands bassins sédimentaires au Sahel. Mémoire. Fondation Universitaire Luxembourggeoise-Université de Liège-IRD.
- Chaouche, T. (2018).** Analyse hydroclimatique et variabilité spatio-temporelle des précipitations en Algérie nord-occidentale (Thèse de doctorat, Université d'Oran 1).
- Chaumont, M., & Paquin, C. (1971).** Carte pluviométrique de l'Algérie (moyenne 1913–1963), 1/500 000 (4 planches). Alger.

Références

- Chen, T., & Guestrin, C. (2016).** Xgboost: A scalable tree boosting system. In Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD international conference on knowledge discovery and data mining (pp. 785-794).
- Choi, S. H., Shin, E., Makarigakis, A., Sohn, O., Clench, C., & Trudeau, M. (2021).** The Role of sound groundwater resources management and governance to achieve water security.
- Collignon, B. (1986).** Hydrogéologie appliquée des aquifères karstiques des monts de Tlemcen (Thèse de doctorat, Université d'Avignon, France).
- Cortes, C., & Vapnik, V. (1995).** Support-vector networks. *Machine learning*, 20, 273-297.
- Crosbie, R., Wang, B., Kim, S., Mateo, C., & Vaze, J. (2023).** Changes in the surface water-groundwater interactions of the Murray-Darling Basin (Australia) over the past half a century. *Journal of Hydrology*, 622(Part B), 129683. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129683>
- Daoudi, A., Lejars, C., & Benouniche, N. (2017).** La gouvernance de l'eau souterraine dans le Sahara algérien : enjeux, cadre légal et pratiques locales. *Cahiers Agricultures*, 26(3), 35004. <https://doi.org/10.1051/cagri/2017021>
- De Matteis, L., Janny, S., Nathan, S., & Shu-Quartier, W. (2022).** Introduction à l'apprentissage automatique. *Culture Sciences de l'ingénieur*.
- De Vries, J. J., & Simmers, I. (2002).** Groundwater recharge: An overview of processes and challenges. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 5-17. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0171-7>
- Díaz-Alcaide, S., & Martínez-Santos, P. (2019).** Advances in groundwater potential mapping. *Hydrogeology Journal*, 27(7), 2307-2324.
- Diriba, D., Takele, T., Karuppannan, S., & Husein, M. (2024).** Flood hazard analysis and risk assessment using remote sensing, GIS, and AHP techniques: a case study of the Gidabo Watershed, main Ethiopian Rift, Ethiopia. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 15(1), 2361813.
