

UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID-TLEMCCEN
FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE ET DES SCIENCES
DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

THESE

Présentée
Pour obtenir le grade de

Docteur en Sciences

Par
Lamia YEBDRI

Spécialité
Hydrogéologie

**ETUDE DE LA VULNERABILITE DES EAUX DU BASSIN VERSANT
DE LA TAFNA (ALGERIE, NORD-OCCIDENTALE)**

Soutenue publiquement le 13 / 05/ 2023 devant les membres du jury:

Choukri SOULIMANE, MCA, UABB-Tlemcen

Yahia HAREK, Professeur, UABB-Tlemcen

Abbas MAROK, Professeur, UABB-Tlemcen

Leila MABROUK, Professeur, Université d'Oran 2

Ali SDIRI, Professeur, (ENIS), Université de Sfax, Tunisie

Président

Directeur de thèse

Co-Directeur de thèse

Examinatrice

Examineur

Table des matières

Remerciements	8
Résumé	10
Abstract	11

Introduction

I. PROBLEMATIQUE	12
II. OBJECTIFS	13
III. STRUCTURE DE LA THESE	13

Premier chapitre: **Cadre général**

I. PRESENTATION DU BASSIN VERSANT DE LA TAFNA	15
A. Sur le plan géographique	15
B. Sur le plan hydrographique	16
C. Sur le plan climatique	17
D. Sur le plan occupation du sol	17
II. CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE DU BASSIN	19
A. Contexte géologique	19
1. Aperçu structural	19
1.1. Bassin de la Tafna	19
1.2. Monts de Tlemcen au sens large (<i>s.l.</i>)	20
2. Série lithostratigraphique type	22
2.1. Le substratum paléozoïque	22
2.2. La couverture sédimentaire	22
2.2.1. Le Mésozoïque	22
2.2.2. Le Cénozoïque	23
B. Contexte hydrogéologique	25

Deuxième chapitre: **Matériel et méthodes**

I. INTRODUCTION	27
II. PRESENTATION DES DONNEES	27
A. Données climatiques	27
B. Données hydrométriques	27
C. Données hydrogéologiques	29
	29
III. TRAVAUX DE TERRAIN	
A. Echantillonnage	29
1. Pour les eaux de surface	29
2. Pour les eaux souterraines	30
B. Transport et conservation	32
C. Méthodes d'analyses physiques	32
IV. TRAVAUX DE LABORATOIRE	33
A. Méthode de chromatographie ionique (CI)	33
1. Principe	33
2. Appareillage	33
3. Mode opératoire	34
3.1. Pour les anions	34
3.2. Pour les cations	34
4. Lecture des résultats	35
B. Méthode titrimétrique (Titre Alcalimétrique complet)	35
1. Principe	36
2. Mode opératoire	36
3. Expression des résultats	36
C. Contrôle de fiabilité de l'analyse chimique (Condition d'électroneutralité)	36
V. METHODES D'INVESTIGATION	37
A. Traitement statistique	37
1. Statistique descriptive	38
2. Statistique corrélatoire	38
2.1. Matrice de corrélation de Pearson	38
2.2. Analyse en Composante Principale (ACP)	39
2.3. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)	39
B. Traitement géochimique	39
1. Diagrammes d'identification géochimique	39
1.1. Diagramme de Piper (1944)	40
1.2. Diagramme de Durov (1948)	40
1.3. Diagramme de Chadha (1999)	42
1.4. Diagramme de Gibbs (1970)	43
2. Indices d'échange de base	44
2.1. Indices chloro-alcalins (CAI)	44

2.2. Indices IEB et IGM	45
3. Indices de saturation (SI)	45
C. Système d'Information Géographique (SIG)	46
1. Présentation du l'outil QGIS	46
2. Traitement des modèles numériques du terrain (DEM)	46
3. Méthodes d'interpolation spatiale	46
D. Outil de modélisation	47
1. Modèle hydrogéochimique	47
2. Modèle de vulnérabilité et évaluation de la qualité des eaux	48
2.1. Indices de qualité des eaux (WQI)	48
2.1.1. Méthode de l'indice arithmétique pondéré de la qualité de l'eau (WQI)	50
2.2. Méthode d'évaluation de la vulnérabilité	51
2.2.1. Vulnérabilité intrinsèque	52
2.2.2. Vulnérabilité spécifique	54

Troisième chapitre: **Morphométrie, variabilité hydroclimatique et hydrogéologie**

I. INTRODUCTION	56
II. MORPHOMETRIE	56
A. Réseau de drainage et délimitation des bassins versants à partir de la carte DEM	56
B. Paramètres morphométriques quantitatifs	59
C. Organisation morphologique	60
1. Sous bassin versant de la haute Tafna	60
1.1. Relief	60
1.2. Réseau hydrographique	61
2. Sous bassin versant de Sikkak	62
2.1. Relief	62
2.2. Réseau hydrographique	62
III. VARIABILITES HYDROCLIMATIQUES	64
A. Températures	65
1. Températures moyennes annuelles	65
2. Minima, maxima et moyennes des températures	65
B. Pluviométrie	67
1. Variabilité interannuelle et annuelle des précipitations	67
2. Variabilité saisonnière des précipitations	68
3. Variabilité mensuelle des précipitations	68
C. Indices bioclimatiques	69
1. Indice d'aridité	69
2. Diagramme ombrothermique	70
3. Diagramme d'Emberger	71
4. Indices de sécheresse	72

4.1. Indice SPI (Standardized Precipitation Index)	72
4.2. Indice de pluviosité (PI)	73
4.3. Variabilité spatio-temporelle des indices de sécheresse	73
4.3.1. Sous bassin de la haute Tafna	74
4.3.2. Sous bassin de Sikkak	75
D. Autres facteurs climatiques	76
1. Humidité relative	76
2. Vent	77
3. Evapotranspiration	78
3.1. Evapotranspiration potentielle	78
3.2. Evapotranspiration réelle	80
3.2.1. Méthode du bilan hydrique selon Thornthwaite	80
3.2.2. Méthode de Turc	81
3.2.3. Méthode de Coutagne	82
3.2.4. Méthode de Wundt	82
4. Lamme d'eau ruisselée	83
5. Lamme d'eau infiltrée	84
E. Comportement hydrométrique	84
1. Variations spatio-temporelles des débits moyens	84
1.1. Variations interannuelles des débits moyens	85
1.2. Variations saisonnières des débits moyens	85
1.3. Variations mensuelles des débits moyens	86
2. Coefficients et indices de la variabilité des débits	87
2.1. L'irrégularité interannuelle des débits moyens	87
2.2. SSFI (Standardized Stream Flow Index)	88
IV. HYDROGEOLOGIE	90
A. L'aquifère de Sebdou	90
B. L'aquifère de Hennaya	93
V. CONCLUSION	95

Quatrième chapitre: **Hydrogéochimie**

I. INTRODUCTION	97
II. CARACTERISATIONS PHYSICOCHIMIQUE ET CHIMIQUE DES EAUX	97
A. Eaux souterraines	97
B. Eaux de surface	101
III. FACIES HYDROGEOCHIMIQUE	103
A. Diagramme de Piper	103
1. Aquifère de Sebdou	103
2. Aquifère de Hennaya	103
B. Diagramme de Durov	104

C. Diagramme de Chadha	104
IV. ORIGINE DE LA MINERALISATION DES EAUX SOUTERRAINES	106
A. Analyse statistique	106
1. Corrélations entre éléments chimiques	106
2. Affinité par ACP et CAH	108
2.1. Pour l'aquifère de Seb Dou	108
2.1.1. Projection des variables sur plan factoriel CP1-CP2 et CAH	109
2.1.2. Projection des individus sur plan factoriel CP1-CP2 et CAH	110
2.2. Pour l'aquifère de Hennaya	112
2.2.1. Projection des variables sur le plan factoriel CP1-CP2 et CAH	112
2.2.2. Projection des individus sur plan factoriel CP1-CP2 et CAH	114
B. Modélisation géochimique	116
C. Diagramme de Gibbs et indices d'échange de base	117
1. Diagramme de Gibbs	117
2. Les indices chloro-alcalins	119
3. Les indices d'échange IEB et IGM	120
V. GEOCHIMIE DES NITRATES	121
VI. CONCLUSION	124

Cinquième chapitre: **E**valuation de la qualité des eaux

I. INTRODUCTION	126
II. QUALITE DES EAUX POUR LA CONSOMMATION HUMAINE	126
A. Classification des eaux souterraines selon les normes de l'OMS et les normes algériennes	126
B. Risques sur la santé humaine	128
III. QUALITE DES EAUX A DES FINS D'IRRIGATION	128
A. Classification des eaux d'irrigation selon la FAO	128
1. Risque de salinité	129
1.1. Conductivité électrique et TDS	129
2. Perméabilité et risque d'infiltration	131
2.1. Taux d'Adsorption de Sodium (SAR)	132
3. Toxicité ionique spécifique	133
3.1. Le sodium	133
3.2. Les chlorures	135
4. Effets divers	136
4.1. Le pH	137

4.2. Les bicarbonates	138
4.3. Les nitrates (N-Nitrate)	139
B. Les indices d'irrigation	140
1. La dureté TH (Total Hardness)	140
2. Le pourcentage de sodium soluble (SSP ou Na%)	142
3. Le risque du magnésium (Magnesium Hazard)	144
4. Le carbonate de sodium résiduel (Residual Sodium Carbonate)	146
5. L'indice de perméabilité (Permeability index)	148
6. Le rapport de Kelly (Kelly's Ratio)	149
C. Diagrammes de classification des eaux d'irrigation	150
1. Diagramme de Wilcox	150
2. Diagramme du U.S. Salinity Laboratory pour la classification des eaux d'irrigation	151
IV. CONCLUSION	154

Sixième chapitre: **V**ulnérabilité des eaux

I. INTRODUCTION	156
II. INDICES DE QUALITE DES EAUX (WQI)	156
A. Indice de qualité de l'eau potable DWQI	156
1. Description	156
1.1 Attribution du poids à chaque paramètre chimique	157
1.2. Evaluation du poids relatif à l'aide d'un indice arithmétique pondéré	157
1.3. Calcul de l'échelle d'évaluation de la qualité de l'eau (Qi)	157
1.4. Calcul des sous-indices de la qualité de l'eau pour chaque paramètre chimique	158
1.5. Estimation de l'indice de la qualité de l'eau potable	158
2. Application	158
B. Indices de qualité de l'eau d'Irrigation (IWQI)	159
1. IWQI (Irrigation Water Quality Index) de SIMSEK & GUNDUZ (2007)	159
2. IWQI de MEIRELES & <i>al.</i> (2010)	163
3. Applications	166
3.1. Eau de surface	166
3.2. Eaux souterraines	168
III. MODELE SINTACS	169
A. Indice de vulnérabilité intrinsèque SINTACS	169
1. Préparation des paramètres SINTACS	170
1.1. Profondeur de la nappe phréatique (S)	170
1.2. Infiltration efficace ou recharge nette (I)	171
1.3. Zone non saturée (N)	171

1.4. Milieu du sol (T)	172
1.5. Milieu aquifère (A)	172
1.6. Conductivité hydraulique (C)	173
1.7. Pente topographique (S)	173
2. Résultats du modèle SIVI	174
B. Indice de vulnérabilité spécifique SSVI	175
1. Préparation du paramètre AI	175
2. Résultat du modèle SSVI (SINTACS Specific Vulnerability Index)	176
C. Discussion et validation des modèles SIVI et SSVI	177
IV. CONCLUSION	178

Conclusions & perspectives

I. CONCLUSIONS	180
A. Sur le plan morphométrique	180
B. Sur le plan climatique	180
C. Sur le plan hydrogéologique	181
D. Sur le plan hydrogéochimique	181
E. Sur le plan qualitatif des eaux et leur vulnérabilité à la pollution	182
II. PERSPECTIVES	184
Références bibliographiques	186
Liste des figures	204
Liste des tableaux	207
Annexes	209

Remerciements

Remerciements

Une thèse achevée est le fruit de plusieurs années de travail, de persévérance et de résistance face aux aléas de la recherche, mais aussi de contribution, d'encouragement et de soutien. Pour cela et aux termes de la rédaction de ce manuscrit, je voudrais exprimer ma profonde gratitude et mes remerciements envers tous ceux qui rendu ce modeste travail possible.

Tout d'abord, je tiens à remercier:

Monsieur Yahia HAREK, Professeur des Universités au Département de Chimie (Faculté des Sciences) pour avoir assuré le rôle de Directeur de thèse, malgré la disparité de nos disciplines. En qualité de Directeur du Laboratoire de chimie analytique et d'électrolyse, Monsieur Yahia HAREK a mis à ma disposition les outils analytiques nécessaires pour mener à bien cette thèse. Je tiens une fois encore à le remercier pour ses suggestions et sa disponibilité.

Monsieur Abbas MAROK, Professeur des Universités au Département des Sciences de la Terre et de l'Univers (Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et Sciences de la Terre et de l'Univers), qui m'a permis de réaliser cette thèse dans les meilleures conditions. Je le remercie pour les conseils et les critiques avisés et pertinents, qui m'ont aidé dans l'apprentissage de ce qu'est une recherche scientifique. Je suis très reconnaissante envers ce « géologue » pour son dévouement, sa disponibilité permanente, et pour sa franchise à toute épreuve. Il est et il restera notre *Leader* en matière de recherche.

Monsieur Choukri SOULIMANE, Maître de Conférences classe (A) au Département des Sciences de la Terre et de l'Univers (Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et Sciences de la Terre et de l'Univers), pour l'honneur qu'il me fait en présidant le jury.

Madame Leila MABROUK, Professeur des Universités au Département des Sciences de la Terre (Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers, Université d'Oran 2) de bien vouloir juger mon travail et apporter son avis et ses critiques.

Monsieur Ali SDIRI, Professeur à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax-Tunisie d'avoir bien voulu consacrer son temps à lire et à donner ses précieuses remarques quant au document soumis à son expertise.

Qu'il me soit permis d'exprimer ma profonde reconnaissance à celle qui n'a pas la mention d'encadrant sur le papier, mais qui m'a tellement aidée, non seulement dans cette

thèse, mais dans toute ma modeste carrière universitaire. Madame Fatiha HADJI, Maître de Conférences classe (B) au Département des Sciences de la Terre et de l'Univers (Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et Sciences de la Terre et de l'Univers), je lui suis reconnaissante pour le temps conséquent qu'elle m'a accordé, sa qualité pédagogique et scientifique, ainsi que pour son assistance morale et sa sympathie. J'ai beaucoup appris à ses côtés et j'espère encore en profiter dans le futur.

Il me serait impardonnable de ne pas remercier mon époux qui m'a soutenu dans toutes les épreuves, et surtout dans les moments les plus durs. Mes pensées vont également à mes deux petits enfants.

J'ai aussi une pensée affectueuse pour mes chers parents qui n'ont jamais hésité à se démenner pour m'aider afin que j'accède à toutes mes requêtes. Grand merci aussi pour leurs présence et encouragements en toutes circonstances, qui ont fait de moi, ce que je suis actuellement.

Mes remerciements s'adressent aussi à mes amis (es) et collègues: Kamel Mustapha TALEB (doyen des géologues de l'Université de Tlemcen et ancien chef de Département), Kamar Eddine BENSEFIA, Souhila GAOUAR, Salamet MAHBOUBI, Soumia KAZI TANI, Mustapha BENCHOUK, Somia YOUSFI, Rachid KARZABI, Mustapha BENADLA (Département des Sciences de la Terre et de l'Univers, Tlemcen), Imad GHALLAI (Laboratoire de chimie analytique et d'Electrolyse), Imen MAROK (Département d'Hydraulique), Nafissa CHABNI et Lemya BENBARKA (Faculté de Médecine), Louisa SAMAR (Divisions les Laboratoires -SONATRACH), Ismahane CHAOUICHE (Université des Sciences et de technologie Houari BOUMEDIENNE), Lahcène BENAABIDATE (Université de Fès, Maroc), Smail SLIMANI (Ecole d'ingénieurs ISTOM, France) pour leurs soutien morale et pour m'avoir donnée le regain d'énergie qui me permettait d'avancer dans mes travaux.

Enfin, je voudrais adresser mes plus profonds remerciements à mes sœurs, leur famille et à ma belle-famille pour leur soutien.

Résumé

Résumé

Dans le présent travail réservé aux sous-bassins de la Haute Tafna et de Sikkak (Nord-Ouest algérien), nous nous sommes intéressés à l'étude hydrogéochimique des eaux, à l'évaluation de la qualité des eaux à des fins de consommation humaine et d'irrigation et enfin à l'estimation des degrés de vulnérabilité.

Dans ce contexte, cinquante-trois (53) échantillons ont été prélevés et analysés, dont quarante et un (41) dans les eaux souterraines des aquifères mio-plio-quadernaires de Sebdou et de Hennaya et douze (12) dans les eaux de surface des oueds de la Tafna supérieure et de Sikkak durant les saisons humide (Mars-Avril 2017) et sèche (Octobre-Novembre 2017). Les analyses physico-chimiques ont concerné la température (T), le pH, la conductivité électrique (EC), la TDS et les ions majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- et NO_3^-). Les diagrammes utilisés pour la détermination des faciès hydrogéochimiques indiquent que les eaux de l'aquifère de Sebdou, sont de type bicarbonaté calcique, caractérisées par la prépondérance des alcalino-terreux et des acides faibles, et chloruré calcique. Ce dernier caractérise aussi les eaux souterraines de Hennaya marquées par une dominance des alcalins et des acides forts.

Par ailleurs, les teneurs en nitrates des eaux souterraines dans le sous-bassin de Sikkak sont élevées et dépassent la norme de potabilité exigée par la réglementation algérienne et celle de l'OMS (50 mg L^{-1}). Il en est de même pour le pH dont les valeurs enregistrées en saison humide (<6.42) ne sont pas conformes aux normes suscitées. Pour le sous-bassin de la Haute Tafna, la situation semble moins préoccupante dans certaines parties de cette zone quant à leur utilisation à des fins de consommation humaine.

Le report des échantillons sur le diagramme du SAR, traduit un risque de salinité moyen à élevé et un risque de sodicité faible pour l'aquifère de Sebdou. Pour le cas de l'aquifère de Hennaya, le risque de salinité assez élevé, ne pose pas de problème de sodicité.

Les valeurs de l'indice MH confèrent, en général, aux eaux des deux aquifères une inaptitude à l'irrigation et pourraient de ce fait modifier la qualité du sol et réduire son rendement agricole.

Les indices de qualité des eaux potables (DWQI) et d'irrigation (IWQI) indiquent que les eaux souterraines de l'aquifère de Sebdou sont de qualité bonne à excellente et que celles de Hennaya, altérée par des teneurs élevées en nitrates sont impropres à la consommation humaine. Quant à leur utilisation à des fins d'irrigation, les eaux sont, selon l'indice de Meireles, à restriction moyenne à élevée pour l'aquifère de Sebdou et élevée à très élevée pour celui de Hennaya.

Enfin, les modèles de vulnérabilité (SINTACS) établis révèlent que le risque de vulnérabilité est modéré à élevé pour les eaux souterraines de l'aquifère de Sebdou et élevé à sévère pour celui de Hennaya.

Mots clés: Tafna, Sikkak, Sous-bassins, Eaux, Hydrogéochimie, Qualité, Modèles, Vulnérabilité.

Abstract

Abstract

In the present work, reserved for the Upper Tafna and Sikkak sub-watersheds (North-West Algeria), we are interested in the hydrogeochemical study of the waters, an assessment of water quality for human consumption and irrigation purposes and finally an estimation of degrees of vulnerability.

In this context, fifty-three samples were analyzed, including forty-one, in the groundwater of the Mio-Plio-Quaternary aquifers of Sebdoou and Hennaya and twelve in the surface waters of the upper Tafna and Sikkak wadis during the wet (March-April 2017) and dry (October/November 2017) seasons. The physical and chemical analyzes carried out concerned temperature (T), pH, electrical conductivity (EC), TDS and major ions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- and NO_3^-). The diagrams used to determine the hydrogeochemical facies indicate that Sebdoou groundwater aquifer is of calcium bicarbonate type, characterized by the preponderance of alkaline earth metals and weak acids, and calcium chloride type. This latter facies characterizes, also Hennaya groundwater marked by a dominance of alkaline and strong acids.

Furthermore, the nitrate contents of groundwater in Sikkak sub-watersheds are high and exceed the Algerian and the WHO drinking standard (50 mg L^{-1}). Regarding pH, the recorded values during the wet season (<6.42) do not comply with the aforementioned standards. For the upper Tafna sub-watershed, the situation seems less worrying in certain parts of this area as regards their use for human consumption.

The plots of the samples on the SAR diagram indicates a medium to high salinity risk and a low sodicity risk for the Sebdoou aquifer. In the case of the Hennaya aquifer, the fairly high salinity risk does not pose any sodicity problems.

Concerning the MH index, its calculated values suggest that waters of the two aquifers are unsuitable for irrigation and could therefore modify the soil quality and reduce its agricultural yield.

The drinking (DWQI) and irrigation (IWQI) water quality indices reveal that groundwater of Sebdoou aquifer is of good to excellent quality and that of Hennaya, which is altered by high nitrate levels, is unsuitable for human consumption. As for their use for irrigation purposes and according to the Meireles index, groundwater are of moderate to high restriction for Sebdoou aquifer and high to very high for that of Hennaya.

The established vulnerability models (SINTACS) reveal that the risk of vulnerability is moderate to high in Sebdoou aquifer and high to severe for that of Hennaya

Keywords: Tafna, Sikkak, Sub-watersheds, Waters, Hydrogeochemistry, Quality, Models, Vulnerability.

Introduction

Introduction

I. PROBLEMATIQUE

La disponibilité de l'eau est affectée par les changements climatiques qui provoquent des pénuries, des surexploitations dans certains endroits, des inondations dans d'autres, avec toutes les conséquences connexes telles que la diminution de la sécurité alimentaire et le transfert potentiel de maladies.

Par ailleurs, des études ont montré que la chimie des eaux et par conséquent sa qualité est contrôlée par des facteurs naturels (telles que les conditions hydrogéologiques, les interactions eau-roche,...) et aussi par des activités anthropiques (telles que la surexploitation des eaux souterraines, les rejets d'eaux usées et la pollution agricole) (LEPOM & *al.*, 2009; GÜLER & *al.*, 2012; LIN & *al.*, 2012; HUANG & *al.*, 2013; CHEN & *al.*, 2016; NEMCIC-JUREC & JAZBEC, 2017; LI & *al.*, 2019; LI & *al.*, 2020). Alors que des actions en matière de réduction de la pollution des eaux sont entreprises et que des normes sont établies dans le but d'atteindre une bonne qualité de l'eau, il est important que les personnes impliquées dans la prise de décision soient bien informées de l'état de sa qualité et de ses variations qualitatives. Ces décisions relatives à la qualité des eaux souterraines et de surface sont prises par les experts de l'eau qui devraient examiner les valeurs des paramètres multiples obtenues sur le terrain ou au laboratoire et, par la suite, procéder à la détermination de l'adéquation d'une eau à un usage prévu.

L'évaluation de la qualité de l'eau utilisée à des fins de consommation humaine est effectuée sur la base de normes nationales ou de directives internationales. L'établissement de ces normes est basé sur les directives de l'Organisation Mondiale Santé (OMS) pour la sécurité de l'eau à l'appui de la santé publique.

Il est important de noter que l'existence de certains paramètres indicateurs de la pollution, à l'exemple des nitrates, peuvent être d'origine naturelle, provenant de l'azote du sol (faibles concentrations $\leq 2 \text{ mgL}^{-1} \text{ NO}_3\text{-N}$) (MADISON & BRUNETT, 1985; SVOBODOVA & *al.*, 1993; MUELLER & HELSEL, 1996; PANNO & *al.*, 2006). Cependant, leur concentration peut être fortement augmentée suite aux diverses activités anthropiques, comme l'utilisation intensive des terres, des engrais azotés inorganiques et du fumier animal dans les pratiques agricoles ainsi que les rejets des effluents d'eau usée (CHOI & *al.*, 2002; BURROW & *al.*, 2010; CAPRI & *al.*, 2009; SU & *al.*, 2013; RE & *al.*, 2017; WARD & *al.*, 2018).

A cet effet, il n'y a presque pas de rétention de nitrate dans le sol, car ce dernier est facilement lessivé dans les cours d'eau (SVOBODOVA & *al.*, 1993). L'ingestion des nitrates via la consommation de l'eau potable peut affecter la santé humaine et provoquer

ainsi une méthémoglobinémie (RIDDER & OEHME, 1974) chez les nourrissons. D'autres effets sur la santé peuvent survenir, tels que le risque de cancers et des malformations congénitales lorsque les nitrates sont ingérés dans des conditions qui augmentent la formation des composés N-nitroso (WARD & *al.*, 2018). En outre, une eau contenant des quantités excessives de nitrates peut affecter les cultures agricoles via l'irrigation des cultures (AYERS & WESTCOT, 1985) et conduire à une diminution de la qualité de l'environnement (LIU & DIAMOND, 2005). D'autres paramètres indicateurs de la pollution incluent l'ammoniac, les nitrites, le pH, le phosphore, les sulfates (SAHOO & *al.*, 2016) et les chlorures. La présence de ces derniers ions, à savoir les chlorures, dans les eaux peut être attribuée, entre autres, à la dissolution de divers minéraux constitutifs des roches, aux effluents industriels et à l'utilisation d'engrais. Bien qu'il n'existe aucune valeur guide basée sur la santé (WHO, 2003) pour l'ion chlorure dans l'eau potable, une teneur dépassant les 250 mgL^{-1} et dépendant des cations associés peut altérer son goût (ZOETEMAN, 1980; WHO, 2003). De même, pour l'irrigation, de fortes concentrations en chlorures dans l'eau ou dans le sol sont toxiques pour les plantes et peuvent affecter leur fonction et réduire leur productivité.

Etant donné que la détermination de la qualité d'une eau repose sur l'utilisation d'une liste assez longue de constituants, des indices de qualité de l'eau ont été conçus lors de ces dernières décennies. Ces indices permettent ainsi de traduire cette liste de paramètres en une valeur unique facilitant la compréhension et l'interprétation de l'importance globale des faits.

II. OBJECTIFS

Dans de nombreuses parties du bassin versant de la Tafna (Nord-Ouest algérien), les ressources en eaux souterraines et en eaux de surface destinées à la consommation humaine, l'irrigation et le bétail souffrent de la dégradation de leur qualité due, entre autres, aux activités agricoles (à l'exemple de la sur utilisation d'engrais azotés). Historiquement, l'évaluation de la qualité de l'eau pour la consommation humaine et à des fins d'irrigation dans certaines parties dudit bassin a été entreprise par HADJI & *al.* (2013), HAMLAT & *al.* (2017) et HAMLAT & GUIDOUM (2018).

Dans cette optique, les objectifs de ce travail de recherche consistent donc à évaluer la qualité des eaux de surface et souterraines à des fins de consommation humaine et d'utilisation agricole. Par la suite, une cartographie des eaux sera réalisée pour identifier les zones les plus vulnérables à la pollution.

III. STRUCTURE DE LA THESE

Sur la base d'une démarche scientifique, la présente thèse est structurée autour de six (06) chapitres précédés par une introduction où la problématique et les objectifs du sujet sont clairement visés. Ces chapitres amplement référenciés sont étoffés par une conclusion générale et par des perspectives.

-le premier chapitre de cette thèse est réservé à la présentation générale du bassin versant de la Tafna. L'aspect géologique et hydrogéologique sera également développé.

-le deuxième chapitre est consacré à la présentation des données disponibles et à la description détaillée de la méthodologie d'analyse et d'interprétation.

-le troisième chapitre s'intéresse particulièrement à l'étude morphométrique, et variabilités climatiques des sous bassins considérés ainsi que l'étude hydrogéologique des aquifères sélectionnés.

-le quatrième chapitre traite l'hydrogéochimie des eaux de surface et souterraines du bassin versant à travers la caractérisation physico-chimique des eaux, les faciès hydrogéochimiques ainsi que l'étude de l'origine de la minéralisation des eaux souterraines.

-le cinquième chapitre fait état de l'évaluation de la qualité des eaux de surface et souterraines.

-enfin, le sixième chapitre a pour objectif à cartographier la vulnérabilité des eaux, en ciblant particulièrement la pollution nutritive et en déterminant les principaux processus de la détermination de la qualité des eaux. L'étude sera réalisée par l'utilisation de plusieurs modèles mathématiques simples et complexes.

Premier chapitre: **Cadre général**

I. PRESENTATION DU BASSIN VERSANT DE LA TAFNA

A. Sur le plan géographique

Situé au Nord-Ouest algérien, entre la latitude 34°66' et 35°05' Nord, et la longitude 1°22' et 1°50' Ouest, le bassin versant de la Tafna s'étend sur une superficie de 7245 km², dont 1905 km² de cette surface se trouve au Maroc (Figure 1). Ce bassin dont l'altitude est comprise entre 263 et 1084 m appartient à la région hydrographique de l'ensemble Oranie Chott Chergui, en portant le code 16. Dans sa thèse consacrée à l'étude géologique du bassin de la Tafna, GENTIL (1902, p. 17) subdivisa se dernier en deux parties, à savoir:

-la vallée de la «Moyenne Tafna»: c'est la dépression tertiaire comprise entre les Monts de Tlemcen au sud et les Monts des Traras et les Sebaa Chioukh au nord.

-la vallée de la «Basse Tafna»: cette partie la plus occidentale est comprise entre les Beni Khelad (Monts des Traras) à l'ouest, et la région volcanique d'Ouled Ben Adda (Aïn Témouchent) à l'est.

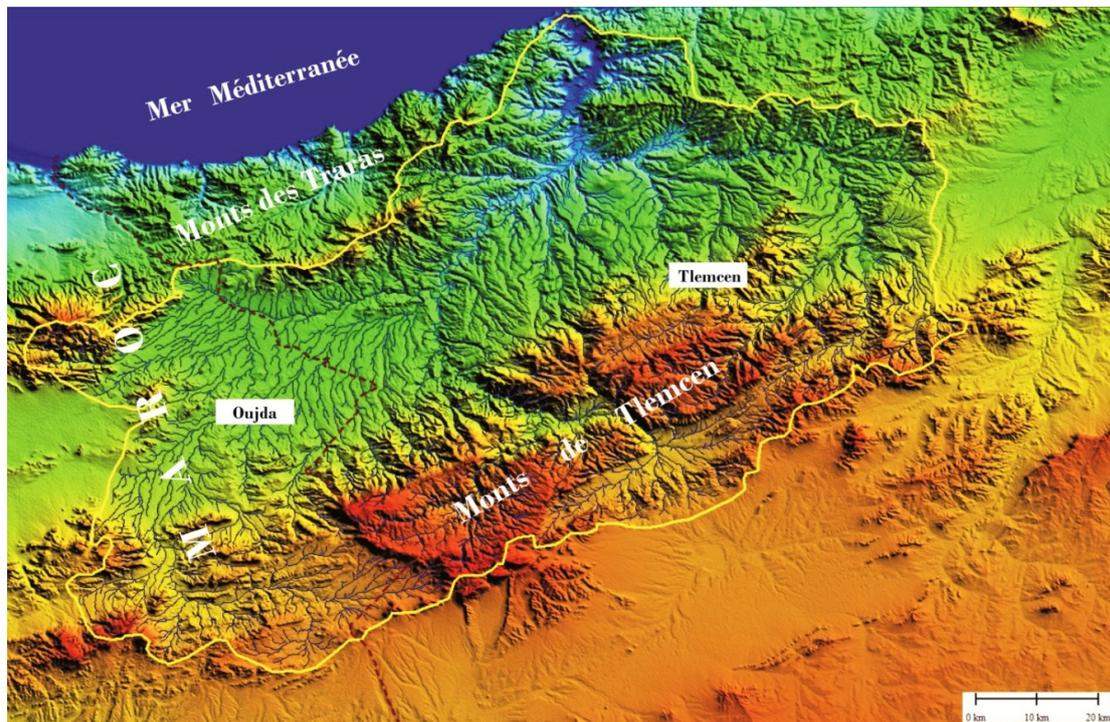


Figure 1- Localisation et limites du bassin versant de la Tafna.

B. Sur le plan hydrographique

Considéré comme le second grand cours d'eau de l'Oranie après le Chélif, Oued Tafna est long de 170 km. Il prend naissance dans les Monts de Tlemcen (Ghar Boumaaza, région de Sebdo) et débouche dans la mer Méditerranée, au niveau de la plage de Rachgoune (Figure 2). Ainsi, il draine un bassin à relief de petites et moyennes montagnes constitué par les Monts des Traras et les Sebaa Chioukh au nord et les Monts de Tlemcen au sud.

De part ces principaux affluents, le bassin versant de la Tafna est subdivisé en trois grandes parties. Une partie occidentale (la haute Tafna) avec oued Sebdo et oued khemis, la partie orientale dite la moyenne Tafna, dont les principaux affluents sont oued Chouly, oued Isser et oued Sikkak et enfin la partie septentrionale (Base Tafna) qui s'étend jusqu'à l'embouchure de la Tafna sur la mer méditerranéenne. Cette dernière partie se distingue par les affluents: oued Boumessaoud, oued Zitoun et oued Boukiou.

Notons que du point de vue hydrologique, l'oued Tafna est considéré comme un cours d'eau à écoulement temporaire. Il coule en hiver et s'assèche en été. Son débit annuel varie entre 000.1 et 1.409 m³ s⁻¹. Le débit moyen journalier à l'exutoire varie entre 0 et 90 m³s⁻¹ (ZETTAM, 2018).

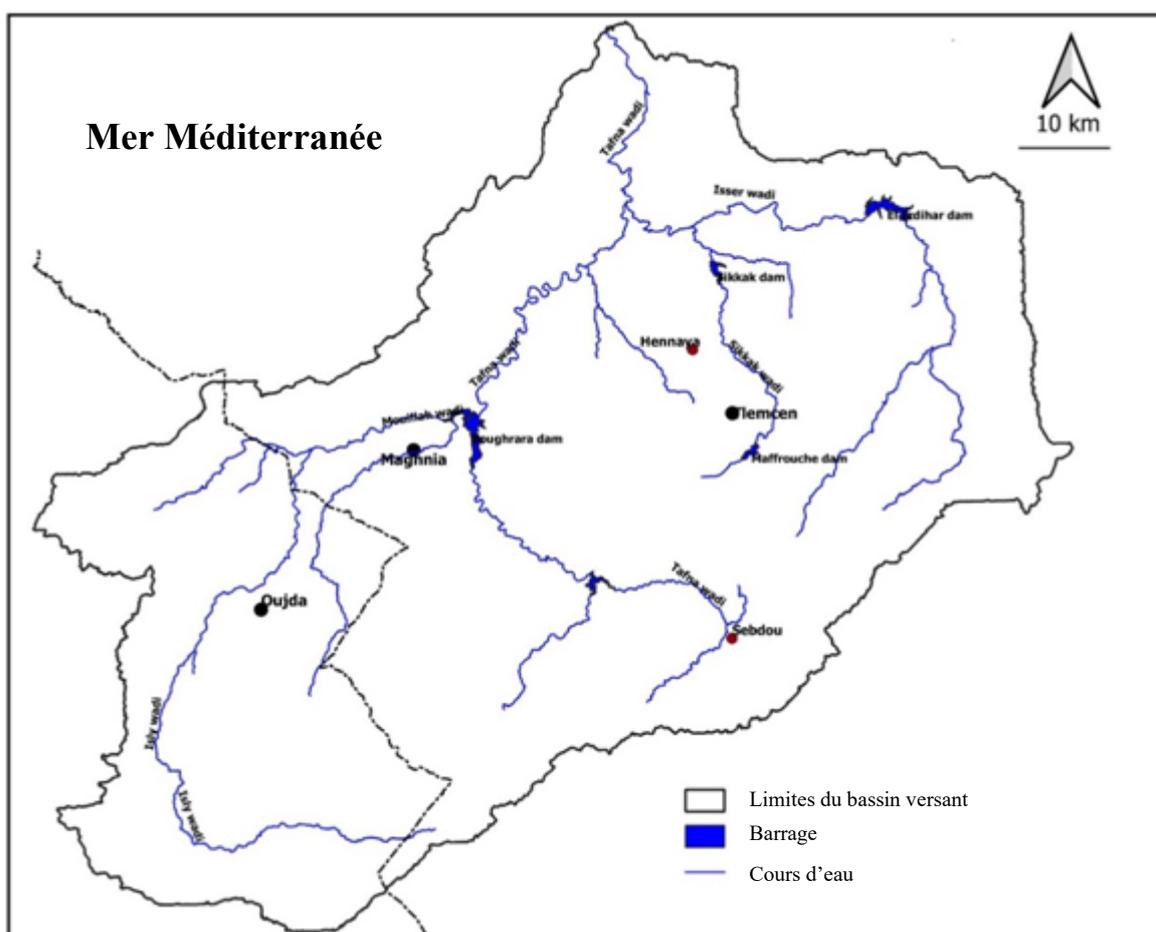


Figure 2- Réseau hydrographique du bassin versant de la Tafna.

L'ensemble du réseau hydrographique du bassin considéré et ses principaux cours d'eau alimente cinq barrages: Béni Bahdel, Maffrouch, Sidi Abdelli, Hammam Boughrara et Sikkak (Tableau 1).

Barrages	Capacité (Mm ³)	Superficie du bassin versin (km ²)	Apport moyen annuel (Hm ³)	Date de mise en eau
Beni Bahdel	65.5	1016	77	1952
Maffrouch	15	90	18.720	1963
Sidi Abdelli	110	1140	61	1988
Hammam Boughrara	177	4000	10.84	1998
Sikkak	30	463	/	2005

Tableau 1- Barrages édifiés dans le bassin versant de la Tafna (d'après MAROK, 2021).

C. Sur le plan climatique

Faisant partie des régions méditerranéennes de l'Afrique du Nord, le régime climatique du bassin versant de la Tafna et de type semi-aride méditerranéen, avec des températures moyennes annuelles de 15.5°C, une lame d'eau précipitée moyenne annuelle de 290 mm par an et un débit moyen annuel de 6.4 m³ s⁻¹ (MEBARKI, 2010).

D. Sur le plan occupation du sol

Sur le plan occupation du sol (Figure 3), le bassin versant de la Tafna est marqué par la présence d'une végétation naturelle représentée par des forêts et maquis recouvrant environ 40 % de sa surface totale (TALEB & *al.*, 2004). Ainsi, dans la zone montagneuse sud, au-dessus de 1200 m d'altitude, la majeure partie des terrains est occupée par une forêt de Chêne vert et de Pin d'Alep. Le Chêne liège se rencontre sur des terrains riches en silice qui caractérisent la forêt d'Ahfir. Au-dessous de 1200 m, nous relevons l'existence d'une association d'Oxycèdre, quelques vestiges de Chêne vert, de Palmier nain et de Tuya. Notons que les terrasses et le fond des vallées de l'oued Tafna sont occupés par des terrains cultivés et les pentes sont couvertes de garrigues (TALEB, 2004).

Par ailleurs, dans la zone nord, sur le sol argilo marneux, généralement profond, la végétation ligneuse est remplacée par les cultures céréalières, fruitières et surtout maraîchères. La végétation naturelle subsistante, comprenant le Tamarix et le Laurier, n'est représentée que par des taches peu étendues (TALEB, 2004).

Enfin, l'agriculture occupe une place importante dans le bassin versant de la Tafna. Elle est représentée essentiellement par la céréaliculture (170.000 ha), l'arboriculture (26 280 ha) et la culture maraîchère (7695 ha) (ZETTAM, 2018).

A noter que le bassin versant en question rassemble environ 1.458 449 habitants dont la plus grande densité se trouve dans la ville d'Oujda (Maroc) avec 548 280 habitants (ZETTAM, 2018).

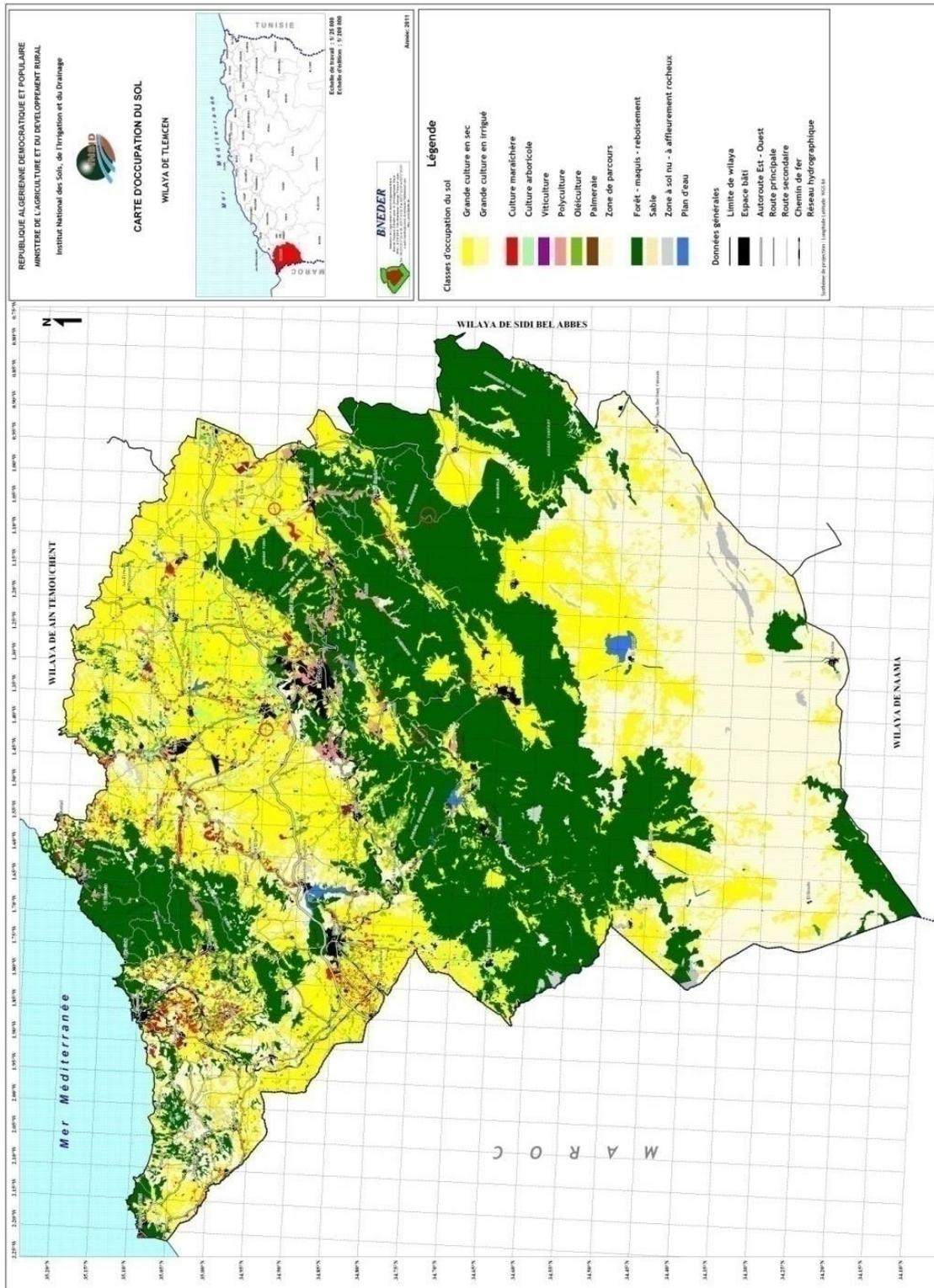


Figure 3- Carte d' occupation du sol (d' après BNEDEP, 2011).

II. CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE DU BASSIN

L'originalité de ce bassin versant de la Tafna est son appartenance à deux bassins, structurellement et géologiquement différents (Figure 4). Il s'agit du bassin de la Tafna et celui des Monts de Tlemcen au sens large.

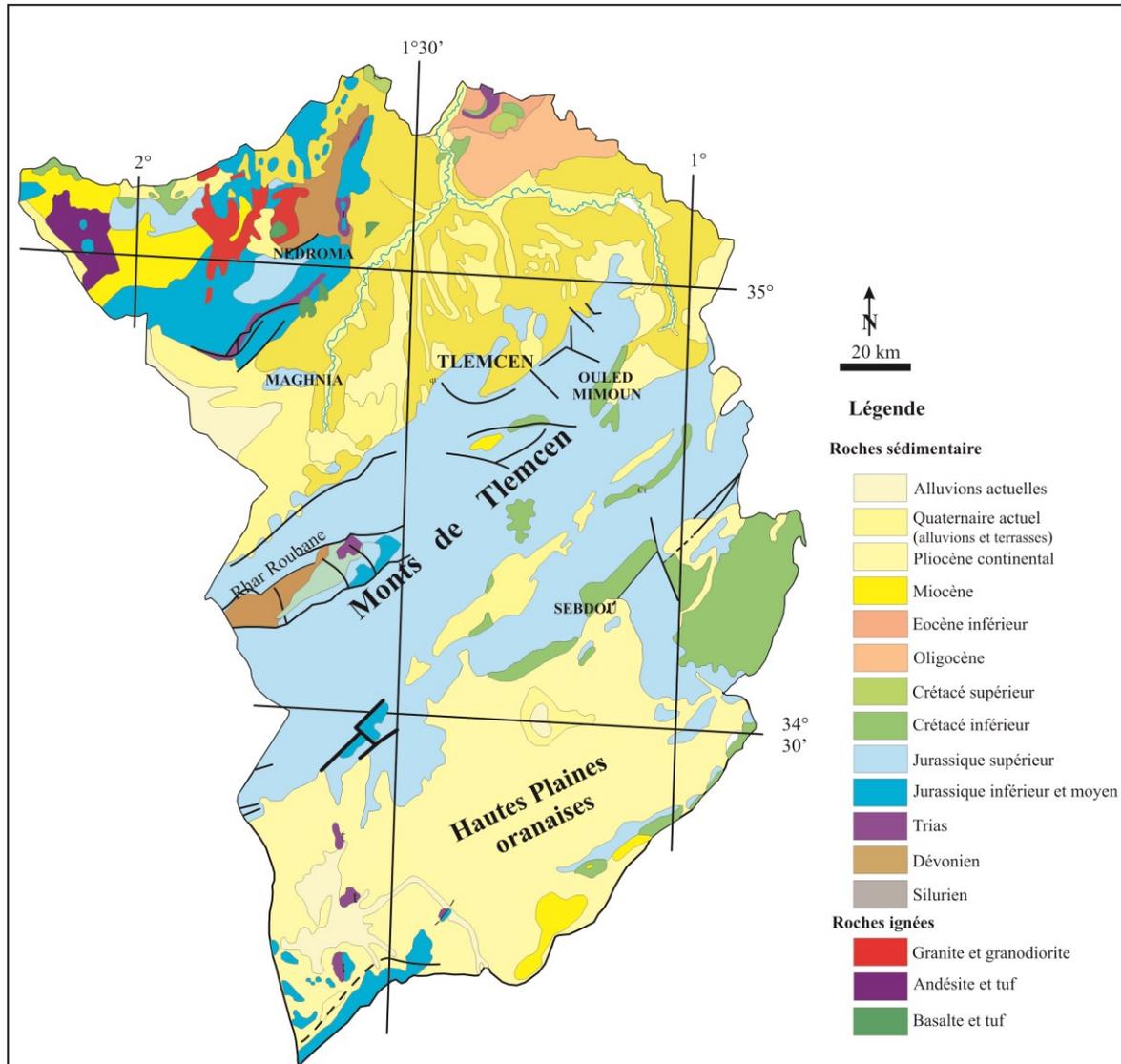


Figure 4- Carte géologique de Tlemcen (Extrait de la carte géologique de l'Algérie-Oran Nord au 1/500 000, modifiée).

A. Contexte géologique

1. Aperçu structural

1.1. Bassin de la Tafna

Faisant partie des bassins sublittoraux de l'Algérie Nord occidentale (au sens de PERRODON, 1957), le bassin de la Tafna a été étudié par GENTIL (1902), PERRODON (1957), GUARDIA (1975), FENET (1975), THOMAS (1985), AMEUR-CHEHBEUR

(1988) et HADJI (2020). Il correspond à un fossé d'effondrement appartenant à la zone externe et se caractérise par un remplissage tertiaire diachrone et, surtout, par un volcanisme récent (Figure 5). La genèse et l'évolution géodynamique du bassin de la Tafna sont liées à l'orogénèse alpine ce qui lui confère un caractère intra-montagneux (THOMAS, 1985).

Il est important de souligner que le Miocène correspond à la dernière phase de la tectogenèse tangentielle de l'orogénèse tello-rifaine qui a permis la mise en place des nappes dans les bassins avoisinants (GUARDIA, 1975).

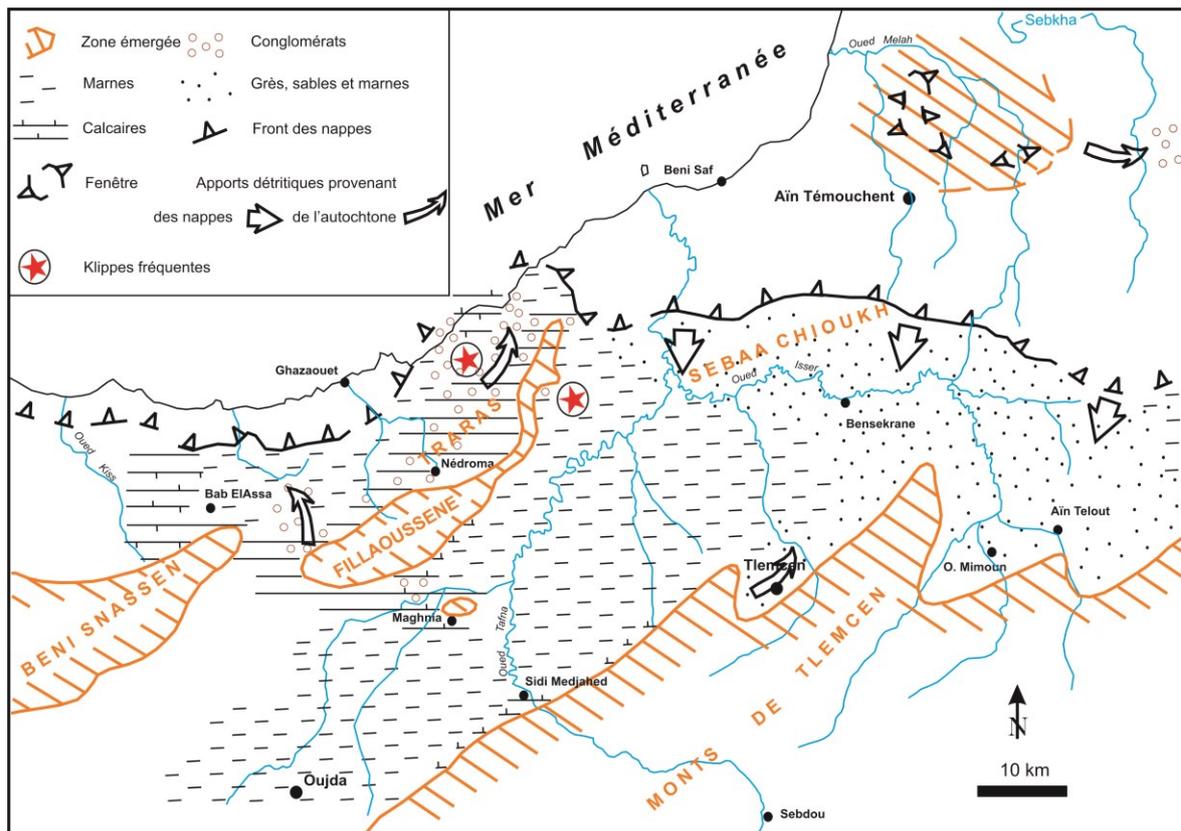


Figure 5- Structure du bassin de la Tafna (in HADJI, 2020).

1.2. Monts de Tlemcen au sens large (s.l.)

D'après les travaux des géologues lyonnais (ELMI, 1970 et BENEST, 1971, 1982, 1985), la structure des Monts de Tlemcen correspond à trois principaux segments limités par la transversale de Tafna-Magoura à l'Ouest et celle d'Aïn Tellout à l'Est. Les segments en question sont souvent décalés par suite du décrochement sénestre. Il s'agit de l'Ouest vers l'Est (Figure 6):

- la zone sigmoïde de Sidi Yahia-Sebdou;
- le panneau central arqué de Terni qui est nettement décroché vers le Nord-Ouest, le long de la faille bordière orientale du fossé de la Tafna;
- le bloc sigmoïde de Lamoricière (Ouled Mimoun) qui est coïncé entre la transversale N20° à rejeu sénestre d'Oued Chouly et la faille d'Aïn Tellout. Localement, les Monts de Tlemcen présentent également un double déversement résultant d'un serrage entre le môle rigide des Hautes Plaines oranaises et le Horst de Rhar Roubane.