- Djorfi, S., Beloulou, L., Djorfi, S., Djidet, M., & Guechi, S. (2018).** Hydrothermal characterization of groundwater in the Tamlouka Plain and its surroundings (Northeast Algeria). *J Biol Environ Sci*, 12(2), 77-85.
- Dormann, C. F., Elith, J., Bacher, S., Buchmann, C., Carl, G., Carré, G., ... & Lautenbach, S. (2013).** Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*, 36(1), 27-46.
- Doumouya, I., Dibi, B., Kouame, K. I., Saley, B., Jourda, J. P., Savane, I., & Biemi, J. (2012).** Modelling of favourable zones for the establishment of water points by geographical information system (GIS) and multicriteria analysis (MCA) in the Aboisso area (South-east of Côte d'Ivoire). *Environmental earth sciences*, 67, 1763-1780.
- Dripps, W. R., & Bradbury, K. R. (2009).** The spatial and temporal variability of groundwater recharge in a forested basin in northern Wisconsin. *Hydrological Processes*, 24(4), 383-392. <https://doi.org/10.1002/hyp.7497>
- Durand-Delga, M. (1980).** Considérations sur les flyschs du Crétacé inférieur dans les chaînes alpines d'Europe. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 7(1), 15-30.
- Efe, B. (2016).** An integrated fuzzy multi criteria group decision making approach for ERP system selection. *Applied Soft Computing*, 38, 106-117. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.09.037>
- El Morjani, Z. E. A., Seif Ennasr, M., Elmouden, A., Idbraim, S., Bouaakaz, B., & Saad, A. (2017).** Flood hazard mapping and modeling using GIS applied to the Souss river watershed. The Souss-Massa River Basin, Morocco, 57-93.
- El Orfi, T., El Ghachi, M., Lebaut, S., & Gille, E. (2022).** Estimation des réserves en eau souterraine régulatrices dans le haut bassin de l'Oum Er Rbia (Maroc). Communication présentée au 35^e colloque annuel de l'Association Internationale de Climatologie : Le changement climatique, les risques et l'adaptation, Toulouse, France. <https://hal.science/hal-03801355>
- Elmi, S. (1972).** L'instabilité des Monts de Tlemcen et de Rhar Roubane (Ouest algérien) pendant le Jurassique, interprétation paléogéographique.
- ERDAS, (1999).** ERDAS Field Guide Revised and Expanded. 5th Edition, ERDAS Inc., Atlanta.
- Esri France. (2019).** Géodécision : Enjeux et solutions pour les territoires. <https://www.esrifrance.fr/rapport-geodecision-2019>