D'après BENEST (1982), l'évolution chronologique des événements structuraux enregistrés dans les Monts de Tlemcen se résume dans cinq phases tectoniques principales allant de l'Eocrétacé au période récente. Il s'agit d'une phase éocrétacé, suivie par une phase atlasique marquée par des mouvements compressifs et distensifs. La troisième phase se distingue par une phase de compression N-S à NW-SE du socle alors que la quatrième est à dominante distensive (marquée essentiellement par la régression pliocène dans la zone de Terni). Enfin, la dernière phase tectonique dite récente (Plio-quaternaire) s'est traduite par des mouvements soit compressifs, soit distensifs.

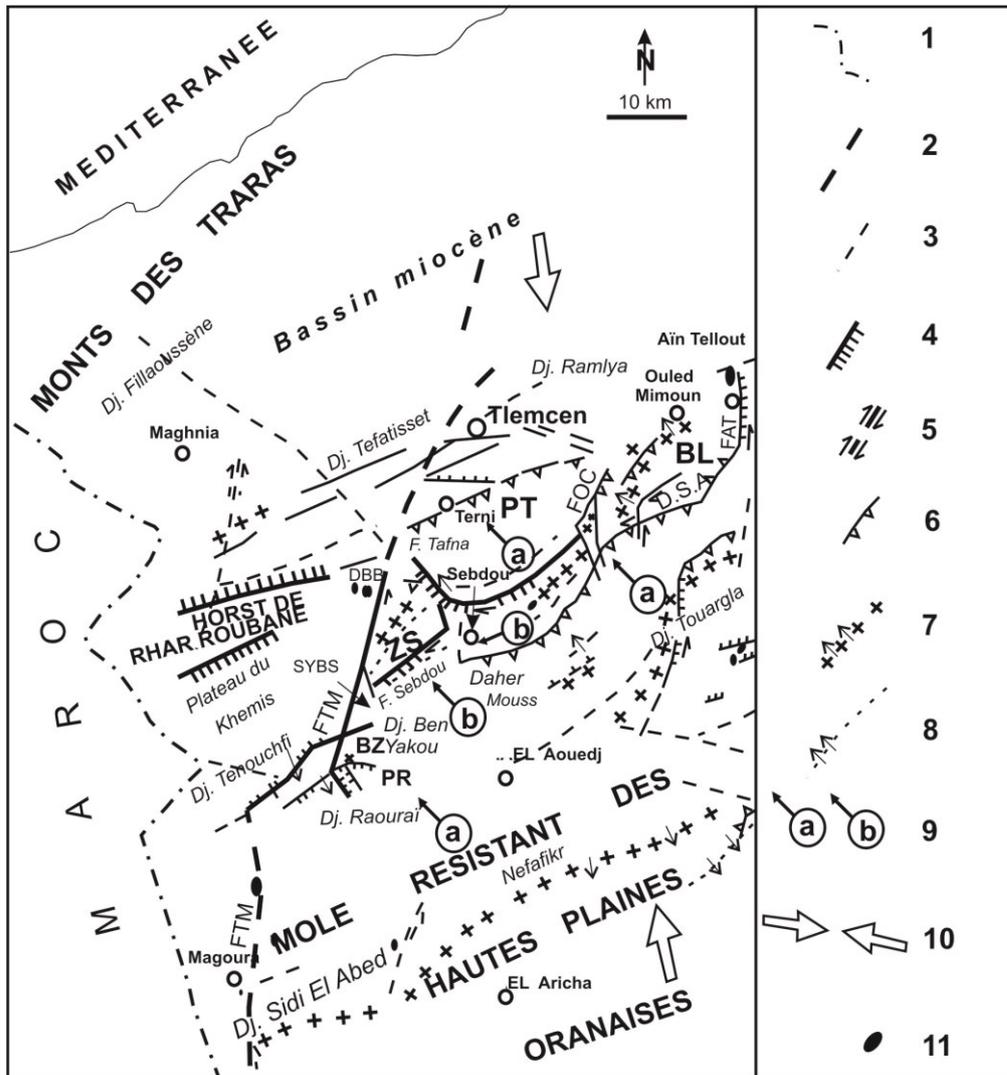


Figure 6- Carte structurale des Monts de Tlemcen au sens large (d'après BENEST, 1982).

1: Frontière algéro-marocaine; 2: Faille majeure; 3: Faille mineure; 4: Faille normale ayant joué verticalement; 5: Sens de décrochement; 6: Faille inverse ou chevauchante; 7: Anticlinal (les flèches indiquent la vergence); 8: Synclinal (les flèches indiquent la vergence); 9: Sens des principaux chevauchements ou déplacements (premier temps a et deuxième temps b); 10: Direction moyenne de compression ou de raccourcissement; 11: Extrusion gypsifère à faciès Keuper; BL: Bloc sigmoïde de Lamoricière; BZ: Djebel Bou Zatatt; DBB: Dépression des Beni Bahdel; DSA: Dépression de Sidi Abdallah; FAT: Décrochement d'Aïn Tellout; FOC: Transversale d'Oued Chouly; FTM: Transversale Tafna-Magoura; PR: Panneau coulissé du Djebel Raouraïa; PT: Panneau central arqué de Terni; SBYS: Sidi Yahia Ben Sefia; ZS: Zone sigmoïde de Sidi Yahia.

2. Série lithostratigraphique type

Parmi les particularités stratigraphiques du bassin versant considéré, nous notons les variations spectaculaires des faciès et des épaisseurs, en particulier durant le Mésozoïque. Ainsi, la succession lithostratigraphique type que nous présentons ici est constituée de bas en haut:

2.1. Le substratum paléozoïque

Affleurant dans le Horst de Rhar Roubane et dans les Monts des Traras, cet intervalle chronologique se distingue par la présence d'une série grésopélitique (e.g. psammites et pélites micacées) des schistes, des phanites et des microconglomérats dont l'âge est attribué au Silurien inférieur-Carbonifère. Cet ensemble est recoupé et métamorphisé par le granite, à l'exemple de Nedroma.

2.2. La couverture sédimentaire

2.2.1. Le Mésozoïque

Les formations mésozoïques occupent une grande partie de notre bassin versant. Elles forment l'essentiel des Monts de Tlemcen au sens large (Figure 7).

-Le Trias

Les dépôts attribués classiquement au Trias sont représentés par des faciès argileux violacés, à verdâtres, riche en gypse et halite et associés parfois à des roches doléritiques dans lesquelles s'intercalent des niveaux carbonatés. D'après les travaux antérieurs (MAROK, 1996; BENSEFIA, 2021), ces dépôts sont généralement localisés le long des zones de faiblesse et/ou le long des grands accidents, à l'exemple du diapir de Beni Bahdel.

-Le Jurassique

Alors que le Jurassique inférieur et moyen affleure dans les Monts de Rhar Roubane (partie occidentale des Monts de Tlemcen) et présente des variations spatiotemporelles des faciès, le Jurassique supérieur domine les affleurements dans les Monts de Tlemcen au sens strict (Figure 7). Dans la succession lithostratigraphique donnée par BENEST (1985) et BENEST & al. (1999), nous relevons de bas en haut:

- *les Argiles de Saïda* (Callovien-Oxfordien)(Épaisseur moyenne = 200 m): il s'agit d'une alternance argilo-gréseuse à intercalations de bancs de calcaires;
- *les Grès de Bou Médine* (Oxfordien supérieur-Kimméridgien supérieur *p.p.*)(Épaisseur moyenne = 300 m): c'est une alternance argilo-gréseuse à prédominance de grès. Ces derniers se distinguent par la présence des litages obliques ou entrecoupés;
- *les Calcaires de Zarifet* (Kimméridgien supérieur)(Épaisseur moyenne = 100 m): ce sont essentiellement des calcaires dolomitiques renfermant quelques fossiles.
- *les Dolomies de Tlemcen* (Kimméridgien terminal)(Épaisseur moyenne = 200 m): suivie localement par la formation des « *Calcaires de Stah* », cette formation se distingue par son faciès essentiellement dolomitique. Elle affleure dans tous les sous-bassins étudiés.

- *-les Marno-calcaires de Raourai* (Tithonien basal)(Epaisseur moyenne = 60 m): ce sont des marnes passant latéralement à des marno-calcaires à intercalation de bancs de grès (Formation des *marno-calcaires de Hassi Haddou*). On les rencontrent particulièrement sur le plateau de Terni, dans le Djebel Lato et à l'Est d'Aïn Fezza;

- *-les Calcaires de Lato* (Tithonien inférieur)(Epaisseur moyenne = 50 m): il s'agit essentiellement de calcaires micritiques parfois dolomitiques et oolithiques;

- *-les Dolomies de Terni* (Tithonien inférieur)(Epaisseur moyenne = 50 m): cette formation dolomitique est bien exposée sur le plateau de Terni et près du barrage Meffrouch. Elle se caractérise à sa base par la présence des bancs de calcaires à silex et parfois de calcaires oolithiques.

- *-les Marno-calcaires de Hariga* (Tithonien supérieur)(Epaisseur = 165 m au Djebel Hariga d'El Gor): c'est une alternance de calcaires et de marnes qui passe latéralement à des calcaires dolomitiques;

- *-les Marno-calcaires d'Ouled Mimoun* (Tithonien supérieur à Berriasien basal)(Epaisseur moyenne = 250 à 300 m): il s'agit d'une alternance d'argiles, de grès et de calcaires lumachelliques « *Grès de Merchiche* » passant vers le haut à des calcaires oolithiques, parfois dolomitiques. Son extension latérale va du d'Ouled Mimoun jusqu'à la bordure nord du fossé de Sebdu.

-Le Crétacé inférieur (= Néocomien)

Cet intervalle chronologique comprend dans l'ordre ascendant, les formations géologiques suivantes (Figure 7):

- *-les Argiles de Lamoricière* (Berriasien moyen à Valanginien)(Epaisseur maximale = 225 m à El Rhoraf): c'est un ensemble argilo-gréseuse admettant à la base des intercalations de grès et de calcaires et au sommet des niveaux de calcaires. Cet ensemble passe latéralement à un faciès gréseux, plus épais « *Grès de Hassi Zerga* »;

- *-les Grès de Berthelot* (Hauterivien)(Epaisseur moyenne = 150 m): il s'agit d'une alternance de grès et d'argiles. On distingue çà et là la présence des bancs carbonatés. Dans la région de Sebdu, cette formation se termine par des calcaires d'âge Barrémien supérieur à Aptien « *Calcaires de Zygine* ».

2.2.2. Le Cénozoïque

-L'Eocène

Il correspond généralement à des faciès gréseux admettant des bancs conglomératiques (poudingues). Dans le massif de Sebâa Chioukh, les dépôts sédimentaires sont constitués d'une alternance de grès et de marnes argileuses formant ainsi une série de 100 à 150 m d'épaisseur d'âge éocène supérieur. Sur cette alternance repose les formations rougeâtres de la basse Tafna attribuées classiquement à l'Oligocène (GENTIL, 1902).

-Le Miocène inférieur

Dans le bassin de la Tafna, la mer du Miocène a été enregistrée dès le Burdigalien (PERRODON, 1957) correspondant ainsi aux terrains synchro- nappes de GUARDIA (1975).

Durant cet intervalle chronologique du Miocène inférieur à moyen, les dépôts sont constitués de conglomérats et d'argiles marneuses à passées de bancs de grès et dont l'âge est attribué au Serravallien. Localement cette série est recouverte par des coulées volcaniques.

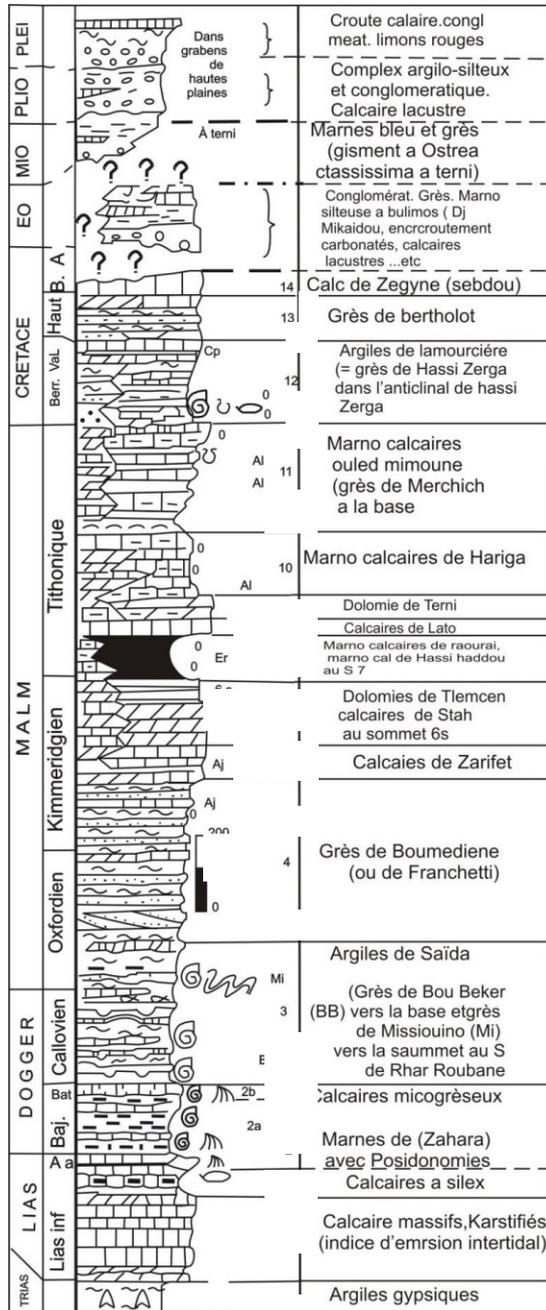


Figure 7- Série lithostratigraphique type des Monts de Tlemcen (s.l.) d'après BENEST & al., 1999).

-Le Miocène supérieur

Il s'agit des terrains Post-nappes localisés dans la partie septentrionale du bassin de la Tafna. Ce sont des terrains formés de dépôts clastiques, des alluvions continentales, des marnes saumâtres et des marnes marines. L'ensemble est surmonté par des calcaires à algues et à madréporaires du Messinien. Cette période géologique est marquée également par une importante activité volcanique. A l'exemple des coulées volcaniques de la

moyenne Tafna (e.g. Oued Bou Kiou, Ain Romana et les coulées de la bordure de la chaîne de Fillaoussène)(BELLON & al., 1984).

-Le Plio-Quaternaire

Il est représenté par des dépôts à la fois marins et continentaux. Les faciès marins sont constitués essentiellement de marnes, alors que les dépôts à cachet continental sont hétérogènes. Nous distinguons les conglomérats, les travertins, les alluvions, des limons et les marnes avec peu ou pas de galets.

A noter la présence de quelques lambeaux de basaltes interstratifiés, à l'exemple des coulées situées au nord-ouest de la plaine de Maghnia dans le bassin du Mouilah.

B. Contexte hydrogéologique

Dans ce bassin objet de la présente étude, HAYANE (1983) et COLLIGNON (1984,1986) ont décrit les principales formations géologiques perméables et qui sont reconnues comme des aquifères potentiels (Figures 8 et 9). Il s'agit de :

-Formations à fort potentiel aquifère : constituées de Dolomies de Tlemcen, dolomies de Terni, grès de Merchiche, avec à leur base les calcaires de Zarifet, elles affleurent en grande partie vers le Nord-Ouest et le Nord-Est du bassin. Ainsi que les formations d'âge Plio-Quaternaire constituées dans alluvions récents formés le long des oueds, les terrasses, croûtes calcaires du Quaternaire ancien et les conglomérats qui comblent le fossé de Sebdou. Ces formations présentent une lithologie favorable sur le plan hydrogéologique et se caractérisent par une forte capacité de rétention de l'eau. Parmi les sources qui drainent ces formations, nous citons : Ain Soltane, Deillen, Sidi Aissa, Berdil, Hadjar.

-Formations à faible potentiel aquifère: elles regroupent des formations de nature lithologique variée où les séries à dominance argileuse ou marneuse occupent une place prépondérante, il s'agit des grès de Boumédien, les marno-calcaires de Raourai, Hariga et d'Ouled Mimoun, ainsi que les argiles de Lamoricière. Ces formations présentent une faible perméabilité d'interstices ou de fissures, donc il n'y existe pas d'aquifères notables.

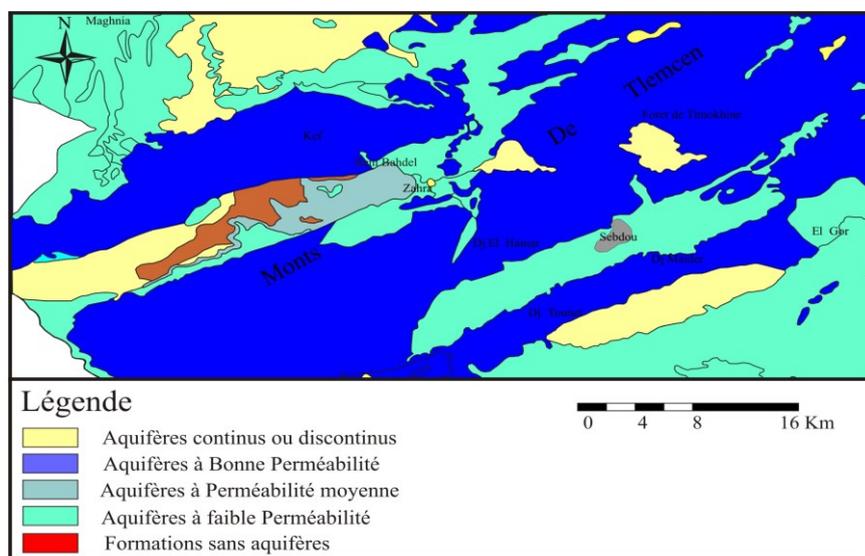


Figure 8- Extrait de la carte hydrogéologique des Monts de Tlemcen (d'après Agence Nationale des Ressources Hydriques, 2008).

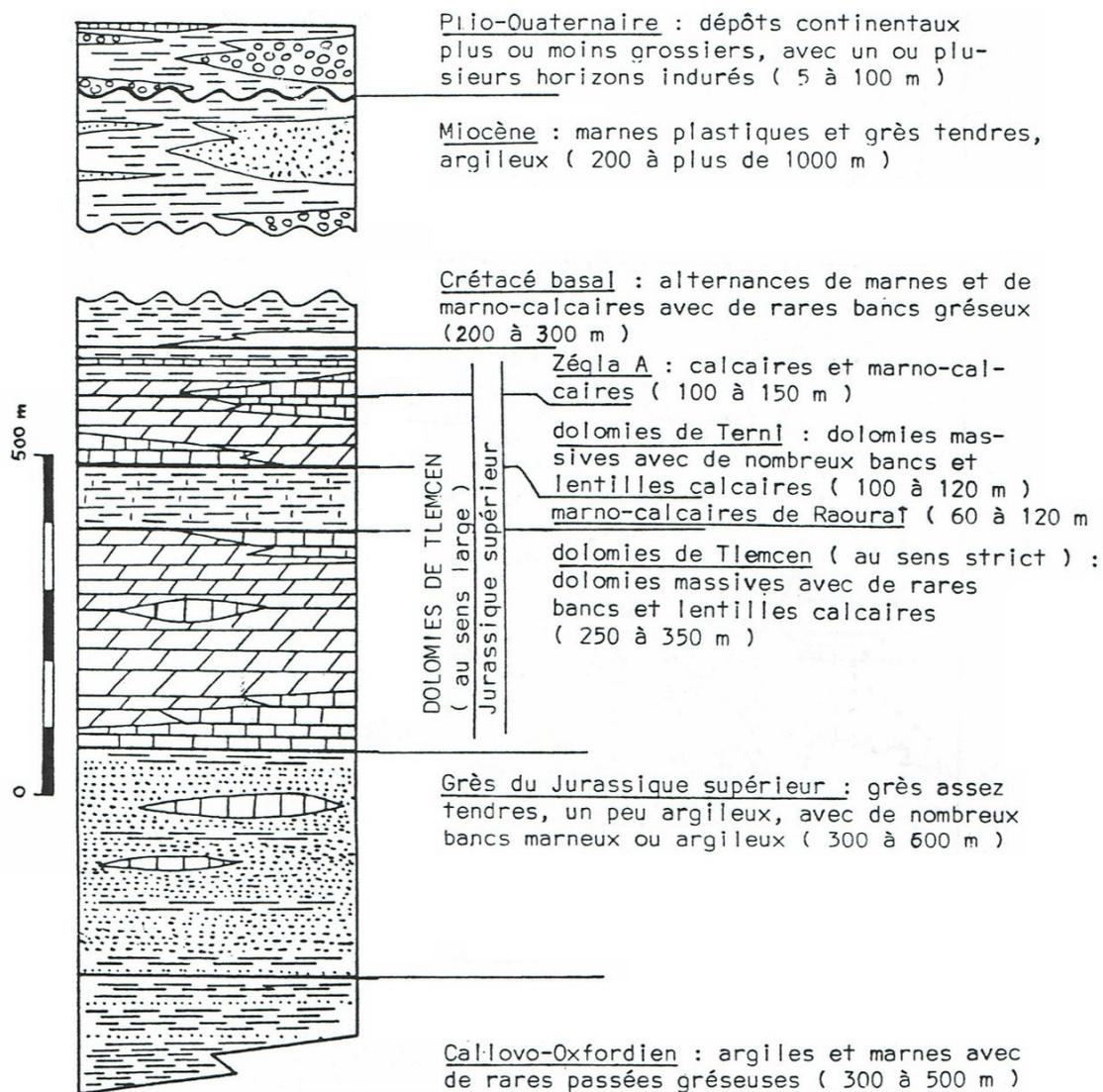


Figure 9- Coupe synthétique des principales formations affleurant dans les monts et piémonts de Tlemcen (d'après COLLIGNON, 1986).

Deuxième chapitre: **Matériel et méthodes**

I. INTRODUCTION

Ce chapitre a pour objectif de présenter le matériel utilisé et la méthodologie adoptée dans ce travail de recherche. Ainsi, il comporte en premier lieu les données disponibles concernant les deux sous bassins d'étude et leurs modes d'acquisition. Ensuite, nous exposons en détail les travaux réalisés à la fois sur le terrain et au laboratoire. A la fin, nous clôturons le chapitre par la présentation des différentes méthodes d'investigation utilisées.

II. PRESENTATION DES DONNEES

Il s'agit des données spatiales et temporelles qui sont à notre disposition et qui seront par la suite traitées avec différentes méthodes. Les données spatiales sont des Modèles Numériques de Terrain (MNT) de chacun des sous-bassins, avec des résolutions de 30 m, issus de la base de données SRTM (The Shuttle Radar Topography Mission-USGS-EROS) et des cartes géologiques des aquifères étudiés. Ces données seront traitées numériquement par un Système d'Information Géographique (SIG).

Par ailleurs, les données temporelles utilisées sont essentiellement des séries hydrométéorologiques relatives aux sous-bassins et des données hydrogéologiques correspondants aux aquifères étudiés.

A. Données climatiques

Les paramètres climatiques (températures, précipitations, humidité relative, vitesse de vent) à l'échelle journalière sont enregistrés au niveau de quatre stations (Sebdou, Béni Bahdel, El Maffrouch et Zenata). Ils seront utilisés ici pour la détermination des variabilités pluviométriques et thermiques dans les sous-bassins de la haute Tafna et de Sikkak, sur des périodes de: 39 ans (Sebdou), 36 ans (Béni Bahdel), 35 ans (El Maffrouch) et 38 ans (Zénata)(Tableau 2). Il à noter que la base de données utilisée appartient au Data-Access de la Nasa Earth Science's.

B. Données hydrométriques

Ce sont des données obtenues auprès de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH). Pour cette étude, quatre (4) stations hydrométriques ont été sélectionnées pour chacun des sous-bassins (Figure 10). Toutefois, il faut souligner certaines contraintes enregistrées par rapport à la longueur des séries et des périodes

qu'elles couvrent lesdites stations. Les caractéristiques des différentes stations utilisées sont mentionnées dans le tableau 2.

Sous - bassins	Station	Type	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)	Type de données	Période d'observation
Haute Tafna	Sebdou	Météorologique	34.637	-1.331	829.18	T (°C), P (mm), RH (%), WS (m s ⁻¹)	1981/82 – 2019/2020
		Hydrométrique	34.655	-1.325	880	Q (m ³ s ⁻¹)	2000/01 – 2011/12
	Béni Bahdel	Météorologique	34.712	-1.502	655	T (°C), P (mm), RH (%), WS (m s ⁻¹)	1984/85 – 2019/20
		Hydrométrique	34.712	-1.504	655	Q (m ³ s ⁻¹)	2000/01 – 2019/20
Sikkak	El Maffrouch	Météorologique	34.847	-1.287	1110	T (°C), P (mm), RH (%), WS (m s ⁻¹)	1985/86 – 2019/20
		Hydrométrique	34.830	-1.310	1120	Q (m ³ s ⁻¹)	(1989/90 – 2013/14)
	Aéroport de Zenata	Météorologique	35.012	-1.456	254.91	T (°C), P (mm), RH (%), WS (m s ⁻¹)	1982/83 – 2019/20
	Sikkak	Hydrométrique	35.02082	-1.329	220	Q (m ³ s ⁻¹)	2000/01 – 2019/20

Tableau 2 Caractéristiques des stations météorologiques et hydrométriques des sous-bassins étudiés.

T (°C) : Température atmosphérique en degré Celsius, P (mm) : Précipitations en millimètres, RH (%) : Humidité relative en %, WS (m s⁻¹) : Vitesse de vent en m par seconde, Q (m³ s⁻¹) : Débit instantané en mètre cube par seconde.

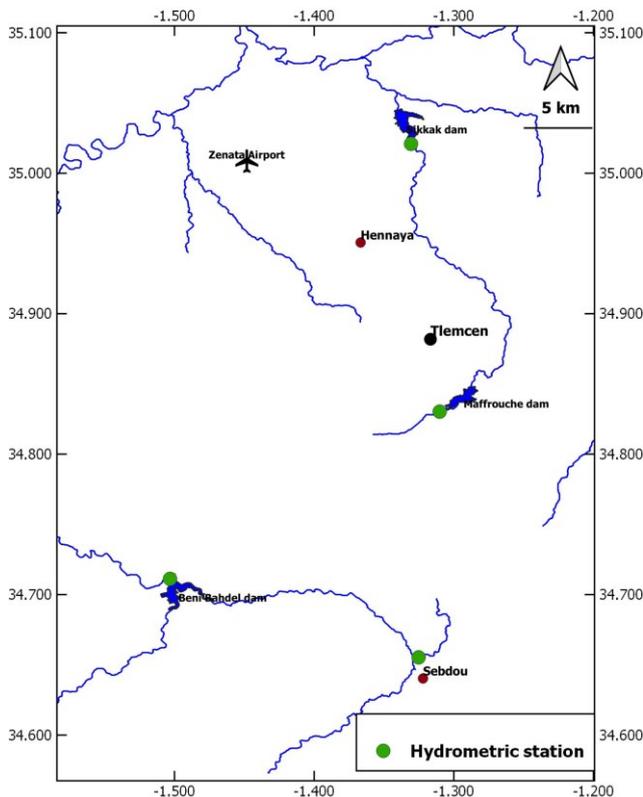


Figure 10- Localisation des stations hydrométrique.

C. Données hydrogéologiques

Les données hydrogéologiques sont principalement des valeurs de paramètres hydrodynamiques (perméabilité, transmissivité, etc.) des aquifères étudiés. Elles sont déterminées dans des travaux antérieurs.

III. TRAVAUX DE TERRAIN

Les eaux de surface et les eaux souterraines des aquifères alluviaux plio-quadernaires des sous-bassins de la haute Tafna et Sikkak représentent une source en eau importante. Ces eaux utilisées pour divers usages (consommation, abreuvement et irrigation) demeurent vulnérables aux pollutions superficielles. Mais, la gestion de cette ressource et son utilisation par la population, nécessitent une connaissance des caractéristiques géochimiques des eaux souterraines, suite à la compréhension du comportement hydrodynamique des réservoirs. Aussi, une évaluation et un suivi ponctuel de la qualité chimique des eaux de surface et souterraines sont primordiales.

Dans cette optique, un suivi chimique saisonnier (saison humide et saison sèche 2017) a été réalisé à travers différents points d'échantillonnage au niveau des cours d'eau principaux et des deux aquifères potentiellement exploitables dans les deux sous-bassins. Le suivi consiste à faire des prélèvements d'échantillons d'eau, à mesurer les paramètres physico-chimiques et à analyser des éléments majeurs. Parallèlement, à ce suivi, des mesures des niveaux d'eau ont été effectués durant la période humide dans les différents puits échantillonnés.

A. Echantillonnage

Un total de cinquante-trois points d'eau (53) ont été sélectionnés et analysés durant les mois de Mars/Avril (saisons des pluies) et Octobre/Novembre (saison sèche) de l'année 2017. Ces échantillons d'eau ont été prélevés dans les eaux de surface, des cours d'eau de la Tafna supérieur et de Sikkak, et dans les eaux souterraines des aquifères plio-quadernaires de Sebdu et de Hennaya. Les points d'eau sont répartis comme suit:

1. Pour les eaux de surface

Quatorze (14) échantillons ont été prélevés dans les eaux de surface, dont cinq (5) points d'eau sont répartis tout en long de l'oued de Tafna supérieur jusqu'à l'entrée du barrage Béni-bahdel (Figure 11), en période humide (21/03/2017). Les neuf (9) d'autres sont prélevés à l'oued Sikkak, du point le plus haut dudit oued jusqu'à l'entrée du barrage Sikkak (Figure 12) durant la période de crue (08/04/2017). Les coordonnées géographiques des différents points d'échantillonnage sont données dans le tableau 3.

Notons que les eaux de surface de ces deux oueds sont utilisées principalement pour l'irrigation des terrains agricoles limitrophes, lorsqu'il y a un écoulement en période humide, puisqu'ils sont généralement à sec en période sèche.

2. Pour les eaux souterraines

Cinquante-six (56) échantillons d'eau souterraine ont été prélevés dans différents puits et sources dont (21) dans l'aquifère de Sebdoou (Figure 12) et (35) dans la plaine de Hennaya, pendant deux périodes (Mars/Avril 2017 et Octobre/Novembre 2017) (Figure 12). Des mesures piézométriques ont été réalisées durant la première campagne d'échantillonnage, à savoir: mars 2017 et concernent les deux aquifères susmentionnés. Les caractéristiques des points d'eau échantillonnés, sont mentionnées dans le tableau 4.

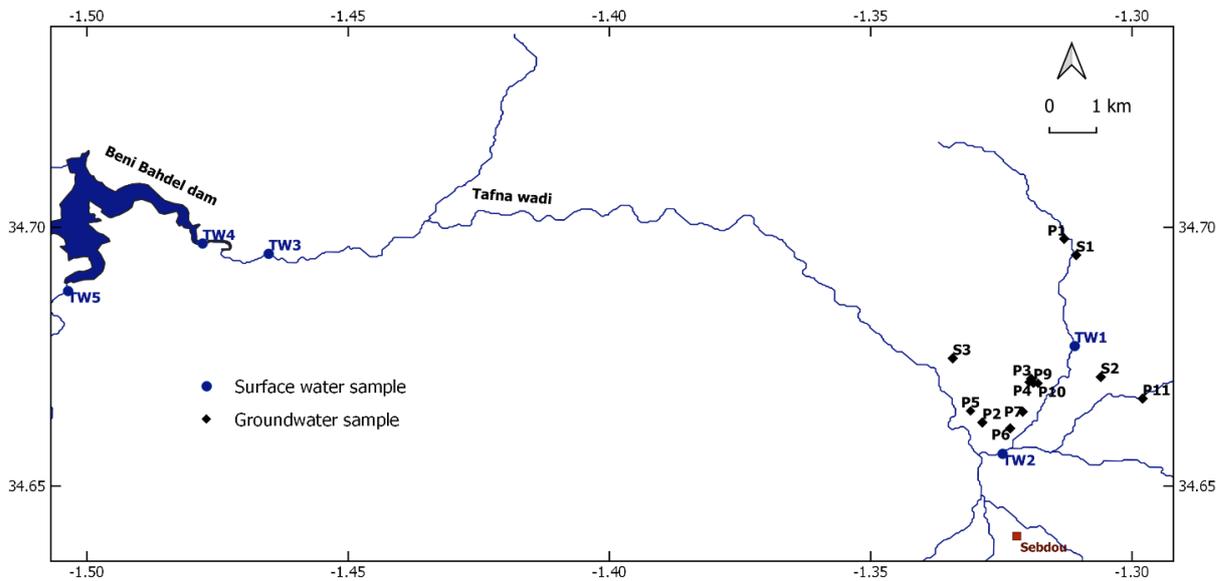


Figure 11- Localisation des points d'échantillonnage dans le sous-bassin versant de la haute Tafna.

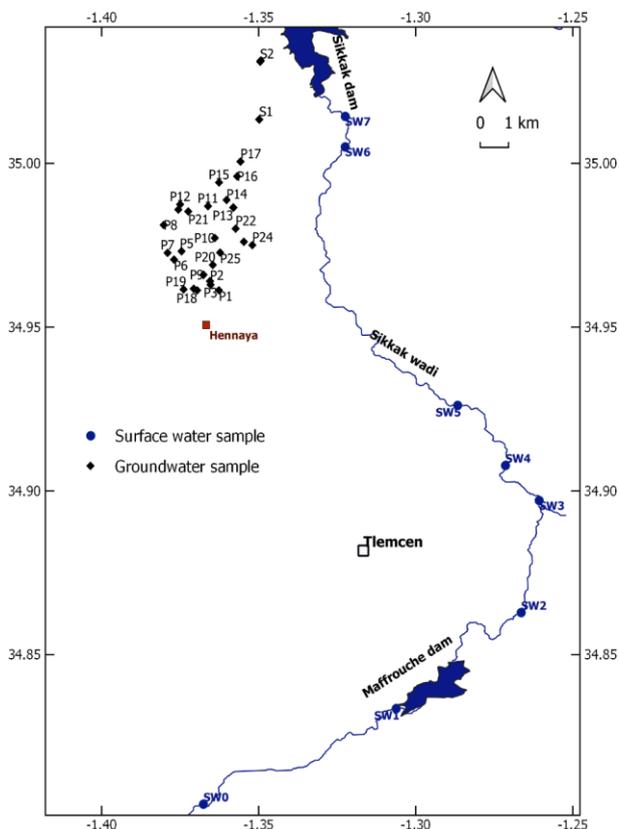


Figure 12- Localisation des points d'échantillonnage dans le sous-bassin versant de Sikkak.

Echantillons	X_Coord.	Y_Coord.	Altitude (m)
Oued Tafna			
TW1	34.677037	-1.310952	955
TW2	34.656209	-1.324752	878
TW3	34.694874	-1.465235	657
TW4	34.696861	-1.477879	655
TW5	34.687673	-1.503628	651
Oued Sikkak			
SW0	34.804372	-1.367602	1148
SW1	34.83357	-1.30622	1120
SW2	34.862855	-1.266449	722
SW3	34.897069	-1.260716	613
SW4	34.90776	-1.27145	591
SW5	34.92611	-1.28667	547
SW6	35.00501	-1.32247	235
SW7	35.01432	-1.32244	226

Tableau 3- Localisation des points d'échantillonnage des eaux de surface.

Point d'eau	X_Coord.	Y_Coord.	Altitude (m)	TYPE	Période d'échantillonnage (Année 2017)	
Aquifère de Sebdou					Sw	Sd
P1	34.6977167	-1.3130167	1084	Puits	Mars	Octobre
P2	34.6622667	-1.3286333	892	Puits		Octobre
P3	34.6706667	-1.3192667	925	Puits	Mars	Octobre
P4	34.6700833	-1.3196833	925	Puits	Mars	Octobre
P5	34.6645	-1.3309	872	Puits	Mars	Octobre
P6	34.6611833	-1.3233333	899	Puits	Mars	Octobre
P7	34.66435	-1.3209	906	Puits	Mars	
P8	34.66995	-1.31885	930	P9	Mars	
P9	34.66985	-1.3179667	927	P10	Mars	
P10	34.6668833	-1.29795	923	P11	Mars	
S1 (Ain Tagga)	34.6946167	-1.3106667	1083	S1	Mars	Octobre
S2 (Ain Soutan)	34.6710667	-1.3059667	915	S2	Mars	Octobre
S3 (Ain El Berd)	34.6746667	-1.3343	877	S3	Mars	Octobre
Aquifère de Hennaya					Hw	Hd
P1	34.961251	-1.36268	388	Puits	Avril	
P2	34.964005	-1.365514	381	Puits	Avril	Novembre
P3	34.962944	-1.365338	382	Puits	Avril	Novembre
P4	34.961722	-1.3707	382	Puits	Avril	
P5	34.97317	-1.374576	355	Puits	Avril	
P6	34.970634	-1.376973	357	Puits	Avril	
P7	34.972681	-1.379029	354	Puits	Avril	
P8	34.98118	-1.380255	344	Puits	Avril	
P9	34.966006	-1.367588	372	Puits	Avril	Novembre
P10	34.977217	-1.363986	349	Puits	Avril	
P11	34.986935	-1.366148	333	Puits	Avril	
P12	34.987469	-1.375032	332	Puits	Avril	Novembre
P13	34.986518	-1.358129	337	Puits	Avril	Novembre
P14	34.988815	-1.360233	327	Puits	Avril	
P15	34.994167	-1.362639	322	Puits	Avril	
P16	34.99604	-1.356884	316	Puits	Avril	
P17	35.000538	-1.355797	309	Puits	Avril	Novembre
P18	34.961238	-1.369614	385	Puits		Novembre

P19	34.961524	-1.373927	378	Puits		Novembre
P20	34.968988	-1.364624	368	Puits		Novembre
P21	34.985318	-1.372434	334	Puits		Novembre
P22	34.980072	-1.357348	354	Puits		Novembre
P23	34.976052	-1.354739	355	Puits		Novembre
P24	34.97504	-1.352036	357	Puits		Novembre
P25	34.972767	-1.362297	361	Puits		Novembre
S1 (Aïn Boukoura)	35.013403	-1.349824	285	Source	Avril	Novembre
S2 (Aïn Ouahab)	35.031038	-1.349536	269	Source	Avril	Novembre

Tableau 4- Caractéristiques générales des points d'échantillonnage des eaux souterraines.

Sw: Sebdou wet: Sebdou période humide; Sd: Sebdou dry: Sebdou période sèche; Hw: Hennaya période humide; Hd : Hennaya période sèche.

B. Transport et conservation

Les échantillons d'eau ont été collectés dans des bouteilles en polyéthylène de 250 ml. Ces flacons ont été rincés plusieurs fois avec l'eau à analyser, puis fermés hermétiquement et transportés par la suite dans des sacs thermiques et des glacières. A l'arrivée au laboratoire, les flacons sont conservés dans le réfrigérateur à une température de -4°C .

C. Méthodes d'analyses physiques

Ce sont les analyses in-situ des différents paramètres physiques, très sensibles aux conditions de milieu et susceptibles de varier dans des proportions importantes, s'ils ne sont pas mesurés sur place au moment du prélèvement. Il s'agit des mesures concernant la Température, le pH, la conductivité électrique (EC) et le total des sels dissous (TDS). La Température et le pH ont été mesurés avec un pH-mètre de type EXTECH (Figure 13a), alors que la conductivité électrique et la TDS par le multi-paramètre Isolab-Multiparameter (Figure 13b).



Figure 13a- pH-mètre de type EXTECH.



Figure 13b- Multi-paramètre Isolab-Multiparameter.

IV. TRAVAUX DE LABORATOIRE

Il s'agit des analyses chimiques réalisés au laboratoire pour mesurer les teneurs en cations: sodium (Na^+), potassium (K^+), calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}) et les teneurs en anions: chlorure (Cl^-), sulfate (SO_4^{2-}), bicarbonate (HCO_3^-), nitrate (NO_3^-), phosphate (PO_4^{3-}) et fluorure (F^-).

Notons que la méthode de la chromatographie ionique a été utilisée pour le dosage de tous les ions étudiés, à l'exception des bicarbonates qui ont été dosés par la méthode titrimétrique.

A. Méthode de chromatographie ionique (CI)

1. Principe

La chromatographie ionique (CI) est une technique analytique qui permet la séparation des différents ions présents dans une solution, dépourvue de matière en suspension, par élution. Cette technique est fondée sur les différences d'affinités des ions pour deux phases. Une phase stationnaire (Résine échangeuse d'ions) et une mobile dite phase liquide (ROUENSSAC, 1992; CURIE, 2006). Les différences d'affinités vont entraîner des différences entre les vitesses de migration des ions permettant de les séparer. Ainsi, les ions migrent d'autant plus lentement qu'ils ont une forte affinité pour la phase stationnaire. Cette affinité est liée entre autres à la charge et à la taille des ions.

Par ailleurs, les résines servant à la séparation des anions et des cations sont de ce fait différentes. Elles sont chargées positivement pour la séparation des anions et négativement pour celle des cations. A titre d'exemple, lorsqu'on dose les anions, les cations n'interagissent pas avec la résine et sortent les premiers formant un pic négatif au début du chromatogramme.

Au final, la séparation est la combinaison de l'effet d'entraînement par la phase mobile et de l'effet de ralentissement par la phase stationnaire. Une fois les différents ions présents dans la solution séparés, ceux-ci sont détectés et quantifiés par un conductimétrie. Pour que le détecteur ne « voie » que les ions appartenant à l'échantillon, il faut éliminer les ions constitutifs de l'éluant après la séparation des ions de l'échantillon. Cette étape est réalisée par un supprimeur qui neutralise les ions constitutifs de l'éluant ayant une forte conductivité et brouillant de ce fait le signal (CURIE, 2006).

2. Appareillage

L'appareillage utilisé ici est la chromatographie ionique de type METROHM. (Model 881 compact IC Pro) (Figure 14). Il est composé des éléments suivants:

- colonnes de séparation : (Metrosep. A Supp 5 - 250/4.0) pour l'analyse des anions, et (Metrosep C4 -150/4.0) pour l'analyse des cations;
- précolonne;
- pompe à piston;
- boucle d'injection.;
- détecteur conductivimétrique;

- suppresseur chimique (MCS);
- réservoir d'éluant.



Figure 14- Chromatographie ionique model (881 Compact IC pro).

3. Mode opératoire

3.1. Pour les anions

L'analyse a été réalisée avec une pompe à piston (833 IC liquid handling Unit) et un détecteur conductimétrique intégré. La colonne échangeuse d'anion (Metrosep. A Supp 5 - 250/4.0) est munie d'un supprimeur d'ion (MCS) à la sortie. L'éluant est constitué d'un mélange de 3 mM L^{-1} de carbonate de sodium (Na_2CO_3) et 3 mM L^{-1} de bicarbonate de sodium (NaHCO_3). Le débit de l'éluant dans l'appareil a été fixé à 1 ml/min . La gamme étalon s'étend de 2 à 100 mg L^{-1} pour chacun des anions. La dilution des échantillons dépassant la gamme d'étalon est réalisée en modifiant le volume injecté. Quand il n'y a pas de dilution, $10 \mu\text{L}$ de l'échantillon est injecté.

3.2. Pour les cations

L'analyse a été réalisée avec le même système de pompe et de détecteur employé pour les anions, moyennant la colonne (Metrosep C4 -150/4.0) et sans l'utilisation du supprimeur chimique. L'éluant est une solution constituée d'un mélange de 4 mM L^{-1} d'acide tartrique $(\text{CHOH})_2(\text{COOH})_2$ et de 1.7 mM L^{-1} d'acide nitrique (HNO_3). Dans le cas où des dilutions s'avèrent nécessaires, elles sont réalisées de la même manière que pour les anions, en modifiant le volume de l'échantillon injecté.

Tous les éluants et les échantillons d'eau ont été filtrés sur des membranes micro-filtres de 0.45 µm de diamètre.

4. Lecture des résultats

La lecture des résultats d'analyse de chacun des échantillons d'eau s'effectue à l'aide des chromatogrammes (Figure 15). Les données des concentrations cationiques et anioniques sont obtenues directement sur l'ordinateur.

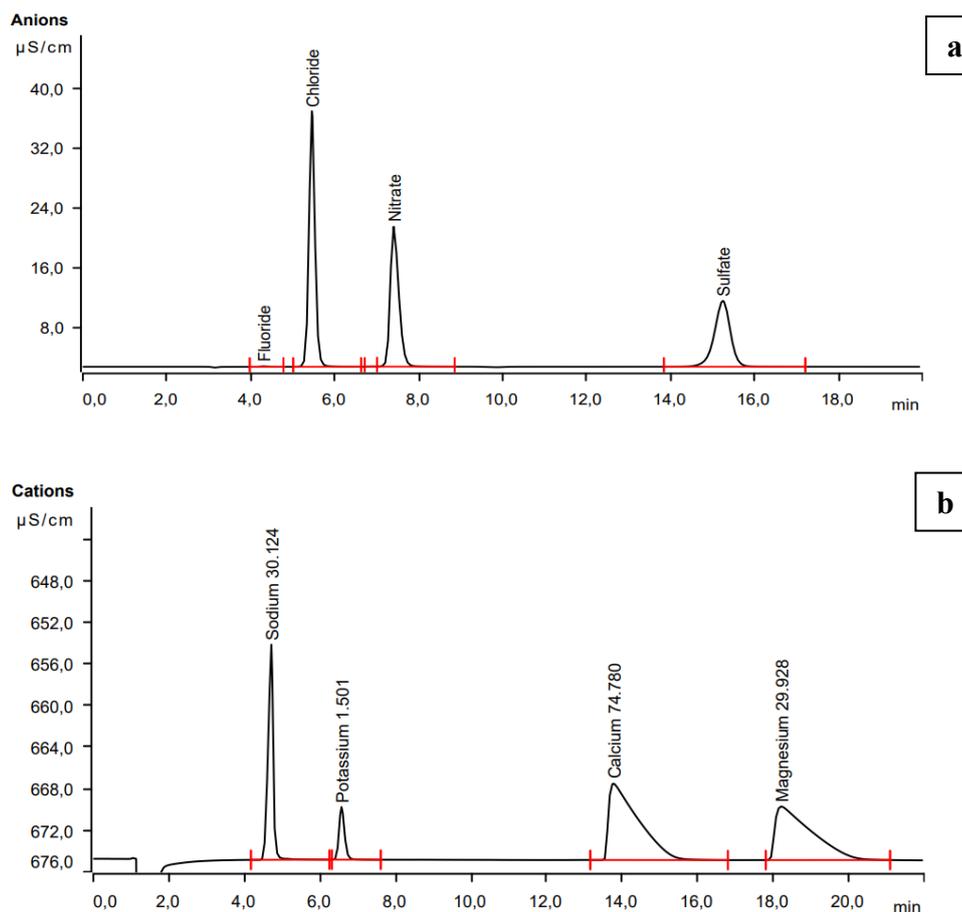


Figure15- Chromatogrammes de l'analyse de l'eau.
a. anions, b. cations

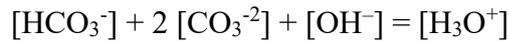
B. Méthode titrimétrique (Titre Alcalimétrique complet)

A l'inverse de l'acidité, l'alcalinité d'une eau correspond à la présence de bases et de sels d'acides faibles. Dans les eaux naturelles, l'alcalinité résulte le plus généralement de la présence des hydrogénocarbonates, des carbonates et des hydroxydes (RODIER & al., 2009). On distingue deux titres qui sont le titre alcalimétrique ou titre alcalimétrique simple (TA) et le titre alcalimétrique complet (TAC). L'unité utilisée est le degré français (1°F = 10 mg L⁻¹ de CaCO₃ = 0.2 meq L⁻¹).

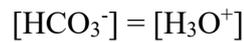
Le TAC correspond à la somme:

$$\text{TAC} = [\text{HCO}_3^-] + 2 [\text{CO}_3^{2-}] + [\text{OH}^-] - [\text{H}_3\text{O}^+]$$

Il s'annule en toute rigueur lorsque:



Dans ces conditions, $[\text{CO}_3^{2-}]$ et $[\text{OH}^-]$ sont le plus souvent négligeables devant $[\text{HCO}_3^-]$, pour autant que l'eau contienne du CO_2 dissous et l'expression peut se simplifier à l'égalité:



1. Principe

Ces déterminations sont basées sur la neutralisation d'un certain volume d'eau par un acide minéral dilué, en présence d'un indicateur coloré. Les réactifs utilisés sont:

- l'acide chlorhydrique ou sulfurique 0.02 N;
- une solution de phénolphtaléine dans l'alcool à 0.5 %;
- des solutions de vert de bromocrésol (0.2 g) et de rouge de méthyle (0.015 g).

2. Mode opératoire

Prélever 100 ml d'eau à analyser dans une fiole conique. Ensuite, ajouter 2 gouttes de solution de vert de bromocrésol et de rouge de méthyle et titrer graduellement l'acide dans la fiole à l'aide d'une burette, en agitant constamment, jusqu'à disparition de la coloration bleu verdâtre et apparition de la couleur rose (pH 4.5).

3. Expression des résultats

Soit V , le volume d'acide (0.02 N) versé depuis le début du dosage, le titre alcalimétrique complet (TAC) en meq L^{-1} sera exprimé par $\frac{V}{5}$ et en $^\circ\text{F}$ par V .

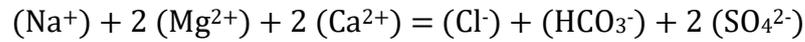
C. Contrôle de fiabilité de l'analyse chimique (Condition d'électroneutralité)

Avant de procéder à une discussion sur les processus et les interactions chimiques naturelles (entre les eaux et les matériaux géologiques à travers lesquels elles s'écoulent), ou anthropiques (entre les eaux et les différents polluants chimiques), le comportement des constituants dissous en phase liquide sans interactions avec les phases solides doit être considéré.

D'après FREEZE & CHERRY (1979), une des conditions fondamentales des solutions d'électrolytes est qu'à l'échelle macroscopique, plutôt qu'à l'échelle moléculaire, une condition d'électroneutralité doit être existée. Ceci est connu sous le nom d'équation d'électroneutralité, ou d'équation d'équilibre de charge, définie par, la somme des charges ioniques positives, égale à celle des charges ioniques négatives. Elle est donnée par la relation:

$$\sum z m_c = z m_a$$

Où, z est la valence ionique, m_c : la molalité des espèces cationiques et m_a : la molalité des espèces anioniques. A l'aide de cette équation de bilan de charge, une indication de la précision des données d'analyse de l'eau peut être obtenue, si les principaux constituants chimiques appelés éléments majeurs sont analysés (FREEZE & CHERRY, 1979), puisque:



Le silicium n'est pas inclus dans cette relation; car il se produit dans un état neutre plutôt que sous une forme chargée. Si un écart significatif par rapport à l'égalité se produit, il doit y avoir (1) des erreurs analytiques dans la détermination de concentration ou (2) des espèces à des niveaux de concentration élevés non inclus dans l'équation (FREEZE & CHERRY, 1979). Cet écart par rapport à l'égalité est exprimé sous la forme:

$$E = \frac{\sum z m_c - \sum z m_a}{\sum z m_c + \sum z m_a} \times 100$$

Où: E est l'erreur d'équilibre des charges exprimée en pourcentage. Les résultats des analyses chimiques sont exprimés en milléquivalents par litre.

Les laboratoires d'analyse de l'eau considèrent normalement qu'une erreur d'équilibre de charge inférieure à environ 5% est acceptable (FREEZE & CHERRY, 1979).

V. METHODES D'INVESTIGATION

Dans cette thèse, diverses méthodes de traitement de données ont été utilisées. Chacune ayant son propre avantage: des analyses statistiques, des traitements géochimiques, une spatialisation des données par l'utilisation des SIG et l'utilisation des modèles conceptuels. La combinaison de ces approches, peut fournir une meilleure compréhension de la vulnérabilité des eaux à l'échelle d'un bassin versant.

A. Traitement statistique

L'étude statistique a été utilisée sur les données temporelles recueillies (données hydrométéorologiques) et enregistrées (données chimiques), à l'aide des logiciels Excel, Excel-STAT et Statistica (version 13.5.0.17). Les différents traitements englobent le calcul des nombres de la statistique descriptive qui permettent de donner une idée sommaire sur la variabilité des données temporelles, et des coefficients de la statistique corrélatrice utilisés pour les paramètres chimiques. Ces derniers favorisent la compréhension des échanges géochimiques dans les systèmes souterrains (ALVIN, 2002; MACHIWAL & JHA, 2015) et fournissent des informations utiles liées à l'évaluation des qualités des eaux de surface et souterraines (KARAKUS, 2020).

Nous tenons à préciser que ces traitements minimisent la taille des grands ensembles de données, permettant ainsi leur classification, interprétation et modélisation (MASSART & KAUFMAN, 1983; SIMEONOV & *al.*, 2003; KARAKUS, 2020).

1. Statistique descriptive

Dans le présent travail, l'intérêt de l'utilisation de la statistique descriptive est de donner une idée globale sur les différents paramètres traités, soit par calcul d'un nombre statistique (valeurs centrales, extrêmes, ou valeurs de dispersion) soit par des représentations graphiques (courbes, histogrammes, Box-plots, ...).

2. Statistique corrélatrice

Les corrélations entre les paramètres chimiques sont très utiles pour comprendre les principaux processus hydrochimiques. Dans notre étude, l'algorithme de classification comprend trois analyses différentes, à savoir: la matrice de Pearson, l'Analyse en Composante Principale (ACP) et la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH).

2.1. Matrice de corrélation de Pearson

Mathématiquement, le coefficient de corrélation de Bravais-Pearson, noté (r) est un indicateur de linéarité entre deux variables continues X et Y . Ce coefficient varie entre -1 et +1. Une valeur nulle (0) reflète une relation de non dépendance entre deux variables. Une corrélation négative signifie que lorsque l'une des variables augmente, l'autre diminue. Enfin, une valeur positive est indicatrice de leur variation dans le même sens (SAPORTA, 2006).

A noter que r est égale à:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) (Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

Lorsqu'on observe les valeurs numériques de p variables et n individus, on se trouve en présence d'un tableau \mathbf{X} à n lignes et p colonnes (SAPORTA, 2006).

$$\mathbf{X} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & \dots & j & \dots & p \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ i \\ \vdots \\ n \end{matrix} & \begin{bmatrix} & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ \dots & \dots & \dots & x_i^j & \dots & \dots \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \end{bmatrix} \end{matrix}$$

x_i^j est la valeur prise par la variable n° j sur le $i^{\text{ème}}$ individu (SAPORTA, 2006).

Les coefficients de corrélation entre les variables supérieures à 0.7 de la matrice sont considérées comme bonnes et satisfaisantes et celles inférieures à 0.3 sont insignifiantes (SCHAUG & *al.*, 1990; NOWAK, 1998).

2.2. Analyse en Composante Principale (ACP)

Cette méthode statistique a été utilisée pour transformer des variables corrélées en un plus petit nombre de paramètres non corrélés, réduisant ainsi la dimensionnalité de la matrice de données (KAUFMAN, 1990; JOLLIFFE, 2002; MENCIO' & MAS-PLA, 2008).

Selon NIU & *al.* (2011), la réalisation d'une ACP se fait en six étapes. A commencer par la sélection des variables et la saisie des données et la normalisation. Ensuite, nous passons à l'étape du calcul de la matrice des coefficients de corrélation, le calcul de la valeur propre de la matrice et le calcul de la matrice de chargement de la composante principale. A la fin, nous terminons par le calcul des poids de notation des paramètres (LI & *al.*, 2013).

2.3. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)

L'analyse par classe peut révéler les caractéristiques communes de différents groupes en organisant des données multivariées en groupes (EVERITT & *al.*, 2011; BIDDAU & *al.*, 2017; FENG & *al.*, 2020).

Dans cette optique l'analyse par Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) est utilisée pour déterminer le meilleur groupe dans lequel les échantillons d'eau souterraine et de surface sont similaires sur le plan géochimique (FARNHAM & *al.*, 2000; ALVIN, 2002; DABGERWAL & TRIPATHI, 2016).

Dans cette étude, les paramètres chimiques sont divisés en groupes initiaux en utilisant la distance euclidienne carrée. Les clusters initiaux sont liés en utilisant la méthode de liaison intergroupe (YIDANA, 2010). Afin d'atteindre l'objectif de distribution normale et d'homogénéité, les données sont standardisées pour obtenir la fraction Z correspondante, c'est-à-dire chaque donnée moins la valeur moyenne de la distribution normale, puis divisées par l'écart-type (S) de la distribution ($Z_i = X_{imoy}/S$) (DAVIS, 1986).

B. Traitement géochimique

Dans ce travail, l'étude hydrogéochimique est basée sur la présentation de données géochimiques sous forme de graphiques (diagrammes d'identification des faciès hydrogéochimiques) et de relations empiriques (calculs d'indices géochimiques permettant l'évaluation des processus géochimiques contrôlant l'acquisition du chimisme de l'eau).

1. Diagrammes d'identification géochimique

L'identification géochimique s'effectue par le concept de faciès hydrogéochimique utilisé pour diagnostiquer le caractère chimique de l'eau dans les systèmes hydrologiques. Le faciès reflète l'effet de processus hydrochimiques complexes dans le sous-sol. Cet effet se produise entre les minéraux des formations lithologiques et les eaux souterraines permettant l'investigation de la variabilité spatiale de la chimie des eaux en termes d'évolution hydrochimique (KUMAR, 2013; RAVIKUMAR & *al.*, 2015). Par conséquent, la délimitation de la variation des faciès a été observée par les diagrammes suivants:

1.1. Diagramme de Piper (1944)

Modifié par LANGGUTH (1966), le diagramme de Piper est largement utilisé pour comprendre les problèmes liés à l'évolution géochimique des eaux souterraines. Il se compose de trois champs distincts. Deux champs triangulaires et un champ en forme de losange (Figure 16). Les concentrations en cations, exprimées en pourcentage de leur total en meqL⁻¹, sont représentées par un seul point sur le triangle gauche. Par contre, le point représentatif des teneurs en anions, exprimé par rapport aux anions (en %) se place dans le triangle droit (Piper, 1944). Chaque point est ensuite projeté dans le champ losangique, le long d'une ligne parallèle à sa marge supérieure et le point où l'extension se recoupe indique le caractère de l'eau tel que représenté par la relation entre Na⁺ + K⁺, Ca²⁺ + Mg²⁺, CO₃²⁻ + HCO₃⁻, Cl⁻ et SO₄²⁻.

Sur la figure 16, le champ en forme de losange est divisé en cinq zones (LI & al., 2013; SUBBA RAO & al., 2019).

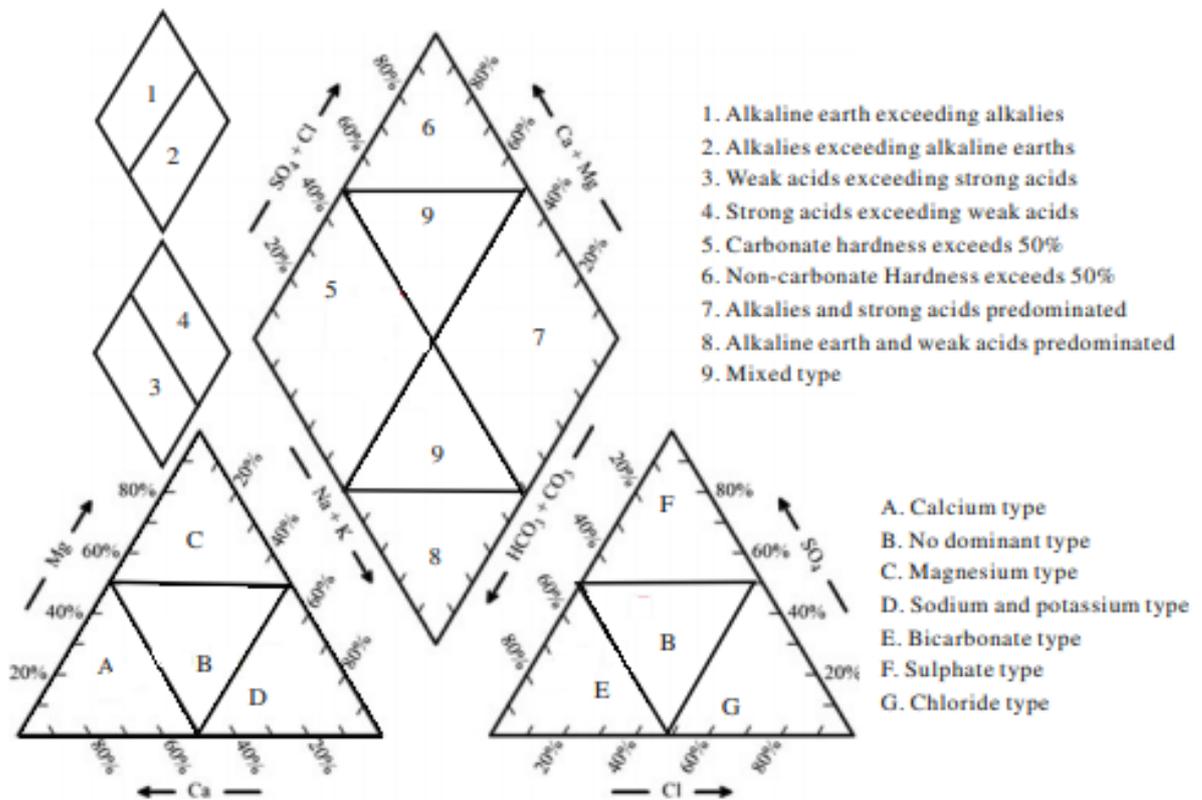


Figure 16- Diagramme de Piper.

1.2. Diagramme de Durov (1948)

Dans ce diagramme (Figure 17) sont indiquées les concentrations relatives de six groupes ioniques dans deux tracés ternaires. Celui de gauche représente les cations (Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺) et sur le deuxième (en haut) sont indiqués les anions (CO₃²⁻ + HCO₃⁻ + Cl⁻ et SO₄²⁻). Le diagramme carré constitue une projection des représentations ternaires cationiques et anioniques. Dans ce diagramme, deux tracés peuvent être aussi inclus. Un représentant le pH (en bas) et un autre la TDS (à droite).

En général, l'évaluation géochimique de l'eau, particulièrement celle de l'eau souterraine, peut être comprise en construisant les deux diagrammes suscités. Ces derniers révèlent des similitudes et différences entre les échantillons d'eau, en regroupant ceux qui sont de même qualité chimique (TODD & MAYS, 2004; RAVIKUMAR & *al.*, 2015). La particularité de ce diagramme est de renseigner sur processus géochimiques impliqués dans l'acquisition du chimisme des eaux (Figure 17 et Tableau 5), contrairement à celui de Piper (subdivisé en champs losangiques) qui ne donne que le faciès hydrogéochimique (Figure 16).

Type d'eau	
1	Dominance de HCO ₃ et Ca : indique fréquemment la recharge des eaux dans les calcaires et grès et de nombreux autres aquifères.
2	Ce type d'eau est dominé par les ions Ca et HCO ₃ . L'association avec la dolomite/dolomie est présumée, si le Mg est significatif. Cependant, dans les échantillons où Na est significatif, un échange d'ions important est présumé.
3	HCO ₃ et Na sont dominants : indique normalement une eau ayant subi un échange d'ions, bien que la génération de CO ₂ en profondeur puisse produire du HCO ₃ où Na est dominant dans certaines circonstances.
4	SO ₄ dominant, ou anion discriminant et Ca dominant, Ca et SO ₄ dominants : indiquent fréquemment de l'eau de recharge dans la lave et les dépôts gypsifères, sinon de l'eau mélangée ou l'eau présentant une dissolution simple peut être indiquée.
5	Aucun anion ou cation dominant: indique une eau présentant une dissolution ou un mélange simple.
6	SO ₄ dominant ou anion discriminant et Na dominant : indique un type d'eau qui n'est pas fréquemment rencontré et révèle des influences probables de mélange ou de dissolution rares.
7	Les prépondérances de Cl et Na sont fréquemment rencontrées sauf en cas de pollution industrielle. Sinon, ils peuvent résulter d'un échange ionique inverse des eaux chlorurées sodiques.
8	L'anion dominant Cl et le cation dominant Na, indiquent que les eaux souterraines sont liées à l'échange d'ions inverse des eaux chlorurées sodiques.
9	La dominance du Cl et de Na indique fréquemment le point le plus bas (descendant) du gradient hydraulique par dissolution.

Tableau 5- Classification des eaux selon le diagramme de Durov (d'après LLOYD & HEATHCOAT, 1985).

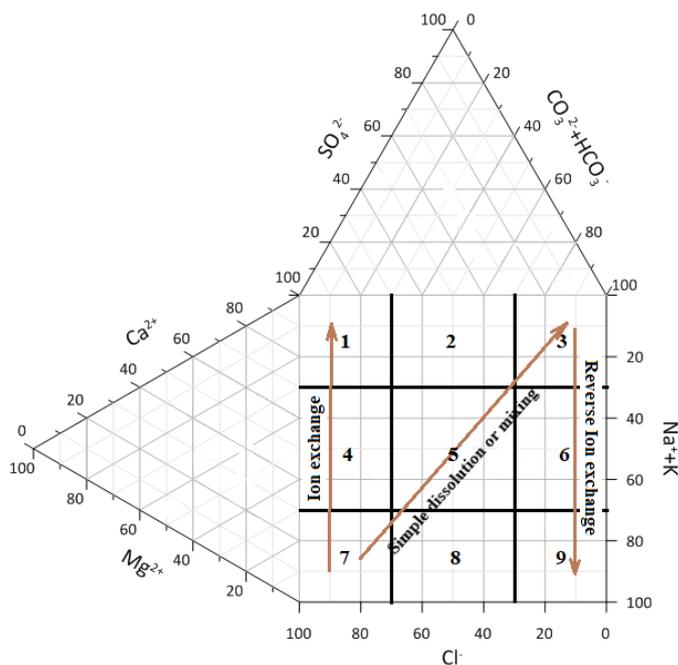


Figure 17- Diagramme de Durov (d'après LLOYD & HEATHCOAT, 1985).

1.3. Diagramme de Chadha (1999)

Le diagramme de Chadha propose une différence entre le pourcentage des milliéquivalents des alcalino-terreux (Ca^{2+} et Mg^{2+}) et des métaux alcalins (Na^+ et K^+) est tracée sur l'axe X d'une part et la différence en pourcentage des milliéquivalent des anions acides faibles (CO_3^{2-} et HCO_3^-) et des anions acides forts (Cl^- et SO_4^{2-}) est tracé sur l'axe Y d'autre part. Le domaine d'étude qui en résulte est un carré ou un rectangle, selon la taille des échelles choisies pour les coordonnées X et Y. Les différences en pourcentage milliéquivalent entre les terres alcalines et les métaux alcalins et entre les anions acides faibles et les anions acides forts, et entre les anions acides faibles et les anions acides forts, figureraient dans l'un des quatre sous-domaines possibles du diagramme, qui décrivent le caractère global de l'eau.

Ce diagramme présente tous les avantages du diagramme de Piper et peut être utilisé pour étudier divers processus hydrochimiques (Echange cationique, mélange des eaux naturelles, pollution industrielle, réduction de sulfates, eau saline, ainsi que d'autres problèmes liés à l'hydrochimie des eaux)(CHADHA, 1999).

- (1) Les alcalino-terreux dépassent les métaux alcalins.
- (2) Les métaux alcalins dépassent les alcalino-terreux.
- (3) Les anions acides faibles dépassent les anions acides forts.
- (4) Les anions acides forts dépassent les anions acides faibles.
Les alcalino-terreux et les anions acides faibles excèdent respectivement les alcalins et les anions acides forts. Les positions des points de données dans le diagramme de Chadha représentent les eaux de types Ca^{2+} - Mg^{2+} - HCO_3^- , Ca^{2+} - Mg^{2+} (dominant)- HCO_3^- , HCO_3^- (dominant)- Ca^{2+} + Mg^{2+} .
Les alcalino-terreux et les anions acides forts excèdent respectivement les alcalins et les anions acides faibles. Une telle eau a une dureté temporaire et ne peut déposer du carbonate de sodium lors de l'irrigation. Les positions des points de données dans ce diagramme représentent les eaux de type : Ca^{2+} - Mg^{2+} - Cl^- , Ca^{2+} - Mg^{2+} (dominants)- Cl^- (dominant) Ca^{2+} - Mg^{2+} .
Les alcalins dépassent les alcalino-terreux et les anions acides forts dépassent les anions acides faibles. Une telle eau crée généralement des problèmes de salinité tant pour l'irrigation que pour la consommation humaine.
- (7) Les points d'eau se positionneront dans le diagramme selon une eau de type Na^+ - Cl^- Na_2SO_4 , Na^+ (dominant) - Cl^- , ou Cl^- (dominant)- Na^+ .
Les métaux alcalins et les anions acides faibles dépassent respectivement les alcalino-terreux et les anions acides forts. Ces eaux déposent du carbonate de sodium résiduel lors de l'irrigation et provoquent des problèmes de mousse. Sur ce diagramme, les points d'eau se positionneront selon les eaux de type : Na^+ - HCO_3^- , Na^+ (dominant)- HCO_3^- ou dominance de HCO_3^- (dominant) - Na^+ .
- (8)

D'après CHADHA (1999), la qualité de l'eau dite aussi le caractère principal de l'eau est défini selon huit sous-subdivision rectangulaire, chacun représentant un type spécifique de l'eau (Figure 18).

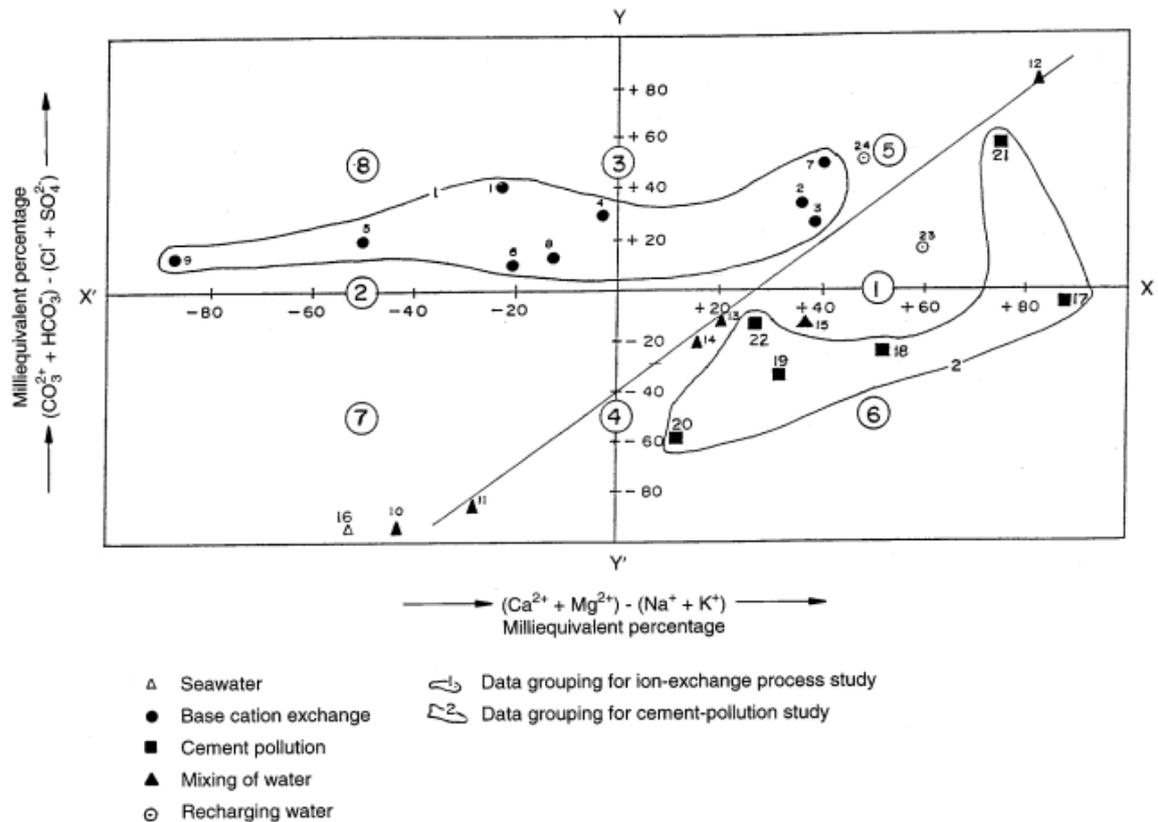


Figure 18- Diagramme de chadha (1999).

1.4. Diagramme de Gibbs (1970)

Résumant l'évolution de la chimie des eaux de surface, le diagramme de Gibbs indique trois domaines distincts. Il s'agit de la dominance des précipitations, la dominance de l'évaporation et la dominance des interactions Eau/Roche. L'influence de ces processus est claire sur le diagramme de dispersion, où les rapports sodium / (calcium + sodium) sur l'axe des X sont représentés par rapport aux solides dissous totaux (TDS ou Salinité) sur l'axe des Y (Figure 19).

A noter que le rapport de Gibbs I (pour Anions) = $\frac{Cl^-}{Cl^- + HCO_3^-}$ et le rapport de Gibbs II (pour Cations) = $\frac{Na^+ + K^+}{Na^+ + K^+ + Ca^{2+}}$. Les concentrations ioniques sont exprimées en meq L⁻¹.

Le diagramme de Gibbs à contour du boomerang a également été appliqué en hydrochimie des eaux souterraines, où le traçage des rapports ioniques et de la salinité peut conduire à une meilleure compréhension des principaux processus. Cependant, l'utilisation unique de modèles conceptuels fondés sur les processus développés spécifiquement pour les eaux de surface afin d'évaluer les processus des eaux souterraines est probablement inapproprié et peut ralentir les interprétations de données plus sophistiquées. De ce fait, la lecture des résultats sur le diagramme original de Gibbs (1970) pour définir la géochimie des eaux souterraines, peut simplifier considérablement l'interprétation réelle des systèmes aquifères existants et peut négliger les processus les plus importants (MARANDI & SHAND, 2018).

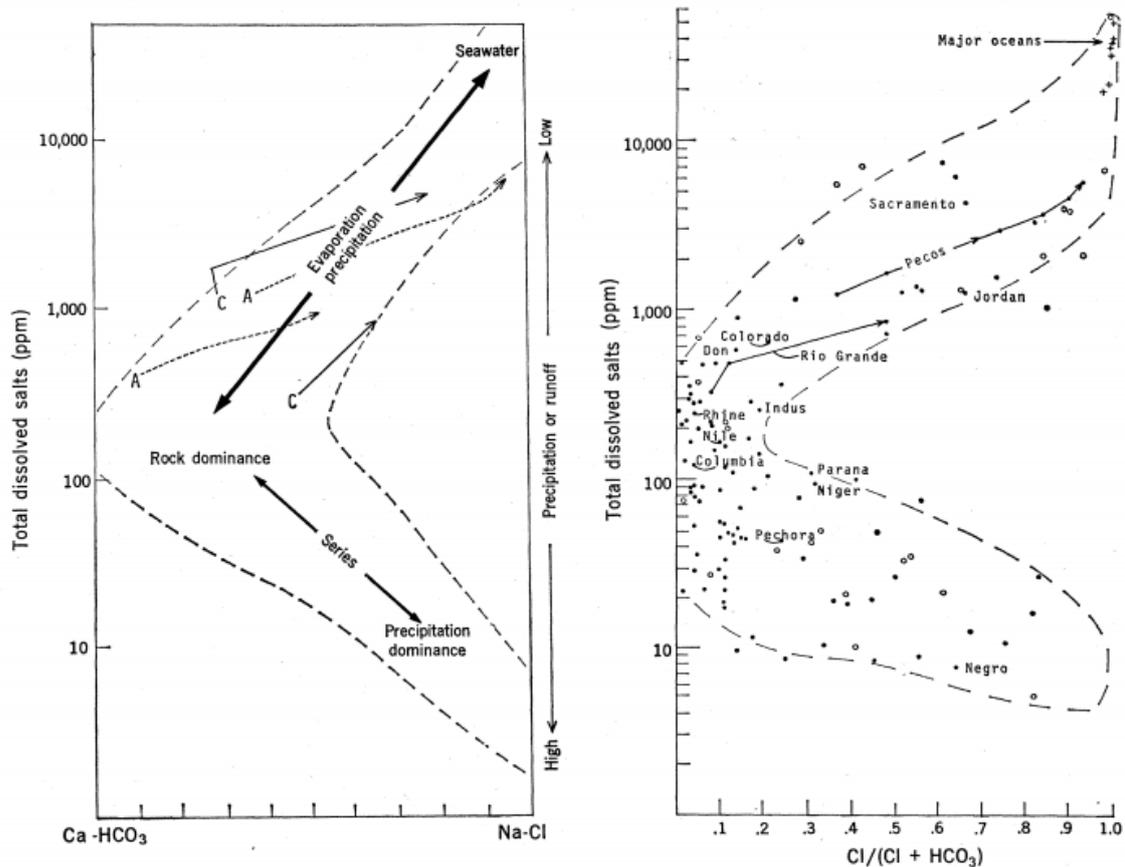


Figure 19- Diagramme de Gibbs (1970)

2. Indices d'échange de base

2.1. Indices chloro-alkalins (CAI)

L'échange de cations peut être un autre processus important se produisant entre les minéraux des roches environnantes et les ions des eaux souterraines (WU & SUN, 2016; LI & *al.*, 2019; LIU & *al.*, 2020). Dans ce même contexte, SCHOELLER (1965) proposa deux indices chloro-alkalins (CAI-1 et CAI-2) pour identifier la possibilité d'échange cationique. D'après LI & *al.*, 2014; LI et *al.*, 2019; MGBENU & EGBUERI, 2019), les CAI-1 et CAI-2 peuvent être déterminés comme suit:

$$CAI - 1 = \frac{[Cl] - [Na + K]}{[Cl]}$$

$$CAI - 2 = \frac{[Cl] - [Na + K]}{[SO_4 + HCO_3 + NO_3]}$$

*(Les concentrations sont meq L⁻¹)

Selon SCHOELLER (1977), une valeur négative de CAI-1 et CAI-2, indique la dominance de l'échange d'ions direct (Le calcium de l'eau est échangé contre le sodium ou le potassium du terrain), tandis que les valeurs positives indiquent l'échange d'ions inverse (Fixation du sodium ou du potassium et solubilisation du calcium).

2.2. Indices IEB et IGM

Pour une classification plus poussée des eaux souterraines, les indices d'échange de base (IEB) et de genèse météorique (IGM) (MATTHESS, 1982; SOLTAN, 1998; SAKRAM & ADIMALLA, 2018), peuvent être utilisés, en utilisant les équations suivantes :

$$\text{IEB} = \frac{[\text{Na} - \text{Cl}]}{\text{SO}_4}$$
$$\text{IGM} = \frac{[(\text{Na} + \text{K}) - \text{Cl}]}{\text{SO}_4}$$

*(Les concentrations sont en meq L⁻¹)

L'IEB renseigne sur le type d'eau. Cette dernière est de type Na – SO₄, si la valeur de son IEB est inférieure à 1 (IEB < 1), ou de type Na – HCO₃, si elle est supérieure à 1 (IEB > 1). Par contre, l'IMG indique l'origine de l'eau. Cette eau peut être de type de percolation d'eau météorique profonde (IMG < 1) ou de surface et peu profonde (IMG > 1).

3. Indices de saturation (SI)

Cet indice de saturation (SI) est le logarithme de quotient du produit de l'activité ionique (IAP) (= produit des activités des éléments) et du produit de solubilité (K_{SP}). Les concentrations déterminées analytiquement doivent être transformées en activités tenant compte de la force ionique, de la température et de la formation du complexe. Le produit de solubilité est la solubilité maximale possible (sur la base des données de solubilité à l'équilibre tirées de la littérature) à une température donnée de l'eau (MERKEL & *al.*, 2008).

$$\text{SI} = \log \frac{\text{IAP}}{\text{K}_{\text{SP}}}$$

L'indice de saturation (SI) indique une solution en équilibre, sous-saturée ou sur-saturée par rapport à une phase solide.

Dans le cas d'une valeur de 1, cela signifie une sursaturation décuplée. Une valeur de -2, une sous-saturation centuplée par rapport à une certaine phase minérale. En pratique, l'équilibre peut être supposé pour une plage de -0.05 à 0.05 (MERKEL & *al.* 2008).

Notons que si la valeur de SI est inférieure à -0.05, la solution est sous-saturée par rapport au minéral correspondant. Dans le cas où SI dépasse +0.05, l'eau est sur-saturée par rapport à ce minéral (e.g. la sursaturation n'est pas automatiquement équivalente à la précipitation). Enfin, si la cinétique de précipitation est lente, les solutions peuvent rester sur-saturées vis-à-vis des phases minérales pendant de très longues périodes (MERKEL & *al.* 2008).

C. Système d'Information Géographique (SIG)

Dans le but d'avoir une idée approfondie sur les caractéristiques géologiques du bassin versant d'une part et les paramètres hydrologiques, climatiques et hydrogéologiques et hydrochimiques d'autre part, des cartes thématiques sous le système d'information géographique (SIG) seront établies. Ces cartes sont réalisées sous forme numérique. D'abord, en quantifiant les propriétés morphométriques et hydrologique de chaque sous bassin, puis en spatialisant les paramètres qualitatifs des eaux de surface et souterraines des sous bassins étudiés. Après une brève présentation de l'outil SIG utilisé, les traitements des modèles numériques de terrain (Digital Elevation Model : DEM) et la méthode d'analyse spatiale utilisée vont être abordés.

1. Présentation du l'outil QGIS

Le QGIS est un logiciel SIG Open source. Fonctionnel sur plusieurs systèmes d'exploitation (Linux, Unix, Windows...) et supporte les traitements rasters et vectoriels. Le QGIS est utilisé pour l'analyse spatiale d'une multitude de jeux de données. Il peut visualiser, éditer, présenter, analyser et voire même compléter les informations géographiques (QGIS-User guide, 2020). Dans cette étude, nous avons utilisé la version QGIS 3.10.1 (A curoña).

2. Traitement des modèles numériques du terrain (DEM)

Les calculs des paramètres morphométriques (pour chaque sous bassins et de son réseau hydrographique sont indispensables pour la compréhension de la réponse hydrologique et des processus sous-jacents de la génération de l'écoulement (El JANYANI, 2013).

La disponibilité actuelle des modèles numériques de terrain appelés MNT ou DEM (Digital Elevation Model) soit sous leur forme matricielle ou vectorielle et le développement du SIG ont rendu possible l'automatisation des calculs et des mesures de ces paramètres. L'extraction de ces paramètres réalisée par le logiciel QGIS 3.14.15 a permis la délimitation des sous bassins versants, la mesure de la géométrie, de l'hypsométrie, des pentes et l'organisation des réseaux hydrographiques.

Notons qu'un modèle DEM de la région nord-ouest algérien, au pas de 30 m (Extrait de l'extension plugins: Downloads SRTM sous le QGIS) est disponible.

3. Méthodes d'interpolation spatiale

Sous le Système d'Information Géographique (SIG), les modèles lisses et joints de la distribution spatiale appelée « méthode d'interpolation » sont basés sur le concept méthodologique avancé. Ce dernier comprend l'application de l'analyse mathématique autocorrélative spatiale entre les données et plusieurs opérateurs de l'outil fonctionnellement interconnectées: (i) saisie des données, (ii) géotraitement (via un script de processus défini), (iii) géovisualisation (le développement d'un modèle spatial pour le traitement des données d'entrée dans des cartes thématiques de sortie) (NUSRET & DUG, 2012).

Diverses méthodes d'interpolation, à savoir: le krigeage ordinaire (OK), le krigeage universel (UK), la pondération de la distance inverse (IDW) sont largement utilisées dans plusieurs disciplines (MALAMOS, 2018), telles que l'hydrographie, la climatographie et la chimie des eaux, etc...

Après le traitement des modèles numériques de terrain sous QGIS, les cartes numériques et les données acquises constituent une base cartographique pour l'étude des variations spatiales des paramètres qualitatives spécifiques des eaux de surface et souterraines de chaque sous bassin considéré, en terme, de consommation humaine et d'irrigation. Ces paramètres seront interpolés par l'utilisation de la méthode de pondération de distance inverse (IDW: Inverse Distance Weighting). Cette méthode est la plus utilisée pour l'estimation des données manquantes. L'estimation de la valeur manquante d'une observation, θ_m , moyennant les valeurs observées à d'autres stations est donnée par la relation suivante :

$$\theta_m = \frac{\sum_{i=1}^n \theta_i d_{mi}^{-k}}{\sum_{i=1}^n d_{mi}^{-k}}$$

Où θ_m est l'observation à la station de base m, n est le nombre de stations ; θ_i est l'observation à la station i, d_{mi} est la distance entre l'emplacement de la station i et la station m ; et k est appelé distance de frottement (VIEUX, 2001; TEEGAVARAPU & CHANDRAMOULI, 2005) qui varie de 1.0 à 6.0. La valeur de k la plus couramment utilisée est 2.

D. Outil de modélisation

1. Modèle hydrogéochimique

Les modèles géochimiques sont des codes informatiques basés sur les constantes d'équilibre, le calcul des activités ioniques et les états de saturation des éléments chimiques (APPELO & POSTMA, 2005). Ici, nous utilisons le code PHREEQC, version 2 (PARKHURST & APPELO, 1999) devenu la norme pour effectuer une variété de calculs hydrogéochimiques. Ce code, développé pour le calcul de l'hydrogéochimie du monde réel est aussi instructif pour la compréhension de l'affectation des concentrations par les processus chimiques et les transports en milieu souterrain (PARKHURST & APPELO, 1999; APPELO & POSTMA, 2005; MERKEL & *al.*, 2008).

Historiquement, le code PHREEQC (PARKHURST & *al.*, 1980) a été écrit en Fortran et nommé « PHREEQE ». Quelques années plus tard, son programme a été complètement réécrit, en utilisant le langage de programmation C et il a eu comme dénomination « PHREEQC » (PARKHURST, 1995). De la version 1995 à nos jours, les options les plus courants, du programme comprenaient:

- le mélange des eaux;
- le calcul des concentrations en éléments, molarités, activités des espèces chimiques, pH, indice de saturation, transfert molaires et fonction des réactions réversibles/irréversibles;
- la modélisation des effets des changements de température;

- la saisie de la concentration mesurée d'un élément dans différentes espèces maîtresses dans les données d'entrée (par exemple N comme NO₃, NO₂ et NH₄);
- la définition du potentiel redox soit avec la valeur Eh mesurée (comme valeur pE) soit avec un couple redox;
- la modélisation des réactions contrôlées en surface telles que la complexation de surface et l'échange d'ions par des modèles intégrés à double couche;
- la modélisation des réactions avec des phases gazeuses à plusieurs composants en tant que systèmes fermés ou ouverts;
- l'administration des quantités de minéraux dans la phase solide et la détermination automatique les associations minérales thermodynamiquement stables;
- la modélisation du transport de masse convectif à l'aide d'un module de transport unidimensionnel, etc...

La version la plus récente du PHREEQC (version 2) (PARKHURST & APPELO, 1999) permet en plus, les simulations suivantes:

- formation de minéraux solides idéaux et non idéaux;
- réactions cinétiques avec taux de conversion défini par l'utilisateur;
- dispersion et/ou diffusion en transport 1-D et ajout de cellules immobiles en option aux cellules mobiles dans une colonne 1-D;
- modifier le nombre de places d'échangeur avec dissolution ou précipitation des réactifs;
- inclusion des bilans isotopiques dans la modélisation inverse;
- modélisation de la composition d'une eau donnée par modélisation inverse basée sur une ou plusieurs eaux de référence et les changements chimiques qui se produisent lorsqu'une eau évolue le long d'un écoulement (MERKEL & *al.*, 2008).

2. Modèle de vulnérabilité et évaluation de la qualité des eaux

Dans le cinquième chapitre de cette thèse, une évaluation qualitative primaire des eaux pour la consommation humaine et l'utilisation agricole sera discutée, en utilisant des différentes méthodes: Comparaison des résultats chimiques obtenus avec les normes de potabilité (JORA, 2011; OMS 2017) et les normes de qualité des eaux d'irrigation publiées par l'Organisation des Nations Unies (ONU) pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) (AYERS & WESTCOT, 1985), le calcul des indices d'irrigation, la spatialisation des paramètres qualitatifs (utilisation des SIG), etc...

Une autre évaluation de la qualité des eaux souterraines sera réalisée, en délimitant, des zonalités régionales par des cartes de distribution, en fonction, des indices de qualité des eaux (WQI) et du modèle de vulnérabilité à la pollution (SINTACS).

2.1. Indices de qualité des eaux (WQI)

Les indices de qualité de l'eau constituent des outils intéressants pour la détermination de la qualité de celle-ci. Ceci nécessite une connaissance des principes et des concepts de base de l'eau et des problèmes qui lui sont associés (NIKBAKHT, 2004). Cette méthode bien connue pour l'expression de la qualité de l'eau offre une stabilité d'unité de mesure reproductible qui répond aux variations des principales caractéristiques des eaux (BROWN & *al.*, 1972).

Le principe de l'indice de qualité est de classer les eaux de surface et souterraine, en fonction de leurs caractéristiques biologiques, chimiques et physiques, qui définissent leurs utilisations possibles et qui gèrent leurs allocations. Pour cela, les variables analytiques doivent être pondérées et agrégées (BOYACIOGLU, 2007; KACHROUD & *al.*, 2019). Ces indices de qualité peuvent être considérés comme des modèles de la qualité des eaux. C'est-à-dire, des représentations simplifiées pour une réalité complexe, où des variables sont sélectionnées et des méthodes de poids et d'agrégation sont définies (KACHROUD & *al.*, 2019).

Il est important de souligner que l'indice de qualité de l'eau, appelé WQI « Water quality index » est un outil permettant de présenter une expression numérique dérivée cumulativement définissant ainsi un certain niveau de qualité de l'eau (MILLER & *al.*, 1986, BORDALO & *al.*, 2006). En d'autres termes, le WQI résume les grandes quantités de données sur la qualité de l'eau en expressions simples (e.g. excellente, bonne, mauvaise, etc...) pour une compréhension facile et cohérente destinée aux décideurs et au public concernés (BHARTI & *al.*, 2011; KARAKUS, 2020).

D'après SUTADIAN & *al.* (2015), les informations obtenues à partir des WQI peuvent être utilisées généralement à des fins suivantes:

- fournir un état général de la qualité de l'eau aux autorités et à la communauté;
- étudier les impacts des politiques réglementaires et des programmes environnementaux sur la qualité de l'environnement;
- comparer la qualité de l'eau de différents sources et sites, sans procéder à une évaluation hautement technique des données sur la qualité de l'eau;
- aider les décideurs et le public à éviter les évaluations subjectives et opinions partiales subséquentes.

L'approche de l'indice de qualité de l'eau (Figure 20) est basée sur des facteurs communs pouvant être décrits dans quatre étapes (FERNANDEZ & *al.*, 2004; ABBASI & ABBASI, 2012): la sélection des paramètres, l'obtention de valeurs de sous-index (transformation à une échelle commune), l'établissement des poids et enfin l'agrégation des sous-indices pour produire l'indice final.

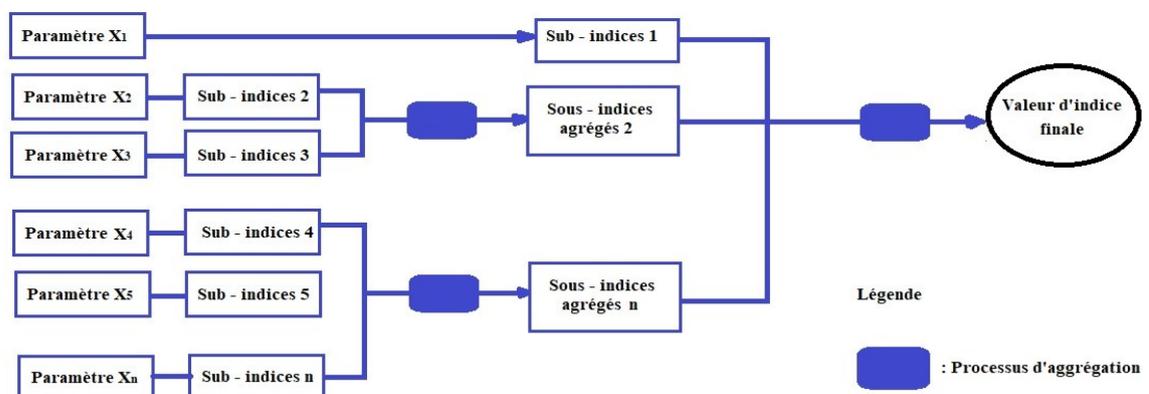


Figure 20- Structure générale d'un indice (d'après SUTADIAN & *al.*, 2015).

Cependant, il existe un grand nombre d'indices de qualité d'eau calculés par différentes méthodes et que nous avons jugé utile de les énumérer ici:

-les indices de qualité de l'eau par la méthode de la moyenne arithmétique pondérée (WAWQI = Weight Arithmetic Water Quality) tels que l'indice de qualité de Horton (Horton's index, 1965), l'indice de qualité de l'eau de la fondation nationale de l'assainissement (NSFWQI = National Sanitation Foundation Water Quality Index, 1971), l'indice de pollution de Prati (Prati's Pollution index, 1971), le premier indice de qualité de l'eau de Dinius (First Dinius Water Quality Index DWQI, 1972), la méthode de Ramakrishaniah (Method of Ramakrishaniah RWQI, 2009), etc. ;

-les indices de qualité de l'eau par la méthode de la moyenne géométrique pondérée à l'exemple du second indice de qualité de l'eau de la fondation nationale de l'assainissement (NSFWQI = Second National Sanitation Foundation Water Quality Index, 1973), celui de Bhargava (Bhargava Method, 1985) et le second indice de qualité de l'eau de Dinius (Second Dinius Water Quality Index, 1987);

-les indices de la qualité de l'eau par la méthode de la moyenne carrée harmonique pondérée et non pondérée. Nous citons: l'indice du Conseil canadien des ministres de l'environnement (CCMEWQI = Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index, 1990) et l'indice de qualité de l'eau de l'Oregon (OWQI = Oregon Water Quality Index, 1994);

-les indices de qualité par la méthode de désagréments logarithmiques à l'exemple du nouvel indice de qualité de l'eau dénommé Said indice (New WQI ou Said WQI, 2004);

Il existe également d'autres indices formulés par des organisations nationales et internationales dans le but d'évaluer et d'apprécier la qualité des eaux de surfaces et souterraines d'un domaine particulier. De plus, ces indices sont souvent fonction du nombre variable et du type des paramètres de la qualité de l'eau, comparés aux standards respectives d'une région donnée (LUMB & *al.*, 2002; CHATURVEDI & BASSIN, 2010; TYAGI & *al.*, 2013).

Il faut savoir que les indices de qualité de l'eau sont accrédités à démontrer les cycles annuels, les variations spatiales et temporelles de la qualité de l'eau et ses tendances même à faibles concentrations de manière efficace et opportune.

Dans littérature, les indices disponibles présentent de nombreuses variations et limitations en fonction du nombre de variables de la qualité de l'eau utilisées et sont, généralement non acceptées à l'échelle mondiale (TYAGI & *al.*, 2013). Pour notre étude, nous nous sommes intéressés à l'utilisation des indices de qualité récents pouvant être appliqués à la potabilité des eaux et à leur aptitude à l'irrigation. Ces indices sont calculés à l'aide de formules simplifiées utilisant la méthode des poids arithmétiques.

2.1.1. Méthode de l'indice arithmétique pondéré de la qualité de l'eau (WQI)

La méthode de l'indice arithmétique pondéré est largement utilisée par différents scientifiques (CHAUHAN & *al.*, 2010; RAO & *al.*, 2010; CHOWDHURY & *al.*, 2012; TYAGI & *al.*, 2013). Cette méthode permet de classer les eaux selon leur degré de pureté en utilisant les paramètres de qualité les plus couramment mesurés. Le calcul de l'indice s'effectue par l'utilisation de l'équation suivante:

$$WQI = \frac{\sum Q_i W_i}{\sum W_i}$$

L'échelle d'évaluation de la qualité (Q_i) pour chaque paramètre est calculée en utilisant l'expression ci-après:

$$Q_i = 100 \left[\frac{V_i - V_0}{S_i - V_0} \right]$$

Où, V_i est la concentration estimée du $i^{\text{ème}}$ paramètre dans l'eau analysée, V_0 représente la valeur idéale de ce paramètre dans l'eau pure $V_0 = 0$ (sauf $pH = 7.0$ et $DO = 14.6 \text{ mg L}^{-1}$) et S_i est la valeur standard recommandée du $i^{\text{ème}}$ paramètre.

Le poids unitaire (W_i) est calculé pour chaque paramètre de qualité de l'eau à l'aide de la formule:

$$W_i = \frac{K}{S_i}$$

Où, K représente la constante de proportionnalité pouvant être calculé par l'équation ci-dessous:

$$K = \frac{1}{\sum (1/S_i)}$$

L'évaluation de la qualité de l'eau selon cet indice (WQI) est donnée dans le tableau 6.

Valeur WQI	Classes de la qualité de l'eau	Notation
0 – 25	Excellente qualité	A
26 – 50	Bonne qualité	B
51 – 75	Mauvaise qualité	C
76 – 100	Très mauvaise qualité	D
> 100	Impropre à l'usage	E

Tableau 6- Evaluation de la qualité de l'eau selon la méthode de l'indice de qualité WQI (d'après TYAGI & *al.*, 2013).

2.2. Méthode d'évaluation de la vulnérabilité

La notion de vulnérabilité repose sur l'idée que le milieu physique, en relation avec la nappe souterraine, procure un degré plus au moins élevé de protection vis-à-vis des polluants, selon les caractéristiques du milieu (HAMZA & *al.*, 2007).

Il existe deux types de vulnérabilité. Une vulnérabilité intrinsèque, utilisée pour présenter les caractéristiques du milieu naturel. Ces caractéristiques sont responsables de la sensibilité des eaux souterraines à la pollution anthropique. Par contre la vulnérabilité spécifique dite combinée est utilisée pour définir la vulnérabilité d'une eau souterraine à un polluant particulier ou un groupe de polluants. En comptant sur les propriétés des polluants étudiés et leurs relations avec les différents composants de la vulnérabilité intrinsèque.

2.2.1. Vulnérabilité intrinsèque

La vulnérabilité intrinsèque des aquifères à la contamination (pollution) est la susceptibilité spécifique des systèmes aquifères dans leurs parties, leurs géométries et leurs paramètres hydrodynamiques à recevoir et à diffuser des contaminants fluides et/ou hydrovectorisés. L'impact de ces derniers sur la qualité des eaux souterraines est fonction de l'espace et du temps (CIVITA, 1987; CIVITA & DE MAIO, 2004). La vulnérabilité intrinsèque dépend de trois facteurs principaux:

-le processus d'ingestion et le temps de parcours de l'eau (et/ou un contaminant fluide) à travers la zone insaturée vers le bas à la zone saturée sous-jacente du système aquifère;

-la dynamique d'écoulement des eaux souterraines (et/ou d'un fluide contaminant) dans la zone saturée;

-la concentration résiduelle du contaminant lorsqu'il atteint la zone saturée, par rapport à la concentration d'origine. Cette dernière indique la capacité d'atténuation de l'aquifère de l'impact du contaminant.

A noter que plusieurs modèles d'évaluation de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines ont été développés. Nous citons DRASTIC (ALLER & *al.*, 1987), GOD (FOSTER, 1987), AVI (VAN STEMPTVOORT & *al.*, 1992), GLA (HÖLTING & *al.*, 1995), ISIS (CIVITA & DE REGIBUS, 1995), SINTACS (CIVITA, 1997), KARSTIC (DAVIS & *al.*, 2002), PI (GOLDSCHIEDER & *al.*, 2000), COP (VIAS & *al.*, 2002), PRESK (KOUTSI & STOURNARAS, 2011), DRISTPI (JIMENEZ MADRID & *al.*, 2013) et RIVA (TZIRITIS & *al.*, 2020). Parmi ces méthodes précitées, nous avons retenu pour notre étude, la méthode dite SINTACS qui aura pour objectif, l'évaluation de la vulnérabilité des eaux des aquifères susmentionnés. La méthode SINTACS a été développée par CIVITA & DE MAIO (1997) pour évaluer la vulnérabilité relative à la pollution des eaux souterraines à l'aide de sept paramètres hydrogéologiques. Il s'agit d'un développement du modèle américain DRASTIC adapté aux conditions méditerranéennes (CIVITA, 1990; HAMZA & *al.*, 2007; KUMAR & *al.*, 2013). Les modèles paramétriques, à l'exemple de SINTACS appartiennent au groupe de modèles du système de pointage dans lequel chaque facteur a non seulement son propre score mais également un poids supplémentaire pour réduire ou amplifier son importance lors de l'analyse. Le poids supplémentaire est fixé en fonction des caractéristiques environnementales, telles que les phénomènes de forte dispersion des masses d'eau de surface vers les eaux souterraines ou les sources de pollution généralisées (KUISI & *al.*, 2006; KUMAR & *al.*, 2013).

L'acronyme **SINTACS** est composé de noms italiens, à savoir: Soggicenza [Profondeur de la nappe phréatique (S)], Infiltrazione [Infiltration efficace (I)], Non saturo [Zone non saturée (N)], Tipologia dell'apertura [(Milieu du sol (T)], Acquifero [Milieu aquifère (A)], Conducibilità [Zone de conductivité hydraulique (C)], Superficie topografica [Pente topographique (S)] (CIVITA & DE MAIO, 2004). Chaque paramètre est multiplié par un poids lié à un contexte hydrogéologique. Le calcul est fait en utilisant l'équation suivante:

$$I_{\text{SINTACS}} = \sum_{j=1}^7 P_j W_j$$

Où, P représente l'évaluation de chaque paramètre et W le poids (voir tableaux 7 et 8).

Profondeur de la nappe (S) (mm)		Infiltration effective où Recharge nette (D) (mm)		Zone non saturée (N)		Milieu du sol (I)	
Intervalle	R	Intervalle	R	Complexe	R	Complexe	R
0-2	10	0-25	1	Alluvions grossiers	6-9	Gravier propre	10
3	9	25-50	2	Calcaires Karstifiés	8-10	Sable propre	9
4-5	8	50-75	3	Calcaires fissurés	4-9	Sol sableux	8
6-7	7	75-100 ; >500	4	Dolomies fissurées	2-5	Sol argilo-sableux	7
8-9	6	100-125 ; 450-500	5	Alluvions fins	3-6	Limons sableux	6
10	5	125-150 ; 400-450	6	Sables	4-7	Limons argilo-sableux	5
20	4	150-175 ; 350-400	7	Grès, conglomérats	5-8	Terreaux (sol argileux)	4-5
35-30	3	175-225 ; 300-350	8	Roches plutonique fissurées	3-5	Sol limoneux	4
40	2	225-300	9	Roches volcaniques fissurées	5-10	Limons argileux	3-4
>60	1	-	-	Marnes, Argiles, limons	1-2	Terreaux d'argile	2-3
-	-	-	-	Roches métamorphiques fissurées	2-6	Argiles limoneuse	1.5-2
Milieu aquifère (A)		Conductivité hydraulique (C) (m s⁻¹)		Pente S (%)			
Complexe	R	Intervalle	R	Intervalle	R		
Alluvions grossiers	8-9	>10 ⁻²	10	26-30	1		
Calcaires Karstifiés	9-10	10 ⁻³	9	22-25	2		
Calcaires fissurés	6-9	10 ⁻⁴	7	19-21	3		
Dolomies fissurées	4-7	10 ⁻⁵	5	16-18	4		
Alluvions moyens et fins	6-8	10 ⁻⁶	3	13-15	5		
Sables	7-9	10 ⁻⁷	2	10-12	6		
Grès, conglomérats	4-9	10 ⁻⁸ - 10 ⁻⁷	1.5	7-9	7		
Roches plutoniques fissurées	2-4	<10 ⁻⁹	1	5-6	8		
Roches volcaniques fissurées	8-10	-	-	3-4	9		
Marnes, Argiles, limons	1-3	-	-	0-2	10		
Roches métamorphiques fissurées	2-5	-	-	-	-		

Tableau 7- Valeurs de classification (R) relatives à SINTACS pour les différents paramètres hydrogéologiques (d' après CIVITA & DE MAIO, 2004)

La spécificité de cette méthode est qu'elle propose cinq scénarios différents de vulnérabilité. Il s'agit des scénarios « impact normal et impact sévère », scénarios relatifs aux aquifères constitués par des sédiments non consolidés, localisés dans les aires à sols épais, avec une profondeur du plan d'eau qui n'est pas très élevée. Les zones relatives au premier scénario correspondent aux régions où les transformations sont rares, avec existence ou non de terres cultivées et une utilisation très faible de pesticides, de fertilisants et d'irrigation, et aux périmètres très urbains très dispersés. Les zones relatives au deuxième scénario correspondent aux régions où l'occupation des sols est intensive, avec des terres cultivées à forte utilisation de pesticides, de fertilisants et d'irrigation, aux implantations industrielles et urbaines denses et aux dépôts liquides et solides de déchets. Les trois autres scénarios sont des scénarios « drainage important à partir d'un réseau superficiel », relatif aux aires où il y a une forte infiltration vers l'aquifère à partir d'un réseau superficiel d'eau. Le scénario « terre très karstifiée » concerne les aires caractérisées par une forte karstification. Enfin, le scénario « terrain fissuré » correspond aux zones caractérisées par une forte fracturation (CIVITA & DE MAIO, 2004; HAMZA & al. 2007). Les poids attribués aux différents paramètres dans les différents scénarios sont présentés dans le tableau 8).