Références

- Ester, M., Kriegel, H. P., Sander, J., & Xu, X. (1996).** A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. In *kdd* (Vol. 96, No. 34, pp. 226-231).
- Sabor, K., Jougnot, D., Guerin, R., Steck, B., Henault, J. M., Apffel, L., & Vautrin, D. (2021).** A data mining approach for improved interpretation of ERT inverted sections using the DBSCAN clustering algorithm. *Geophysical Journal International*, 225(2), 1304-1318, <https://doi.org/10.1093/gji/ggab023>
- FAO (2021).** Food and Agriculture Organization of the United Nations. Faostat. <http://faostat.fao.org>
- Flint, A. L., Flint, L. E., Kwicklis, E. M., Fabryka-Martin, J. T. & Bodvarsson, G. S. (2002)** Estimating recharge at Yucca Mountain, Nevada, USA: comparison of methods. *Hydrogeol. J.* 10(1), 180–204.
- Friedman, J. H. (2001).** Greedy function approximation: a gradient boosting machine. *Annals of statistics*, 1189-1232.
- Gentil, É. (1902).** La chute de l'empire de Rabah. Hachette.
- Gentil, L. (1903).** Etude géologique du bassin de la Tafna (Vol. 4). A. Jourdan.
- Géron, A. (2022).** Hands-on machine learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow: Concepts, tools, and techniques to build intelligent systems. " O'Reilly Media, Inc.".
- Ghaemi, M., Nazari, M., & Taghizadeh, A. (2017).** Using support vector machines and decision trees for soil classification. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(11), 576. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6272-8>
- Ghenim, A. N., & Megnounif, A. (2013).** Analysis of rainfall in Northwestern Algeria. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 24(2), 107-114.
- Khaldi, A. (2005).** Impacts de la sécheresse sur le régime des écoulements souterrains dans les massifs calcaires de l'Ouest Algérien" Monts de Tlemcen-Saida. These de doctorat, université d'Oran, Algérie.
- Gosselin, J.-S. (2016).** Estimation de la recharge à partir de séries temporelles de la température du sol, des niveaux d'eau dans les puits et de données météorologiques: Développement méthodologique et évaluation de l'incertitude [Thèse de doctorat, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, Centre Eau Terre Environnement].
- Grönwall, J., & Danert, K. (2020).** Regarding groundwater and drinking water access through a human rights lens: Self-supply as a norm. *Water*, 12(2), 419.<https://doi.org/10.3390/w12020419>
- Guardia, P. (1975).** Géodynamique de la marge alpine du continent africain d'après l'étude de l'Oranie nord-occidentale (Doctoral dissertation, Toulouse).
- Guerinial, A. (2012).** Analyse spatio-temporelle par télédétection de la région de Djelfa – Évolution de l'occupation du sol (Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure Agronomique El Harrach, Alger, 109 p.).
- Guns, M., & Vanacker, V. (2012).** Logistic regression applied to natural hazards: rare event logistic regression with replications. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(6), 1937-1947.
- Hancer, E., & Karaboga, D. (2017).** A comprehensive survey of traditional, merge-split and evolutionary approaches proposed for determination of cluster number. *Swarm and Evolutionary Computation*, 32, 49-67.
- Hani, A. (2010).** Approches méthodologiques pour l'analyse de la structure, des écoulements et des influences anthropiques: application aux ressources en eau dans des systèmes aquifères complexes (Doctoral dissertation).
- Haouas, F. (2019).** Raisonnement approximatif pour la détection et l'analyse de changements (Doctoral dissertation, Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Atlantique).
- Harbaugh, A. W. (2005).** MODFLOW-2005, the US Geological Survey modular ground-water model: the ground-water flow process (Vol. 6). Reston, VA, USA: US Department of the Interior, US Geological Survey.
- Hayane, S. M. (1983).** Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du bassin versant de l'oued Sikkak (région de Tlemcen) (Doctoral dissertation).
- Healy, R. W. (2010).** Estimating groundwater recharge. Cambridge university press.
- Herman, M. W., & Koczkodaj, W. W. (1996).** A Monte Carlo Study of Parwise Comparison. *Inf. Process. Lett.*, 57(1), 25-29.
- Hosmer, D. W., & Lemeshow, S. (2000).** Applied logistic regression (2nd ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/0471722146>
- Hountondji, B., Codo, F. P., Dahounto, S. V. H., & Gbaguidi, T. B. (2019).** Gestion des inondations en milieu urbain : Cas de la ville de Cotonou au Bénin. *Larhyss Journal*, (39), 333–347