Scénario/ paramètre	Impact normal	Impact sévere	Drainage important	Karst	Terrain fissurés
S	5	5	4	2	3
I	4	5	4	5	3
N	5	4	4	1	3
T	4	5	2	3	4
A	3	3	5	5	4
C	3	2	5	5	5
S	2	2	2	5	4

Tableau 8- Poids attribués aux paramètres SINTACS dans les différents scénarios de la méthode (d'après CIVITA & DE MAIO, 2004).

Le tableau 9 représente les critères d'évaluation de la vulnérabilité par la méthode SINTACS.

Degré de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
Très faible	<90
Faible	90 - 110
Moyen	110 - 150
Elevé	150- 195
Très élevé	195-220
Extrême	>220

Tableau 9- Critères d'évaluation de la vulnérabilité de la méthode SINTACS (d'après CIVITA & De MAIO 1997).

2.2.2. Vulnérabilité spécifique

Afin d'évaluer la vulnérabilité spécifique, le modèle doit être modifié en faisant intervenir un paramètre supplémentaire reflétant l'impact anthropique. Le choix de ce paramètre dépend du type de contamination pour lequel l'évaluation de vulnérabilité

spécifique doit être effectuée. Pour les études impliquant les nitrates comme contaminant (HAMERLINCK & ARNESON, 1998; JAVADI & *al.*, 2011; KUMAR & *al.*, 2013; CANORA & *al.*, 2022), l'occupation du sol est prise comme paramètre de substitution.

Le paramètre d'occupation du sol est en outre subdivisé en gammes ou en zones, telles que les zones agricoles, bâties ou de peuplement, les friches et les plans d'eau. Ensuite, ces plages se voient attribuer différentes classes, en fonction du potentiel de contamination par les nitrates provenant de différentes sources. Ce paramètre supplémentaire est combiné linéairement de manière additive avec l'indice de vulnérabilité $I_{SINTACS}$ pour déterminer l'indice de vulnérabilité SINTACS spécifique $I_{SINTACS-S}$.

Cet indice ($I_{SINTACS-S}$) est calculé en utilisant l'équation suivante:

$$I_{SINTACS-S} = I_{SINTACS} + AI_r \times AI_w$$

Où, AI représente le paramètre anthropique et les indices "r" et "w" indiquent respectivement la classe et le poids correspondants.

Les classes attribuées selon le modèle spécifique de SINTACS aux paramètres d'impact anthropique sont données dans le tableau 10.

Catégories d'utilisation des terres	Classe	Poids
Agriculture intensive	9	5
Zones industrielles, Zones humides	8	
Cultures annuelles, Arbres fruitiers, Zones urbaines	7	
Zones minières	6	
Oliveraies, Vignobles	5	
Plages, Dunes, Sables,	4	
Pâturages, forêts	3	
Friches ou terre déserte	2	
Plan d'eau	1	

Tableau 10- Évaluation de l'impact anthropique selon le modèle SINTACS (d'après CIVITA & DE MAIO, 2004; CIVITA, 2010).

La zone ayant un indice de vulnérabilité spécifique élevé serait plus vulnérable à la contamination des eaux. La gamme de l'indice de vulnérabilité est divisée en zones de vulnérabilité très faible, faible, modérée et élevée (KUMAR & *al.*, 2013; CANORA & *al.*, 2022).

Troisième chapitre: **Morphométrie, variabilité hydroclimatique et hydrogéologie**

Troisième chapitre: **Morphométrie, variabilité hydroclimatique et hydrogéologie**

I. INTRODUCTION

La compréhension des comportements hydrologiques et hydrogéologiques intervenant dans les bassins versants nécessitent l'acquisition de données sur les facteurs internes (morphométrie, occupation du sol, lithologie,...) et des facteurs externes (pluviosité, climat, écoulement,...). Celles-ci sont essentielles et constituent un préalable à toutes les analyses de variabilité spatio-temporelle dans un but d'étude quantitative, qualitative, ou d'impact environnemental. Dans ce chapitre, ces données spatiales et temporelles seront traitées avec différentes méthodes. Les paramètres internes, tels que, la morphométrie des sous bassins et des réseaux hydrographiques, ainsi que la piézométrie des aquifères sélectionnés seront traitées numériquement, moyennant les Systèmes d'Information géographique (SIG), et les paramètres externes (les chroniques météorologiques et hydrométriques) seront traités par des analyses graphiques basées sur des traitements de statistique descriptive par le programme informatique Excel.

II. MORPHOMETRIE

Les caractéristiques physiographiques dites internes, d'un bassin versant (à l'exemple de l'aire, le périmètre, la longueur, la largeur, la pente, l'indice de compacité, les courbes hypsométriques ...) sont indispensables pour la compréhension hydrologique de l'évolution des écoulements en période de crue et d'étiage, de la relation pluie-débit, et du temps de concentration. La quantification de ces caractéristiques pour les deux sous bassins considérés sera établie par utilisation de la cartographie thématique sous SIG, conduisant à la réalisation des cartes numériques.

A. Réseau de drainage et délimitation des bassins versants à partir de la carte DEM

Un modèle numérique de terrain appelé DEM (Digital Elevation model) représente la surface du modelé du paysage. Il est constitué d'une grille dont chaque point possède des coordonnées (X, Y, Z), correspondant à la latitude, la longitude et l'altitude (Figure 21).

Les méthodes d'extraction du réseau de drainage à partir d'un DEM raster, se décomposent essentiellement en deux approches. La première repose sur l'analyse géomorphologique par caractérisation locale des variations altimétriques, tandis que la deuxième se base sur le suivi du ruissellement de l'eau (HOCINE & *al.*, 2008; TARMOUL, 2018). Ceci nécessite des prétraitements du DEM pour la correction des erreurs inhérentes aux données (à titre d'exemple: Dépressions erronées créées par le

programme d'interpolation du DEM). Ce prétraitement améliore la précision des grilles lors de l'extraction des directions d'écoulement.

L'extraction du réseau de drainage s'appuie sur la détermination des directions d'écoulement de l'eau en chacun des pixels à partir des valeurs altimétriques du DEM, par simulation de l'écoulement de l'eau en surface. Une fois le DEM corrigé par prétraitement, le calcul d'une grille de direction d'écoulement sera possible par calcul du gradient de pente entre chaque pixel : $\text{Gradient} = d/d \times 100$ (avec d : distance entre le centre de chaque pixel), qui permet l'obtention d'une grille dont les valeurs sont basées sur la direction que suit l'eau pour s'écouler depuis un pixel particulier. En reliant les points les plus bas, le réseau hydrographique est attribué (TARMOUL, 2018).

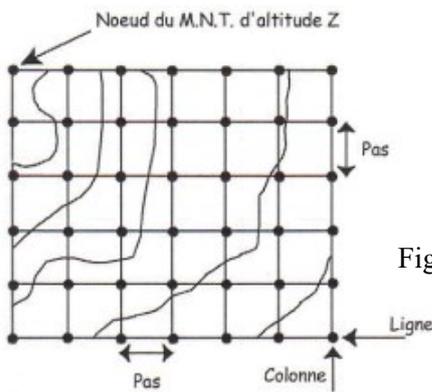


Figure 21- Schéma d'un maillage régulier d'un DEM.

La figure 22 illustre un exemple de fonctionnement de la méthode d'extraction du réseau de drainage sur un petit échantillon DEM donnée par WANG & LIU (2006).

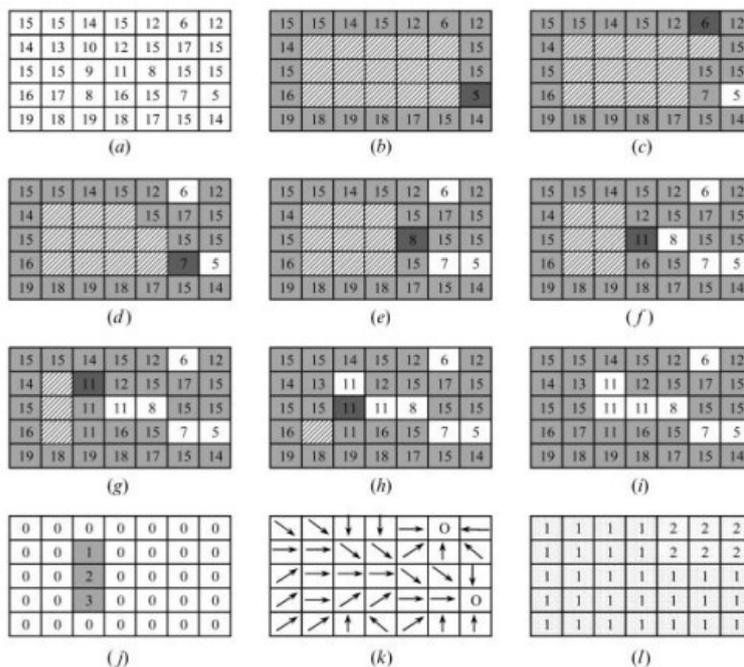


Figure 22- Calcul de grille de direction et d'accumulation des écoulements pour l'extraction du réseau de drainage sur échantillon DEM (d'après WANG & LIU, 2006).

a. DEM hypothétique avec valeurs d'élévation; b. les cellules limites (grises) sont insérées dans la file d'attente prioritaire, et la cellule avec la plus faible élévation de déversement est sélectionnée (foncée); c. premier cycle d'expansion optimale de la trajectoire d'écoulement et de propagation de l'élévation du déversement; d. deuxième tour; e. troisième tour; f. quatrième tour; g. cinquième tour; h. sixième tour; i. DEM sans dépression résultant; j. cellules de dépression avec des valeurs de profondeur de remplissage; k. grille de direction d'écoulement; et l. partition de deux bassins versants.

Dans la présente étude, c'est bien le modèle DEM de la région du Nord-Ouest algérien, au pas de 30 m (Extrait de l'extension plugins: Downloads SRTM sous le QGIS) qui a été utilisé. Son traitement a été réalisé à l'aide de l'extension « Terrain Analyses-Hydrology dans SAGA-Toolbox » du logiciel QGIS 3.14.15. Ce dernier nous a permis de générer un réseau de drainage multidirectionnel à partir de ce modèle DEM.

Par ailleurs, la désignation des exutoires sur les cours d'eau ont permis la délimitation des deux sous bassins considérés. L'exutoire du premier sous bassin correspond à la digue du barrage de Béni Bahdel (Latitude 34.71186 et longitude -1.50359) et l'exutoire du deuxième sous bassin se situe à l'aval de l'oued Sikkak (latitude : 35.08038 et longitude : 1.35975) (Figure 23).

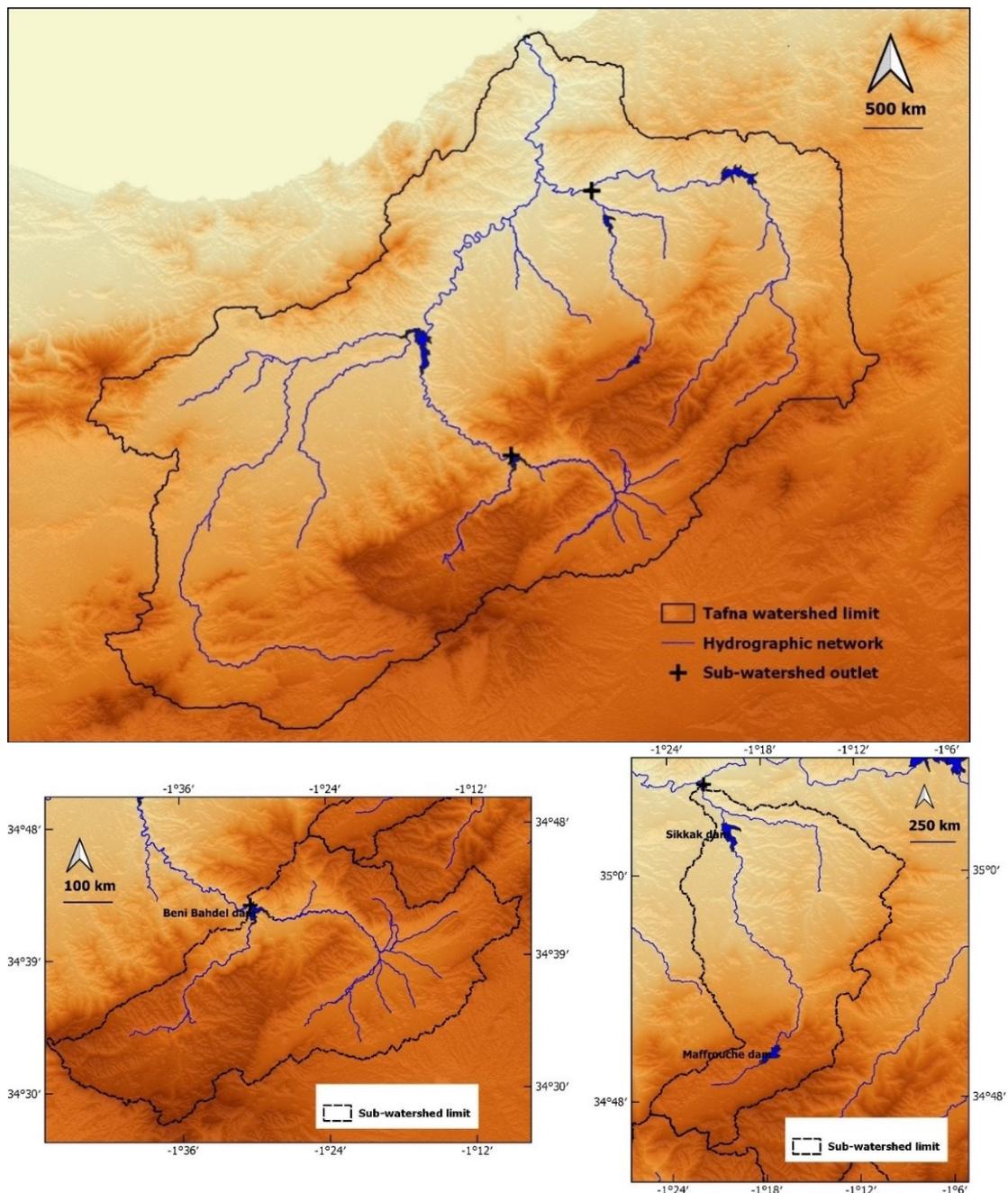


Figure 23- Délimitation des sous bassins considérés.

B. Paramètres morphométriques quantitatifs

Les indices géomorphologiques exprimant des liaisons statistiques observées entre divers caractères physiques des cours d'eau et des bassins ont été établis par de nombreux auteurs (GRAVELIUS, 1914; HORTON, 1945; LEOPOLD & MILLER 1956; STRAHLER, 1957; SHUMM, 1963). Ils sont également cités dans de nombreux ouvrages d'hydrologie à l'exemple de: HIRSCH (1962); ROCHE, 1963; KRIMGOLD, 1963; DUBREUIL, 1966; LLAMAS, 1993; AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, 1996). Les quantifications de ces indices ont un intérêt primordial dans l'identification de l'influence théorique de la morphologie des bassins versants sur leur réponse hydrologique (DUBREUIL, 1966).

Dans notre travail, l'objectif de ces quantifications consiste à: analyser les caractéristiques morphométriques de chaque sous bassin, à comprendre et justifier le comportement hydrologique et enfin à comparer les sous bassins entre eux. Les méthodes de calcul des paramètres utilisés sont regroupées dans le tableau 11.

	Paramètres morphométriques	Méthodes de calcul
Forme et relief	A : Surface drainée (Km ²)	Calcul automatique par DEM
	P : Périmètre (km)	Calcul automatique par DEM
	Kc : Indice de Gravelius (1914)	$Kc = \frac{0.28}{\sqrt{A}} \times P$
	L ; longueur du rectangle équivalent (Km)	$L = \frac{Kg\sqrt{A}}{1.12} \left[1 + \left(\frac{1.12}{Kg} \right)^2 \right]$
	L : Largeur du rectangle équivalent (km)	$l = \frac{A}{L}$
	Gradient de Pente (Degré ou %)	Carte de pente automatique par DEM
	H moy. Altitude moyenne (m)	$H_{moy} = \frac{\sum(ai \times hi)}{A}$ <i>hi</i> : Altitude entre deux courbes de niveau (m)
	Courbe hypsométrique	Calcul automatique par DEM
	Lp : Longueur du thalweg principal (km)	Calcul automatique par DEM
	Ig : Indice de pente	$Ig = \frac{Ds}{L}$ Ds : Dénivelée en m (H95%- H5%) définie sur la courbe hypsométrique entre 5 et 95 %.
	Tc : Temps de concentration (heure) (Formule de Giandotti 1937)	$Tc = \frac{4\sqrt{A} + 1.5Lp}{0.5\sqrt{H_{moy} - H_{min}}}$
Réseau hydrographique		Calcul automatique par DEM
	Lr : Longueur du réseau (km)	Calcul automatique par DEM
	Densité de drainage (km/km ²)	$Dd = \frac{Lr}{A}$
	Densité hydrographique	$F = \frac{Nu}{A}$ Nu : nombre des cours d'eau d'ordre

Fréquence de drainage ordre 1

$$F1 = \frac{N1}{A}$$

$N1$: Nombre total des thalwegs d'ordre 1

Coefficient de torrentialité

$$Ct = F1 \times Dd$$

Rapport de longueur (Horton 1945 ; Schumm 1956)

$$Rl = \frac{L_n}{L_{n-1}}$$

L_n : Longueur moyenne des cours d'eau d'ordre n ; L_{n-1} : Longueur moyenne des cours d'eau d'ordre $n-1$.

Rapport de confluence (Horton 1945 ; Schumm 1956)

$$Rc = \frac{N_u}{N_{u+1}}$$

N_u : nombre des cours d'eau d'ordre u . N_{u+1} : Nombre des cours d'eau d'ordre suivant.

Tableau 11- Récapitulatif de tous les paramètres morphométriques quantitatifs extraits grâce au modèle DEM sous SIG.

C. Organisation morphologique

La caractérisation morphométrique des deux sous bassins est réalisée ici par la quantification des paramètres descriptifs des spécificités physiques, relatifs à leur relief et à leur réseau hydrographique. Les valeurs de ces paramètres sont regroupées dans le tableau 12.

Sous bassin	A (km ²)	P (Km)	Kc	L (km)	L (km)	Hmoy (m)	Ds (m)	Ig	Tc (h)
Haute Tafna	992.68	464.00	2.30	80.16	12.38	1194.18	275.13	8.73	9.96
Sikkak	259.41	173.53	2.25	54.07	8.58	683.87		18.86	8.84

Sous bassin	Lr (km)	Lp (Km)	Dd (km/km ²)	F	F1	Ct	Rl	Rc	/
Haute Tafna	145.45	37.58	0.146	0.02	0.01	1.47 10 ⁻³	1.57	1.83	/
Sikkak	134.96	52.31	0.29	0.06	0.03	9.40 10 ⁻³	0.39	2.51	/

Tableau 12- Paramètres descriptifs des spécificités physiques des sous bassins versants considérés.

1. Sous bassin versant de la haute Tafna

1.1. Relief

C'est un sous bassin dont l'exutoire est à la digue du barrage de Béni Bahdel (Figure 24 et 25). Il a une aire drainée de 992.68 km² et un périmètre de 464 km (Figure 24a). La longueur de son rectangle équivalent est de 80.16 km et sa largeur est de 12.38 km (Tableau 12). Sa forme est plutôt allongée ($Kc = 2.3$) et les pentes varient entre 0 et 75 % (Figure 24b), avec de fortes incisions des reliefs dont les altitudes sont comprises entre 670m et 1820m (Figure 24c et d).

La carte des altitudes et la courbe hypsométrique du sous bassin (Figure 24c, d) montrent la dominance de très hautes altitudes, avec une altitude moyenne de 1194.18 m et un dénivelé spécifique d'une valeur de 275.13 m (Tableau 12). Les altitudes les plus élevées sont observées aux limites des deux versants du sous bassin. Ceci traduit la maturité du relief lié aux zones montagneuses de forte altitude dans la zone d'étude (TARMOUL, 2018).

1.2. Réseau hydrographique

La longueur du réseau de drainage du sous bassin de la haute Tafna est de 145.45 km. La longueur de son drain principal est de 37.58km (Tableau 12). La forme générale de son réseau de drainage est dendritique, avec quelques petits drains parallèles à son extrémité (Figure 25a). Le réseau hydrographique reste peu développé, avec un ordre de 3 selon la classification de Strahler (Figure 25b). Ses paramètres descriptifs, à savoir: sa densité de drainage ($D_d = 0.146$), sa fréquence de drainage ($F = 0.02$) et son rapport de confluence ($R_c = 1.57$) présentent de faibles valeurs, confirmant ainsi son développement faible, caractérisé par un écoulement centralisé. Le profil en long de son cours d'eau principal (Figure 25c et d) présente une pente assez régulière et faible.

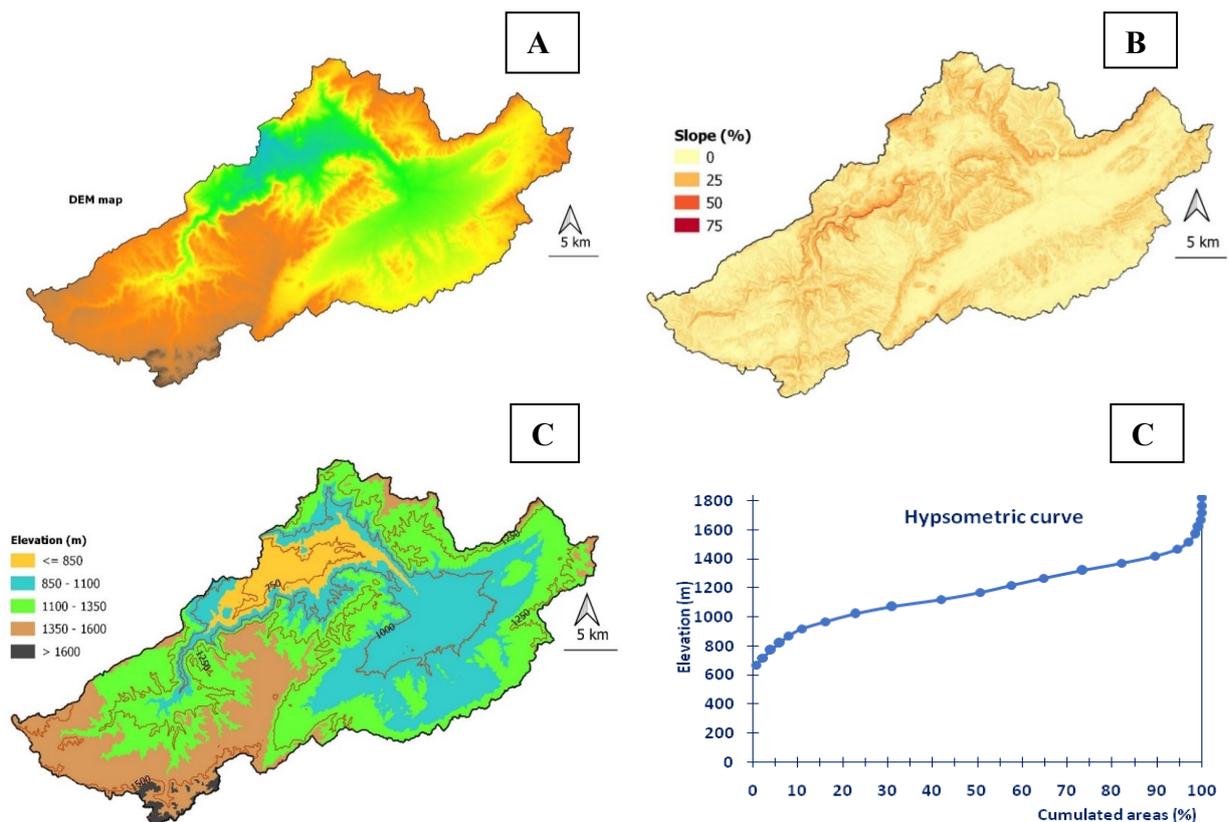


Figure 24- Caractéristiques morphométriques du sous bassin versant de la haute Tafna. A: Carte DEM; B: Carte des pentes en %; C: Carte des altitudes; D: Courbe hypsométrique

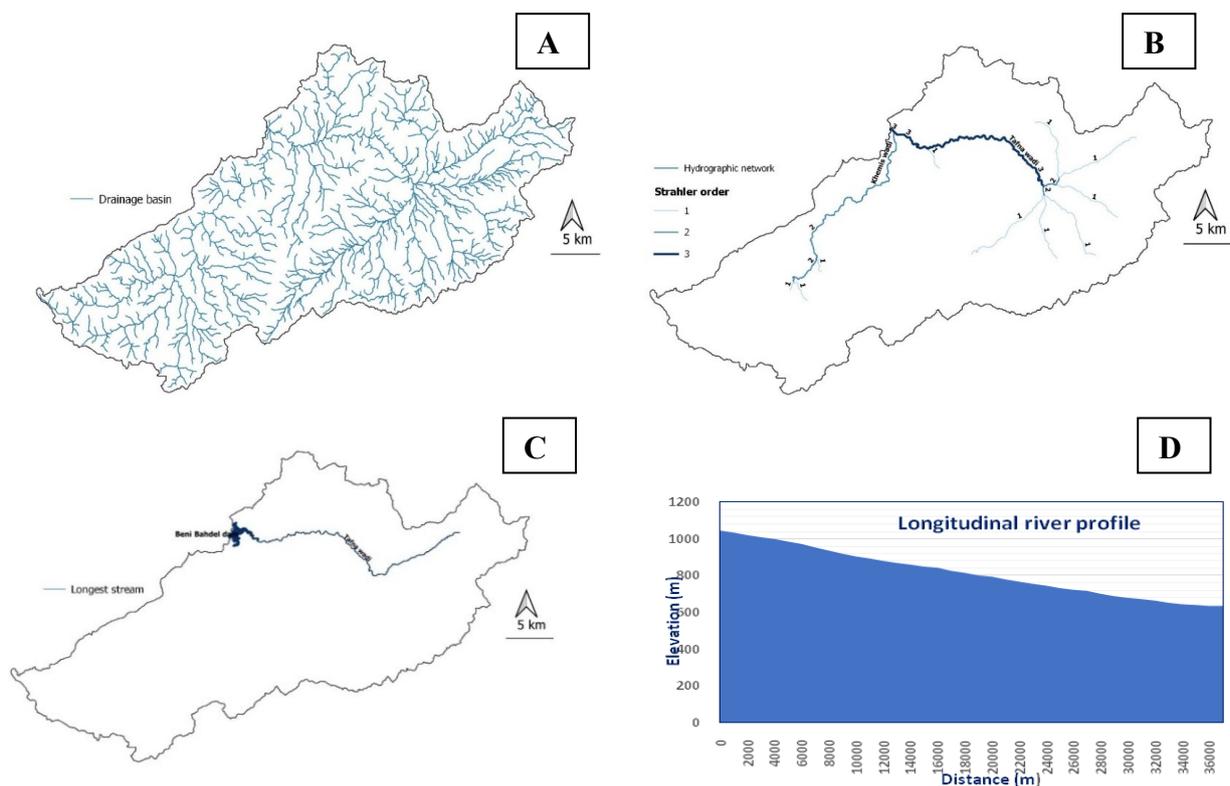


Figure 25- Caractéristiques morphométriques du réseau hydrographique du sous bassin de la haute Tafna.

A: Carte de drainage; B: Classification de Strahler; C: Carte du cours d'eau principal; D: Profil en long.

2. Sous bassin versant de Sikkak

2.1. Relief

Le sous bassin de Sikkak se présente avec une aire, plus réduite de 259.41 km et un périmètre de 173.53 km (Figure 26 et 27). La longueur de son rectangle équivalent est de 54.07 km et sa largeur est de 8.58 km. (Tableau 12). Avec un coefficient de Gravelius de 2.25, ce sous bassin est assez allongé. La carte des pentes (Figure 26b) montre une variation comprise entre 0 et 60%, avec de fortes incisions des reliefs. Les altitudes évoluent entre 183 m à 1583 m (Figure 26c et d), avec une altitude moyenne de 683.87 m et un dénivelé spécifique assez fort de 406.28 m, ainsi qu'un indice de pente de 18.86 (Tableau 12).

L'analyse de la courbe hypsométrique du sous bassin (Figure 26d) a permis de distinguer deux types de populations d'altitude. Il s'agit de la tranche d'altitude 183-1000 m présentant ainsi les reliefs immatures (TARMOUL, 2018) et celle comprise entre 1000-1600 m, caractérisant des reliefs matures. Ces derniers sont liés aux zones montagneuses de forte altitude en amont du sous bassin.

2.2. Réseau hydrographique

Le sous bassin de Sikkak a une longueur de 134.96 km, avec un drain principal de 52.31 km (Figure 27, Tableau 12). Son réseau de drainage a une forme dendritique et son drain principal présente un développement quasiment rectiligne (Figure 27a). Selon la

classification de Strahler (Figure 27b), le réseau hydrographique est d'ordre 2, avec une densité de drainage de 0.29, une fréquence de drainage de 0.06, un rapport de confluence de 2.51 et un coefficient de torrentialité de $9.4 \cdot 10^{-3}$ (Tableau 12). Les valeurs de ces paramètres sont plus importantes comparées à celles du sous bassin de la haute Tafna. Cependant elles restent faibles, qualifiant le réseau de Sikkak de peu développé. Le profil en long de l'oued Sikkak (Figure 27c et d) montre des pentes irrégulières et fortes avec des ruptures à plusieurs niveaux d'altitude.

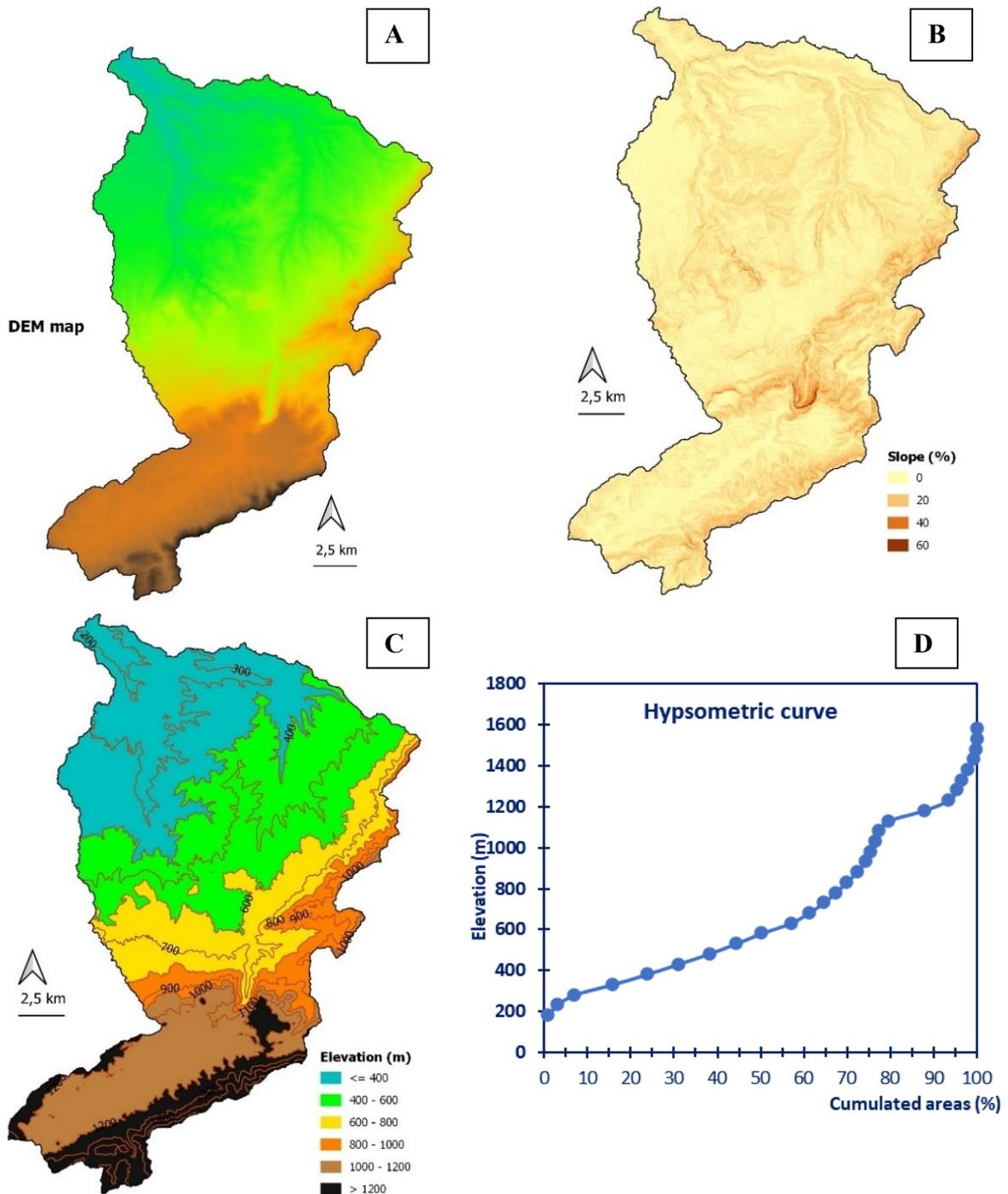


Figure 26- Caractéristiques morphométriques du sous bassin de Sikkak.
A: Carte DEM; B: Carte des pentes en % ; C: Carte des altitudes; D: Courbe hypsométrique.

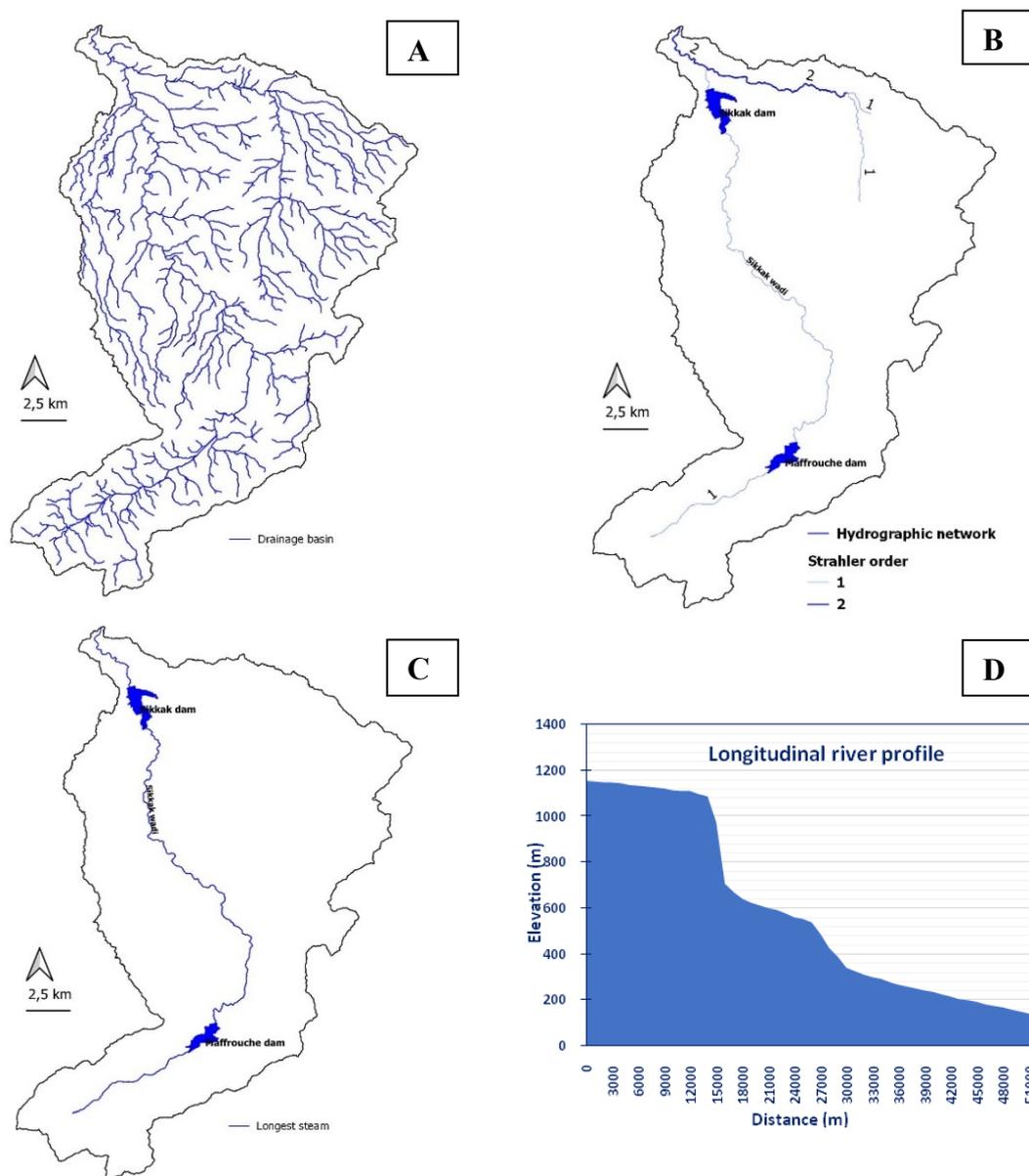


Figure 27- Caractéristiques morphométriques du réseau hydrographique du sous bassin de Sikkak. A: Carte de drainage; B: Classification de Strahler; C: Carte du cours d'eau principal; D: Profil en long.

III. VARIABILITES HYDROCLIMATIQUES

Les conditions climatiques, en particulier, les précipitations jouent un rôle déterminant dans les régimes d'écoulements aussi bien de surface que souterrain. Leur traitement selon leur répartition annuelle, saisonnière, mensuelle et journalière est plus que nécessaire pour distinguer d'abord leur variabilité, établir des bilans hydriques et comprendre le comportement hydrologique des cours d'eau face aux variations du climat.

Dans cette optique, le climat global de la zone d'étude sera présenté par une analyse de données climatiques, à savoir: les températures, les précipitations, l'humidité relative, la vitesse des vents, l'évapotranspiration et les indices climatiques. Ceci sera complété par un examen de l'évolution des séries hydrométriques au cours des dernières décennies dans les sous bassins considérés.

A. Températures

En interaction avec d'autres facteurs climatiques tels que les précipitations, l'insolation, le vent..., la température de l'air est un paramètre qui conditionne le phénomène d'évapotranspiration et le déficit d'écoulement dans un bassin versant. Dans le cas des deux sous bassins étudiés, nous avons utilisé les données de quatre (4) stations météorologiques (Sebdou, Beni Bahdel, Maffrouch et Zenat) pour la distinction des variations thermiques des différentes périodes,

1. Températures moyennes annuelles

La figure 28 représente la répartition des températures moyennes annuelles des quatre stations. Elle montre une irrégularité des données annuelles et une diminution des températures, du Nord vers le Sud pour les deux sous bassins, avec des températures moyennes interannuelles d'environ 17.30 °C pour les stations d'El Maffrouch et Zenata, et 15 °C pour celles de Sebdou et Beni Bahdel (Figure 29). Cette diminution est liée à la fois à l'altitude et l'effet de la continentalité dans les régions semi-arides.

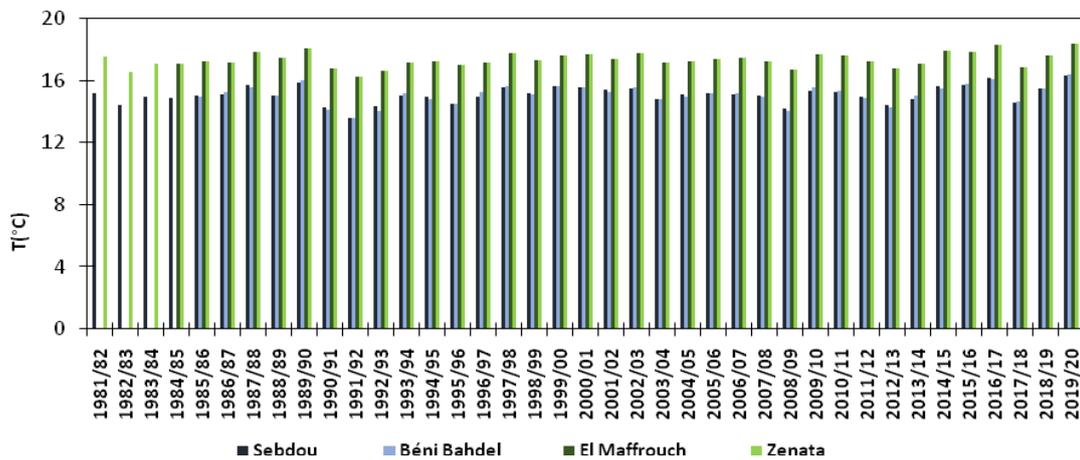


Figure 28- Températures moyennes annuelles aux stations d'étude.

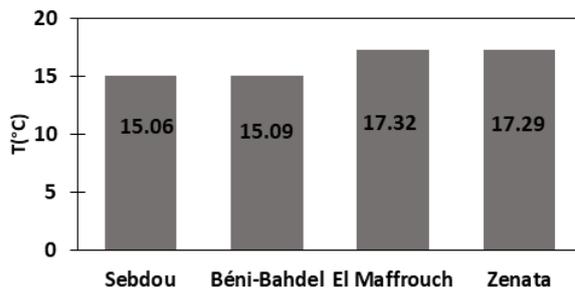


Figure 29- Températures moyennes interannuelles aux stations d'étude.

2. Minima, maxima et moyennes des températures

Les variations des températures mensuelles minimales et maximales (Tableau 13 et Figure 30) montrent que le mois le plus froid est le celui de janvier pour les stations de Sebdou, de Béni Bahdel et de Zenata, et le mois de février pour celle d'El Maffrouch. Le mois le plus chaud est celui de juillet. Les températures les plus basses (variant entre -2.94

et à $-1.36\text{ }^{\circ}\text{C}$) sont atteintes aux stations de la haute Tafna. Les températures les plus élevées de l'ordre de $39.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ sont enregistrées aux stations du sous bassin de Sikkak.

D'après les températures moyennes mensuelles et annuelles (Tableau 13) des deux sous bassins, l'année hydrologique peut être divisée en deux saisons thermiques. La saison chaude s'étendant du mois de mai à octobre, mois pendant lesquels les températures moyennes sont supérieures à la moyenne annuelle. La saison froide correspond à la période novembre-avril.

Stations	T (C)	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Annuel
Sebdou (1981/82-2019/20)	Min.	9.98	5.44	0.56	-2.19	-2.94	-2.11	-1.51	1.3	4.38	9	13.81	14.65	4.19
	Avg.	21.07	16.05	10.22	6.93	5.82	7.18	9.98	12.76	16.87	21.93	26.11	25.83	15.06
	Max.	34.61	29.34	23.54	19.02	18.42	20.57	24.62	27.97	32.1	36.81	38.75	38.31	28.67
Béni Bahdel (1985/86-2019/20)	Min.	10.03	5.56	0.416	-2.15	-2.75	-2.03	-1.36	1.238	4.54	8.99	13.8	14.78	4.25
	Avg.	16.13	10.13	6.98	5.84	7.15	10.07	12.69	17.11	21.88	26.1	25.96	21.03	15.08
	Max.	34.63	29.34	23.65	19.15	18.34	20.56	24.64	27.9	32.25	36.86	38.78	38.39	28.7
El Maffrouch (1984/85-2019/20)	Min.	17.7	13.83	9.67	5.15	2.29	1.29	2.22	3.03	5.376	8.51	12.53	16.76	8.19
	Avg.	22.91	18.69	13.41	10.47	9.26	10.35	12.64	14.9	18.63	22.87	26.69	27.02	17.32
	Max.	35.26	30.92	25.83	21.38	20.65	22.5	26.03	28.5	32.62	36.46	39.15	39.02	29.86
Zenata (1981/82-2019/20)	Min.	13.8	9.64	5.27	2.26	1.23	2.16	2.95	5.47	8.43	12.47	16.73	17.67	8.17
	Avg.	22.94	18.69	13.49	10.44	9.27	10.28	12.61	14.93	18.47	22.88	26.7	26.88	17.29
	Max.	35.25	30.94	25.83	21.31	20.73	22.38	26	28.63	32.37	36.51	39.16	38.87	29.83

(Avg. : moyenne ; Max : maximale, Min : minimale)

Tableau 13- Températures minimales, moyennes et maximales des stations étudiées.

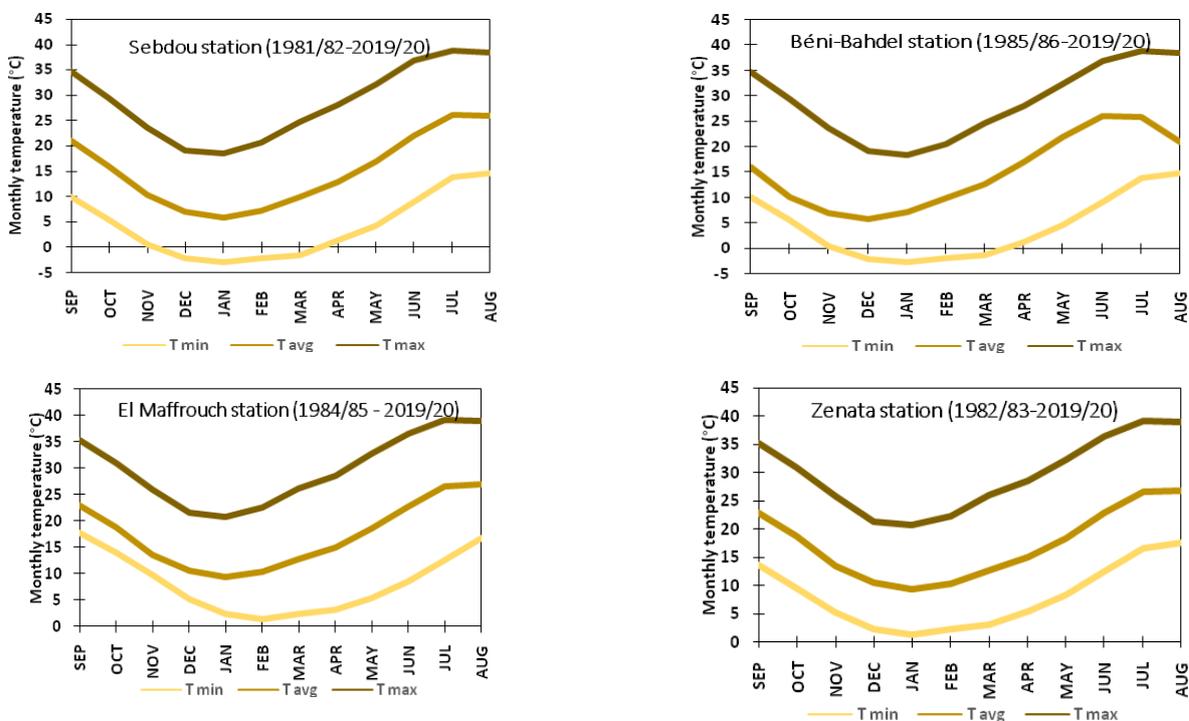


Figure 30- Températures moyennes, maximales et minimales des stations météorologiques.

B. Pluviométrie

L'évaluation quantitative des précipitations et leurs distributions spatiales permettent l'observation des irrégularités interannuelles, inter-saisonnières et inters-mensuelles d'une chronique considérée. A noter que l'intérêt de l'analyse de ces séries pluviométriques est d'abord de déterminer les régimes climatiques, en les associant avec les amplitudes thermiques des mêmes séries, de les confronter avec les écoulements de surface correspondants, et d'estimer leurs contributions dans les écoulements des cours d'eau des sous bassins considérés.

1. Variabilité interannuelle et annuelle des précipitations

D'une manière générale, les régimes annuels sont très irréguliers d'une année à une autre, mais les écarts des moyennes annuelles pluviométriques entre les différentes stations sont peu prononcés confirmant ainsi une certaine homogénéité des valeurs de précipitations (Figure 31). Toutefois, les modules pluviométriques des deux stations du bassin de la haute Tafna restent inférieurs à ceux enregistrés aux stations du bassin de Sikkak (Figures 31 et 32).

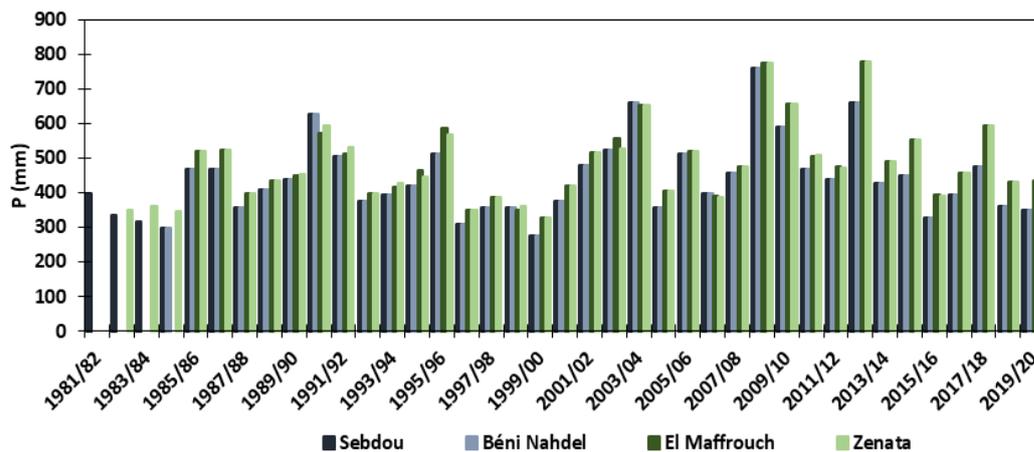


Figure 31- Précipitations annuelles des stations météorologiques.

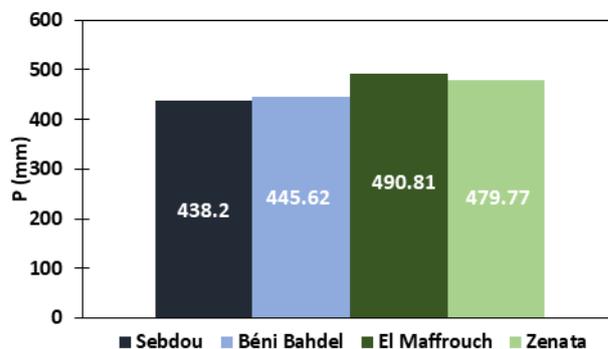


Figure 32- Précipitations interannuelles aux stations météorologiques.

Sur une période de 39 ans (1981/82-2019/20), les valeurs minimales des modules pluviométriques observées sont de 276 mm à la station de Béni Bahdel (bassin de la haute Tafna) et de 326 mm à la station de Zénata (bassin de Sikkak) durant l'année 1999/00

(Figure 31). Les valeurs maximales enregistrées sont de 759 mm (2008/09) pour la station Sebdou (bassin de la haute Tafna) et de 777 mm (2012/13) pour la station de Zénata (bassin de Sikkak) Figure 31).

Notons que plusieurs modules pluviométriques sont inférieurs aux moyennes interannuelles observées aux stations de Sebdou (438.2 mm), Béni Bahdel (445.62 mm), El Maffrouch (490.81 mm) et Zenata (479.77 mm) (Figure 32).

2. Variabilité saisonnière des précipitations

La distribution des précipitations saisonnières (Figure 33) montre que pour les quatre stations, la saison d'été affiche les valeurs les plus basses, et correspond ainsi à la période la plus sèche.

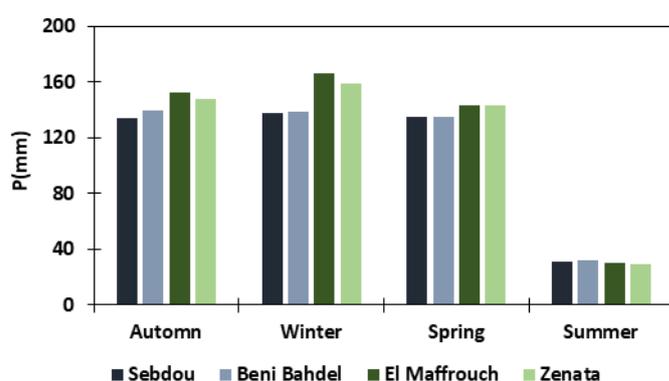


Figure 33- Précipitations inter-saisonnières aux stations météorologiques.