Références

- IRD. (1998).** KhronoStat (version 1.0) [Logiciel]. IRD, Montpellier.<http://www.hydrosciences.org/spip.php?article239>
- Jensen, J. R. (2005).** Introductory digital image processing: A remote sensing perspective (3rd ed., pp. 505–512). Prentice Hall.
- Jensen, J. R. (2007).** Remote sensing of the environment: An Earth resource perspective (2nd ed.). Pearson Prentice Hall.
- Kamznan, Y. (2012).** Élaboration d'un modèle de protection des eaux souterraines en zone de socle : Cas des aquifères fissurés du bassin versant de la Lobo à Nibéhibé (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire) (Thèse de doctorat, Université Jean Lorougnon Guédé, 194 p.).
- Khoumeri, E. H. (2007).** Représentation des données spatiales à différents niveaux d'abstraction: application à l'archéoastronomie (Doctoral dissertation, Université Pascal Paoli).
- Koczkodaj, W. W., Mikhailov, L., Redlarski, G., Soltys, M., Szybowski, J., Tamazian, G., ... & Yuen, K. K. F. (2016).** Important Facts and Observations about Pairwise Comparisons (the special issue edition). *Fundamenta Informaticae*, 144(3-4), 291-307.
- Koehl, M. (2004).** SIG, une histoire de définitions. *Revue de l'Association Française de Topographie*, (101), 61-66.
- LaBaugh, J. W., Rosenberry, D. O., & Winter, T. C. (1995).** Groundwater contribution to the water and chemical budgets of Williams Lake, Minnesota, 1980–1991. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 52(4), 754-767.
- Lakhdari, S. (2022).** Apport du Traçage Chimique et Isotopique à l'Identification des Aquifères des Aurès (Doctoral dissertation).
- Lassaube, G. (2020).** Produire et protéger une ressource cachée: Analyse comparée France-Inde de la constitution des eaux souterraines en discipline et métier aux prises avec des enjeux contradictoires (Doctoral dissertation, Université de Bordeaux).
- Lee, S., & Seo, K. K. (2016).** A hybrid multi-criteria decision-making model for a cloud service selection problem using BSC, fuzzy Delphi method and fuzzy AHP. *Wireless Personal Communications*, 86, 57-75.<https://doi.org/10.1007/s11277-015-2976-z>
- Lerner, D. N., Saether, O. M., & de Caritat, P. (1997).** Groundwater recharge. In O. M. Saether & P. de Caritat (Eds.), *Geochemical processes, weathering and groundwater recharge in catchments* (pp. 109–150). Balkema.
- Li, M., Gao, Q., & Yu, T. (2023).** Kappa statistic considerations in evaluating inter-rater reliability between two raters: which, when and context matters. *BMC cancer*, 23(1), 799
- Lillesand, T.M., Kiefer, R.W., & Chipman, J.W. (2015).** *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley & Sons.
- Liu, Y., Wu, S., Wu, Z., & Zhou, S. (2024).** Application of gradient boosting machine in satellite-derived bathymetry using Sentinel-2 data for accurate water depth estimation in coastal environments. *Journal of Sea Research*, 201, 102538.<https://doi.org/10.1016/j.seares.2024.102538>
- Magesh, N. S., Chandrasekar, N., & Soundranayagam, J. P. (2012).** Delineation of groundwater potential zones in Theni district, Tamil Nadu, using remote sensing, GIS and MIF techniques. *Geoscience frontiers*, 3(2), 189-196.
- Mandal, J., Ghosh, N., & Mukhopadhyay, A. (2019).** Urban growth dynamics and changing land-use land-cover of megacity Kolkata and its environs. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 47(10), 1707-1725.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993).** The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology* (Vol. 17, No. 22, pp. 179-183).
- Memurtry, G. J., Petersen, G. W., & Rambert, C. E. (1973).** Analog to digital conversion and processing of MSS data using a hybrid computer (No. E74-10033).
- Meddi, M., & Hubert, P. (2003).** Impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau du Nord-Ouest de l'Algérie. *Hydrological Sciences Journal*, 48(3), 339–352.
- Medinger, G. (1956).** Hauteurs de pluies en Algérie, moyenne 1913-1953 (recueil statistique). SES, Alger, 23p.

Références

- Megartsi, M. (1985).** Le volcanisme mio-plio-quaternaire de l'Oranie nord occidentale(Algérie). Thèse d'Etat. Université d'Alger, 296 p.
- Mejni, F. (2008).** Structures synchronisées dans les écoulements inhomogènes de convection mixte en milieu poreux (Doctoral dissertation, université des sciences et technologies de lille, lille1).
- Mekahli, L. (1998).** Évolution des Monts des Ksour (Algérie) de l'Hettangien au Bajocien. Biostratigraphie, sédimentologie, paléogéographie et stratigraphie séquentielle. Travaux et Documents des Laboratoires de Géologie de Lyon, 147(1), 3-319.
- Merabet-Baghl, N., Bouanani, A., & Billaud, J. P. (2018).** Comment traiter la question de l'eau en Algérie How to deal with the issue of water in Algeria.
- Mohia, Y. (2018).** Analyse et classification d'images multispectrales basée sur l'extraction des paramètres texturaux et spectraux des images MSG (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- Mussa, I., Debella, A., Maruta, M. B., Getachew, T., Regassa, L. D., Gamachu, M., ... & Eyeberu, A. (2024).** Fetal malnutrition among neonates in African countries: a CAN score systematic review and meta-analysis. Nutrition journal, 23(1), 102.
- Naghibi, S. A., Ahmadi, K., & Daneshi, A. (2017).** Application of support vector machine, random forest, and genetic algorithm optimized random forest models in groundwater potential mapping. Water Resources Management, 31, 2761-2775.
- Ndiaye, M., Boissy, R., & Faye, M. (2025).** Évaluation comparative des algorithmes d'apprentissage automatique pour la classification des types de sols à partir de caractéristiques physico-chimiques: application de Random Forest, XGBoost, SVM et KNN. VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement.
- Nguyen, P. T., Ha, D. H., Avand, M., Jaafari, A., Nguyen, H. D., Al-Ansari, N., ... & Pham, B. T. (2020).** Soft computing ensemble models based on logistic regression for groundwater potential mapping. Applied Sciences, 10(7), 2469.<https://doi.org/10.3390/app10072469>
- Osmani, Y. (2023).** Synthèse hydrologique du bassin versant de l'Oued Sikkak. Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed, Faculté des Sciences de la Terre, Département de Géologie.
- Ouis, S., & Azzaz, H. (2024).** Impact des fluctuations pluviométriques sur le ruissellement de surface dans un contexte de variabilité climatique : Cas du bassin versant de la Tafna (Nord-Ouest algérien). TSM – Techniques Sciences Méthodes, (5),
- Perrodon, A. (1957).** Etude géologique des bassins néogènes sublittoraux de l'Algérie occidentale. Bulletin N0 12. Service de la Carte géologique de l'Algérie. Algérie
- Pettitt, A. N. (1979).** A non-parametric approach to the change-point problem. Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics), 28(2), 126-135.. <https://doi.org/10.2307/2346729>
- Pouyanne, J. (1877).** Notice géologique sur la subdivision de Tlemcen. Algérie occidentale). Ann.
- Rahmani, A., Bouanani, A., Kacemi, A., & Hamed, K. B. (2017).** Contribution of GIS for the survey and the management of water resources in the basin “Benhandjir–Tirkount”(Ain Sefra)–mounts of Ksour-Saharian Atlas–Algeria. Journal of Fundamental and Applied Sciences, 9(2), 829-846
- Rahmati, O., Pourghasemi, H. R., & Melesse, A. M. (2016).** Application of GIS-based data driven random forest and maximum entropy models for groundwater potential mapping: a case study at Mehran Region, Iran. Catena, 137, 360-372.
- Remini, B., & Achour, B. (2008).** La recharge artificielle des nappes en Algérie : état des lieux et perspectives. Revue des Sciences de l'Eau, 21(3), 293–306.
- Remini, B., Achour, B., Ouled Belkhir, C., & Baba Amar, D. (2012).** The Mzab foggara: an original technique for collecting the water rising. Journal of Water and Land Development.
- Rivest, R. (2019).** Techniques de simulation pour la recherche sur le perfectionnement de la méthode AHP.
- Rogers, M., Bruen, M., & Maystre, L. Y. (2000).** The electre methodology. In ELECTRE and Decision Support: Methods and Applications in Engineering and Infrastructure Investment (pp. 45-85). Boston, MA: Springer US.https://doi.org/10.1007/978-1-4757-5057-7_3