3. Variabilité mensuelle des précipitations

A l'échelle des sous bassins considérés, la répartition des précipitations moyennes mensuelles pour les chroniques d'étude (Figure 34) montre que les minima des précipitations s'observent au mois de juillet qui, avec une moyenne de 4.9 mm est considéré comme étant le mois le plus sec. Les maxima sont enregistrés, au mois de novembre, avec une moyenne de 59.3 mm pour les stations de Sebdou et Béni Bahdel et de 68.66 mm pour les stations d'El Maffrouch et de Zenata. Ce dernier représente le mois le plus arrosé de l'année hydrologique.

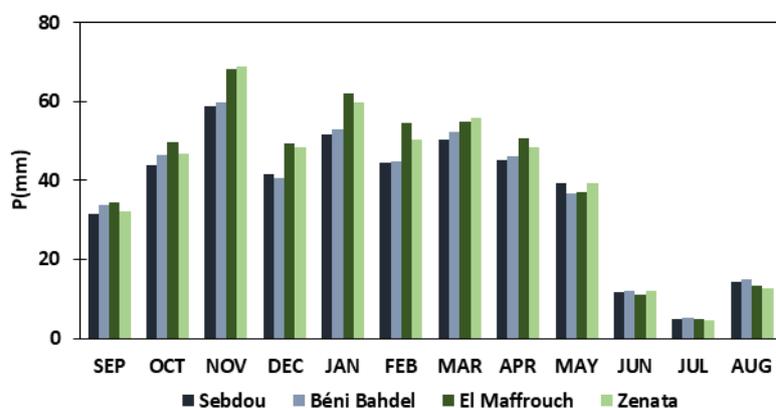


Figure 34- Précipitations mensuelles aux stations météorologiques.

C. Indices bioclimatiques

Pour la caractérisation du climat d'une région donnée, de nombreux indices et formules ont été élaborés à partir de la combinaison des facteurs thermiques et pluviométriques. Dans le cas de notre étude, nous avons calculé l'indice d'aridité, les diagrammes ombrothermique et d'Emberger et les indices de sécheresse.

1. Indice d'aridité

Défini par DE MARTONNE (1923), l'indice d'aridité (I) est calculé en fonction de la température (T) et des précipitations (P). Il permet de déterminer le type de climat qui caractérise la zone d'étude. L'indice d'aridité (I) est donné par la relation suivante:

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

Où, **P** représente les précipitations moyennes annuelles (mm) et **T** les températures moyennes annuelles (C).

Les valeurs de l'indice permettent déterminer le climat selon la classification du tableau ci-dessous:

Type de climat	Limites de valeurs de I
Climat est hyperaride (H-A)	$I < 5$
Climat est désertique (D)	$5 < I < 7.5$
Climat est steppique (S)	$7.5 < I < 10$
Climat est semi-aride (S-A)	$10 < I < 20$
Climat est tempéré (T)	$20 < I < 30$
Climat est humide (H)	$I > 30$

Tableau 14- Classification du climat (d'après DE MARTONNE, 1923).

Les résultats de cet indice pour les quatre stations considérées indiquent que les deux sous bassins étudiés sont régis par un climat semi-aride (Tableau 15).

Station	P (mm)	T (°C)	I	Etage bioclimatique
Sebdou	438.19	15.06	17.48	Semi -Aride
Béni Bahdel	445.62	15.08	17.76	
El Maffrouch	490.81	17.32	17.96	
Zenata	477.77	17.29	17.50	

Tableau 15- Valeurs d'indice d'aridité des stations météorologiques.

A noter que certains auteurs ont mis en évidence un indice d'aridité mensuel qui pourrait situer l'aridité des mois dans l'année:

$$i = \frac{12p}{t + 10}$$

Où, **P** et **t** représentent respectivement les précipitations (mm) et les températures mensuelles (°C).

D'après la classification de De Martonne, les indices d'aridité mensuelle calculés (Tableau 16) indiquent que la période de mai à octobre aride, avec une sévérité accentuée aux mois de juin, juillet et août (Climat hyperaride). Les mois restants de l'année constituent la période humide à tempérée.

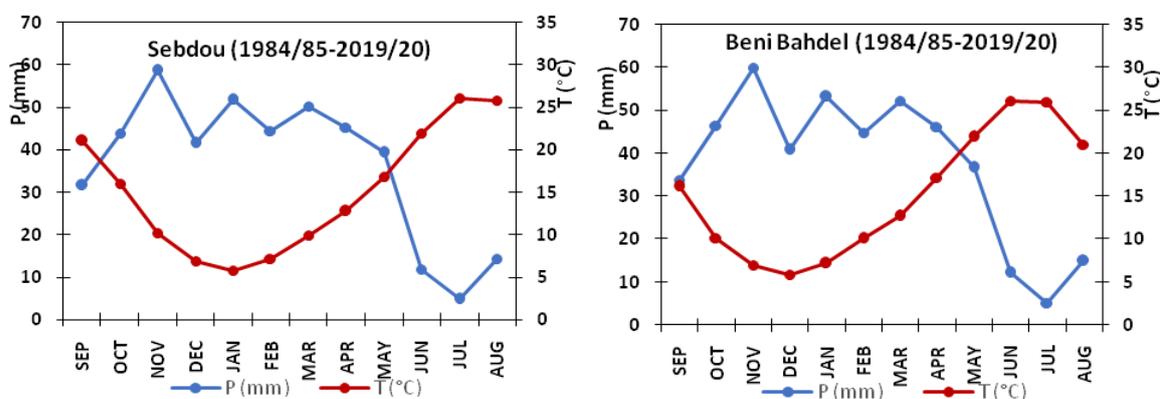
Stations	Paramètres	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG
Sebdou (1981/82-2019/20)	P (mm)	31.66	43.88	58.72	41.54	51.81	44.49	50.31	45.32	39.36	11.83	4.79	14.44
	T (°C)	21.07	16.05	10.22	6.93	5.82	7.18	9.98	12.76	16.87	21.93	26.11	25.83
	i	12.22	20.21	34.84	29.44	39.29	31.07	30.21	23.89	17.57	4.44	1.59	4.83
	Climat	S-A	S-A	H	T	H	H	H	T	S-A	H-A	H-A	H-A
Béni Bahdel (1984/85-2019/20)	P (mm)	33.67	46.38	59.8	40.72	53.12	44.81	52.22	46.19	36.62	12.11	5.08	14.85
	T (°C)	16.13	10.13	6.98	5.84	7.15	10.07	12.69	17.11	21.88	26.1	25.96	21.03
	i	15.46	27.65	42.25	30.83	37.15	26.79	27.61	20.44	13.78	4.02	1.69	5.74
	Climat	S-A	T	H	H	H	T	T	T	S-A	H-A	H-A	H-A
El Maffrouch (1985/86-2019/20)	P (mm)	34.5	49.57	68.29	49.39	61.94	54.45	55.09	50.76	37.02	11.23	5.05	13.47
	T (°C)	22.9	18.76	13.4	10.48	9.3	10.27	12.71	14.88	18.68	22.87	26.68	27.02
	i	12.58	20.68	35	28.93	38.5	32.22	29.1	24.48	15.48	4.09	1.65	4.36
	Climat	S-A	T	H	T	H	H	T	T	S-A	H-A	H-A	H-A
Zénata (1982/83-2019/20)	P (mm)	32.03	47.66	72.1	46.48	59.12	51.13	53.73	48.57	38.35	10.08	4.71	13.74
	T (°C)	22.95	18.66	13.45	10.41	9.24	10.28	12.61	14.94	18.48	22.86	26.7	26.91
	i	11.66	19.95	36.89	27.32	36.85	30.24	28.51	23.36	16.15	3.68	1.54	4.46
	Climat	S-A	S-A	H	T	H	H	T	T	S-A	H-A	H-A	H-A

Tableau 16- Valeurs de l'indice d'aridité mensuelle des stations météorologique.

2. Diagramme ombrothermique

D'après BAGNOULS & GAUSSEN (1953), un mois est considéré comme étant sec, si le total moyen des précipitations exprimées en millimètres est égal ou inférieur au double de la température mensuelle moyenne exprimée en degré centigrade. Cette relation $P = 2T$ permet d'établir le diagramme pluvio-thermique sur lequel les températures sont portées à une échelle double de celle des précipitations.

Les diagrammes ombrothermiques de la figure 35 présentent une synthèse de l'état climatique des quatre stations d'étude qui se manifeste par deux périodes, sèche et humide. Les stations de Sebdou, d'El Maffrouch et de Zenata se caractérisent par une période humide qui s'étend du début du mois d'octobre à la fin du mois de mai et une période sèche s'étendant du mois de juin au mois de septembre. A l'encontre des stations précédentes, celle de Béni Bahdel manifeste une période humide de la mi-septembre à la fin d'avril et une période sèche durant le reste de l'année.



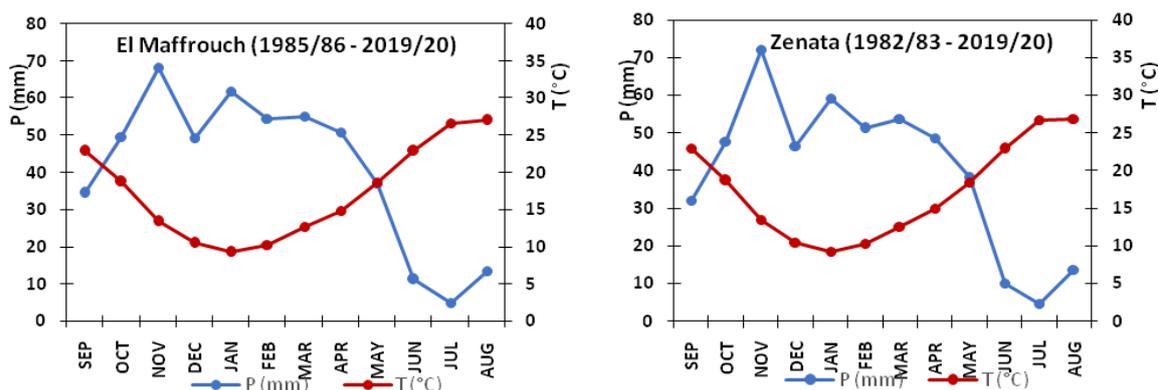


Figure 35- Diagrammes ombrothermiques des stations météorologiques des sous-bassins étudiés.

3. Diagramme d'Emberger

En 1971, EMBERGER proposa un indice d'aridité adapté au climat méditerranéen sur la base des limites des aires occupées par différentes associations végétales. La formule de cet indice est donnée comme suit:

$$Q_2 = \frac{P}{\left(\frac{M+m}{2}\right)(M-m)} \times 1000$$

Simplifiée par:

$$Q_2 = \frac{2000 \times P}{(M^2 - m^2)}$$

Où, **P** est la moyenne des précipitations annuelles (mm), **M** est la moyenne des maxima du mois le plus chaud (°K) et **m** est la moyenne des minima du mois le plus froid (°K). Les valeurs du Q_2 des 4 stations sont résumées dans le tableau 17.

Stations	P (mm)	M (°C)	M (°K)	m (°C)	m (°K)	Q_2
Sebdou	438.19	38.75	311.9	-2.94	270.2	36.05
Béni Bahdel	445.62	38.78	312	-2.75	270.39	36.8
El Maffrouch	490.81	39.15	312.30	1.29	274.44	44.46
Zenata	477.77	39.16	312.31	1.23	274.38	43.20

Tableau 17- Quotients pluviothermiques des stations étudiées.

M : Température maximale du mois le plus chaud ; m : Température minimale du mois le plus froid ; P : Pluviométrie annuelle ; Q_2 : Coefficient pluviothermique d'Emberger.

Les résultats du Q_2 (Tableau 17) sont ensuite reportées sur le climagramme qui compte en ordonnée les valeurs du Q_2 et en abscisse les moyennes des minima du mois le plus froid en degré Celcius (Figure 36). Il en ressort que le sous bassin de la haute Tafna se range dans l'étage climatique «semi-aride à hivers très froids», et celui de Sikkak dans l'étage «semi-aride à hivers froids».

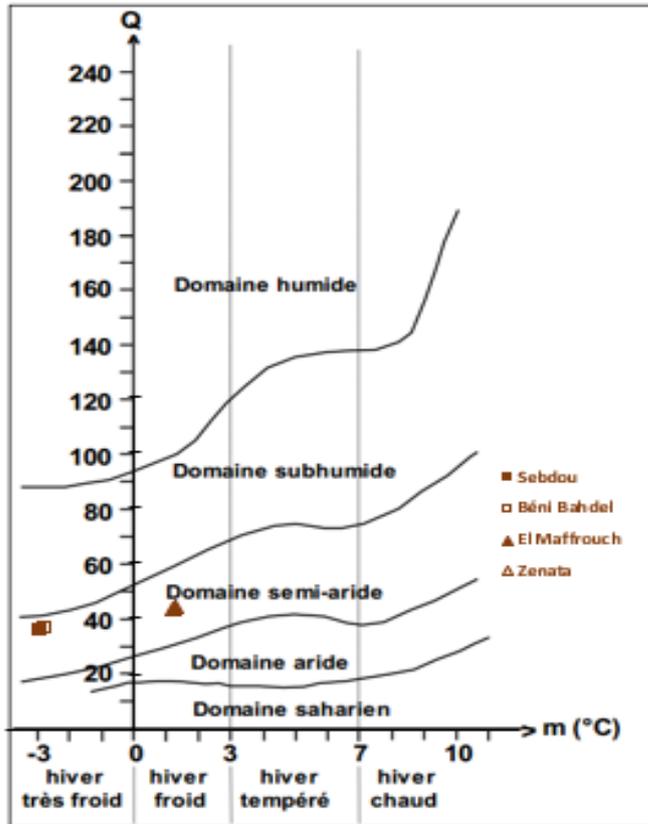


Figure 36- Diagramme d'Emberger des stations étudiées.

4. Indices de sécheresse

L'évaluation de la sécheresse est réalisée par l'utilisation des indices statistiques qui servent à quantifier sa sévérité (SPI et PI)

4.1. Indice SPI (Standardized Precipitation Index)

Développé par McKEE & al. (1993) et décrit en détail par EDWARDS & McKEE (1997), l'indice SPI est utilisé pour estimer les conditions humides ou sèches en fonction de la variabilité des précipitations. Ces conditions de sécheresse et d'humidité peuvent être contrôlées par le SPI sur une variété d'échelles temporelles (Exemple: 3, 6, 12 et 48 mois). Ces échelles de temps reflètent l'impact de la sécheresse sur la disponibilité des différentes ressources en eau. Par exemple, les conditions d'humidité du sol réagissent aux anomalies des précipitations sur une échelle relativement courte (1, 3 à 6 mois). Les eaux souterraines, l'écoulement fluvial et le stockage dans les réservoirs reflètent les anomalies de précipitations à plus long terme (12, 24 et 28 mois) (McKEE & al., 1993). Mathématiquement, le SPI s'exprime comme suit:

$$SPI = \frac{(P_i - \bar{P})}{\sigma}$$

Avec, P_i : Précipitations à l'intervalle de temps i ; \bar{P} : la moyenne des précipitations de la série considérée; σ : l'écart type de la série.

En utilisant le SPI comme indicateur, une définition fonctionnelle et quantitative de la sécheresse peut être établie pour chaque échelle de temps. Un événement de sécheresse pour l'échelle de temps i est défini ici comme étant une période au cours de laquelle le SPI est continuellement négatif et atteint une valeur inférieure à -1.0. La sécheresse commence lorsque le SPI descend pour la première fois en dessous de zéro (McKEE & *al.*, 1993).

L'intensité de la sécheresse est arbitrairement définie pour les valeurs du SPI avec les catégories ci-dessous :

Classification	Valeurs de SPI
Extrêmement humide	$SPI \geq 2.0$
Très humide	$1.5 \leq SPI < 2.0$
Modérément humide	$1.0 \leq SPI < 1.5$
Proche de la normale	$-1.0 \leq SPI < 1.0$
Modérément sèche	$-1.5 \leq SPI < -1.0$
Sévèrement sèche	$-2.0 \leq SPI < -1.5$
Extrêmement sèche	$SPI < -2.0$

Tableau 18- Classification de la sécheresse basée sur la valeur SPI (d'après McKEE & *al.* 1993; MODARRES, 2007).

4.2. Indice de pluviosité (PI)

Appelé aussi coefficient pluviométrique, cet indice correspond au rapport de la pluviométrie d'une année, à la pluviométrie moyenne pour une période de « n » année, au niveau d'une station donnée. Il est utilisé pour déterminer les années excédentaires et les années déficitaires. Ledit indice est exprimé par la formule:

$$PI = \frac{P_i}{P_m}$$

Avec : P_i : Hauteur pluviométrique d'une année donnée ; P_m : Pluviométrie moyenne pour une période de n années.

Les années déficitaires correspondent à des valeurs de PI inférieures à l'unité (1) et les années excédentaires sont celles où ces valeurs lui sont supérieures.

4.3. Variabilité spatio-temporelle des indices de sécheresse

Pour une meilleure appréciation de la sécheresse à courte et longue termes, trois pas de temps sont appliqués aux indices de sécheresse. Il s'agit de 12 mois (Année hydrologique), 6 mois (novembre à avril) et 6 mois (mai à octobre).

Les indices PI et SPI sur 12 mois fournissent une représentation des régimes de précipitations à long terme, liés aux écoulements dans les cours d'eau, aux taux de remplissage des réservoirs et aux niveaux statiques des nappes souterraines (KHAN & *al.* 2008). L'indice SPI sur 6 mois se révèle performant pour la mise en évidence des précipitations sur des périodes bien précises, sachant que dans la région d'étude, l'année

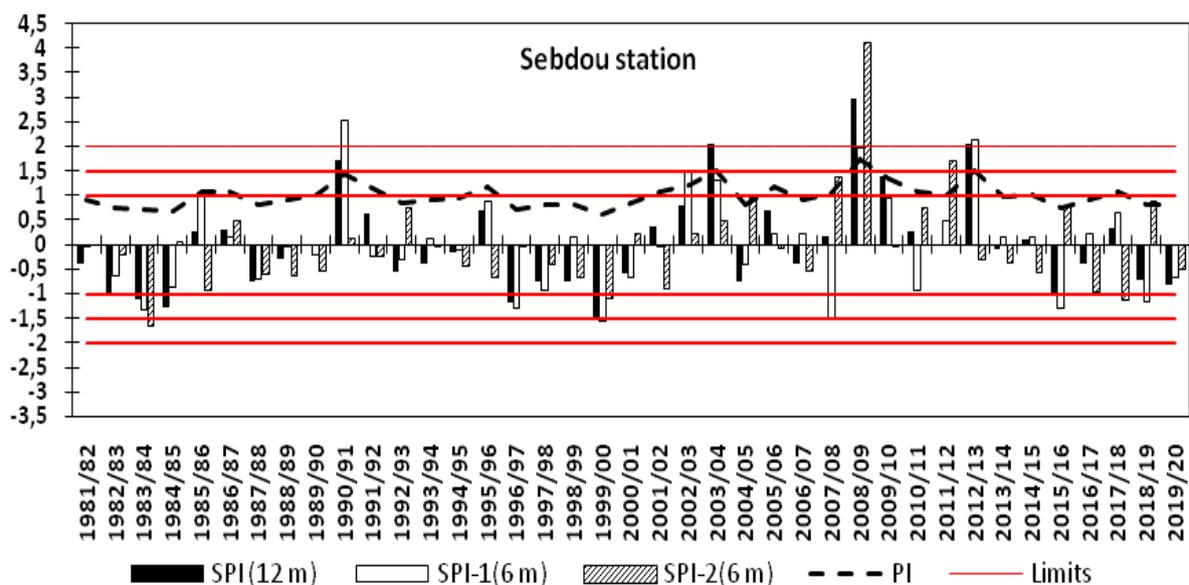
hydrologique se compose de 2 périodes : une humide s'étalant sur les saisons hivernale et printanière et une autre sèche comprenant les saisons estivale et automnale.

L'examen des variations chroniques des indices SPI et PI (Figure 37), dont les principales statistiques sont résumées en annexe I, permet de constater que pour les quatre stations, les valeurs extrêmes ne sont pas nombreuses. Les précipitations n'ont pas atteint des seuils de sécheresse excessive, mais la tendance vers un assèchement accru est observée sur les différentes séries chronologiques étudiées.

4.3.1. Sous bassin de la haute Tafna

Pour les deux stations étudiées, les valeurs des indices SPI (12m) et PI à long terme varient dans des intervalles similaires [-1.5 +3 pour les SPI_{12m} et 0.7 – 1.8 pour PI]. Leur évolution chronologique montre une alternance entre des séquences sèches de durées variant entre 3 à 6 années et des séquences humides avec des durées très courtes d'une à 2 années. Des pics pluviométriques sont enregistrés aux années (1990/91), (2008/09), (2003/04) et (2012/13), avec l'année 2008/09 marquée par des valeurs positives extrêmes (SPI_{12m}=2.97, PI=1.73) pour la station de Sebdou et (SPI_{12m}=2.88, PI=1.7) pour la station de Béni Bahdel. Quant à l'année la plus sèche c'est celle de 1999/00 avec des valeurs de SPI_{12m} égales à -1.49 (Sebdu) et -1.55 (Béni Bahdel) et des valeurs de PI de 0.63 (Sebdu) et 0.62 (Béni Bahdel).

La variabilité des indices SPI_{6m} à court terme est encore plus accentuée que celle observée au pas annuel. Quoique les précipitations soient concentrées principalement durant la période de novembre à avril, les périodes humides et sèches sont désordonnées durant les chroniques étudiées. 60% des indices SPI_{6m} occupent des périodes d'humidité et de sécheresse légères (-1.0 < SPI < 1.0) vers des tendances de deux périodes sèches durant la même année hydrologique (Figure 37). Une certaine similitude, notée entre les indices SPI 12m, PI et SPI-1_{6m}, correspond à la période humide durant les années à pluviosité importante. Au-delà de l'année 2012/13, les périodes humides et sèches sont plus marquées et correspondent le plus aux saisons pluviales pour les deux stations.



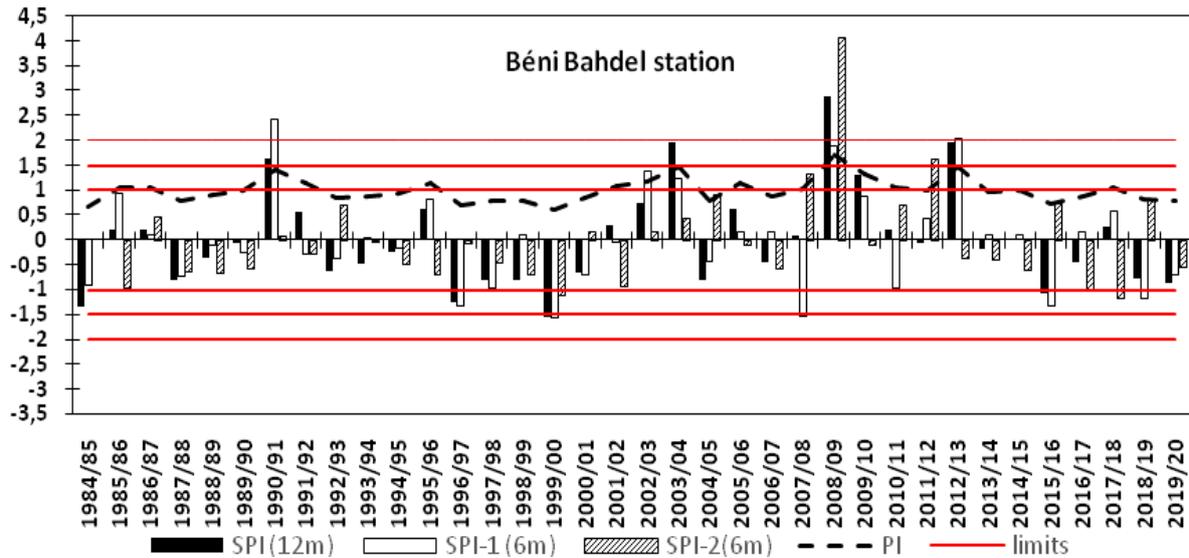


Figure 37- Évolution des indices SPI, et PI à l'échelle annuelle et semestrielle de 1981/1982 à 2019/2020 au sous bassin de la haute Tafna.

[SPI (12 m) : SPI d'une année hydrologique ; SPI-1 (6m) : SPI de novembre à avril ; SPI-2 (6m) : SPI de mai à octobre ; Limits : limites des classes].

4.3.2. Sous bassin de Sikkak

A l'échelle annuelle, les stations d'El Maffrouch et de Zenata indiquent des valeurs de SPI_(12m) comprises respectivement entre -1.51 et 2.64 et -1.38 et 2.69 (Figure 38). Concernant les PI, leurs valeurs varient entre 0.66 et 1.58 pour la station d'El Maffrouch et entre 0.68 et 1.62 pour celle de Zenata (Figure 38).

De grandes similitudes sont observées dans les résultats obtenus pour ces deux stations comparées à celles trouvées précédemment, à savoir:

- les mêmes durées de séquences sèches et humides (3 à 6 ans pour les périodes sèches et 1 à 2 ans pour les périodes humides),
- des pics pluviométriques aux mêmes années (1990/91 ; 2003/04 ; 2008/09 et 2012/13).

Néanmoins, pour ces deux stations, l'année la plus humide est celle de 2012/13 avec des valeurs extrêmes de 2.64 (SPI_{12m}) et 1.58 (PI) à la station d'El Maffrouch) et de 2.69 (SPI_{12m}) et 1.62 (PI) à celle de Zenata. De même que pour les stations du sous bassin de la haute Tafna, l'année la plus sèche reste celle de 1999/00 affichant à El Maffrouch un SPI_{12m} de -1.51 et un PI= 0.66 et à Zenata un SPI_{12m} = -1.38 et un PI= 0.68.

En ce qui concerne les variations semestrielles des indices SPI_(6m) (Novembre-Avril et Mai-Octobre), elles indiquent des périodes sèches et humides désordonnées et une période sèche plus étalée sur les chroniques étudiées (1996/97 à 1999/00), par rapport à celles enregistrées aux stations de la haute Tafna (Figure 38).

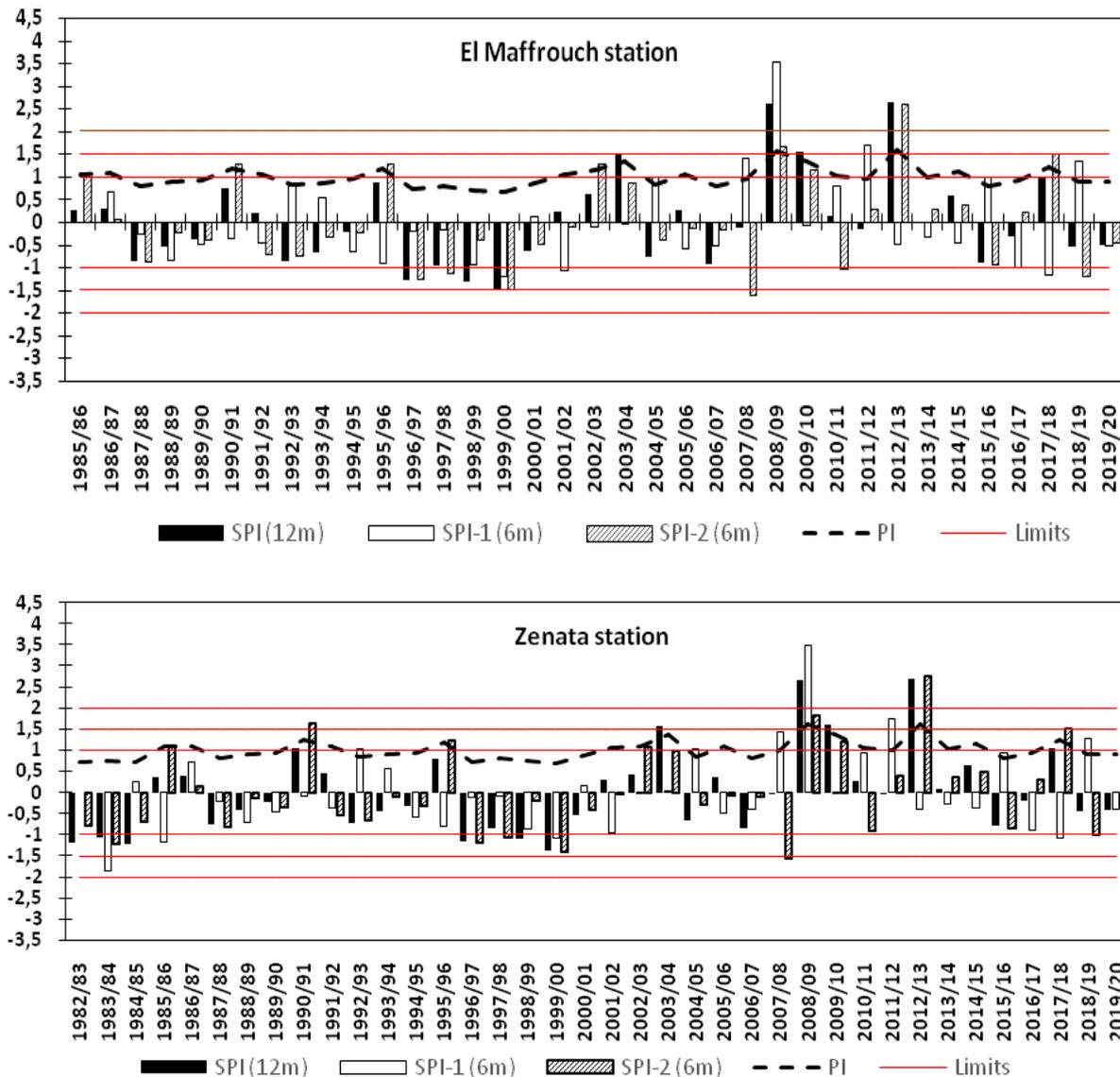


Figure 38- Évolution des indices SPI, et PI à l'échelle annuelle et semestrielle de 1982/1983 à 2019/2020 au sous bassin de Sikkak.
 [SPI (12m) : SPI d'une année hydrologique ; SPI-1 (6m) : SPI de novembre à avril ; SPI-2 (6m) : SPI de mai à octobre].

D. Autres facteurs climatiques

1. Humidité relative

Les données de l'humidité relative fournies par les stations météorologiques de Sebdou, Béni Bahdel, El Maffrouch et de Zenata sont représentées sur les figures 39 et 40 . L'humidité relative interannuelle des périodes étudiées est en moyenne de 59.23 % pour le sous bassin de la haute Tafna et de l'ordre de 61.9 % pour celui de Sikkak (Figure 39). Mensuellement, elle dépasse les 50 % durant les neuf (9) mois de l'année, au premier sous bassin, et dix (10) mois au second, avec des maximums enregistrés en décembre de 74.15 % à la station de Sebdou, de 73.99 % à Béni Bahdel, de 72.23 % à El Maffrouch et de 72.35 % à Zenata.

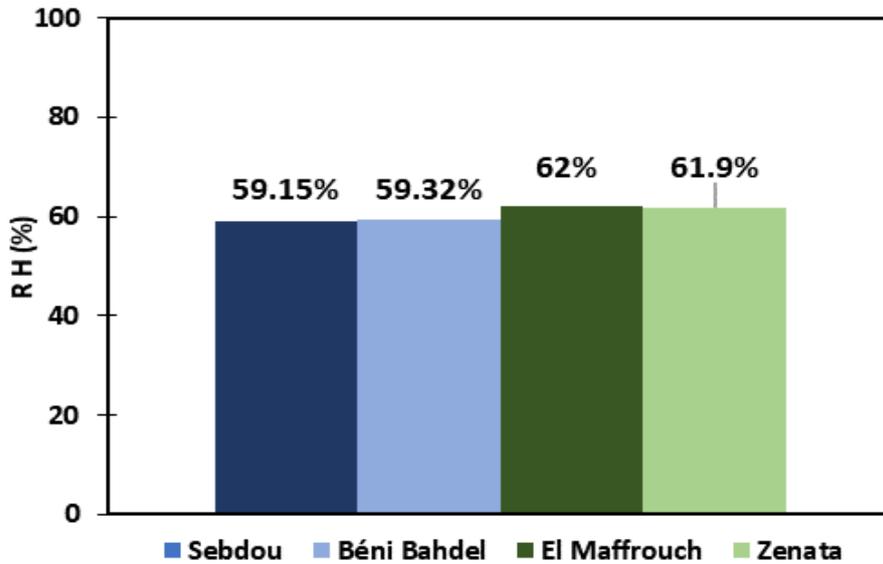


Figure 39- Humidité relative interannuelle aux stations météorologiques.

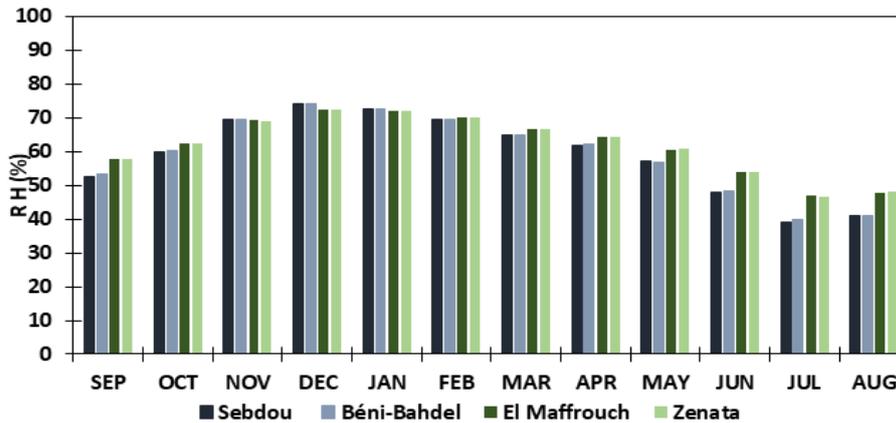


Figure 40- Humidité relative mensuelle aux stations météorologiques.

2. Vent

Au niveau des quatre stations, les variations des moyennes, des minima et maxima des vitesses des vents aux échelles intermensuelles et interannuelles reflètent des irrégularités bien distinctes (Tableau 19 et Figure 41). Ainsi, les vents sont très fréquents pendant les périodes hivernales, avec des vitesses maximales enregistrées au mois de février, dans le sous bassin de Sikkak (13 m s^{-1} à la station de Zenata et 12.9 m s^{-1} à celle d'El Maffrouch). Ils sont relayés par des vents du Sud (Sirocco) pendant la saison estivale (Juin, Juillet et Août). Ces vents chauds et secs sont observés surtout aux stations du sous bassin de la haute Tafna.

Les moyennes des vitesses des vents restent relativement plus importantes dans les stations de Béni Bahdel et d'El Maffrouch comparées à celles des stations de Sebdou et de Zenata (Figure 41).

	W. S (ms ⁻¹)	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	Annuel
Sebdou	Avg.	3.48	3.62	4.28	4.34	4.33	4.42	4.28	4.25	3.90	3.67	3.57	3.50	3.97
	Max.	9.59	11.47	11.90	12.17	12.24	12.54	12.51	11.85	10.69	9.51	9.10	9.27	11.07
	Min.	0.15	0.17	0.21	0.21	0.21	0.27	0.21	0.21	0.16	0.181	0.17	0.16	0.19
Béni Bahdel	Avg.	9.51	11.38	11.71	11.74	12.05	12.25	12.30	11.70	10.53	9.32	8.87	9.12	10.87
	Max.	9.66	11.54	11.93	11.94	12.28	12.54	12.52	11.92	10.69	9.51	9.04	9.29	11.07
	Min.	0.15	0.16	0.22	0.19	0.22	0.28	0.22	0.22	0.16	0.18	0.17	0.17	0.20
El Maffrouch	Avg.	12.4	12.80	12.03	11.73	10.89	9.36	8.77	9.05	9.45	11.07	12.28	12.08	11
	Max.	9.60	11.25	12.47	12.28	12.65	12.90	12.30	11.86	11.00	9.5	8.94	9.18	11.16
	Min.	0.15	0.18	0.18	0.20	0.26	0.25	0.23	0.18	0.16	0.15	0.14	0.12	0.18
Zenata	Avg.	3.51	3.67	4.46	4.40	4.49	4.53	4.34	4.32	3.89	3.64	3.41	3.41	4.01
	Max.	9.43	11.26	12.29	12.50	12.58	13.00	12.21	11.87	11.08	9.45	8.88	9.15	11.14
	Min.	0.15	0.18	0.18	0.20	0.26	0.24	0.21	0.18	0.17	0.1	0.14	0.12	0.18

Tableau 19- Vitesses des vents minimales, moyennes, maximales enregistrées aux stations étudiées. W.S : Wind Speed (m s⁻¹) : Vitesse de vent ; Avg: Moyenne, Max : Maximale, Min : Minimale.

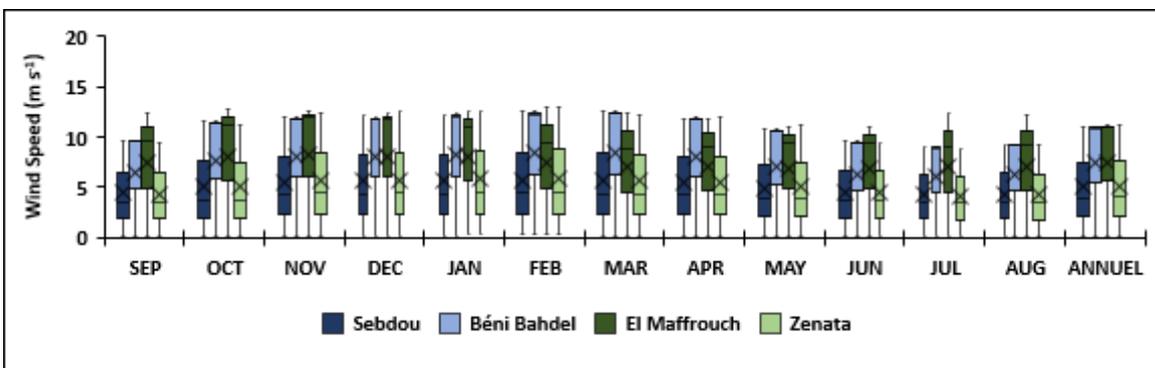


Figure 41- Boîtes à moustache représentatives des vitesses des vents moyennes, minimales et maximales aux stations étudiées. [└ : valeurs maximales ou minimales ; × : valeurs moyennes].

3. Evapotranspiration

En hydroclimatologie, le terme d'évapotranspiration est utilisé pour combiner entre les deux processus de l'évaporation physique et la transpiration de la couverture végétale. On distingue trois types d'évapotranspirations: l'évapotranspiration potentielle (ETP), évapotranspiration maximale (ETM) et l'évapotranspiration réelle (ETR).

L'appréciation de l'évapotranspiration au niveau des stations étudiées est effectuée par l'estimation des évapotranspirations potentielles (ETP) et réelle (ETR). Ces dernières sont calculées par plusieurs formules, basées sur la température et la hauteur des précipitations annuelles ou mensuelles.

3.1. Evapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration potentielle dite aussi de référence correspond à l'évaporation et à la transpiration au niveau d'une surface dans des conditions idéales. Elle sera calculée par la méthode de THORNTHWAITE (1948) qui proposa une équation basée sur les températures moyennes mensuelles:

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

Avec

$$I = \sum i$$

Où

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

Avec, **ETP**: Evapotranspiration potentielle mensuelle (mm); **T**: Température moyenne mensuelle (°C); **i**: Indice thermique mensuel; **I**: Somme des indices mensuels de l'année; **a**: Indice liée à la température.

L'évapotranspiration potentielle mensuelle corrigée est obtenue à partir de la formule: $ETP_{\text{Corrigée}} = ETP \times F$

F: facteur correctif fonction du mois (m) et de la latitude.

Les résultats de l'ETP des quatre stations sont regroupés dans le tableau 20.

Il en ressort que les valeurs des ETP les plus faibles sont observées aux mois de décembre ou de janvier (10.67 mm pour Sebdou, 10.44 mm pour Béni Bahdel, 17.47 mm pour El Maffrouch et 19.72 mm pour Zenata). Les plus élevées sont enregistrées au mois de juillet avec 164.9 mm (Sebdou), 163.38 mm (Béni Bahdel), 165.20 mm (El Maffrouch) et 166.93 mm (Zenata).

	Paramètres	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	Annuel
Sebdou	T (°C)	21.07	16.05	10.22	6.93	5.82	7.18	9.98	12.76	16.87	21.93	26.11	25.83	15.06
	i	8.826	5.845	2.951	1.639	1.258	1.729	2.847	4.130	6.303	9.377	12.21	12.01	69.13
	ETPnc (mm)	95.81	61.88	29.97	16.06	12.13	17.00	28.85	42.81	67.04	102.17	135.22	132.90	/
	F (34°N)	1.03	0.97	0.87	0.86	0.88	0.85	0.85	1.03	1.09	1.2	1.22	1.16	/
	ETP (mm)	98.69	60.03	26.07	13.81	10.67	14.45	24.52	44.09	73.07	122.6	164.9	154.16	807.18
Béni Bahdel	T (°C)	16.13	10.13	6.98	5.84	7.15	10.07	12.69	17.11	21.88	26.1	25.96	21.03	15.09
	i	5.89	2.91	1.65	1.26	1.71	2.88	4.09	6.44	9.34	12.20	12.10	8.80	69.32
	ETPnc (mm)	62.27	29.45	16.17	12.14	16.81	29.17	42.3305	68.47	101.71	135.08	133.92	95.42	/
	F (34°N)	1.03	0.97	0.87	0.86	0.88	0.85	0.85	1.03	1.09	1.2	1.22	1.16	/
	ETP (mm)	64.13	28.57	14.07	10.44	14.79	24.80	35.98	70.52	110.86	162.10	163.38	110.69	810.38
El Maffrouch	T (°C)	22.9	18.76	13.4	10.48	9.3	10.27	12.71	14.88	18.68	22.87	26.68	27.02	17.32
	i	10.07	7.40	4.44	3.06	2.55	2.97	4.10	5.21	7.35	9.99	12.61	12.86	82.61
	ETPnc (mm)	102.51	71.28	38.61	24.68	19.85	23.78	35.07	46.74	70.73	102.27	135.41	138.57	/
	F (34°N)	1.03	0.97	0.87	0.86	0.88	0.85	0.85	1.03	1.09	1.2	1.22	1.16	/
	ETP (mm)	105.59	69.15	33.59	21.22	17.47	20.21	29.81	48.14	77.10	122.72	165.20	160.74	871.00
Zenata	T (°C)	22.95	18.66	13.45	10.41	9.24	10.28	12.61	14.94	18.48	22.86	26.7	26.91	17.29
	i	10.04	7.34	4.47	3.03	2.53	2.97	4.05	5.24	7.23	9.98	12.63	12.78	82.35
	ETPnc (mm)	103.07	70.76	39.02	24.49	19.72	23.94	34.71	47.23	69.52	102.3	135.71	137.66	/
	F (35°N)	1.03	0.97	0.86	0.85	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	/
	ETP (mm)	106.17	68.64	33.56	20.82	17.16	20.35	35.75	51.49	84.12	123.83	166.93	159.68	888.54

Tableau 20- ETP annuelles et mensuelles calculées pour les stations considérées.

ETPnc (mm): Evapotranspiration potentielle non corrigée (mm) ; ETP (mm) : Evapotranspiration potentielle corrigée (mm).

3.2. Evapotranspiration réelle

L'évapotranspiration réelle est la somme des quantités de vapeur d'eau évaporées par le sol et transpirées par les plantes dans des conditions réelles (Sol est à son humidité spécifique actuelle et les plantes à un stade de développement physiologique et sanitaire réel) (MUSY, 2001). L'estimation de cette grandeur a été réalisée par les méthodes de Thornthwaite, Turc, Coutagne et Wundt.

3.2.1. Méthode du bilan hydrique selon Thornthwaite

La méthode de Thornthwaite permet de calculer ponctuellement, en une station, les valeurs de l'évapotranspiration réelle mensuelle et annuelle à partir de la comparaison des valeurs de l'évapotranspiration mensuelle (ETP) et des hauteurs des précipitations mensuelles (P) (BONNET & *al.*, 1970). Plusieurs cas peuvent se présenter:

$$-ETP < P \rightarrow ETR = ETP$$

La quantité d'eau correspondant à $P - ETP$ est emmagasinée dans le sol jusqu'à saturation de celui-ci. La partie de l'excédent dépassant éventuellement la réserve cumulée maximale (réserve utile ou RU) en eau du sol est disponible pour le ruissellement et l'infiltration (BONNET & *al.*, 1970).

$$-ETP = P \rightarrow ETR = P$$

Les réserves en eau de sol restent les mêmes que celles du mois précédent.

$-ETP > P \rightarrow ETR = P +$ tout ou partie de la réserve en eau du sol jusqu'à épuisement de celle-ci.

Lorsque les réserves en eau du sol sont épuisées et que $ETP > ETR$, $ETP - ETR =$ Déficit.

La valeur de l'évapotranspiration réelle annuelle est la somme des 12 valeurs d'évapotranspiration réelle mensuelles (BONNET & *al.*, 1970).

Il existe plusieurs méthodes de calcul de la réserve utile (RU). Nous citons, les formules de RICHARD (1954), et de HALLAIRE (1961), l'équation de régression linéaire de RAWLS (1982). Leurs calculs se basent sur les données de texture des sols, de densité apparente, d'humidité du sol et de l'épaisseur de l'horizon.

L'estimation des RU au niveau de chaque station météorologique étudiée n'ayant pas été effectuée, la valeur de seuil de saturation du sol égale à 100 mm, adoptée par THORNTHWAITE et confirmée par divers agronomes (PEDELABORDE, 1968; BONNET & *al.*, 1970) est utilisée comme réserve utile pour le calcul du bilan hydrique.

Les valeurs moyennes de l'ETR des deux sous bassins calculées à partir des valeurs estimées aux stations (Tableau 21) sont respectivement de 378.37 et 422 mm aux bassins de la haute Tafna et de Sikkak.

	Paramètres	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	Annuel
Sedou	T(°C)	21.07	16.05	10.22	6.93	5.82	7.18	9.98	12.76	16.87	21.93	26.11	25.83	15.06
	P (mm)	31.66	43.88	58.72	41.54	51.81	44.49	50.31	45.32	39.36	11.83	4.79	14.44	438.15
	ETP (mm)	98.69	60.03	26.07	13.81	10.67	14.45	24.52	44.09	73.07	122.6	164.9	154.16	807.18
	P-ETP	-67.03	-16.15	32.65	27.73	41.14	30.04	25.79	1.23	-33.71	-110.77	-160.11	-139.72	/
	RU (mm)	0	0	32.65	60.38	100	100	100	100	66.29	0	0	0	/
	ETR (mm)	31.66	43.88	26.07	13.81	10.67	14.45	24.52	44.09	73.07	78.12	4.79	14.44	379.57
	Exc. (mm)	0	0	0	0	1.52	30.04	25.79	1.23	0	0	0	0	58.58
	D (mm)	67.03	16.15								44.48	160.11	139.75	427.52
Beni Banguel	T (°C)	16.13	10.13	6.98	5.84	7.15	10.07	12.69	17.11	21.88	26.1	25.96	21.03	15.09
	P (mm)	33.67	46.38	59.8	40.72	53.12	44.81	52.22	46.19	36.62	12.11	5.08	14.85	445.57
	ETP (mm)	64.13	28.57	14.07	10.44	14.79	24.8	35.98	70.52	110.86	162.1	163.38	110.69	810.38
	P-ETP	-30.46	17.81	45.73	30.28	38.33	20.01	16.24	-24.33	-74.24	-149.99	-158.3	-95.84	/
	RU (mm)	0	17.81	63.54	93.82	100	100	100	75.67	1.43	0	0	0	/
	ETR (mm)	33.67	28.57	14.07	10.44	14.79	24.8	35.98	70.52	110.86	13.54	5.08	14.85	377.17
	Exc. (mm)	0	0	0	0	32.15	20.01	16.24	0	0	0	0	0	68.4
	D (mm)	30.46	0	0	0	0	0	0	0	0	148.56	158.3	95.84	433.16
El Maïrouch	T (°C)	22.9	18.76	13.4	10.48	9.3	10.27	12.71	14.88	18.68	22.87	26.68	27.02	17.32
	P (mm)	34.5	49.57	68.29	49.39	61.94	54.45	55.09	50.76	37.02	11.23	5.05	13.47	490.76
	ETP (mm)	105.59	69.15	33.59	21.22	17.47	20.21	29.81	48.14	77.1	122.72	165.2	160.74	871
	P-ETP	-71.09	-19.58	34.7	28.17	44.47	34.24	25.28	2.62	-40.08	-111.49	-160.15	-147.27	/
	RU (mm)	0	0	34.7	62.87	100	100	100	100	59.92	0	0	0	/
	ETR (mm)	34.5	49.57	33.59	21.22	17.47	20.21	29.81	48.14	77.1	71.15	5.05	13.47	421.28
	Exc. (mm)	0	0	0	0	7.34	34.24	25.28	2.62	0	0	0	0	69.48
	D (mm)	71.09	19.58	0	0	0	0	0	0	0	51.57	108.58	147.27	398.09
Zenata	T (°C)	22.95	18.66	13.45	10.41	9.24	10.28	12.61	14.94	18.48	22.86	26.7	26.91	17.29
	P (mm)	32.03	47.66	72.1	46.48	59.12	51.13	53.73	48.57	38.35	10.08	4.71	13.74	477.7
	ETP (mm)	106.17	68.64	33.56	20.82	17.16	20.35	35.75	51.49	84.12	123.83	166.93	159.68	888.54
	P-ETP	-74.14	-20.98	38.54	25.66	41.96	30.78	17.98	-2.92	-45.77	-113.75	-162.22	-145.94	/
	RU (mm)	0	0	38.54	64.2	100	100	100	97.08	51.31	0	0	0	/
	ETR (mm)	32.03	47.66	33.56	20.82	17.16	20.35	35.75	51.49	84.12	61.39	4.71	13.74	422.78
	Exc. (mm)	0	0	0	0	6.16	30.78	17.98	0	0	0	0	0	54.92
	D (mm)	74.14	20.98	0	0	0	0	0	0	0	62.44	162.22	145.94	370.6

Tableau 21- Bilans hydrologiques calculés par la méthode de Thornthwaite.

RU: Réserve Utile utilisée (RU=120 mm) ; Exc.: Excédent ; D: Déficit d'écoulement ; R: Ruissèlement ; I: Infiltration.

3.2.2. Méthode de Turc

Elle est définie par l'expression suivante:

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

Avec, *ETR*: Evapotranspiration dans des conditions réelles; *P*: Hauteur des précipitations annuelles (mm); $L = 300 + 25T + 0.05T^3$ et *T*: Température moyenne annuelle (°C).

Le tableau ci-après montre les différentes valeurs de l'évapotranspiration.

Station	P (mm)	T (°C)	ETR (mm)
Sebdou	438.19	15.06	405.54
Béni Bahdel	445.62	15.08	410.95
El Maffrouch	490.81	17.32	458.79
Zenata	477.77	17.29	448.93

Tableau 22- Valeurs de l'évapotranspiration réelle selon Turc.

3.2.3. Méthode de Coutagne

Cette méthode fait intervenir les températures et les précipitations (Tableau 23). Elle est donnée par l'expression suivante :

$$D = ETR = P - \lambda P^2 \qquad \lambda = \frac{1}{0.8 + 0.14 T}$$

Avec, **D**: Déficit d'écoulement (ETR) en m; **P**: Précipitations moyenne annuelles en (m) et **T**: Température moyenne annuelles en (°C).

L'application de cette formule est conditionnée par la relation ci-après:

$$\frac{1}{8\lambda} < P < \frac{1}{2\lambda}$$

Station	P(m)	T (°C)	λ	$\frac{1}{8\lambda}$	$\frac{1}{2\lambda}$
Sebdou	0.438	15.06	0.343	0.363	1.454
Béni Bahdel	0.445	15.08	0.343	0.364	1.456
El Maffrouch	0.490	17.32	0.309	0.403	1.613
Zenata	0.478	17.29	0.310	0.402	1.610

Tableau 23- Valeurs de l'évapotranspiration réelle selon Coutagne.

Étant donné que les hauteurs pluviométriques des sous bassins considérés ne répondent pas à la condition préalablement citée, l'utilisation de cette méthode n'est donc pas possible.

3.2.4. Méthode de Wundt

L'abaque de WUNDT (1937) modifié par COUTAGNE (1954) permet de déduire les valeurs de l'ETR, en prenant, en considération les températures moyennes annuelles et les précipitations annuelles de chaque station (Figure 42).