Références

- RV, A., & SV, R. (2020).** Unsupervised ISODATA algorithm classification used in the landsat image for predicting the expansion of Salem urban, Tamil Nadu. Indian J. Sci. Technol, 13, 1619-1629.<https://doi.org/10.17485/IJST/v13i16.271>
- Saaty, T. L. (1977).** A scaling method for priorities in hierarchical structures. Journal of mathematical psychology, 15(3), 234-281. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5)
- Saaty, T. L. (1980).** The analytic hierarchy process. McGraw-Hill.
- Sabins, F.F. (1997).** Remote Sensing: Principles and Interpretation. W. H. Freeman and Company, New York, 361
- Saouli, R. A. (2018).** Cartographie thématique d'Annaba (Algérie) par le biais d'outils d'aide à la décision (SIG et télédétection). Annales de l'université d'Alger, 32(4), 918-936.
- Seltzer, P. (1946).** Le climat de l'Algérie. Institut de Météorologie et de Physique du Globe, Université d'Alger, 219 p.
- Singh, S., Kumar, C. P., Sharma, A., & Vatsa, R. (2012).** Quantification of groundwater recharge using visual help in Sonar sub-basin of Madhya Pradesh. Journal of Indian Water Resources Society, 32(3-4), 23-31.
- Siziba, N. A., & Chifamba, P. (2023).** Research Paper Using geospatial technologies to delineate Ground Water Potential Zones (GWPZ) in Mberengwa and Zvishavane District, Zimbabwe. Science and Engineering, 11(4), 317-332.
- Taati, A., Sarmadian, F., Mousavi, A., Pour, C. T. H., & SHAHIR, A. H. E. (2015).** Land use classification using support vector machine and maximum likelihood algorithms by Landsat 5 TM images. Walailak Journal of Science and Technology (WJST), 12(8), 681-687.. <https://doi.org/10.14456/WJST.2015.33>
- Taibi, S. (2016).** Influence de la circulation atmosphérique générale sur les précipitations du Nord de l'Algérie (Doctoral dissertation, Ecole nationale supérieure d'hydraulique-Arbaoui Abdellah Blida).
- Taleb, A., Belaidi, N., Sanchez-Perez, J. M., Vervier, P., Sauvage, S., & Gagneur, J. (2008).** The role of the hyporheic zone in the nitrogen dynamics within a semi-arid gravel bed stream located downstream of a heavily polluted reservoir (Tafna Wadi, Algeria). River Research and Applications, 24(2), 183-196. <https://doi.org/10.1002/rra.1054>
- Taleb, N. N. (2016).** Fooled by randomness: The hidden role of chance in life and in the markets. Editeurs divers USA.
- Thomas, G. M., & Meyer, J. W. (1984).** The expansion of the state. Annual review of sociology, 461-482.
- Todd, J. R. (1956).** Investigations into the chemical composition and nutritive value of certain forage plants at medium altitudes in the tropics II. The digestibility and nutritive value of three grasses at different stages of growth. The Journal of Agricultural Science, 47(1), 35-39.
- Uc Castillo, J. L., Martínez Cruz, D. A., Ramos Leal, J. A., Tuxpan Vargas, J., Rodríguez Tapia, S. A., & Marín Celestino, A. E. (2022).** Delineation of groundwater potential zones (GWPZs) in a semi-arid basin through remote sensing, GIS, and AHP approaches. Water, 14(13), 2138.
- Walser, T., Demou, E., Lang, D. J., & Hellweg, S. (2011).** Prospective environmental life cycle assessment of nanosilver T-shirts. Environmental science & technology, 45(10), 4570-4578
- Wentz, C. W. (1995).** Hazardous waste management (2nd ed., pp. 155–157). McGraw-Hill.
- Wildi, W., & Wernli, R. (1977).** Stratigraphie et micropaléontologie des sédiments pliocènes de l'Oued Laou (côte méditerranéenne marocaine).
- Yles, F. (2014).** Hydrologie et transport solide dans le bassin versant de l'Oued Saida : Modélisation pluie-débit et débit liquide-transport solide (Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen, 150 p.).
- Youan, T. M., Lasm, T., Adja, G. M., Kouamé, K. J., & Biémi, J. (2011).** Cartographie des eaux souterraines en milieu fissuré par analyse multicritère : Cas de Bondoukou (Côte d'Ivoire). Revue Internationale de Géomatique, 21(1), 43–71.
- Zettam, A. (2018).** Transfert des nitrates du bassin versant de la Tafna (Nord-Ouest de l'Algérie) vers la mer Méditerranée-approche couplant mesures, modélisation et changement d'échelle vers les grands bassins versants Nord africains (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT; Université Abou Bekr Belkaïd (Tlemcen, Algérie)).

Références

Zouggari, A. (2011). Une approche couplant logique floue et capitalisation des connaissances pour la résolution du problème de choix des fournisseurs [Thèse de doctorat, Université Paul Verlaine-Metz]. HAL Archives Ouvertes. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01749069>