En ce qui concerne les deux sous bassins considérés, l'ETR est d'environ 420 mm pour les stations de Sebdou et de Béni Bahdel et de 480 mm pour celles de Zenata et d'El Maffrouch; soit moins de 10% du quotient d'écoulement et plus de 95 % des précipitations.

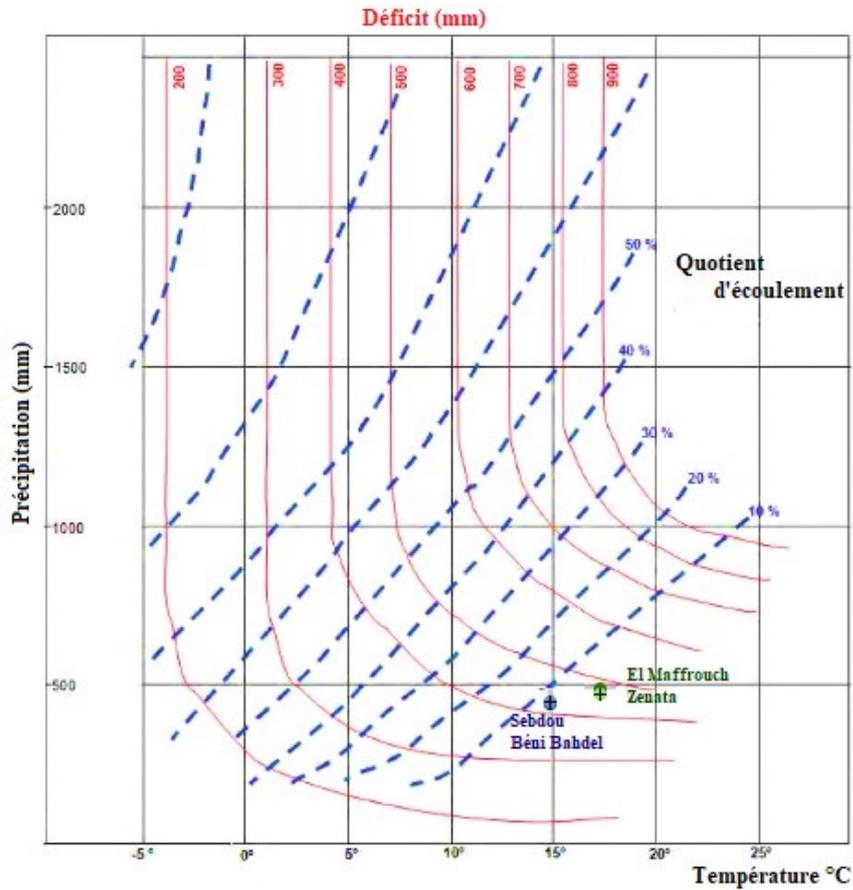


Figure 42- Abaque de Wundt modifié par COUTAGNE.

4. lame d'eau ruisselée

La lame d'eau ruisselée sur les deux sous-bassins versants est calculée par l'utilisation de la méthode de Tixeront-Berkaloff applicable en zone aride. Le ruissellement moyen annuel est donné par la formule :

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

Avec, **R** : Ruissellement moyen annuel (mm); **P**: Précipitations annuelles (mm) et **ETP**: Evapotranspirations potentielles annuelles (mm).

Les valeurs du ruissellement calculées sont mentionnées dans le tableau 24 :

Station	P (mm)	ETP (mm)	R (mm)
Seb dou	438.15	807.18	43.03
Béni Bahdel	445.57	810.38	44.90
El Maffrouch	490.76	871	51.93
Zénata	477.7	888.54	46.02

Tableau 24- Valeurs de ruissellement selon Tixeront- Berkaloff.

Les valeurs du ruissellement moyennes sont estimées à 43.96 mm / an pour le sous bassin de la haute Tafna et de 49 mm /an pour celui de Sikkak (Tableau 24), soit l'équivalent de 10 % de la lame d'eau annuelle précipitée sur ces deux sous-bassins.

5. Lame d'eau infiltrée

Selon l'équation du bilan hydrique, l'infiltration est égale à la différence entre divers éléments du cycle globale:

$$I = P - ETR - R$$

Comme les valeurs de P, de ETR et de R sont connues, l'infiltration moyenne mensuelle a été aisément calculée (Tableau 25).

Station	P (mm)	ETR (mm)	R (mm)	I (mm)
Sebdou	438.15	379.57	43.03	15.55
Béni Bahdel	445.57	377.17	44.9	23.5
El Maffrouch	490.76	421.28	51.93	17.55
Zénata	477.7	422.75	46.02	8.93

Tableau 25- Valeurs d'infiltration aux sous bassins considérés.

Pour le sous-bassin de la haute Tafna, l'infiltration moyenne annuelle est de 19.52 mm, soit 4.5 % des précipitations annuelles. Pour le Sikkak, la hauteur d'eau infiltrée est de 13.24 mm soit de 2.7% de la lame d'eau précipitée à l'échelle de ce sous bassin. L'estimation de l'infiltration a été tentée par l'utilisation des valeurs moyennes des ETR calculées par les différentes méthodes exposées ci-dessus, mais aucune valeur de celle-ci n'a été révélée.

E. Comportement hydrométrique

Pour la compréhension des réactions des deux sous bassins (la haute Tafna et le Sikkak) à des sollicitations pluviométriques, plusieurs méthodes ont été appliquées. Il s'agit de:

- l'analyse des hydrogrammes des quatre stations hydrométriques par étude de variabilité spatio-temporelle (annuelle, saisonnière et mensuelle);

- l'approche statistique par l'utilisation des coefficients et indices qui caractérisent le comportement hydrologique des sous bassins versants suivant les périodes sèches et humides d'une part et l'analyse corrélatoire entre les pluies et débits afin de comprendre la dépendance entre ses deux phénomènes d'autre part.

1. Variations spatio-temporelles des débits moyens

Les variations des débits moyens mesurés au niveau des deux sous bassins reflètent des irrégularités spatiotemporelles. Les irrégularités spatiales sont liées à la situation géographique des sous bassins, ainsi qu'au positionnement des stations par rapport à l'amont et l'aval de chacun des sous bassins. Quant aux irrégularités temporelles, elles relatent la succession des périodes humides et sèches des oueds étudiés.

1.1. Variations interannuelles des débits moyens

L'évaluation interannuelle des débits moyens au niveau des deux sous bassins sur les différentes périodes expriment que plus de 50% des débits moyens annuels ont des valeurs inférieures aux moyennes interannuelles (58% pour la station hydrométrique de Sebdou, 61% pour Béni Bahdel et 64 % pour celles d'El Maffrouch et de Sikkak) (Figure 43).

Les valeurs les plus élevées ont été observées durant les années hydrologiques 2008/09 ($1.32 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ à Sebdou et $2.51\text{m}^3\text{s}^{-1}$ à Béni Bahdel), 2012/13 ($5.54 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ à El Maffrouch) et 2002/03 ($3.37\text{m}^3\text{s}^{-1}$ à Sikkak) (Figure 43).

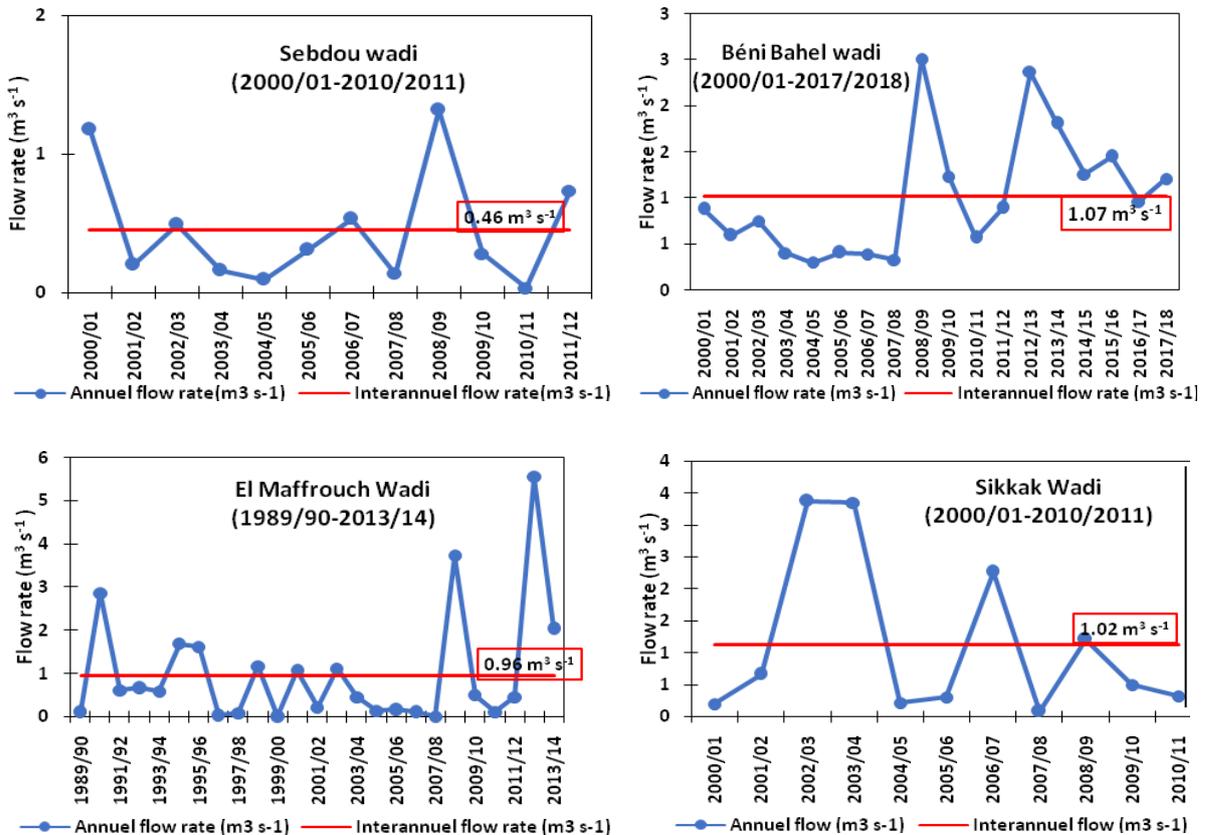


Figure 43- Débits moyens interannuels aux stations hydrométriques.

[Annuel flow rate ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$): Débit moyen annuel ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$). Interannual flow rate ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$): Débit moyen interannuel ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$).

1.2. Variations saisonnières des débits moyens

D'après les variations saisonnières des débits moyens dans les quatre stations hydrométriques mentionnées sur la figure 44, les écoulements dans la haute Tafna s'effectuent essentiellement en saisons hivernales et printanières, avec des maximums enregistrés en hiver 2008/09 ($11.81\text{m}^3\text{s}^{-1}$ à Sebdou et $19.3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ à Béni Bahdel). Ceci s'explique par la présence de fortes pluies durant cette saison.

En amont du sous bassin de Sikkak, la station hydrométrique d'El Maffrouch enregistre de faibles valeurs de débits avec un pic hivernal de $2.69\text{m}^3\text{s}^{-1}$ en 2008/09.

En aval des valeurs relativement élevées par rapport aux précédentes sont enregistrées avec un maximum en hiver de $39.18 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ en 2002/03 et des variations similaires durant les saisons printanière et automnale (Figure 44).

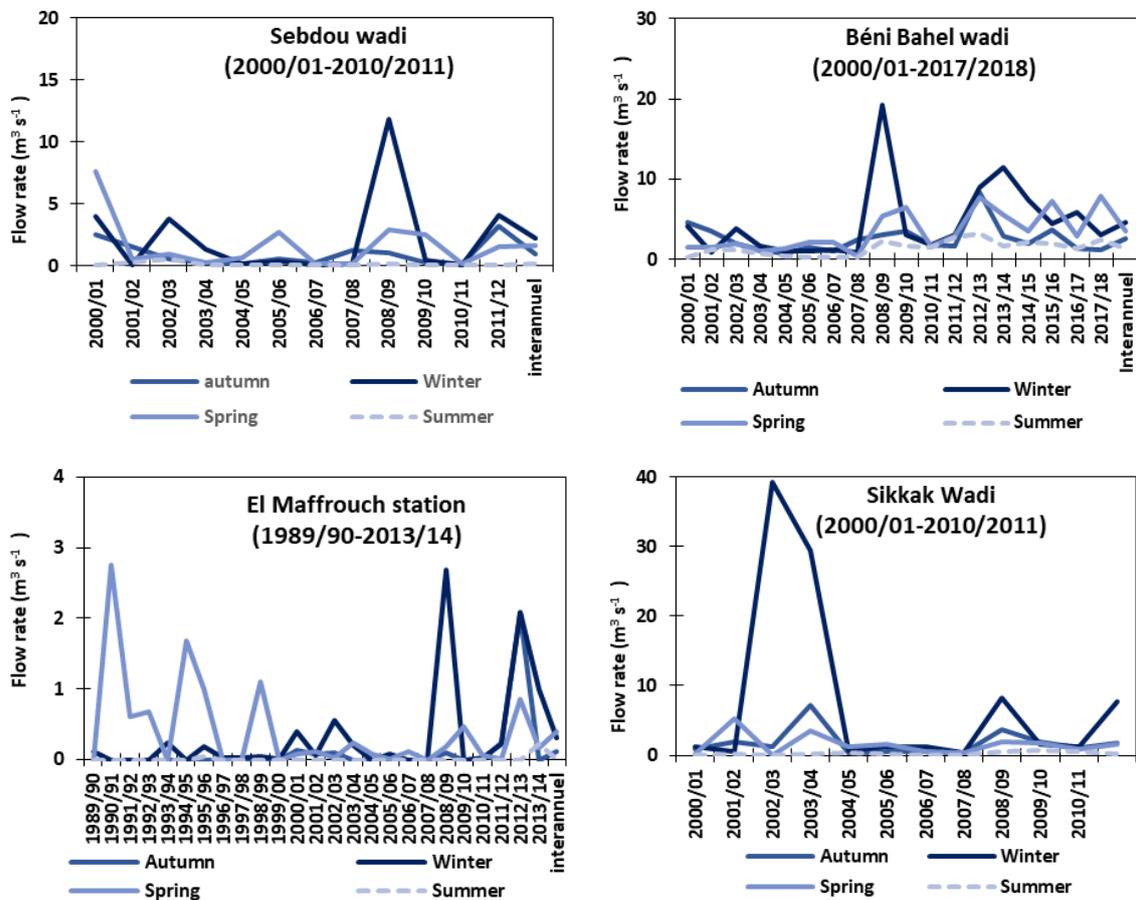


Figure 44- Débits moyens saisonniers aux stations hydrométriques.
 [Flow rate ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) : Débit ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$); Autumn : automne; Winter : hiver, Spring : Printemps, Summer: été

1.3. Variations mensuelles des débits moyens

L'évolution des débits moyens intermensuels pour les quatre stations (Figure 45) montre que les minimums frôlent les $0 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ aux mois de juillet et d'août, évoluant vers des valeurs plus importantes et atteignant leurs maximums aux mois de février et de mars. Les valeurs extrêmes maximales observées durant les différentes périodes d'étude sont de $7.58 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (mars-2000/01 à la station de Sebdu), $8.23 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (janvier 2008/09 à la station de Béni Bahdel), $2.06 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (octobre 2012/13 et $2.71 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (mars 1990/91) à la station d'El Maffrouch et $21.21 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (février 2002/03 à la station de Sikkak) (Figure 45).

Les deux sous bassins étudiés sont caractérisés par deux périodes. Une période de crue s'étalant principalement du mois de novembre au mois de mai et une période d'étiage allant de juin à octobre.

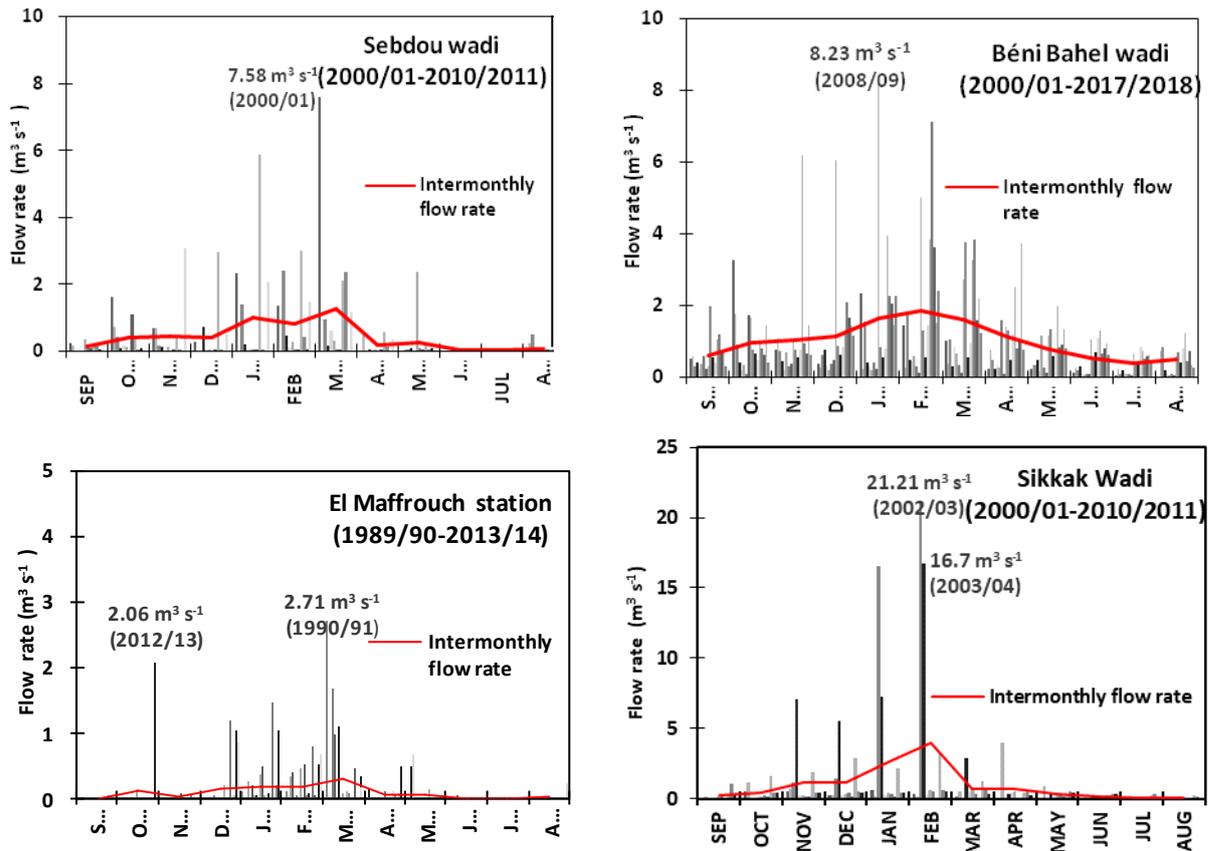


Figure 45- Débits moyens mensuels et intermensuels aux stations hydrométriques.
 [Intermonthly flow rate ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) : Débit moyen intermensuelle ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)]

2. Coefficients et indices de la variabilité des débits

2.1. L'irrégularité interannuelle des débits moyens

L'irrégularité interannuelle des débits peut être caractérisée à partir des débits moyens annuels des quatre stations hydrométriques des deux sous-bassins versants. La méthode adoptée, ici est celle des écarts à la moyenne (E_c) des débits moyens annuels (Q_i) au débit moyen interannuel (Q_m) (RIEHL, 1979; PROBST & TARDY, 1985). Ces écarts sont donnés par l'équation:

$$E_c = \frac{(Q_i - Q_m)}{Q_m} \times 100$$

Avec, Q_i : débit moyen annuel de l'année (i) et Q_m : débit moyen interannuel de la série.

Cette méthode permet de distinguer les périodes humides (courbe croissante) des périodes sèches (courbe décroissante).

Sur la base de cet indice, l'année est considérée comme étant excédentaire (humide) si $E_c > 0$ et comme étant déficitaire (sèche) si $E_c < 0$.

Enfin, les représentations graphiques de la méthode des écarts (Figure 46 et Annexe II) révèlent d'importantes fluctuations de débit d'une année à une autre. Les sous bassins considérés sont caractérisés par une alternance de longues périodes déficitaires allant d'une à 7 années successives et des périodes excédentaires courtes (une à deux années) avec des irrégularités quantitatives très accentuées.

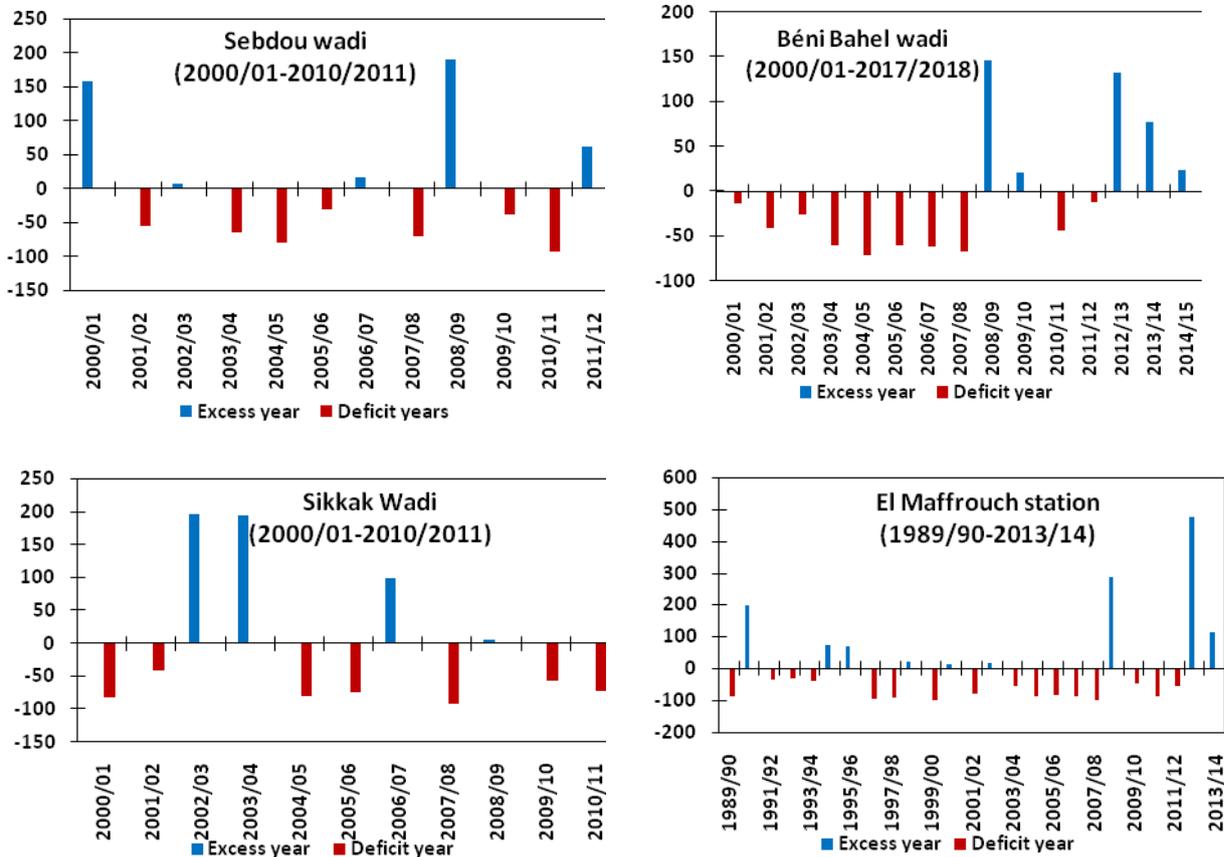


Figure 46- Variations annuelles des écarts à la moyenne des débits aux niveaux des stations hydrométriques étudiées.

[Excess year: Année excédentaire; Deficit year: Année déficitaire]

2.2. SSFI (Standardized Stream Flow Index)

L'indice de débit standardisé (SSFI) est un indice probabiliste basé sur les périodes de retour de sécheresse hydrologique (MODARRES, 2007). Cet indice est statistiquement similaire à l'indice SPI plus couramment utilisé pour l'analyse météorologique de la sécheresse introduit par MCKEE & *al.* (1993). Le SSFI pour une période donnée est défini comme étant la différence de débit entre la moyenne divisée par l'écart type. L'équation s'écrit comme suit:

$$SSFI = \frac{Q_i - \bar{Q}}{\sigma}$$

Avec, Q_i : débit à l'intervalle de temps i ; (\bar{Q}): la moyenne des débits de la série considérée et σ : l'écart type de la série.

Pour des séries mensuelles, le SSFI est donné par l'expression ci-après:

$$SSFI_t = \frac{Q_{vt} - \bar{Q}_t}{\sigma_t}$$

Avec :

$$\bar{Q}_t = \frac{1}{n} \sum_{v=1}^N Q_{v,t} \quad t = 1, \dots, \omega$$

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{v=1}^n (Q_{v,t} - \bar{Q}_t)^2}$$

Où, v désigne l'année et t l'intervalle des années; \bar{Q}_t et σ_t sont la moyenne et l'écart type du mois t ; $\omega = 12$.

Nous tenons à rappeler que MODARRES (2007) a utilisé une classification de la gravité de sécheresse hydrologique selon les valeurs de l'indice SSFI. Cette classification est similaire à celle de la sécheresse météorologique SPI, donnée par McKEE & al. (1993)(Tableau 27).

Le SSFI est calculé pour les séries chronologiques intermensuelles des 4 stations hydrométriques étudiées et la gravité de sécheresse observée est illustrée sur la figure 47.

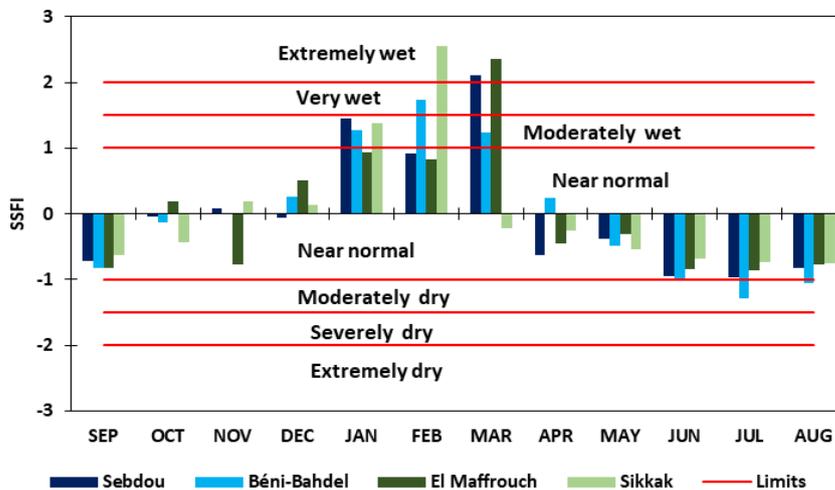


Figure 47- Évolution de l'indice SSFI à l'échelle inter mensuelle.

Etroitement liés à la pluviométrie, les écoulements subissent la variabilité mensuelle des précipitations. A l'échelle mensuelle, les seuils de sécheresse et d'humidité hydrologiques sont plus prononcés. Les valeurs de SSFI oscillent entre -1.28 et 2.54. Huit mois sur douze (avril à décembre) présentent un état de sécheresse légère ($-1.0 < SSFI < 1.0$), avec une tendance vers une sécheresse modérée pour les mois de juin, juillet, août et septembre dans des cours d'eau des deux sous bassins considérés (Figure 47).

A partir du mois de décembre, la tendance est croissante, avec des valeurs de SSFI positives et un état d'humidité variant de modérée au mois de janvier vers extrêmement humide en février et mars surtout pour les oueds de Sebdou, d'El Maffrouch et de Sikkak (Figure 47).

IV. HYDROGEOLOGIE

Dans le sous-bassin de la haute Tafna, les formations géologiques dominantes sont principalement les calcaires karstiques et dolomitiques (Jurassique inférieur et moyen), les marno-calcaires, les marnes et les grès (Jurassique supérieur-Crétacé inférieur) et les dépôts conglomératiques et les alluvions du graben de Sebdou (Plio-Quaternaire). Ces derniers constituent un aquifère important dans la région (COLLIGNON, 1986) (Figures 48 et 49).

Par ailleurs, le sous-bassin de Sikkak comprend la zone des contreforts formée essentiellement calcaires dolomitiques et la plaine de Hennaya constituée de grès et d'alluvions d'âge miocène et quaternaire (HAYANE, 1983; COLLIGNON, 1986).

Notons que les formations alluviales du Plio-Quaternaire précitées constituent les deux aquifères importants des sous-bassins versants étudiés.

A. L'aquifère de Sebdou

L'aquifère de Sebdou d'âge plio-quaternaire est constituée par des alluvions récents, localisés le long des oueds, des terrasses, des croûtes calcaires du Quaternaire ancien et des conglomérats qui comblent le fossé de Sebdou. Il repose sur un substratum marno-calcaires d'âge mésozoïque (Figures 48 et 49). Ces différentes formations géologiques présentent une lithologie favorable sur le plan hydrogéologique et se caractérisent par une forte capacité de rétention de l'eau. Parmi les sources qui drainent ces formations, nous citons : Ain Taga, Ain Soltane, Ain El Berd (Figure 50), Deillen, Sidi Aissa, Berdil et Hadjar.

La carte piézométrique (Figure 51) a été établie à partir des données de la campagne piézométrique réalisée au mois de mars de l'année 2017. Son tracé est basé sur un inventaire de 11 points d'eau dont les données sont reportées en annexe III (Figure 48). Cette carte montre que l'écoulement se fait de manière générale du Nord vers le Sud avec des courbes isopièzes plus rapprochées au Nord que dans les parties médiane et méridionale de la zone cartographiée, avec une légère convexité des courbes au Sud-Est, témoignant ainsi d'une éventuelle drainance de la nappe vers le Sud-Ouest.

Les gradients hydrauliques calculés varient entre $1.21 \cdot 10^{-1}$ au Nord à $5.6 \cdot 10^{-2}$ au Sud-Ouest. Au Sud-Est, les valeurs de ce gradient sont beaucoup plus faibles et elles sont de l'ordre de $8.4 \cdot 10^{-3}$.

D'après COLLIGNON (1986), l'alimentation de la nappe alluviale plio-quaternaire de Sebdou se fait par deux processus: verticalement par son impluvium, en quantités variables suivant l'intensité pluviométrique et latéralement par communication hydraulique directe avec les réservoirs karstiques.

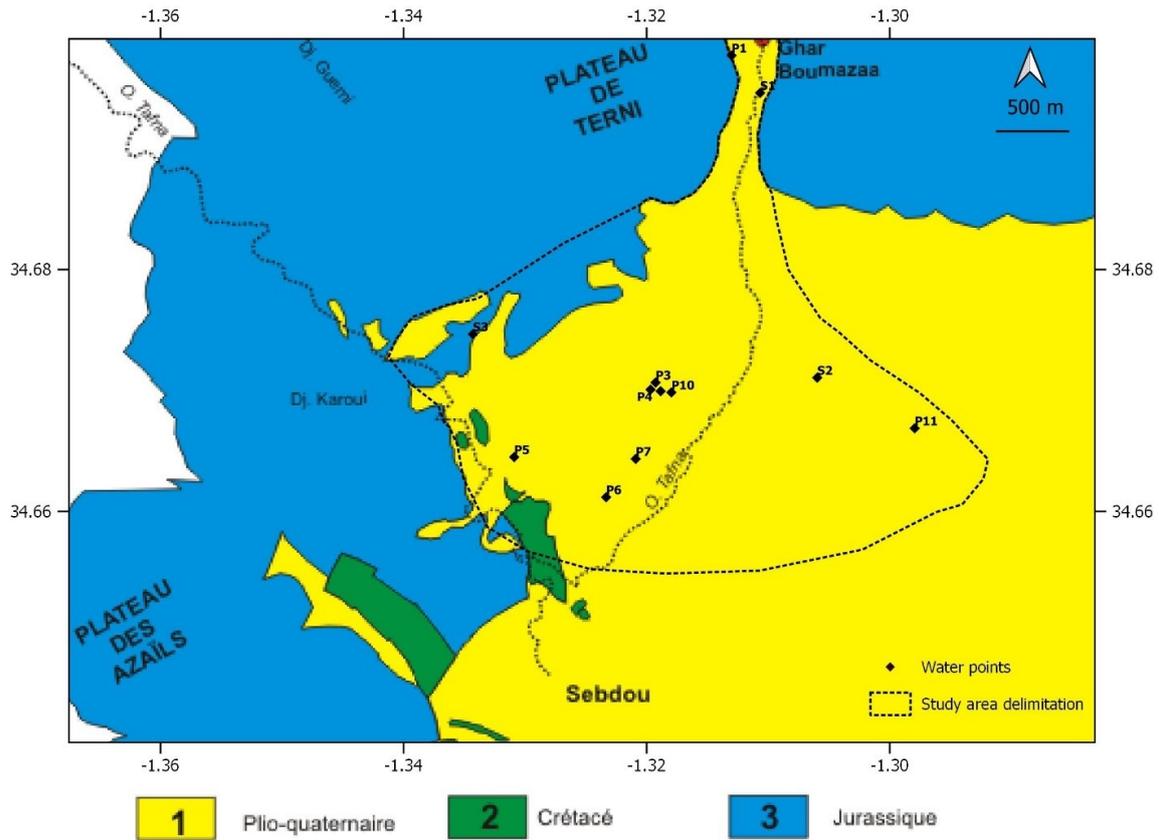


Figure 48- Carte géologique de Sebdu (d'après BENEST 1985, modifiée).

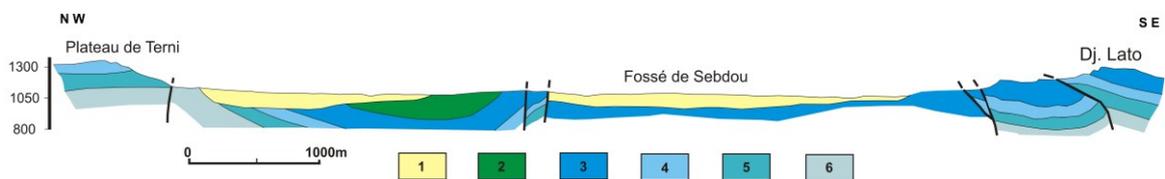


Figure 49- Coupe géologique à travers le secteur de Sebdu (d'après BENEST, 1985, modifiée).
 1. Formation de Sebdu à faciès fluviolacustre (Pliocène ?) ; 2. Marno-calcaires d'Ouled Mimoun; 3. Marno-calcaires de Hariga ; 4. Calcaires de lato et Dolomie de Terni ; 5. Marno-calcaire de Raourai (Tithonien basal), 6. Calcaires de Zarifet et Dolomie de Tlemcen s.l. (Kimméridgien supérieur).





Figure 50- Quelques sources émergentes au fossé de Sebdu.

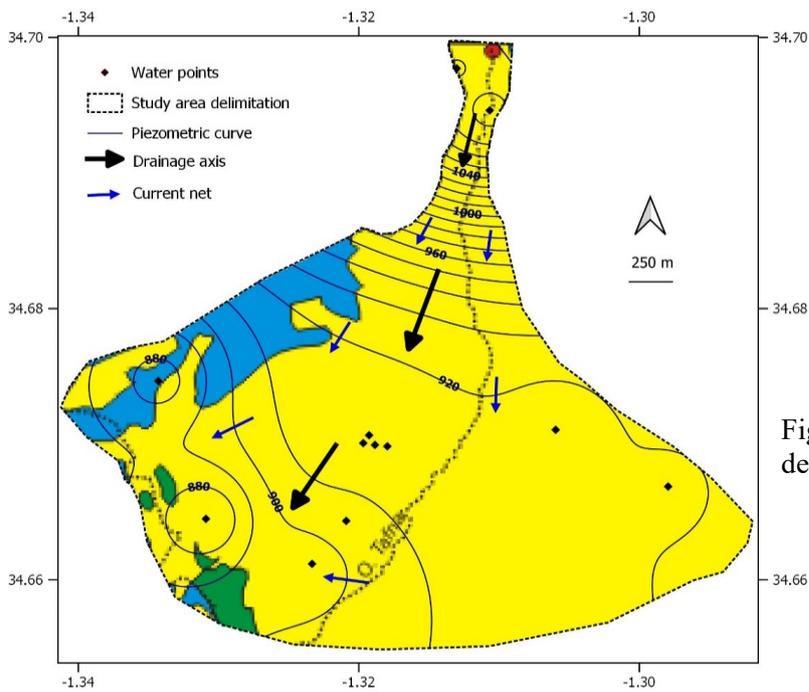


Figure 51- Carte piézométrique de la nappe de Sebdu.

B. L'aquifère de Hennaya

L'aquifère de Hennaya est représenté par les grès, conglomérats, travertins, graviers et graviers argileux du Tortonien reposant sur les marnes helvétiques qui constituent son substratum (HAYANE, 1983). Son exutoire est représenté par des sources qui apparaissent au contact des conglomérats du substratum. Il est principalement rechargé à partir des formations dolomitiques du Sud de la plaine (HAYANE, 1983) (Figures 52 et 53).

L'étude piézométrique a été réalisée sur la base de 29 points d'eau, durant le mois de mars 2017. Les résultats des relevés sont présentés en annexe III.

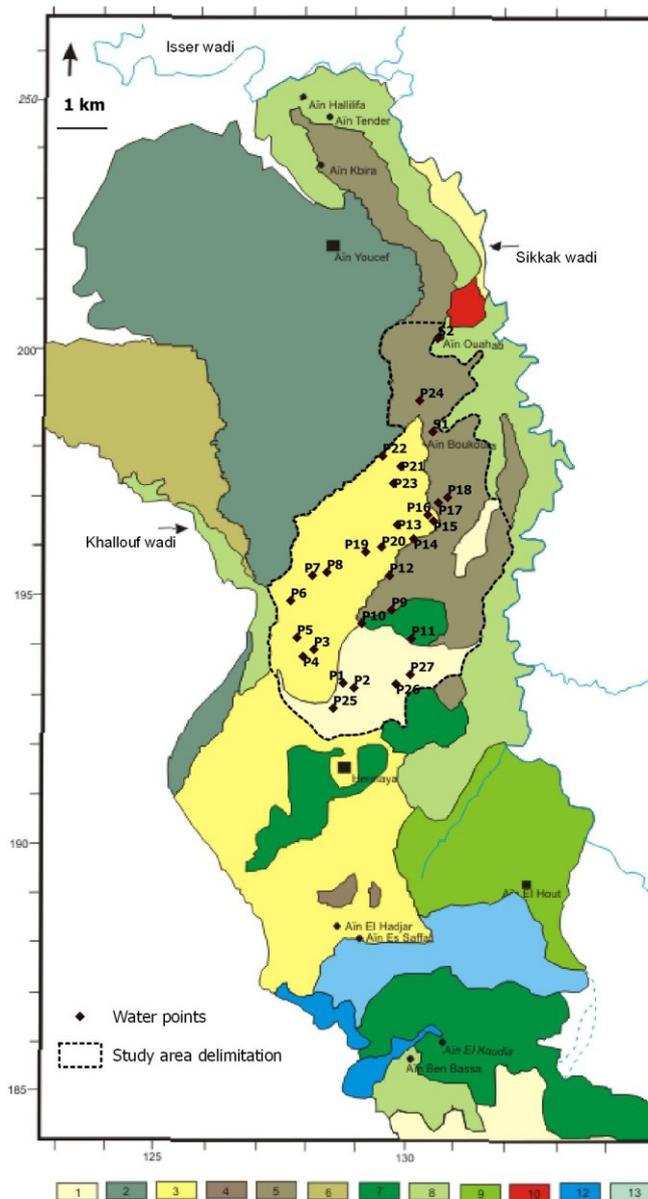


Figure 52- Carte géologique de la plaine de Hennaya (d'après ANRH, 2002).

1: Tufs calcaires ; 2: Eboulis et dépôts de pentes ; 3: Alluvion anciennes des vallées et cuvettes des plateaux 15 à 20m ; 4: Carapaces calcaires ; 5 : Alluvions anciennes et dépôts anciens d'atterrissement ; 6 : Alluvions anciennes 55 à 60m ; 7: Alluvions anciennes 70 à 80m ; 8: Grès Tortoniens; 9: Marnes et grès helvétiques ; 10: Marnes carténiennes; 11: Grès éocènes ; 12: Marnes et calcaires; 13: Dolomies de Tlemcen et Calcaires compacts.

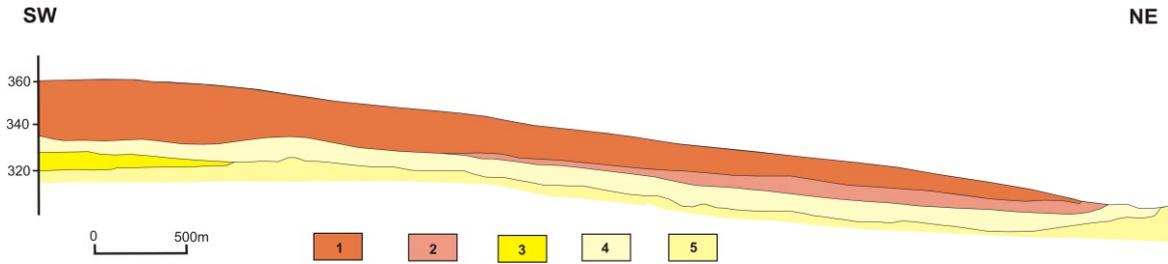


Figure 53- Coupe géologique de la plaine de Hennaya (d'après HAYANE, 1983, modifiée).
 1. Croûtes, argiles et graviers argileux (Quaternaire); 2. Travertins; 3. Conglomérats; 4. Grès tortoniens; 5. Marnes helvétiques.

L'interprétation de la carte piézométrique de la figure 54 montre que l'écoulement se fait de manière globale du Sud-Ouest vers le Nord-Est. Les eaux circulent dans la nappe suivant l'axe de drainage correspondant approximativement au milieu de la bande occupée par des conglomérats, où toutes les eaux se rassemblent (HAYANE, 1983), et émergent au niveau des sources (Ain Boukoura (S1) et (Ain Ouahab (S2), établies dans les conglomérats (Figure 55). Dans cette nappe, les valeurs du gradient hydraulique varient entre $2.83 \cdot 10^{-2}$ au Sud $9.25 \cdot 10^{-3}$ au Nord.

Enfin, les caractéristiques hydrodynamiques de la nappe de Hennaya obtenues au cours des essais de pompage réalisés par HAYANE (1983) montrent que les conglomérats ont des valeurs de transmissivité (T) variant de $0.78 \cdot 10^{-3}$ à $3.39 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ et des valeurs de perméabilité (K) de l'ordre de 10^{-4} m s^{-1} . Quant aux grès du Tortonien, ils se caractérisent par des valeurs beaucoup plus faibles avec T de l'ordre de $10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ et k de l'ordre de 10^{-6} m s^{-1} .

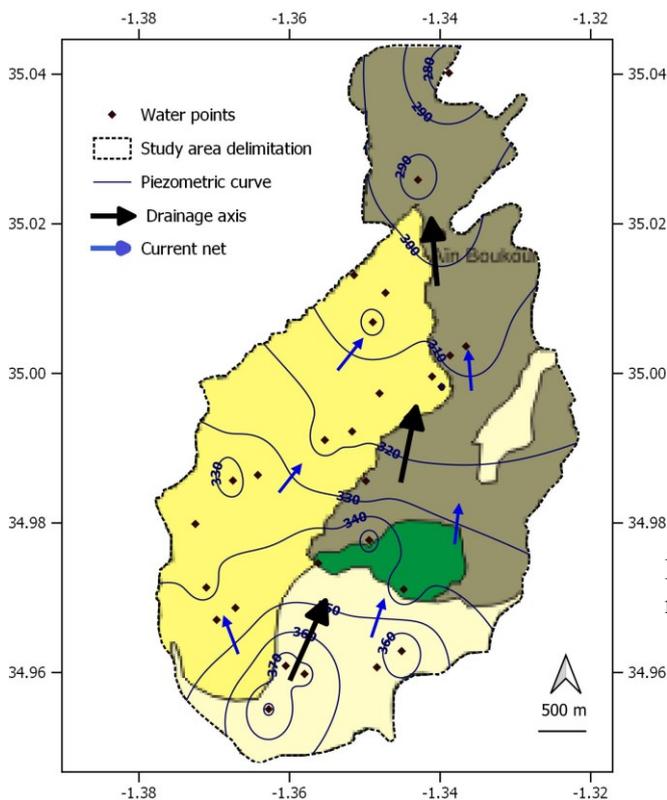


Figure 54- Carte piézométrique de la nappe de Hennaya.



Figure 55- Formations conglomératiques de la plaine de Hennaya avec ses émergences.

V. CONCLUSION

Dans cette étude, la cartographie thématique sous SIG a permis la délimitation des sous bassins versants de la Haute Tafna et de Sikkak et leur caractérisation physiographique.

Ainsi, le bassin de la haute Tafna, d'une superficie de 992.68 km² dispose d'un réseau hydrographique peu développé de 145.45 km de long. Quant au bassin de Sikkak, quoique de superficie plus réduite (259.41 km²), sa longueur du réseau hydrographique (134.96 km) est peu différente du sous bassin susmentionné.

L'analyse des caractéristiques morphométriques a permis l'attribution d'une forme plutôt allongée avec un profil en long du cours d'eau principal présentant une pente assez régulière et faible pour l'oued Sebdou et montre des pentes irrégulières et fortes avec des ruptures à plusieurs niveaux d'altitude pour l'Oued Sikkak.

Les deux sous bassins étudiés sont caractérisés par un climat de type semi-aride à hiver froid (Sikkak) à très froid (haute Tafna) où, d'une manière générale, les régimes pluviométriques annuels sont irréguliers d'une année à l'autre avec des écarts de moyennes annuelles peu prononcés confirmant ainsi une certaine homogénéité des hauteurs de précipitations. Sur le plan saisonnier, les précipitations les plus faibles se rencontrent durant la période estivale et hauteurs maximales sont enregistrées au mois de novembre.

L'utilisation du SPI comme indicateur pour la définition des conditions humides ou sèches en fonction de la variabilité des précipitations a permis de montrer que, moyennant les précipitations, les seuils de sécheresse excessive n'ont pas été atteints, mais qu'une tendance vers un assèchement accru est observée sur les différentes séries chronologiques étudiées.

L'évapotranspiration réelle déterminée par la méthode de Thornthwaite est respectivement de 378.37 et 422 mm aux sous-bassins de la haute Tafna et de Sikkak et la hauteur de la lame d'eau ruisselée déterminée par la méthode de Tixeront- Berkaloff est comprise entre 43 et 51.93 mm par an.

L'infiltration calculée par l'équation du bilan hydrique indique des hauteurs de lames d'eau infiltrées de 19.52 mm, soit 4.5 % des précipitations annuelles pour le sous bassin de la Tafna et 13.24 mm, soit de 2.7 % de la lame d'eau précipitée pour celui de Sikkak.

L'évaluation interannuelle des débits moyens indiquent qu'environ plus de 60 % des débits moyens annuels ont des valeurs inférieures aux moyennes interannuelles et que les deux sous bassins considérés sont caractérisés par une période de crue s'étalant principalement du mois de novembre au mois de mai et une période d'étiage allant de juin à octobre.

Sur le plan hydrogéologique, les tracés des cartes piézométriques des deux aquifères plio-quaternaires étudiés indiquent un écoulement général du Nord vers le Sud, avec un gradient compris entre $1.21 \cdot 10^{-1}$ (au Nord) à $5.6 \cdot 10^{-2}$ (au Sud-Ouest) pour l'aquifère de Sebdou et, du Sud-Ouest vers le Nord-Est avec un gradient compris entre $2.83 \cdot 10^{-2}$ au Sud $9.25 \cdot 10^{-3}$ au Nord pour celui de Hennaya.

Quatrième chapitre: **Hydrogéochimie**

I. INTRODUCTION

Le présent chapitre est consacré à la caractérisation physico-chimique et géochimique des eaux de surface et souterraines des sous bassins de la haute Tafna et de Sikkak. Les résultats des paramètres physicochimiques seront décrits en termes de minima, maxima, moyennes et écart-types. Les faciès hydrogéochimiques et les divers indices géochimiques seront déterminés par diverses méthodes, dans le but de mettre en évidence des types d'interactions eau/roche ayant conduit à l'acquisition du chimisme de l'eau. Enfin, un essai de détermination de l'origine des nitrates est réalisé sur la base des corrélations.

II. CARACTERISATIONS PHYSICOCHIMIQUE ET CHIMIQUE DES EAUX

Le tableau 26 et les figures 56A et B regroupent les valeurs moyennes, minimales et maximales des paramètres chimiques des eaux échantillonnées dans les sous-bassins de la haute Tafna et de Sikkak. La répartition des box-plots des anions et cations représentés sur les figures 26 montrent qu'en général, les valeurs des paramètres les plus faibles sont représentatives des eaux de surface et les maximales des eaux souterraines.

A. Eaux souterraines

En ce qui concerne les eaux souterraines, une différence des valeurs moyennes des paramètres mesurés est notée entre la saison humide et la saison sèche pour les deux aquifères étudiés (Figure 56).

-la température: à Sebdou, la température des eaux souterraines varie de 16.1 à 19.1 °C et de 15.6 à 19.7 °C respectivement, durant les périodes humides et sèches. Par contre à Hennaya, les valeurs de la température sont plus élevées que les précédentes. Elles varient entre 18 et 24 °C et 14.2 et 22.7 °C pendant les saisons humides et sèches.

-le Potentiel hydrogène: l'aquifère de Sebdou se distingue par des eaux acides à alcalines. En effet, les valeurs de leur pH sont comprises entre 6.5 et 7.78 (Moyenne: 6.88) durant la saison humide et 6.94 et 8.98 (Moyenne: 7.32) durant la saison sèche. Pour le cas de l'aquifère de Hennaya, les valeurs du pH des eaux varient différemment, comparées à celles des eaux de l'aquifère suscité. Ces eaux sont acides pendant la saison humide, avec des valeurs comprises entre 5.87 et 6.42 (Moyenne: 6.28), et alcalines durant la saison sèche (entre 7.14 – 8.06, moyenne: 7.38).

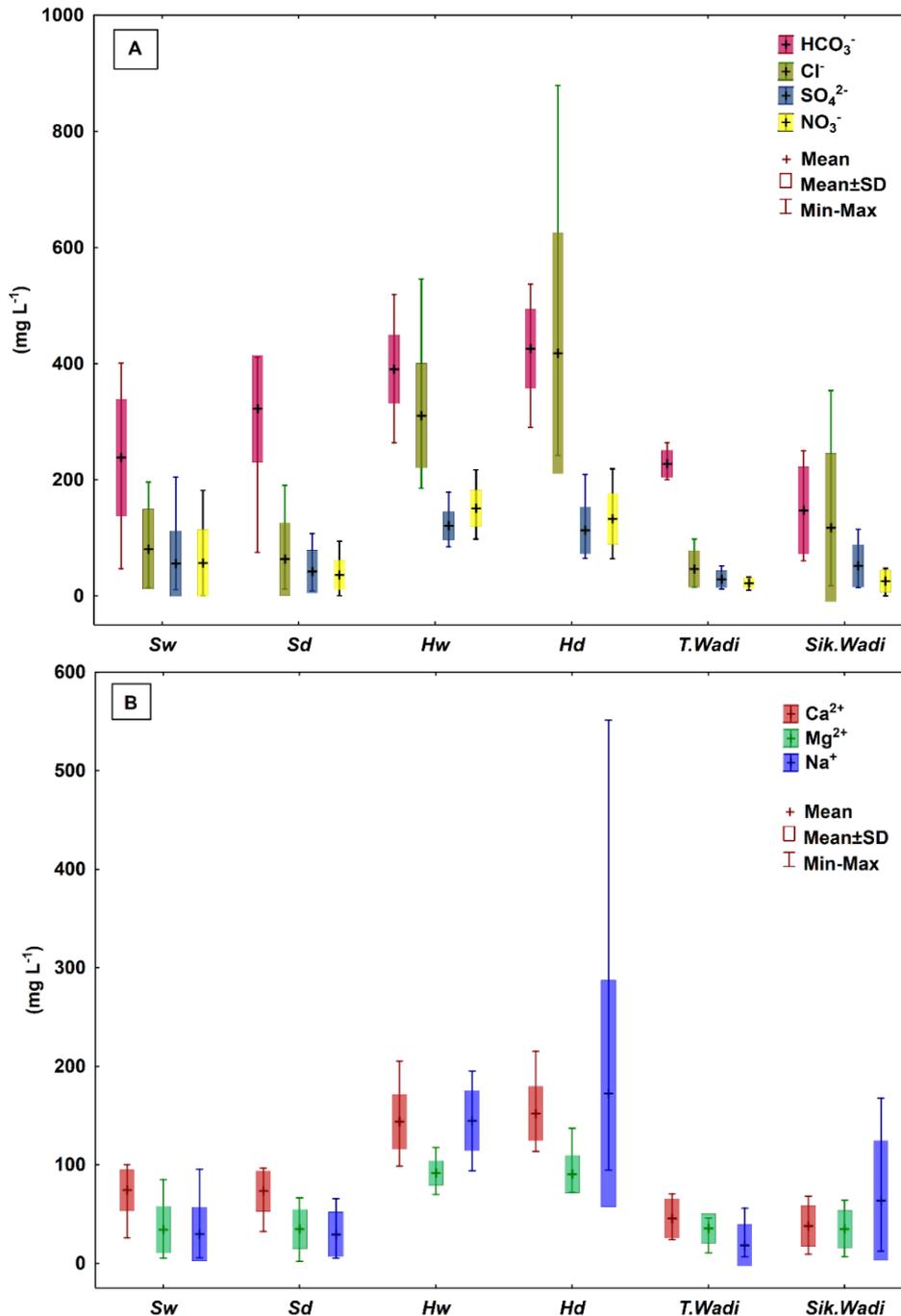


Figure 56- Analyse par box-plots: A. Anions, B. Cations.

Sw: Sebduo aquifer wet season (Aquifère de Sebduo en saison humide); Sd: Sebduo dry season (Aquifère de Sebduo en saison sèche); Hw : Hennaya wet season (Aquifère de Hennaya en saison humide); Hd : Hennaya dry season (Aquifère de Hennaya en saison sèche); T.Wadi : Tafna wadi (Oued Tafna); Sik. Wadi : Sikkak Wadi (Oued Sikkak).

-la conductivité électrique: dans l'aquifère de Sebduo, les valeurs de la CE des eaux varient de 318 à 1341 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (Moyenne : 761.6 $\mu\text{S cm}^{-1}$) pendant la saison humide et de 143.6 à 1122 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (Moyenne : 674.7 $\mu\text{S cm}^{-1}$). En ce qui concerne les eaux souterraines de la plaine de Hennaya, les valeurs de la conductivité sont plus élevées par rapport à celles de l'aquifère de Sebduo. Elles fluctuent entre 1365.5 et 2130 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (Moyenne: 1493.8 $\mu\text{S cm}^{-1}$) et 1314 à 3310 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (Moyenne : 1601.1 $\mu\text{S cm}^{-1}$).

		T (°C)	pH	EC	TDS	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻	NO ₃ ⁻
Groundwater samples														
Sebdou aquifer -														
Wet season (n=12)														
Minimum	16.100	6.500	318.000	126.000	25.990	5.310	5.610	5.610	0.120	46.660	13.970	10.950	0	0.140
Maximum	19.300	7.780	1341.000	536.000	100.280	84.820	95.610	5.500	410.880	196.000	204.630	204.630	0.500	182.000
Mean	17.967	6.886	761.583	304.500	74.300	34.149	29.742	1.948	238.394	80.497	55.793	55.793	0.123	56.531
SD	0.897	0.358	289.393	116.321	20.638	23.551	27.449	1.801	101.111	68.656	56.642	56.642	0.222	57.355
Dry season (n=10)														
Minimum	15.600	6.940	143.600	59.200	32.310	2.010	5.300	0.620	75.000	11.940	8.400	8.400	0	0.240
Maximum	19.700	8.980	1122.000	450.000	96.500	66.430	65.710	4.450	410.880	190.430	107.140	107.140	0	94.310
Mean	17.430	7.321	674.660	271.120	73.383	34.801	29.403	1.920	322.348	63.446	41.747	41.747	0	35.889
SD	1.328	0.604	281.924	111.978	20.721	19.833	22.528	1.353	92.155	62.810	36.870	36.870	0	25.484
Hennaya aquifer														
Wet season (n=19)														
Minimum	18.000	5.870	1365.000	530.000	98.380	69.860	93.920	0.480	329.400	185.470	84.570	84.570	0	97.990
Maximum	24.000	6.420	2130.000	840.000	205.050	117.690	195.210	21.640	518.800	545.600	178.770	178.770	0	217.260
Mean	21.772	6.286	1493.765	595.412	142.722	91.983	143.944	5.284	397.012	308.952	121.159	121.159	0	150.952
SD	1.634	0.144	188.142	73.259	28.046	12.613	31.047	5.046	52.675	92.279	24.746	24.746	0	32.381
Dry season (n=17)														
Minimum	14.200	7.140	1314.000	531.000	113.400	72.080	94.590	0.000	290.360	241.970	64.580	64.580	0	64.064
Maximum	22.700	8.060	3310.000	1300.000	215.270	137.150	551.490	15.180	536.800	879.100	208.830	208.830	0.420	218.580
Mean	19.829	7.385	1601.059	668.353	152.027	90.572	172.308	2.945	425.708	388.285	113.023	113.023	0.066	132.539
SD	2.140	0.249	483.108	189.127	27.666	18.935	114.917	3.786	67.934	170.711	40.026	40.026	0.149	43.729
Surface water Samples														
Tafna														
(n=5)														
Minimum	16.600	7.470	418.000	170.000	23.920	10.510	6.610	0.060	200.380	14.700	11.610	11.610	0	9.990
Maximum	20.500	7.770	861.000	346.000	70.750	45.900	55.880	3.410	263.520	97.560	51.500	51.500	0	32.720
Mean	18.880	7.632	596.800	238.600	45.588	35.540	18.264	1.998	227.284	46.424	28.514	28.514	0	22.020
SD	1.564	0.116	164.849	65.961	19.933	14.861	21.072	1.545	23.246	31.433	14.558	14.558	0	9.100
Sikkak														
(n=9)														
Minimum	14.000	7.000	299.000	112.000	9.510	6.460	12.110	0.060	60.390	17.480	14.210	14.210	0	0.000
Maximum	19.600	7.650	1383.000	566.000	68.080	64.080	167.440	10.970	249.790	353.690	114.670	114.670	0	47.490
Mean	17.044	7.314	783.667	313.667	37.788	34.820	63.753	5.950	147.312	117.598	51.749	51.749	0	25.506
SD	1.806	0.240	412.687	171.531	20.458	18.871	60.792	4.018	75.049	127.393	36.449	36.449	0	18.780

Tableau 26- Statistiques descriptives des données chimiques des eaux souterraines et de surface.

-*les bicarbonates*: dans les eaux de l'aquifère de Hennaya, les valeurs moyennes des ions bicarbonates sont assez élevées durant les deux campagnes d'échantillonnage où les maximales enregistrées atteignent les 518.8 mg L⁻¹ en saison humide et 536.8 mg L⁻¹ en saison sèche. Les valeurs moyennes sont respectivement de 397 et 425.7 mg L⁻¹ pendant les saisons humide et sèche. Pour la nappe de Seb Dou, les concentrations en bicarbonates atteignent 410.9 mg L⁻¹ en saison sèche au puits P11 et la teneur la plus faible (14.8 mg L⁻¹) est enregistrée à la source de Aïn Tagga (S1) (Figure 56A).

-*les sulfates*: les teneurs en sulfates enregistrées dans les eaux de l'aquifère de Seb Dou sont comprises entre 10.95 et 204.63 mg L⁻¹ (moyenne : 55.79 mg L⁻¹) (saison humide) et entre 8.4 et 107.14 mg L⁻¹ (moyenne : 41.7 mg L⁻¹) (saison sèche) (Tableau 26 et figure 56A). Dans l'aquifère de Hennaya, les concentrations en sulfates des eaux souterraines sont plus élevées. Elles fluctuent entre 84.57 et 178.77 mg L⁻¹ (saison humide) et entre 64.58 et 208.93 mg L⁻¹ (saison sèche).

-*les nitrates*: pour ce qui est des nitrates, des concentrations élevées ont été enregistrées dans les eaux souterraines de la plaine de Hennaya, pendant les saisons humide (98 – 217.3 mg L⁻¹ ; moyenne : 151 mg L⁻¹) et sèche (64 – 218.6 mg L⁻¹; moyenne : 132.5 mg L⁻¹) (Tableau 26 et Figure 56A). Dans le cas de Seb Dou, les teneurs en nitrates restent relativement plus faibles avec des valeurs comprises entre 0.14 et 182 mg L⁻¹ (Moyenne: 56.53 mg L⁻¹) durant la saison humide et entre 0.24 et 94.31 mg L⁻¹ (Moyenne : 35.88 mg L⁻¹) pendant la saison sèche.

-*les phosphates*: concernant les phosphates, les eaux de l'aquifère de Seb Dou sont exemptes durant la période estivale. Par contre durant la période humide, les concentrations enregistrées sont comprises entre 0 et 0.5 mg L⁻¹ (Moyenne: 0.23 mg L⁻¹). A l'encontre de ce dernier, l'aquifère de Hennaya, affiche des contenus en cet ion (0 – 0.42 mg L⁻¹ (Moyenne: 0.06 mg L⁻¹) durant la saison sèche.

-*le sodium*: les concentrations de sodium sont faibles dans les eaux souterraines de l'aquifère de Seb Dou, avec un maximum d'environ 95.6 mg L⁻¹ (Figure 56B). À Hennaya, les concentrations de sodium sont faibles à élevées. Elles varient entre 93.9 et 195.2 mg L⁻¹ pendant la période des hautes eaux et atteignent une concentration de 551.9 mg L⁻¹ pendant celle des basses eaux (Figure 56B).

-*le calcium et le magnésium*: les concentrations en calcium et en magnésium sont plus élevées dans les eaux souterraines de Hennaya que dans celles de Seb Dou. Durant la saison sèche, la teneur en calcium est comprise entre 32.3 et 96.5 mg L⁻¹ et entre 113.4 à 215.3 mg L⁻¹ respectivement dans les eaux souterraines de Seb Dou et de Hennaya (Figure 56 B).

Pour l'aquifère de Seb Dou, les teneurs moyennes en calcium varient de 74.3 mg L⁻¹ (saison humide) et 73.38 mg L⁻¹ (saison sèche), celles en magnésium sont de 34.14 mg L⁻¹ et 34.8 mg L⁻¹ pour les saisons humide et sèche. Dans le cas des eaux de l'aquifère de Hennaya, les concentrations moyennes en Ca²⁺ sont nettement plus élevées. Elles sont de 142.72 mg L⁻¹ durant la saison humide et de 152.02 mg L⁻¹ durant la saison sèche. Concernant les teneurs en Mg²⁺, les moyennes sont respectivement de 91.98 et 90.57 mg L⁻¹ pour les saisons humides et sèches) (Tableau 26).

B. Eaux de surface

Les eaux de surface prélevées uniquement pendant la saison des hautes eaux sont exemptes de phosphate (0 mg L^{-1}), avec d'importantes variations des paramètres observés dans les deux oueds (Figures 57 et 58).

-la température: à l'oued Tafna, les températures des eaux de surface varient entre 16.6 et $20.5 \text{ }^\circ\text{C}$, avec une moyenne de $18.88 \text{ }^\circ\text{C}$ et un écart type de $1.56 \text{ }^\circ\text{C}$; alors qu'au niveau de l'oued Sikkak, elles sont comprises entre 14 et $19.6 \text{ }^\circ\text{C}$ et ont pour moyenne $17.04 \text{ }^\circ\text{C}$ et un écart type de $1.8 \text{ }^\circ\text{C}$ (Tableau 26).

-le potentiel hydrogène: les eaux superficielles des oueds considérés sont alcalines. Les valeurs de leur pH sont comprises entre 7.47 et 7.77 (Moyenne: 7.63) pour l'oued Tafna et entre 7 et 7.65 (Moyenne: 7.31) pour le Sikkak.

-la conductivité électrique: les valeurs de la CE des eaux de la haute Tafna varient de 418 à $861 \text{ } \mu\text{S cm}^{-1}$ (Moyenne: $596.8 \mu\text{S cm}^{-1}$ et écart type: $164.84 \text{ } \mu\text{S cm}^{-1}$). Pour les eaux de Sikkak, les valeurs de CE sont plus élevées. Elles fluctuent entre 299 et $1383 \text{ } \mu\text{S cm}^{-1}$ (Moyenne : $783.66 \text{ } \mu\text{S cm}^{-1}$ et écart type : $412.68 \text{ } \mu\text{S cm}^{-1}$).

-les chlorures: comme pour la conductivité, les teneurs en chlorures des eaux de surface de Sikkak fluctuent entre 17.48 et 353.69 mg L^{-1} (Moyenne : 117.6 mg L^{-1}). Elles sont plus élevées par rapport à celle de la Tafna supérieure où les valeurs enregistrées sont comprises entre 14.7 et 97.56 mg L^{-1} (Moyenne: 46.42 mg L^{-1}) (Figures 57 et 58).

-les bicarbonates: les teneurs en bicarbonates mesurées sont comprises entre 200.38 et 263.52 mg L^{-1} (Moyenne: 227.28 mg L^{-1}) pour les eaux de l'oued Tafna et entre 60.39 et 249.79 mg L^{-1} (Moyenne: 147.31 mg L^{-1}) pour celles de l'oued Sikkak.

-les sulfates: dans le cas de la Tafna supérieure, les valeurs des teneurs en sulfates varient de 11.61 à 51.5 mg L^{-1} (Moyenne: 28.51 mg L^{-1}). Elles sont inférieures à celles des eaux de l'oued Sikkak. Ce dernier se caractérise par des valeurs fluctuent entre 14.21 et 114.67 mg L^{-1} (Moyenne: 51.75 mg L^{-1}).

-les nitrates: en ce qui concerne les nitrates, des teneurs comprises entre 9.59 à 32.72 mg L^{-1} avec une moyenne de 22.02 mg L^{-1} ont été enregistrées dans les eaux de surface de la haute Tafna. Les teneurs pour oued Sikkak sont comprises entre 0 et 47.5 mg L^{-1} (Moyenne: 25.5 mg L^{-1}).

-le sodium: dans les eaux de la haute Tafna, les concentrations en sodium (Figure 57) sont relativement plus faibles (6.61 à 55.88 mg L^{-1} , Moyenne: 22.02 mg L^{-1}). Pour les eaux de Sikkak, les teneurs en cet ion sont comprises entre 12.11 et 167.44 mg L^{-1} , avec une moyenne de 63.75 mg L^{-1} (Figure 58).

-le calcium et le magnésium: les concentrations en calcium et en magnésium sont légèrement plus élevées dans les eaux de l'oued Tafna que dans celles de Sikkak. Les valeurs moyennes dans les deux oueds sont respectivement de 45.55 et de 37.78 mg L^{-1} pour le calcium et de 35.54 et 34.8 mg L^{-1} pour le magnésium (Tableau 26).

A l'amont de l'oued Tafna, les concentrations maximales des anions (Cl^- : 97.6 mg L^{-1} ; HCO_3^- ; 263.5 mg L^{-1} ; SO_4^{2-} : 51.5 mg L^{-1} et Na^+ : 55.9 mg L^{-1}) sont enregistrées au point TW3 (Figure 57).

Dans l'oued Sikkak, CE, TDS, et les teneurs en Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} et NO_3^- augmentent de l'amont vers l'aval. Les concentrations maximales en Cl^- (256.9 mg L^{-1}), SO_4^{2-} (114.7 mg L^{-1}) et NO_3^- (47.5 mg L^{-1}) sont enregistrées au point d'échantillonnage SW7, situé non loin du barrage de Sikkak (Figure 58). Celles des bicarbonates ont été observées au point SW0 situé en amont de l'oued (Tableau 26).

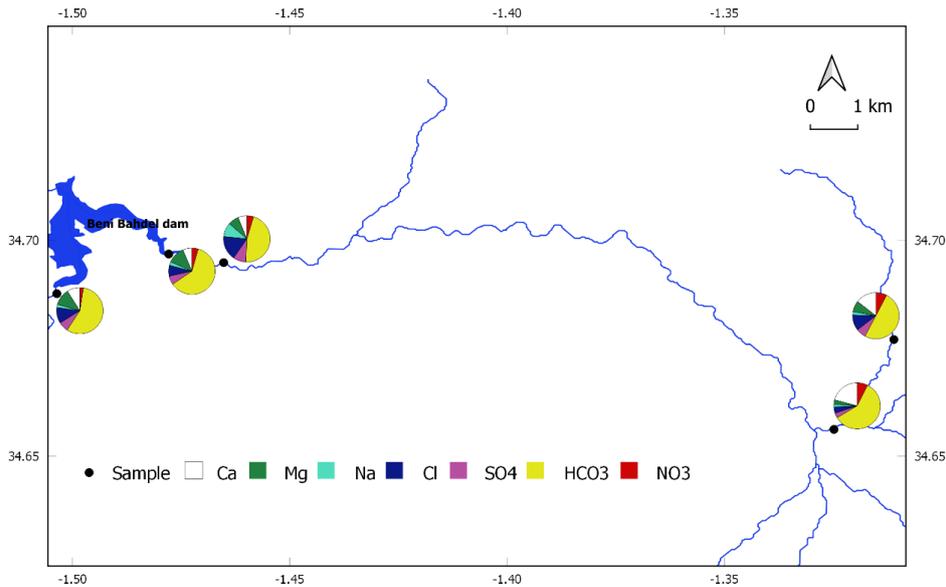


Figure 57- Variations spatiales des paramètres des eaux de l'Oued Tafna.

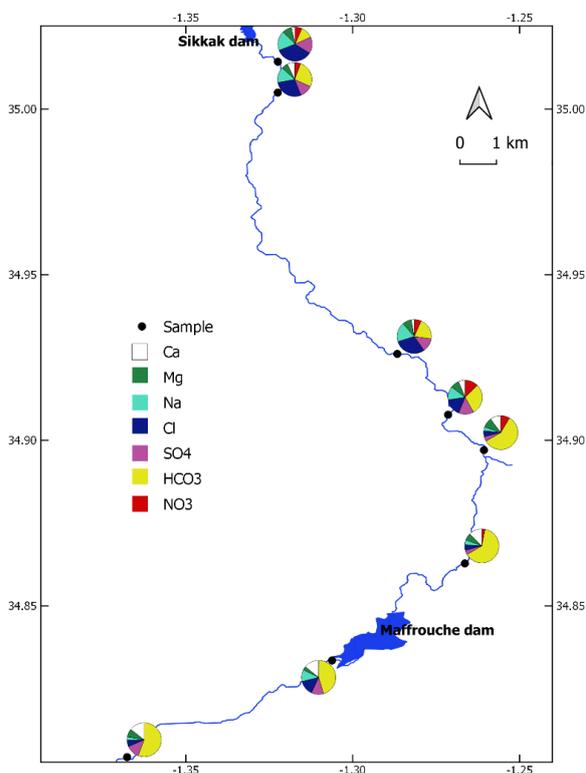


Figure 58- Variation spatiale des paramètres des eaux de l'Oued Sikkak.

III. FACIES HYDROGEOCHIMIQUE

A. Diagramme de Piper

Le report des données chimiques des échantillons d'eau des deux aquifères durant les deux périodes (humide et sèche) sur le diagramme de Piper montre que les faciès des eaux souterraines sont principalement de type bicarbonaté et chloruré calcique (HCO_3 (Cl) – Ca) (Figure 59).

1. Aquifère de Sebdo

Dans l'aquifère de Sebdo, les eaux souterraines, en saison humide sont de type (HCO_3) – Ca ($S_1, S_2, S_3, P_4, P_5, P_9$) et (Cl) – Ca ($P_1, P_3, P_7, P_{10}, P_{11}$), tandis qu'en saison sèche, toutes les eaux souterraines se regroupent dans la catégorie (HCO_3) – Ca, à l'exception des deux points P_4 et P_6 dont le faciès est (Cl) – Ca. Ces faciès indiquent que les eaux souterraines sont alcalino-terreuses normales avec une prédominance carbonatée et chlorurée (Figure 59).

2. Aquifère de Hennaya

En ce qui concerne, l'aquifère de Hennaya, toutes les eaux souterraines présentent, durant les deux périodes un faciès de type (Cl) – Ca, à l'exception des points P_{22} et P_{24} de la saison sèche dont le faciès est de type (Cl) – Na (Figure 59). Ces eaux souterraines sont alcalino-terreuses, avec de fortes fractions alcalines et prédominance de chlorures (Figure 59)

Sur la représentation graphique de Piper, nous observons que la dominance anionique est répartie entre les chlorures et nitrates pour les eaux souterraines de la plaine de Hennaya et les bicarbonates pour les eaux souterraines de Sebdo, alors que la dominance cationique est majoritairement calcique pour les eaux souterraines de Sebdo et pas de dominance cationique observée pour les eaux souterraines de l'aquifère de Hennaya (Figure 59).

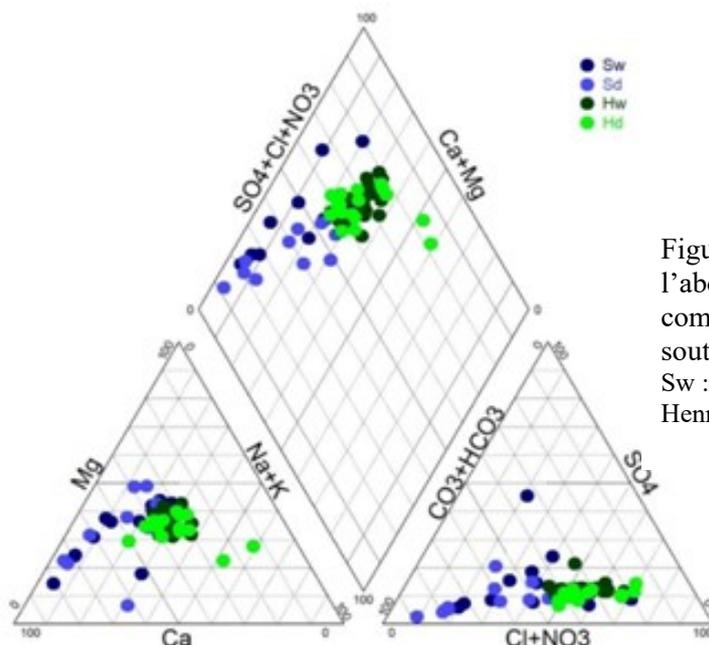


Figure 59- Diagramme de Piper montrant l'abondance relative des cations et anions communs dans les échantillons d'eau souterraine.

Sw : Sebdo wet, Sd: Sebdo dry, Hw: Hennaya wet, Hd: Hennaya dry)

B. Diagramme de Durov

Le report des données chimiques sur le diagramme de Durov (Figure 60) indique une répartition des points en trois groupes (1, 4 et 5) des eaux souterraines de Sebduo durant les deux campagnes d'analyse et cela conformément à la classification donnée par LLOYD & HEATHCOAT (1985).

40 % des points d'eau de l'aquifère de Sebduo sont localisés dans le champ (1) qui définit une dominance des ions HCO_3^- et Ca^{2+} , indiquant ainsi une recharge des eaux dans les calcaires et les grès. Alors 20 % seulement sont dans le champ (4) à dominance de Ca^{2+} et Cl^- , ce qui indique fréquemment de l'eau de recharge dans les dépôts gypsifères. Les 40 % restants des eaux échantillonnées du fossé de Sebduo sont classés avec la quasi-totalité des eaux prélevées dans l'aquifère de Hennaya (98%) appartenant au groupe 5. Ces eaux sont considérées comme type d'eau mitigée qui d'après cette même classification (LLOYD & HEATHCOAT, 1985), ne préconise aucune dominance anionique ou cationique. Notons que cette tendance peut être attribuée à la recharge récente d'eau douce dans les deux aquifères, présentant une dissolution ou un mélange simple de l'eau.

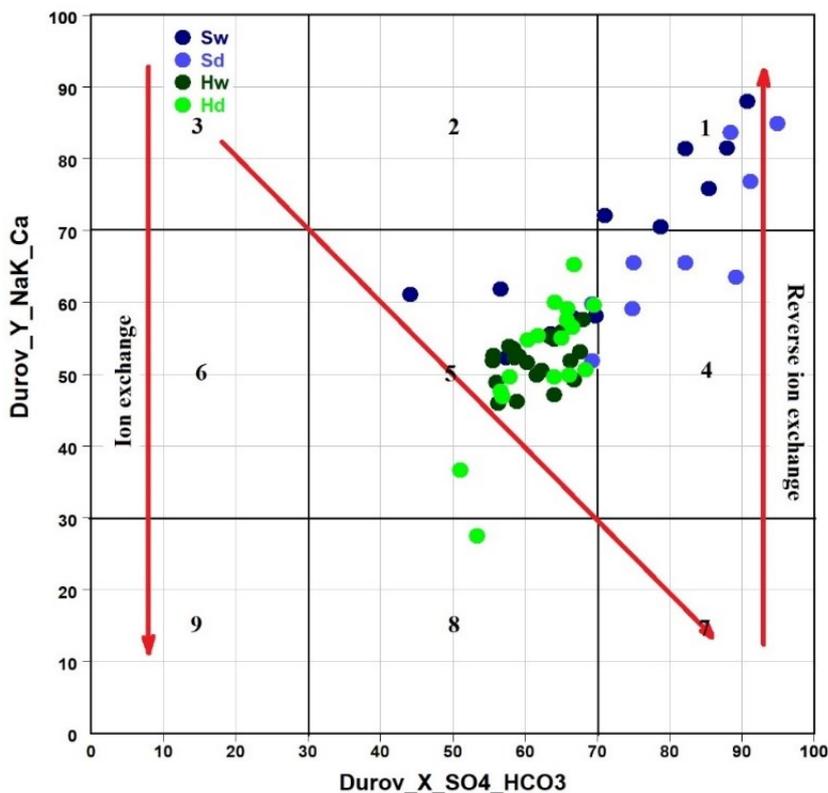


Figure 60- Diagramme de Durov.

Sw: Sebduo wet, Sd: Sebduo dry, Hw: Hennaya wet, Hd: Hennaya dry.

C. Diagramme de Chadha

Ce diagramme est utilisé ici pour classer les eaux souterraines des deux aquifères et identifier les processus hydrogéochimiques (Figure 61). Il s'agit en réalité d'une version quelque peu modifiée du diagramme de PIPER (1944) et de celui de DUROV (1948). Cette différence est observée par l'omission des triangles équilatéraux.

L'eau analysée des différents échantillons montre que les teneurs en alcalino-terreux (Ca^{2+} et Mg^{2+}) dépassent celles des métaux alcalins (Na^+ et K^+).

La figure 61 montre que globalement, tous les échantillons se regroupent dans les sous-groupes 1, 5, 6.

La majorité des points d'eau de l'aquifère de Sebdoou (87%), en saison humide et sèche appartient aux sous-groupes 1 et 5 (Figure 61). Cette appartenance indique une eau de dureté temporaire à faciès de type Ca-Mg- HCO_3 , caractérisée par une dominance des alcalino-terreux et des acides faibles (CO_3^{2-} et HCO_3^-). 13% des échantillons des eaux souterraines de Sebdoou (en saison humide) sont dans le sous-groupe 6, avec une eau de type Ca-Mg-Cl.

Sur ce diagramme (Figure 61), la quasi-totalité des eaux souterraines échantillonnées dans la plaine de Hennaya (94% des échantillons) durant les deux périodes (humide et sèche) sont classées dans le sous-groupe 6, avec une eau de type Ca-Mg-Cl, caractérisée par la dominance des alcalino-terreux (Ca^{2+} et Mg^{2+}) et les acides forts (SO_4^{2-} et Cl). Cette eau à une dureté permanente et ne dépose pas de carbonate de sodium résiduel lors de l'irrigation (CHADHA, 1999). Seuls les deux points d'eau P₂₂ et P₂₄, en période sèche sont dans les sous-groupes 4 et 7, montrant une dominance des métaux alcalins ainsi que les acides forts. Leur position représente une eau de type Na-Cl, pouvant être à l'origine des problèmes de salinité pour la consommation et l'irrigation.

En somme, la représentation des résultats des eaux souterraines des deux aquifères durant les deux périodes sur le diagramme de Chadha a donné des résultats similaires à ceux schématisés sur les diagrammes de Piper et de Durov.

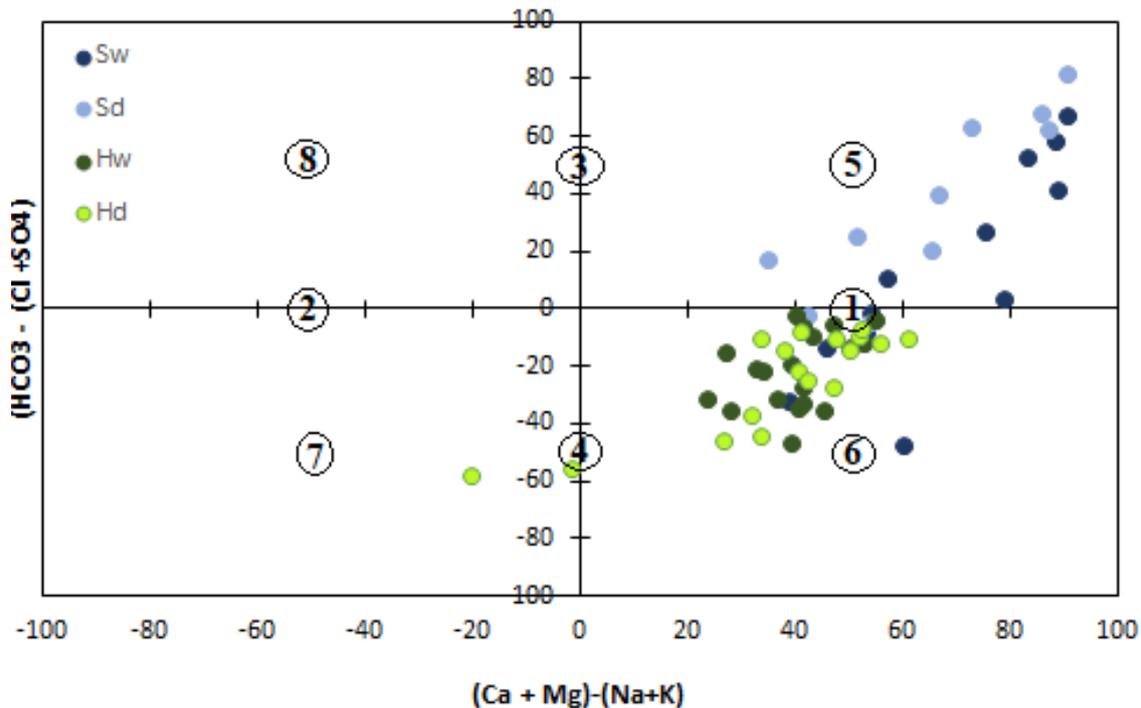


Figure 61- Diagramme de Chadha pour les eaux souterraines.
Sw: Sebdoou wet, Sd: Sebdoou dry, Hw: Hennaya wet, Hd: Hennaya dry

IV. ORIGINE DE LA MINERALISATION DES EAUX SOUTERRAINES

A. Analyse statistique

1. Corrélations entre éléments chimiques

Une matrice de corrélation de Pearson des principaux paramètres hydrochimiques des échantillons d'eau souterraine a été calculée (Tableaux 27 et 28). Cette matrice a été utilisée pour déterminer les différentes interrelations entre les paramètres des eaux souterraines et de surface, dans le but d'interpréter leurs diverses sources (AHAMAD & *al.*, 2018; AHMED & *al.*, 2018).

Le phosphore et les ions NO_3^- , SO_4^{2-} et Cl^- sont actuellement connus comme étant les principaux dérivés des fertilisants agricoles, des excréments d'animaux, des eaux usées domestiques et industrielles. Ces paramètres étant principalement liés aux variations de la conductivité et de la TDS peuvent indiquer une influence de l'activité humaine sur la chimie de l'eau (GAILARDET & *al.*, 1999; HAN & LIU, 2004; JALALI, 2009).

Dans les eaux souterraines, les nitrates peuvent avoir différentes origines: naturelle (formations géologiques riches en azote) ou anthropique (contamination des eaux souterraines par des déchets riches en azote: apports d'azote organique, engrais azotés inorganiques)(HAMMER, 1986; BARNES & *al.*, 1992; PATEL & *al.*, 2016; REZAEI & *al.*, 2017).

Dans le cas de l'aquifère de Sebdu, la matrice de corrélation a montré que la TDS est fortement ($> +0.7$) à moyennement ($+0.5 < r < 0.7$) corrélée, avec CE , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , HCO_3^- et Ca^{2+} indiquant des contributions significatives de ces derniers à la TDS (Tableau 27). Des corrélations positives fortes ont été observées aussi, entre les paires (Na^+ - SO_4^{2-}), (Mg^{2+} - SO_4^{2-}), (Na^+ - Cl^-), (Na^+ - PO_4^{3-}), (Mg^{2+} - HCO_3^-) et (Ca^{2+} - HCO_3^-). Une corrélation négative importante entre Ca^{2+} et K^+ ($r = -0.9$) durant la saison sèche a été mise en évidence (Tableau 27). La forte corrélation entre les ions Mg^{2+} et Ca^{2+} avec HCO_3^- (Tableau 27) serait liée à la dissolution des minéraux carbonatés, processus important contrôlant le chimisme des eaux souterraines de Sebdu. Celles entre Na^+ et Cl^- pourrait indiquer une dissolution de NaCl et/ou son introduction par lessivage lors de la recharge.

Par ailleurs, les corrélations entre les teneurs en PO_4^{3-} et celles en SO_4^{2-} ($r = 0.81$), en Mg ($r = 0.815$), en Na ($r = 0.807$), en HCO_3^- ($r = 0.774$) et en Cl^- ($r = 0.603$) seraient probablement liées à des sources anthropiques (Déversement des eaux usées sans traitement préalable et utilisation des engrais).

Pour l'aquifère de Hennaya, il a été constaté l'existence de corrélations positives significatives de la TDS avec CE , Cl^- , Na^+ , Mg^{2+} , SO_4^{2-} et NO_3^- (Tableau 28). D'autres corrélations positives significatives ont été observées entre les paires (Na^+ - Cl^- : saison humide $r = 0.814$; saison sèche $r = 0.949$), et (Na^+ - SO_4^{2-} : saison humide $r = 0.570$; saison sèche $r = 0.886$) ; (Mg^{2+} - Cl^- : saison humide $r = 0.638$; saison sèche $r = 0.722$), et (Mg^{2+} - SO_4^{2-} : saison humide $r = 0.465$; saison sèche $r = 0.561$ à l'encontre des bicarbonates qui sont faiblement à fortement et négativement corrélés avec la plupart des ions durant les deux saisons (Tableau 28).

Variables	T	pH	CE	TDS	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃	PO ₄
Wet season													
T	1												
pH	-0.327	1											
CE	0.441	-0.29	1										
TDS	0.448	-0.28	1.000	1									
Ca	0.662	-0.559	0.549	0.548	1								
Mg	0.383	-0.230	0.979	0.979	0.470	1							
Na	0.230	-0.029	0.896	0.897	0.303	0.949	1						
K	-0.036	0.021	0.499	0.494	0.162	0.505	0.545	1					
HCO ₃	0.389	-0.489	0.719	0.717	0.660	0.742	0.646	0.154	1				
Cl	0.473	0.040	0.863	0.866	0.315	0.848	0.833	0.668	0.396	1			
SO ₄	0.119	-0.004	0.824	0.823	0.295	0.898	0.970	0.456	0.658	0.694	1		
NO ₃	0.167	-0.461	0.393	0.391	0.426	0.310	0.163	0.031	0.047	0.170	0.173	1	
PO ₄	0.022	-0.068	0.758	0.754	0.291	0.815	0.807	0.530	0.774	0.603	0.810	-0.084	1
Dry season													
T	1												
pH	-0.410	1											
CE	-0.078	-0.508	1										
TDS	-0.082	-0.510	1.000	1									
Ca	-0.177	-0.598	0.407	0.419	1								
Mg	-0.043	-0.431	0.921	0.917	0.203	1							
Na	-0.294	-0.092	0.831	0.826	-0.016	0.766	1						
K	0.142	0.595	-0.399	-0.407	-0.906	-0.136	-0.082	1					
HCO ₃	0.041	-0.850	0.708	0.715	0.786	0.648	0.261	-0.675	1				
Cl	-0.349	-0.063	0.859	0.857	0.130	0.762	0.951	-0.151	0.329	1			
SO ₄	-0.233	-0.138	0.782	0.782	0.147	0.871	0.737	-0.080	0.459	0.706	1		
NO ₃	0.532	-0.275	0.031	0.018	-0.139	0.078	-0.065	-0.097	-0.032	-0.232	-0.022	1	
PO ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1

Tableau 27- Matrice de corrélation entre paramètres physicochimiques des eaux de l'aquifère de Sebdu.

Variables	T	pH	CE	TDS	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃	PO ₄
Wet season													
T	1												
pH	-0.189	1											
CE	0.185	0.022	1										
TDS	0.172	-0.044	0.983	1									
Ca	0.287	-0.055	0.072	0.077	1								
Mg	0.363	0.066	0.287	0.251	0.606	1							
Na	0.415	-0.045	0.455	0.462	0.518	0.446	1						
K	-0.339	-0.262	0.130	0.223	0.194	0.083	0.135	1					
HCO ₃	-0.493	0.401	0.015	-0.004	-0.303	-0.376	-0.484	-0.213	1				
Cl	0.292	-0.057	0.331	0.358	0.805	0.638	0.814	0.358	-0.445	1			
SO ₄	0.315	0.014	0.493	0.495	0.166	0.465	0.570	0.136	-0.361	0.387	1		
NO ₃	0.326	-0.050	0.612	0.601	0.417	0.588	0.499	0.351	-0.463	0.477	0.723	1	
PO ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
Dry season													
T	1												
pH	-0.273	1											
CE	0.075	0.289	1										
TDS	0.126	0.241	0.940	1									
Ca	0.148	-0.203	-0.197	-0.227	1								
Mg	0.420	0.150	0.721	0.730	-0.145	1							
Na	0.227	0.308	0.917	0.868	-0.338	0.698	1						
K	-0.161	0.151	0.096	0.024	0.038	-0.067	0.109	1					
HCO ₃	-0.436	-0.493	-0.108	-0.041	0.110	-0.170	-0.363	-0.139	1				
Cl	0.263	0.352	0.882	0.883	-0.240	0.722	0.949	0.001	-0.412	1			
SO ₄	0.381	0.171	0.726	0.648	-0.230	0.561	0.886	0.052	-0.584	0.857	1		
NO ₃	0.472	0.302	-0.023	-0.086	-0.034	0.081	0.220	0.159	-0.861	0.197	0.486	1	
PO ₄	-0.387	0.084	-0.149	-0.212	-0.141	-0.164	-0.175	0.301	0.210	-0.221	-0.206	-0.199	1

Tableau 28- Matrice de corrélation entre paramètres physicochimiques des eaux de l'aquifère de Hennaya.

La corrélation importante positive entre NO_3^- et SO_4^{2-} durant la saison humide montre que ces deux ions proviendraient, entre autres, de l'utilisation des engrais (APPELO & *al.*, 2005 ; SINGH & *al.*, 2011; KRAIEM & *al.*, 2014; AHMED & *al.*, 2018; HAMDAN & *al.*, 2018; ISLAM & *al.*, 2018) étant donné que l'activité principale de la plaine de Hennaya est l'agriculture et que des quantités considérables de produits agrochimiques (NPK, engrais azotés, chlorure de potassium,...) y sont utilisées (YEBDRI & *al.*, 2021). De même, quoique faibles, les corrélations de NO_3^- avec K^+ et avec Cl^- indiquent que ces ions auraient la même origine et seraient issus des fertilisants employés.

2. Affinité par ACP et CAH

En hydrochimie, les principaux composants peuvent être interprétés comme étant des processus géochimiques. Le premier composant principal (nommé CP1) avec la valeur propre la plus élevée et la variance maximale représente généralement la combinaison de processus la plus importante contrôlant le chimisme de l'eau (YIDANA, 2010; FENG & *al.*, 2020). La valeur de la composante principale de l'échantillon est liée à la force du processus géochimique représenté par la composante principale. Elle peut être interprétée comme une mesure de l'impact chimique du processus sur les eaux souterraines (FENG & *al.*, 2020). Or, la classification ascendante hiérarchique (CAH) donne des résultats très similaires à ceux de l'ACP. Les paramètres appartenant au même groupe sont susceptibles de provenir d'une même source (BHUIYAN & *al.*, 2016; AHMED & *al.*, 2018).

Ces analyses sont jumelées et utilisées ici, pour classer les paramètres chimiques et les points d'eaux en fonction de leurs similitudes. Les analyses en groupement ont été utilisées pour combiner les variables (Températures, pH, CE, TDS, éléments majeurs, nitrates et phosphates) et les individus (échantillons d'eau souterraine) en classes des deux aquifères.

2.1. Pour l'aquifère de Sebdou

La variance totale expliquée par chaque facteur (CP) et la matrice de chargement des facteurs sont présentées dans le tableau 29.

Trois facteurs avec des valeurs propres supérieures à 1, représentant 83% (saison humide) et 88 % (saison sèche) de l'inertie totale ont été extraites (Tableau 29). Ils sont:

-le facteur CP1 exprimé par des pourcentages de 57.74 et 51.74 % respectivement aux saisons humide et sèche est essentiellement bien corrélé avec les variables conductivité, TDS, magnésium, sodium, sulfate, chlorure, bicarbonate et phosphate en saison humide. Il s'agit du pôle des minéralisations issues, est en bonne partie de l'interaction eau-roche;

-le facteur CP2 exprime 16.92 % (saison humide) et 22.46 % (saison sèche) de l'inertie totale du nuage. Ce dernier est caractérisé par le pH, calcium et potassium (saison humide);

-le facteur CP3 n'exprimant que 8.4% et 14.54% de la variance totale est corrélée avec les nitrates et la température.

Pour observer la distribution des variables et individus, les composantes principales (CP), les plus intéressantes ont été considérées.

Variables	Wet season			Dry season		
	CP1	CP 2	CP 3	CP 1	CP 2	CP 3
T	0.184	0.329	0.004	0.025	0.169	0.628
pH	0.077	0.583	0.020	0.303	0.525	0.058
CE	0.964	0.002	0.010	0.969	0.006	0.012
TDS	0.963	0.002	0.011	0.972	0.005	0.009
Ca ²⁺	0.333	0.445	0.007	0.263	0.458	0.237
Mg ²⁺	0.974	0.004	0.000	0.822	0.039	0.068
Na ⁺	0.863	0.084	0.000	0.617	0.279	0.006
K ⁺	0.302	0.162	0.106	0.240	0.458	0.136
HCO ₃ ⁻	0.607	0.056	0.328	0.616	0.290	0.007
Cl ⁻	0.717	0.048	0.112	0.666	0.242	0.007
SO ₄ ²⁻	0.765	0.089	0.006	0.631	0.135	0.010
NO ₃ ⁻	0.090	0.283	0.353	0.001	0.091	0.566
PO ₄ ³⁻	0.669	0.115	0.133	0.000	0.000	0.000
Valeur propre	7.507	2.201	1.092	6.126	2.695	1.745
Variabilité (%)	57.749	16.928	8.400	51.047	22.461	14.542
(%) cumulé	57.749	74.677	83.077	51.047	73.507	88.049

Tableau 29- Chargements factoriels des valeurs propres extraits dans l'ACP.

2.1.1. Projection des variables sur plan factoriel CP1-CP2 et CAH

Les figures 62A et 63A montrent la distribution factorielle des paramètres chimiques des eaux de l'aquifère de Sebdo. La projection des variables sur le plan factoriel CP1-CP2 exprime 74.67 % de l'information pour la saison humide et 73.5 % pour la saison sèche. Cette même projection des variables est représentée sur les dendrogrammes hiérarchiques, sur les figures 62B et 63B. Dans le même aquifère, et durant la saison humide, tous les paramètres physiques et chimiques sont par rapport à l'axe factoriel PC1 classés (Figure 62A) en deux groupes, à l'exception du pH. Le premier, regroupe les variables à corrélation forte et positive. Il s'agit de la conductivité électrique, la TDS et les ions responsables de la minéralisation des eaux souterraines de (Mg²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻ et PO₄³⁻). Le second, regroupe la température et les ions calcium et nitrates corrélés négativement avec l'axe CP1, indiqueraient la présence probable d'une source anthropique agricole (Figures 62A et 62B). L'axe factoriel CP2 et la CAH isolent le dernier groupe qui ne contient que le pH.

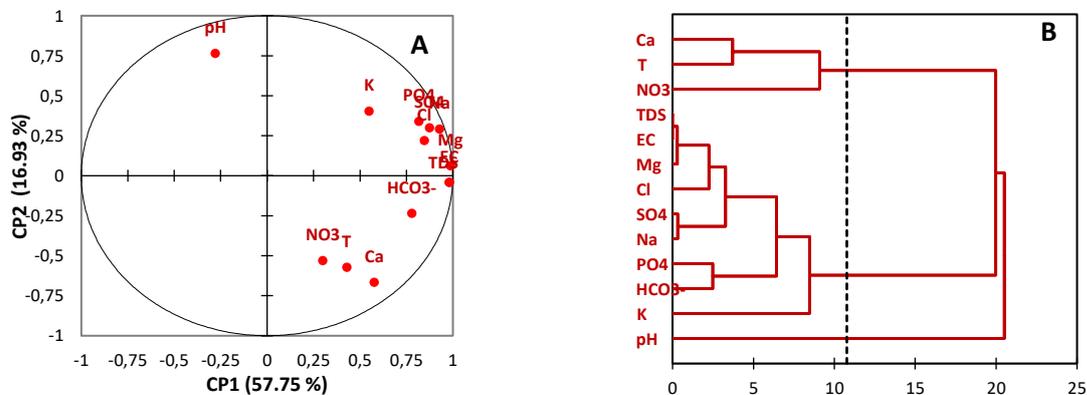


Figure 62- Diagrammes ACP et CAH des variables des eaux souterraines de l'aquifère de Sebdo en saison humide. A. Projections des variables sur axes factoriels CP1-CP2; B. Dendrogrammes des classes des variables.

En saison sèche, le plan factoriel CP1-CP2 et la CAH regroupent les éléments chimiques en deux groupes. Le premier, comporte la CE, la TDS et les ions Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^- , Na^+ , HCO_3^- et Ca^{2+} (Figures 63A et 63B). Une fois projeté sur l'axe CP1 (57.75%), ce groupe représente le pôle de la minéralisation. Cet assemblage confirme l'hypothèse de l'interaction entre l'eau et les alluvions plio-quadernaires de cet aquifère. Quant au second, il renferme le pH, T et les ions K^+ , PO_4^{3-} et NO_3^- , éléments à charges factoriels faibles à moyennes. Projeté sur CP2 (22.46%), le groupe se retrouve isolé dans la même classe de CAH (Figures 63A et 63B). Ces éléments seraient issus de l'activité anthropique principalement agricole dans la région de Sebdu.

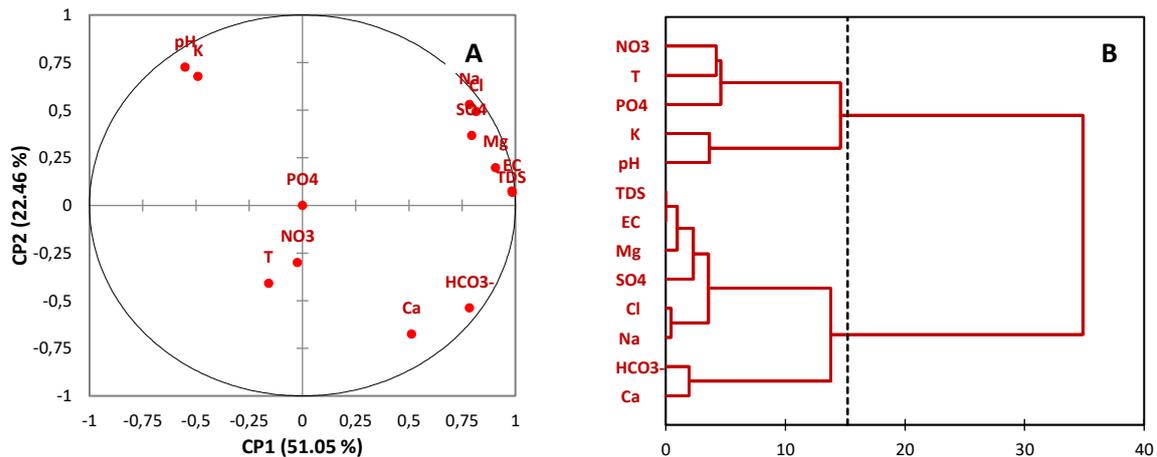


Figure 63- Diagrammes ACP et CAH des variables des eaux souterraines de l'aquifère de Sebdu en saison sèche. A. Projections des variables sur axes factoriels CP1-CP2; B. Dendrogrammes des classes des variables.

2.1.2. Projection des individus sur plan factoriel CP1-CP2 et CAH

La projection des individus sur les plans factoriels CP1-CP2 (Figure 64) présente pratiquement les mêmes groupes d'individus que sur les dendrogrammes de la CAH (Figure 65), à savoir:

-groupe 1: composé de points d'eau isolés à très faibles conductivités. Il s'agit des points P3 ($318 \mu S cm^{-1}$) échantillonné durant la saison humide et P2 ($143.6 \mu S cm^{-1}$) (Figure 64A et 65A) de la saison sèche (Figure 64B et 65B).

-groupe 2: regroupant de points d'eau à conductivité électrique faible ($<700 \mu S cm^{-1}$). Ledit groupe concerne les points P5, P1, P10, P6, S3, S2, P9, S1, et P4 de la saison humide et P8, P1, S3, S1, et S2 de la saison sèche. Ces points d'eaux ont de faibles concentrations en Mg, Na, Cl et SO_4 (Tableau 30).

-groupe 3: constitué des échantillons d'eau à forte conductivité ($>700 \mu S cm^{-1}$). Ce groupe inclu les points P11 et P7 de la saison humide et P6, P5, P3 et P4 de la saison sèche. Ces points d'eaux ont de concentrations élevées en Mg, Na, Cl et SO_4 (Tableau 30).

La localisation des points d'eau échantillonnés de l'aquifère de Sebdu (voir figure 48) et leur classification sur ACP et CAH confirme que la minéralisation des eaux souterraines dépend du sens d'écoulement (voir figure 51).

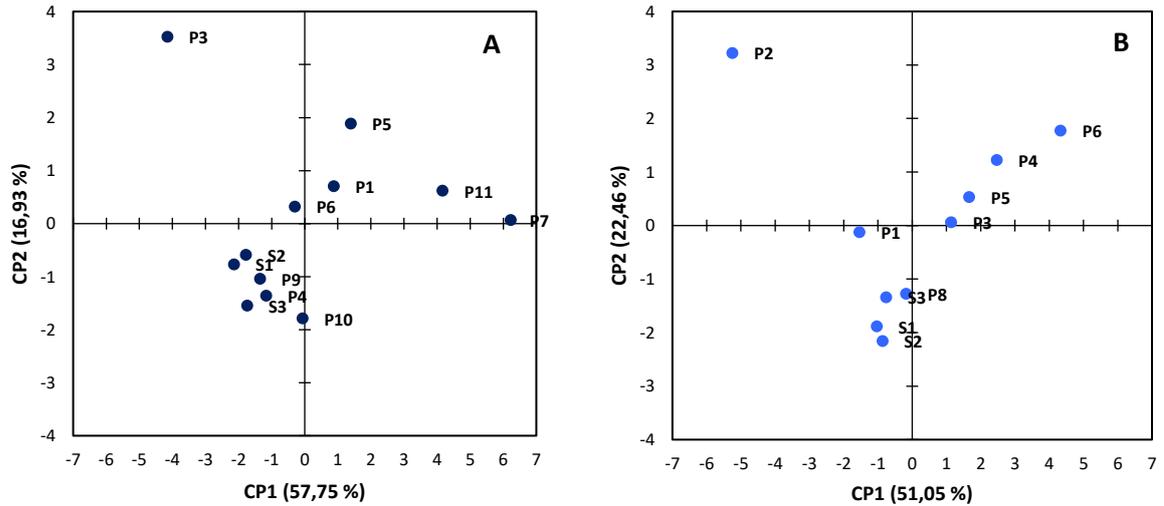


Figure 64-Projections des individus des eaux souterraines de l'aquifère de Sebdo sur les axes factoriels CP1-CP2. A. Saison humide, B. Saison sèche.

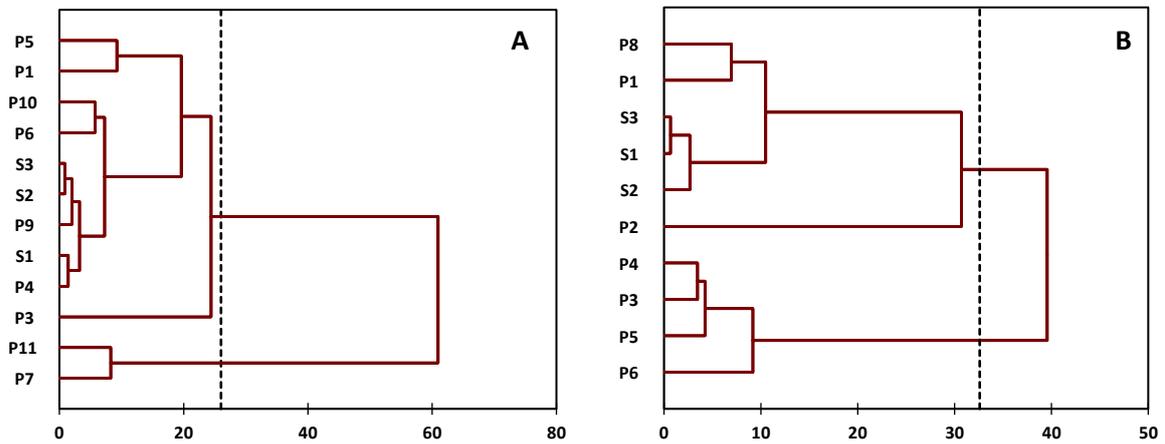


Figure 65- Dendrogrammes des classes hiérarchiques des individus des eaux souterraines de l'aquifère de Sebdo. A. Saison humide, B. Saison sèche.

Variables	Cluster (Wet season)			Cluster (Dry season)		
	1	2	3	1	2	3
T	16.10	18.02	18.65	16.30	18.04	16.95
pH	7.78	6.79	6.83	8.980	7.08	7.20
CE	318.00	700.55	1258.00	143.60	572.20	935.50
TDS	126.00	280.11	503.50	59.20	230.60	374.75
Ca	25.93	75.29	94.00	32.31	80.14	75.15
Mg	5.31	27.82	77.04	2.01	26.95	52.80
Na	16.24	19.87	80.89	16.01	13.39	52.76
K	1.39	1.77	3.00	4.45	1.51	1.79
HCO ₃ ⁻	46.66	224.32	397.57	75.00	339.16	363.16
Cl	16.70	66.30	176.25	22.02	24.32	122.70
SO ₄	49.66	32.15	165.25	9.81	18.24	79.11
NO ₃	0.48	59.84	69.62	21.11	42.17	31.73
PO ₄	0	0.05	0.48	0	0	0

Tableau 30- Composition ionique de chaque classe (barycentre des classes individus).

2.2. Pour l'aquifère de Hennaya

Le tableau 31 décrit la variance totale expliquée par chaque facteur (CP) et la matrice de chargement des facteurs. Ainsi, quatre facteurs avec leurs valeurs propres (>1), représentant 79.223 % (saison humide) et 82.2 % (saison sèche) de l'inertie totale ont été extraits. Il s'agit de:

-facteur CP1: exprimant 41.05 et 42.86 % respectivement aux saisons humide et sèche. Il est essentiellement corrélé avec T, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, HCO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻ et NO₃⁻ en saison humide et avec CE, TDS, Mg²⁺, Na⁺, Cl⁻ et SO₄²⁻ en saison sèche;

-facteur CP2: exprimant 16.1 % (saison humide) et 17.54 % (saison sèche) de l'inertie totale. Il faut souligner qu'en saison humide, il est corrélé avec CE et TDS, alors qu'en saison sèche, il est caractérisé par HCO₃⁻ et NO₃⁻;

-facteur CP3: représentant 11.82 % (saison humide) et 14.26% (saison sèche) de la variance totale, il est corrélé respectivement avec K⁺ et avec T, pH et PO₄³⁻.

-facteur CP4: ne représentant que 10.245 % de la variance totale en saison humide, il est corrélé uniquement avec le pH. 7.543 % de la variance en saison sèche n'est corrélé qu'avec le K⁺.

Variables	Wet season				Dry season			
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP1	CP2	CP3	CP4
T	0.252	0.123	0.206	0.241	0.106	0.297	0.364	0.027
pH	0.040	0.022	0.340	0.393	0.119	0.007	0.462	0.103
CE	0.366	0.539	0.013	0.003	0.780	0.162	0.000	0.006
TDS	0.379	0.522	0.001	0.008	0.735	0.198	0.012	0.000
Ca ²⁺	0.397	0.224	0.010	0.181	0.150	0.001	0.198	0.174
Mg ²⁺	0.536	0.051	0.023	0.030	0.614	0.020	0.063	0.008
Na ⁺	0.663	0.011	0.014	0.011	0.937	0.018	0.003	0.003
K ⁺	0.109	0.035	0.720	0.021	0.001	0.000	0.292	0.624
HCO ₃ ⁻	0.319	0.249	0.026	0.174	0.221	0.635	0.087	0.000
Cl ⁻	0.673	0.074	0.016	0.144	0.929	0.014	0.000	0.001
SO ₄ ²⁻	0.508	0.046	0.049	0.020	0.801	0.029	0.000	0.006
NO ₃ ⁻	0.686	0.036	0.000	0.003	0.094	0.768	0.047	0.003
PO ₄ ³⁻	0.000	0.000	0.000	0.000	0.086	0.131	0.326	0.025
Valeur propre	4.927	1.932	1.419	1.229	5.572	2.281	1.854	0.981
Variabilité (%)	41.056	16.100	11.823	10.245	42.861	17.544	14.260	7.543
% cumulé	41.056	57.156	68.979	79.223	42.861	60.405	74.665	82.208

Tableau 31- Chargements factoriels des valeurs propres extraites dans l'ACP.

2.2.1. Projection des variables sur le plan factoriel CP1-CP2 et CAH

La projection des paramètres chimiques des eaux de l'aquifère de Hennaya exprime 57.15 % (saison humide) (Figure 66A) et 60.4 % (saison sèche) (Figure 67A) de l'information sur le plan factoriel CP1-CP2. Les dendrogrammes hiérarchiques des périodes sont représentés sur les figures 66B et 67B.

Concernant la saison humide, tous les paramètres physiques et chimiques, à l'exception du pH et des ions HCO₃⁻ sont groupés par rapport à l'axe factoriel PC1 (Figure 66A) et peuvent être partagés en deux groupes. Le premier, regroupe la conductivité et la TDS, tandis que le second, regroupe tous les paramètres (K⁺, SO₄²⁻, NO₃⁻, Na⁺, Cl⁻, Mg²⁺,

Ca²⁺ et T) responsables de la minéralisation des eaux souterraines de l'aquifère en question. De par ces rassemblements, la probabilité de l'origine anthropique des ions se confirme de plus en plus dans les eaux de cette plaine (Figure 66B). L'axe factoriel CP2 et la CAH isolent le dernier groupe qui ne contient que le pH et les bicarbonates.

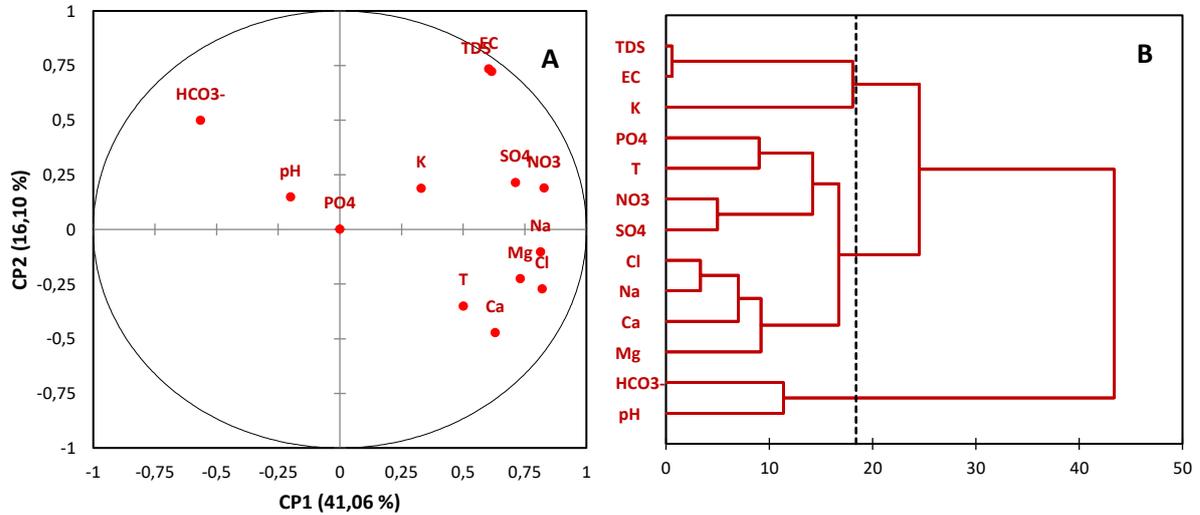


Figure 66- Diagrammes ACP et CHA des variables des eaux souterraines de l'aquifère de Hennaya, en saison humide. A. Projections des variables sur axes factoriels CP1-CP2; B. Dendrogrammes des classes des variables.

Le plan factoriel CP1-CP2 et la CAH (Figure 67) font apparaître trois groupes d'éléments chimiques bien distincts. Le premier groupe inclut les paramètres CE, TDS, Na⁺, Cl⁻, SO₄²⁻ et Mg²⁺ qui sont tous projetés vers le pôle de minéralisation. Par rapport au même axe factoriel, le deuxième groupe regroupe les nitrates et la température (Figure 67A) et le troisième les ions Ca²⁺, HCO₃⁻, pH, K⁺ et PO₄³⁻ (Figure 67B). Ces groupes infirment qu'en période de basse eau, la charge polluante domine la minéralisation des eaux souterraines de cet aquifère.

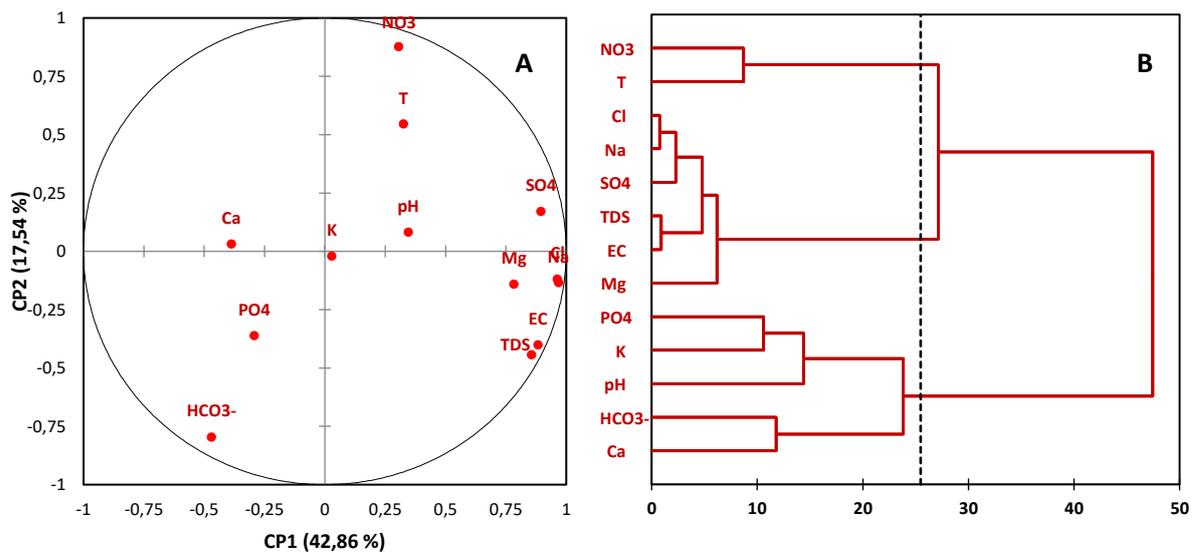


Figure 67- Diagrammes ACP et CHA des variables des eaux souterraines de l'aquifère de Hennaya, en saison sèche. A. Projections des variables sur axes factoriels CP1-CP2; B. Dendrogrammes des classes des variables.

2.2.2. Projection des individus sur plan factoriel CP1-CP2 et CAH

Pour l'aquifère alluvial de Hennaya, similairement à la projection des individus sur les plans factoriels CP1-CP2 (Figure 68), les dendrogrammes de la CAH (Figure 69) donnent les groupes d'individus suivants:

-groupe 1: il inclut les échantillons d'eau à salinité relativement faible ($<1400 \mu\text{S cm}^{-1}$). Ce sont les P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P9 et P10 de la saison humide et P2, P3, P9, P12, P13, P17, P18, P22 et P25 et P4 de la saison sèche. Les points suscités, localisés dans les parties septentrionale et centrale de la plaine ont les concentrations les plus faibles en Mg, Na, Cl, SO_4 et NO_3 (Tableau 32).

-groupe 2: il est formé de points d'eau à salinité modérée ($\approx 1450 \mu\text{S cm}^{-1}$). Les eaux souterraines concernées sont celles des puits P8, P12, P13, P14, P15, P16, P17 et des sources S1 et S2 de la saison humide et les puits P20, P21, P23, P24, S1, et S2 de la saison sèche. Ces eaux sont localisées dans le Nord-Ouest de la plaine de Hennaya.

-groupe 3: il regroupe les deux points d'eau isolés à forte salinité. Il s'agit des puits P11 en saison humide (Figures 68A et 69A) et P19 en saison sèche (Figures 68B et 69B) où les valeurs de CE étaient respectivement de 2130 et $3310 \mu\text{S cm}^{-1}$. Ces deux points sont caractérisés par des teneurs très élevés en Na, Cl et SO_4 (Tableau 32).

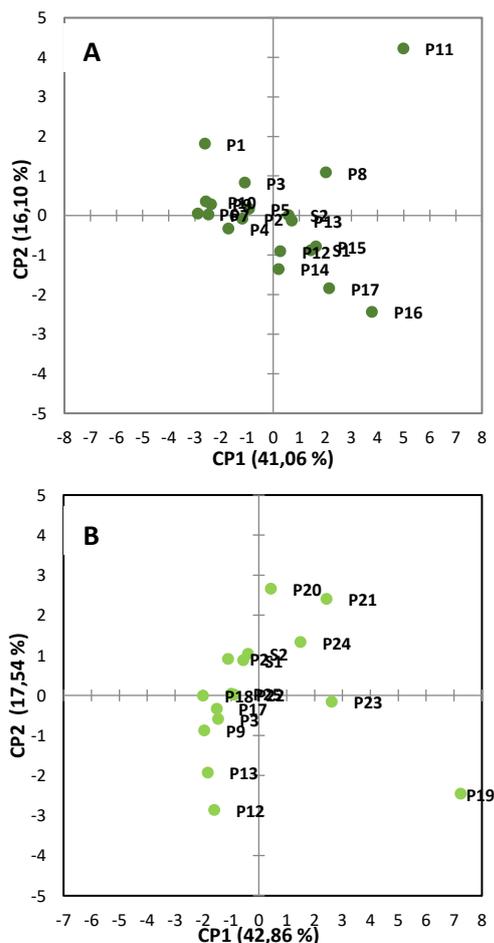


Figure 68- Projections des individus des eaux souterraines de l'aquifère de Hennaya, sur les axes factoriels CP1-CP2. A. Saison humide, B. Saison sèche.

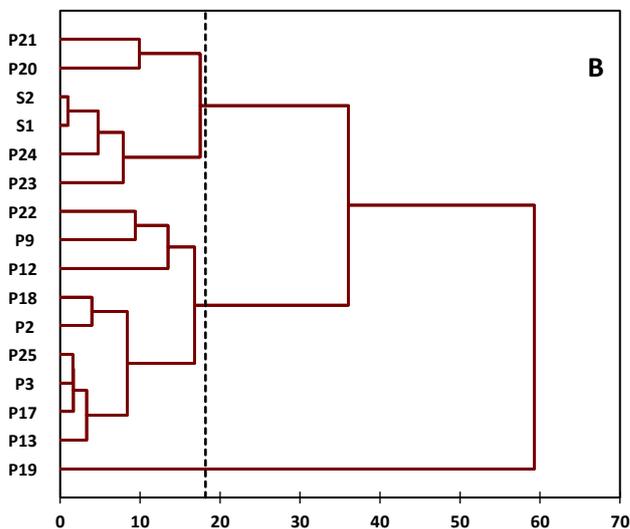
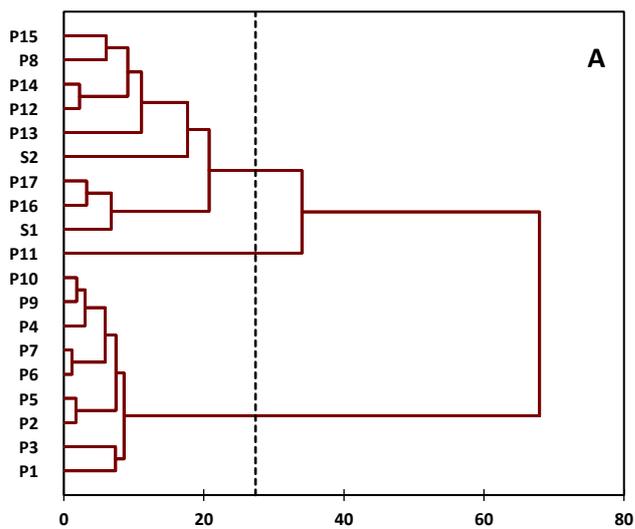


Figure 69- Dendrogrammes des classes des individus des eaux souterraines de l'aquifère de Hennaya. A. Saison humide, B. Saison sèche.

Variables	Cluster (Wet season)			Cluster (Dry season)		
	1	2	3	1	2	3
T	20.90	22.56	21.70	18.92	20.20	20
pH	6.372	6.210	6.41	7.32	7.70	7.67
CE	1427.11	1468.89	2130.00	1437.77	1558.50	3310.00
TDS	560.00	588.00	840.00	607.66	625.50	1300.00
Ca ²⁺	127.50	158.67	136.16	156.39	136.82	113.40
Mg ²⁺	84.32	98.21	104.90	81.02	77.44	137.15
Na ⁺	119.78	162.50	194.25	115.40	237.81	551.49
K ⁺	3.46	6.53	10.45	3.41	4.45	5.94
HCO ₃ ⁻	435.53	358.37	398.02	466.31	290.36	414.80
Cl ⁻	244.54	360.38	425.76	293.62	489.83	879.10
SO ₄ ²⁻	106.34	129.57	178.77	92.94	149.11	208.83
NO ₃ ⁻	129.90	164.63	217.26	117.87	213.74	118.76
PO ₄ ³⁻	0	0	0	0.12	0	0

Tableau 32- Composition ionique de chaque classe (barycentre des classes individus).

B. Modélisation géochimique

Les valeurs des indices de saturation (IS) par rapport aux minéraux carbonatés (calcite et dolomite) et évaporitiques (gypse, anhydrite et halite) indiquent que:

-les eaux souterraines de l'aquifère de Sebdo, sont légèrement sous-saturées à équilibrées, en saison humide, à globalement équilibrées en saison sèche, à l'exception des puits P2 et P6. Ces derniers sont témoins d'une légère sursaturation (Figure 70).

De même, en saison humide, cet état de sous-saturation en calcite et dolomite est observé dans les eaux souterraines de l'aquifère de Hennaya à l'exception des eaux de P4 qui indique un état d'équilibre. En saison sèche, les eaux souterraines de la plaine en question sont en général légèrement sursaturées surtout par rapport à la dolomite (Figure 71).

En ce qui concerne, les minéraux évaporitiques, les valeurs de IS déterminées pour la totalité des points d'eau indiquent une sous-saturation des eaux souterraines en anhydrite, en gypse et en halite lors des deux périodes (Figures 70 et 71).

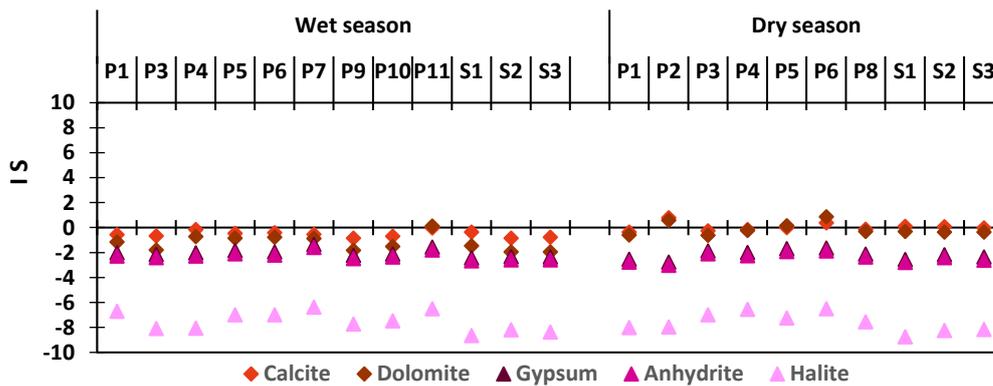


Figure 70- Evolution des indices de saturation dans l'aquifère de Sebdo.

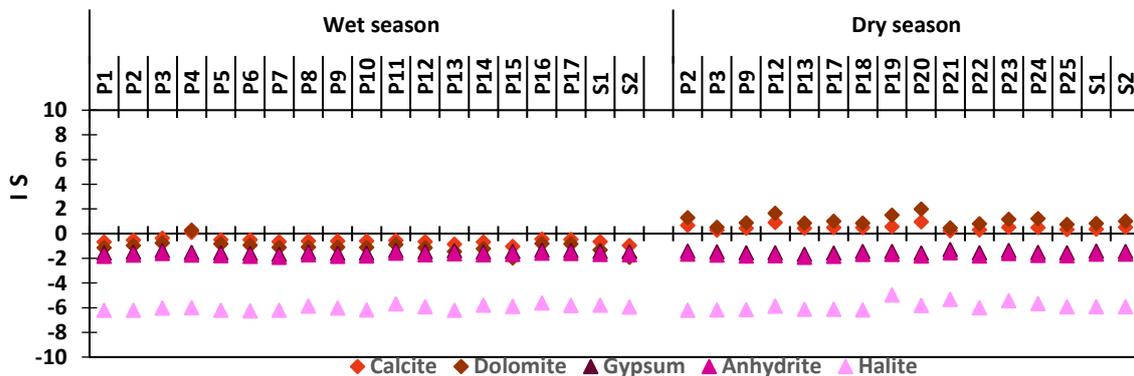


Figure 71- Evolution des indices de saturation dans l'aquifère de Hennaya.

La figure 72 indique en saison humide, une tendance à la dissolution de la calcite et de la dolomite dans les eaux souterraines. Ces minéraux se dissoudraient par la suite, dans les deux aquifères jusqu'à ce que ces eaux atteignent un état d'équilibre ou soient saturées

après diminution et/ou arrêt des précipitations, en saison sèche, accompagnée d'une altération chimique à long terme, observée entre les eaux souterraines et les formations carbonatées. Cependant, les valeurs de IS du gypse et de l'halite, étant toutes inférieures à zéro, suggèrent une tendance à la dissolution de ces deux minéraux dans les eaux souterraines des deux aquifères.

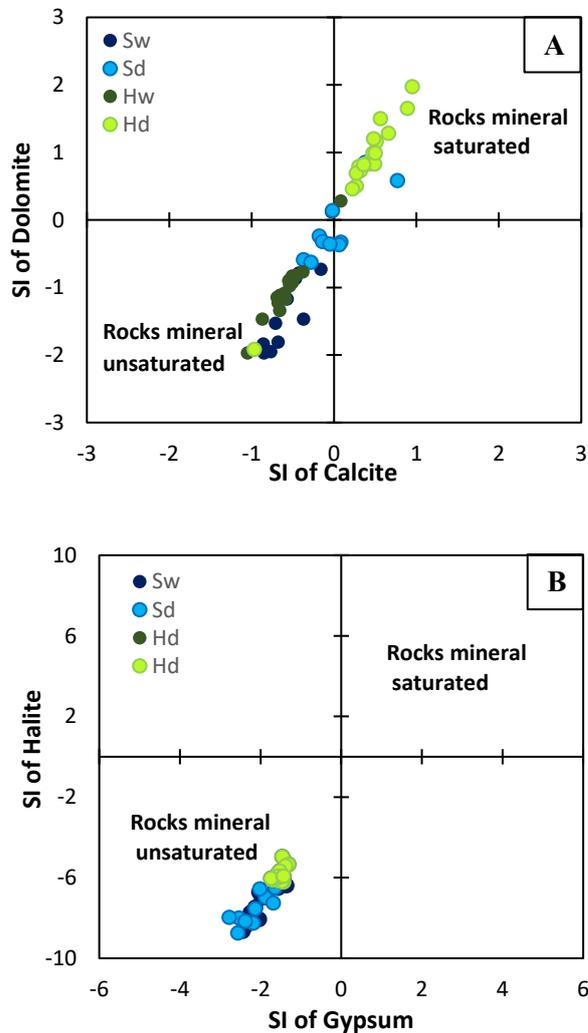


Figure 72- Indices de Saturation. A: Dolomite (Dolomie) vs Calcite (calcite), B: Halite (Halite) vs Gypsum (Gypse). (Sw: Sebdou wet, Sd: Sebdou dry, Hw: Hennaya wet, Hd: Hennaya dry)

C. Diagramme de Gibbs et indices d'échange de base

1. Diagramme de Gibbs

De nombreux processus hydrochimiques contribuent aux changements de la qualité de l'eau dans les aquifères (BRINDHA & *al.*, 2020). Pour se limiter aux processus clés, le diagramme de GIBBS (1970), moyennant les rapports ioniques et la salinité des eaux souterraines a été utilisé. Ce diagramme (Figure 73) permet la mise en évidence des processus chimiques dominants (précipitation, altération ou évaporation). Autrement dit, il permet de distinguer si la composition chimique est dominée par les interactions eau-roche (dominance rocheuse) par les processus de mélange et d'évaporation de l'eau de mer ou par réapprovisionnement en eau (recharge par l'eau de pluie).

Dans le diagramme de Gibbs (Figures 73a,b,c), la quasi-totalité des échantillons d'eau des deux aquifères durant les deux saisons a été regroupée dans la partie où domine l'altération des roches.

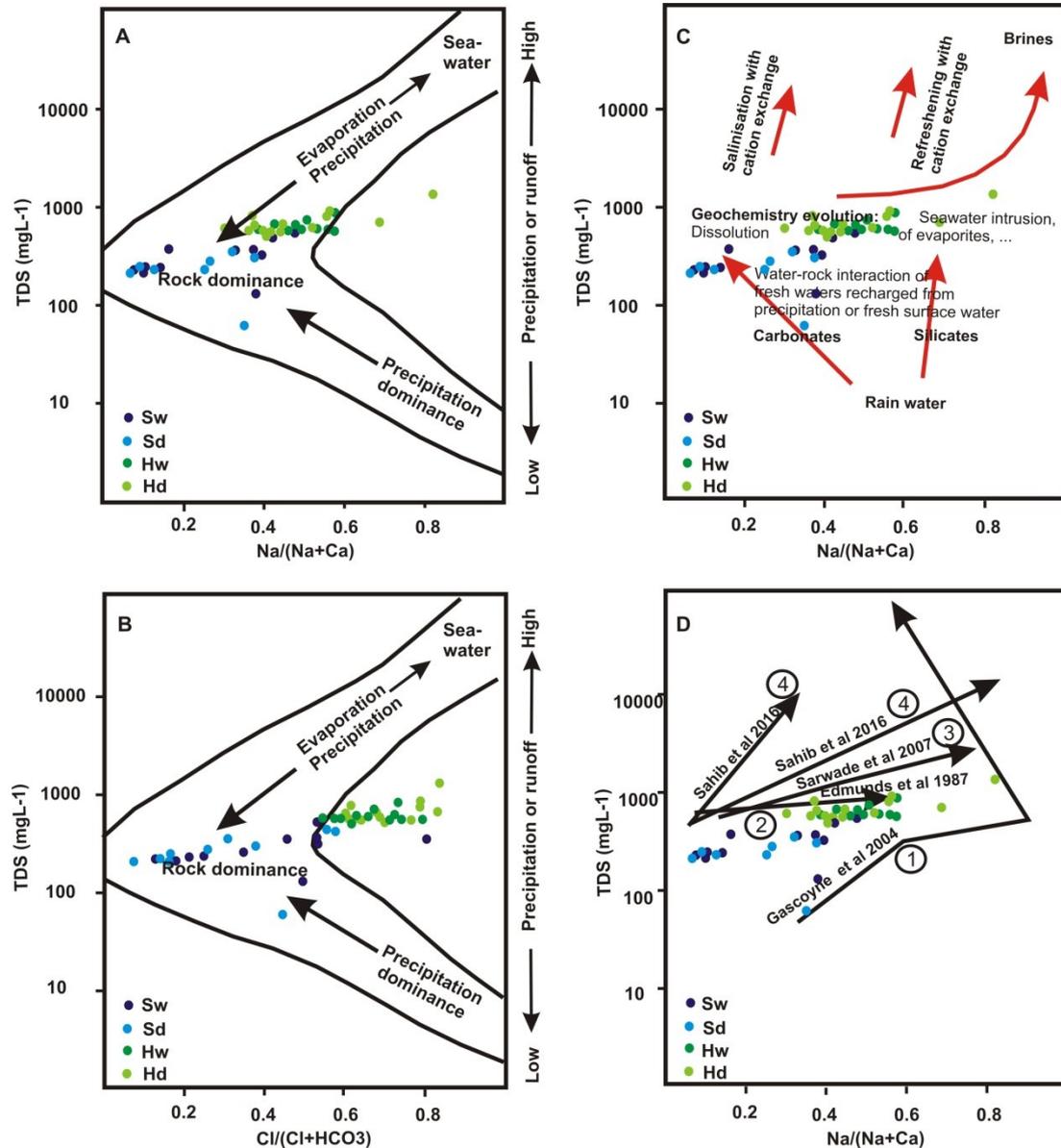


Figure 73- Diagrammes de Gibbs (1970) montrant les processus chimiques dominants (Sw: Sebdou wet, Sd: Sebdou dry, Hw: Hennaya wet, Hd: Hennaya dry).

Comparaison des processus naturels définissant la chimie de l'eau des eaux de surface et des eaux souterraines sur les diagrammes de Gibbs (A), (B) et (C). Les données de placement reflétant l'évolution de la qualité des eaux souterraines sur le diagramme de Gibbs (D) le long de la ligne d'écoulement des eaux souterraines 1- dans les roches cristallines, 2- dans les roches carbonatées, 3- en cas d'intrusion d'eau de mer et 4- en cas de dissolution des minéraux évaporés.

L'évaporation semble ne pas avoir joué un rôle significatif dans la gouvernance du chimisme de l'eau. Deux échantillons d'eau, à savoir, P2 (saison humide) et P3 (saison sèche) de l'aquifère de Sebdou se distinguent du nuage de points, en s'approchant de la zone de la dominance des précipitations. Leur composition pourrait être similaires à celle de l'eau de pluie et pourraient correspondre à de l'eau récemment rechargée.

Au cours des deux périodes, les valeurs du rapport $(Na)/(Na+Ca)$ des échantillons des eaux souterraines de Seb dou (Figure 73a,c) sont relativement plus faibles (< 0.5) que celles des points de la plaine de Hennaya, spécifiant une dominance des minéraux carbonatés pour l'aquifère de Seb dou.

De même, la variation du rapport $Cl/ (Cl+HCO_3)$ est assez représentative, avec des valeurs faibles pour la plupart des points échantillonnées dans l'aquifère de Seb dou, et des valeurs élevées du rapport (> 0.5) pour ceux prélevés dans celui de Hennaya. Ceci est à l'origine des concentrations plus élevées en chlorures, conduisant à une augmentation de la TDS, en raison des influences des flux d'irrigation sur le système souterrain. Par conséquent, les échantillons d'eau souterraine de Hennaya se déplacent en saison sèche, vers le domaine d'évaporation à partir du domaine altération des roches (Figure 73b). Ces mécanismes suggèrent que la qualité des eaux de type géogénique se dégradent, en raison de l'influence des activités anthropique (agricoles) sur le système aquifère (SUBBA RAO & *al.*, 2019).

A l'origine, le graphique de Gibbs a été développé pour les eaux de surface et ne fournit donc pas d'informations détaillées sur les autres processus tels que celui impliquant les sulfates ou des variations du rapport $Ca - Mg$. Toutefois, il peut être adopté pour les eaux souterraines afin d'identifier les principaux processus de gouvernance géochimique (MARANDI & SHAND, 2018). Ce diagramme peut être utilisé avec d'autres méthodes géochimiques pour affiner davantage la compréhension des processus hydrogéochimiques.

2. Les indices chloro-alcalins

Lorsqu'il y a un échange entre Ca ou Mg de l'eau souterraine avec Na et K des formations d'un aquifère, les indices chloro-alcalins (CAI-1 et CAI-2) sont négatifs. Si les valeurs sont nulles ($CAI = 0$), cela signifie qu'il n'y a pas d'échange. S'il y a un échange d'ions inverse, alors ces indices seront positifs. Aussi, plus les valeurs absolues des indices CAI sont élevées, plus l'échange cationique est important (CHIDAMBARAM & *al.*, 2012; WU & *al.*, 2018; FENG & *al.*, 2020).

De plus, lorsque l'échange ionique inverse est un processus géochimique important pour équilibrer la composition des eaux souterraines, la relation entre $(Na+K)-Cl$ et $(Ca+Mg)-(HCO_3-SO_4)$, devrait être linéaire avec une pente de -1 (FISHER & MULLICAN, 1997; WANG & *al.*, 2017).

Après calcul des indices CAI-1 et CAI-2 des échantillons des eaux souterraines, les valeurs de CAI-1 obtenues sont comprises entre -4.85 (P7) et 0.66 (P1), pour l'aquifère de Seb dou et entre -11.24 (P19) et -0.11 (P13), pour celui de Hennaya (Figure 74a). Quant au CAI-2, ses valeurs sont négatives et fluctuent entre -0.26 (P7) et -0.001 (P10) à l'aquifère de Seb dou et entre -1.7 (P8) et -0.26 (P2) dans celui de Hennaya.

La quasi-totalité des valeurs des indices CAI-1 et CAI-2 est négative, à l'exception de P1 captant l'aquifère de Seb dou (Figure 74a). Ces valeurs suggèrent que, dans les eaux souterraines, K^+ et Na^+ remplacent Ca^{2+} et Mg^{2+} , par échange cationique direct avec dominance de ce processus dans les eaux de l'aquifère de Hennaya, comparé au faible échange, voire absence d'échange, en saison de pluies et faible échange en saison sèche dans les eaux de l'aquifère de Seb dou (Figure 74b).

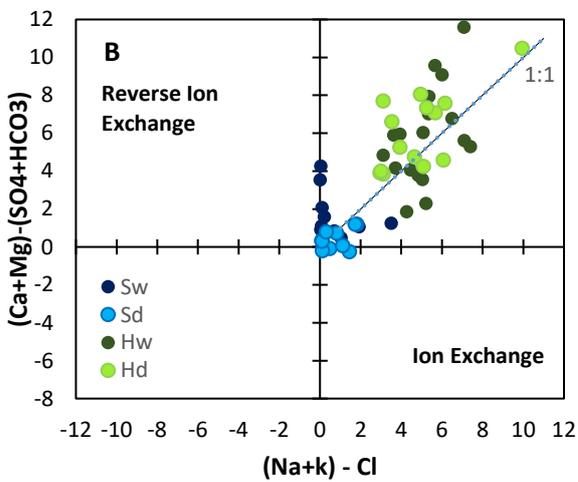
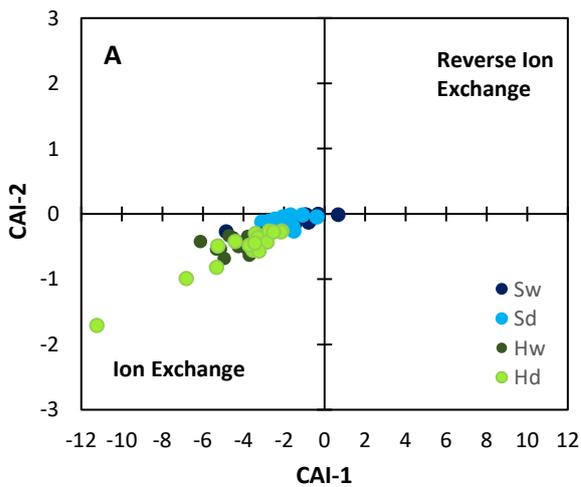
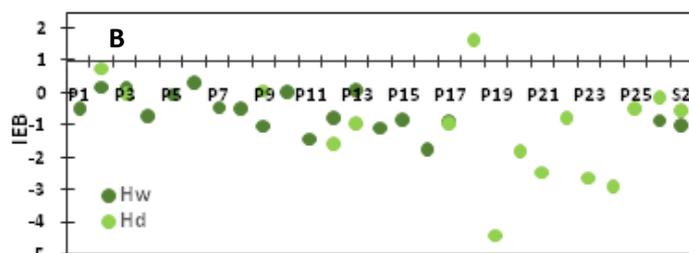
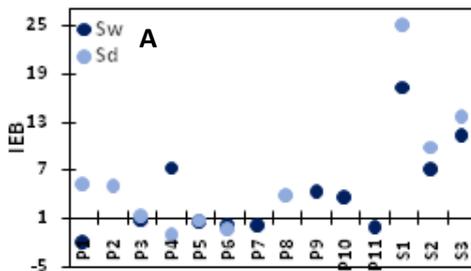


Figure 74- Corrélation entre: A: CAI-1 vs CAI-2, B.: $(Ca^{2+} + Mg^{2+}) - (SO_4^{2-} + HCO_3^-)$ vs $(Na^+ + K^+) - Cl^-$

3. Les indices d'échange IEB et IGM

Selon les indices d'échange de base IEB et IGM (Figures 75 et 76), 60 % de points d'eaux souterraines de Sebdoou sont de type $Na-HCO_3$, avec une source d'eau météorique profonde. A l'encontre de ces derniers, le reste des points d'eau (40 %) des deux périodes d'échantillonnage sont de type $Na-SO_4$, avec une source d'eau météorique profonde.

Par ailleurs, celles des eaux souterraines de la plaine de Hennaya sont globalement de type $Na-SO_4$, avec une source d'eau météorique peu profonde.



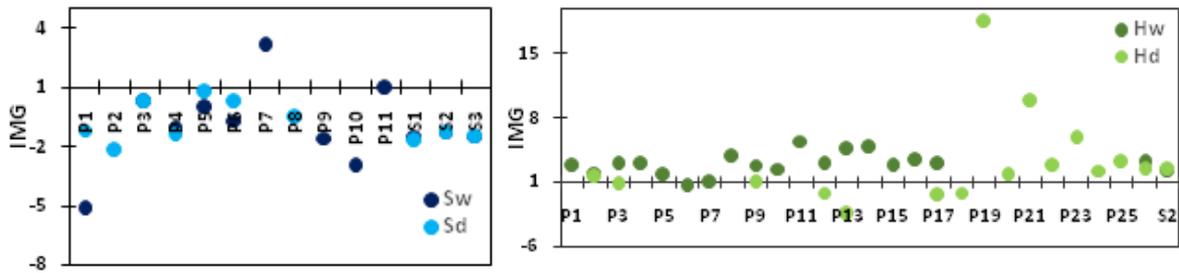


Figure 75- les indices IEB et IMG. (A. Aquifère de Sebdo, B. Aquifère de Hennaya).

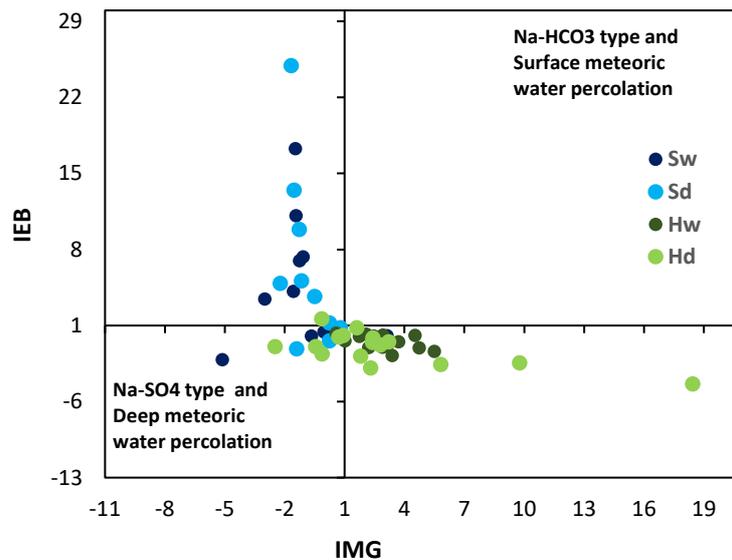


Figure 76- IEB vs IMG.

V. GEOCHIMIE DES NITRATES

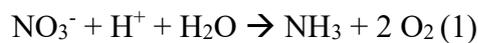
Dans les eaux souterraines, les nitrates peuvent être soit d'origine naturelle (formations géologiques riches en azote), soit d'origine anthropique (contamination des eaux souterraines par des déchets riches en azote (apports d'azote organique, engrais inorganiques azotés)(HAMMER, 1986; BARNES & SMITH, 1992; PATEL & *al.*, 2016; REZAEI & *al.*, 2017).

Les aquifères étudiés sont affectés par des sources, principalement anthropiques dues à l'utilisation des engrais dans les plaines de Sebdo et Hennaya. Les nitrates résultants des processus géogéniques peuvent être identifiés grâce à des graphiques bivariés des nitrates en fonction de EC, de la TDS ou des bicarbonates (BRINDHA & *al.*, 2020).

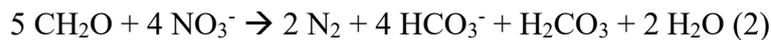
Dans cette optique, et pour une meilleure compréhension des origines de nitrates, de multiples corrélations par graphiques binaires ont été établies (Figures 77et 78). Les fortes concentrations de nitrates trouvées dans les points d'eau où les niveaux statiques sont à de faibles profondeurs, inférieures à 15 m pour l'aquifère de Sebdo (Figure 77A) et à 24 m pour celui de Hennaya (Figure 78A). L'orientation du nuage de points (Figures 77B, C et figure 78B,C) corroborent leur origine anthropique, préalablement confirmées par les fortes corrélations entre nitrates et sulfates observées principalement dans l'aquifère de Hennaya (Tableau 28, figure 78 C, D).

Les ions nitrates et sulfates seraient introduits avec l'urée [CO(NH₂)₂] et le sulfate d'ammonium [(NH₄)₂(SO₄)] utilisés pour la fertilisation des terres cultivées. Comme leur excès ne peut pas être absorbé par les colloïdes du sol, ils finissent par migrer rapidement vers les eaux souterraines (GALLARDO & TASE, 2007).

L'augmentation du rapport Cl⁻/NO₃⁻ pourrait être un indicateur du processus d'élimination des nitrates dans les eaux, à l'exemple d'une dénitrification. La diminution de la concentration en nitrates entraîne l'augmentation du rapport Cl⁻/NO₃⁻. Ceci pourrait indiquer éventuellement que la diminution du nitrate est un élément de dilution ainsi qu'une procédure de dénitrification (ALTMAN & PARIZEK, 1995; MENGIS & *al.*, 1999; REZAEI & *al.*, 2017), et par corrélation inverse, la diminution des nitrates augmentera le pH des eaux souterraines (VAN BEEK & *al.*, 2007), selon l'équation suivante:

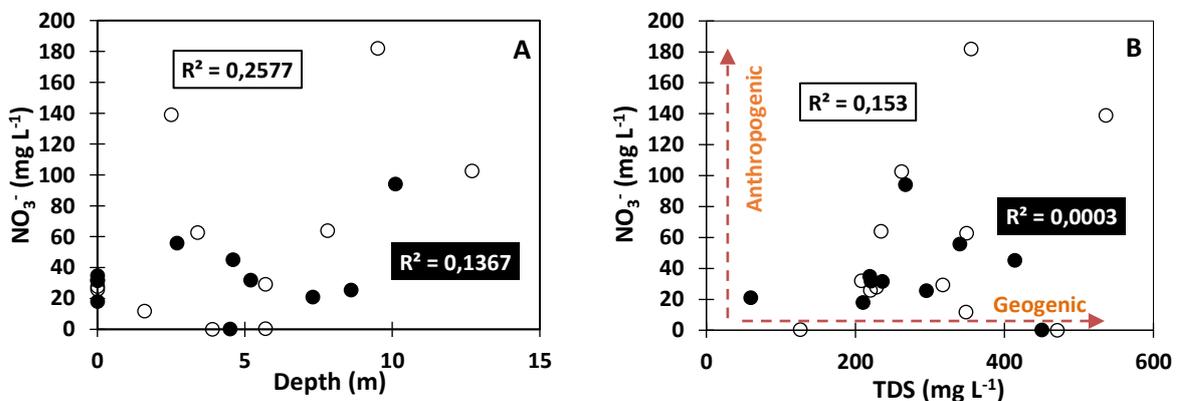


Les auteurs CHKIRBENE & *al.* (2009) ont démontré que le processus de dénitrification microbienne peut être expliqué par une augmentation des concentrations en bicarbonates et une diminution de celles des nitrates selon l'équation:



Les faibles valeurs du rapport Cl⁻/NO₃⁻, déterminées pour les eaux souterraines de l'aquifère de Sebdou, à l'exception des puits P11 (r Cl⁻/NO₃⁻ = 1291) et P3 (r Cl⁻/NO₃⁻ = 34.79) de la saison humide et P6 (r Cl⁻/NO₃⁻ = 793.4) de la saison sèche (Figure 77E), la corrélation inverse établie entre le pH et les nitrates (Tableau 27 et figure 77F), ainsi que les corrélations faibles et positives entre les nitrates et bicarbonates (Figure 77C) attestent la présence du processus de dénitrification selon la première équation, dans certains puits.

A l'inverse, les nuages de points des rapports Cl/NO₃⁻ vs TDS et pH vs NO₃⁻ des eaux souterraines de la plaine de Hennaya (Figures 78E et F) montrent une diminution des concentrations des nitrates à de faibles valeurs de pH et une augmentation du r Cl/NO₃⁻ en saison sèche, indiquerait l'absence du processus de dénitrification microbienne des eaux souterraines de la plaine (Equation 1). Or, la corrélation forte et négative entre les bicarbonate et les nitrates (Tableau 28 et Figure 78C) est un indicateur fort de la présence du processus de dénitrification microbienne représenté par l'équation 2 (CHKIRBENE & *al.*, 2009).



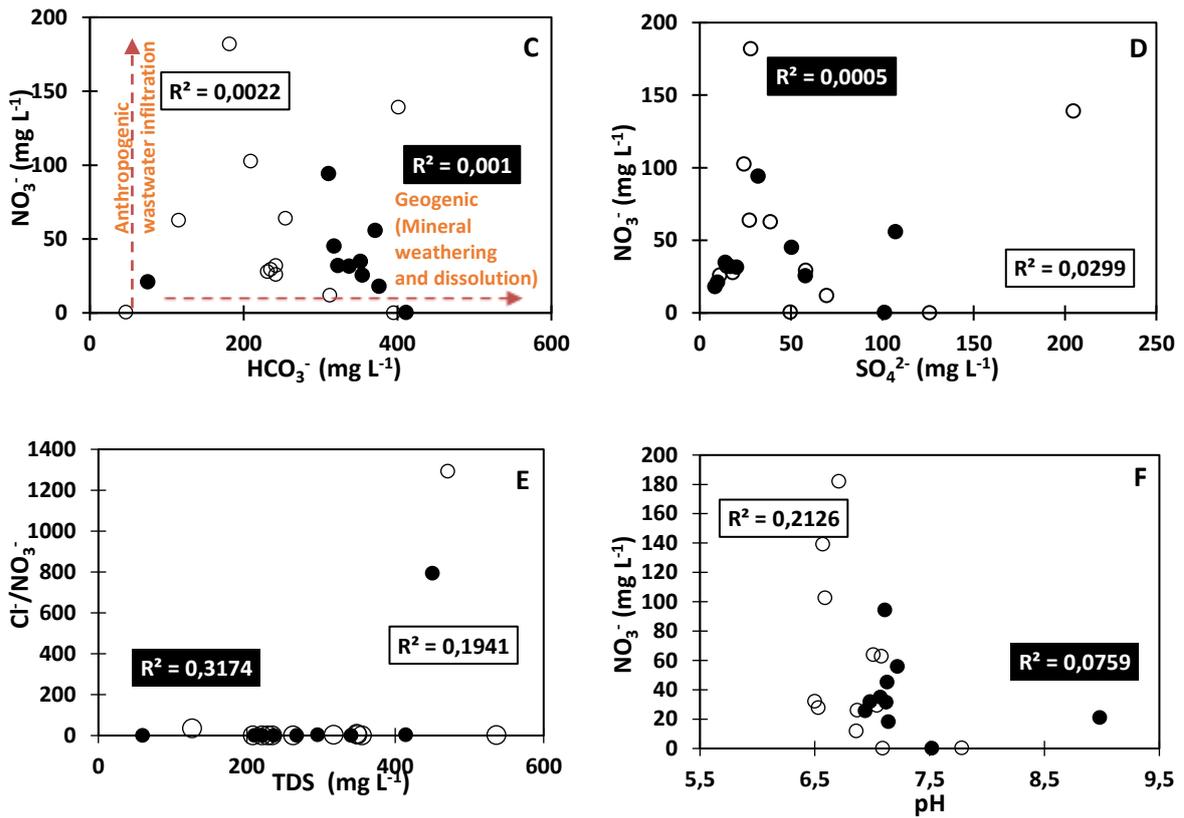
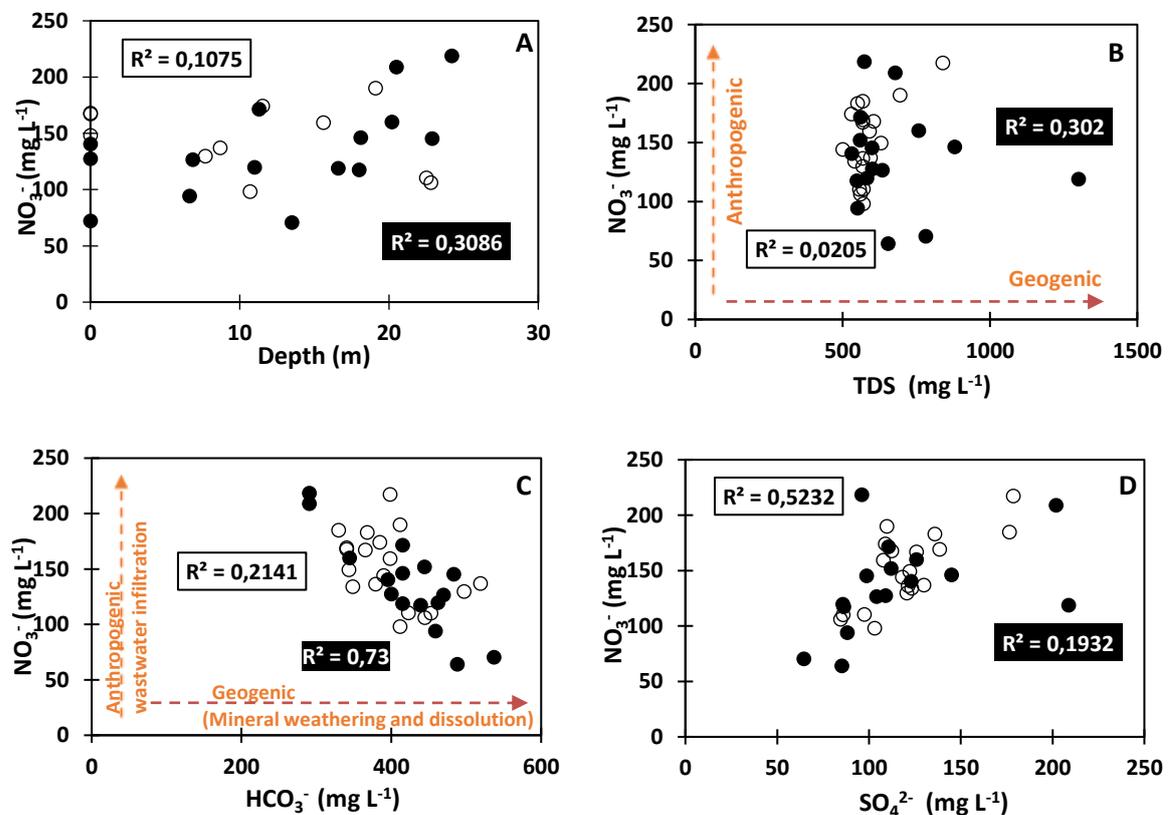


Figure 77- Nuage de points entre : NO_3^- vs Depth (profondeur); NO_3^- vs TDS; NO_3^- vs HCO_3^- ; NO_3^- vs SO_4^{2-} ; Cl/NO_3^- vs TDS et NO_3^- vs pH; dans l'aquifère de Sebdoou. Cercle blanc: saison humide, Cercle noir: saison sèche.



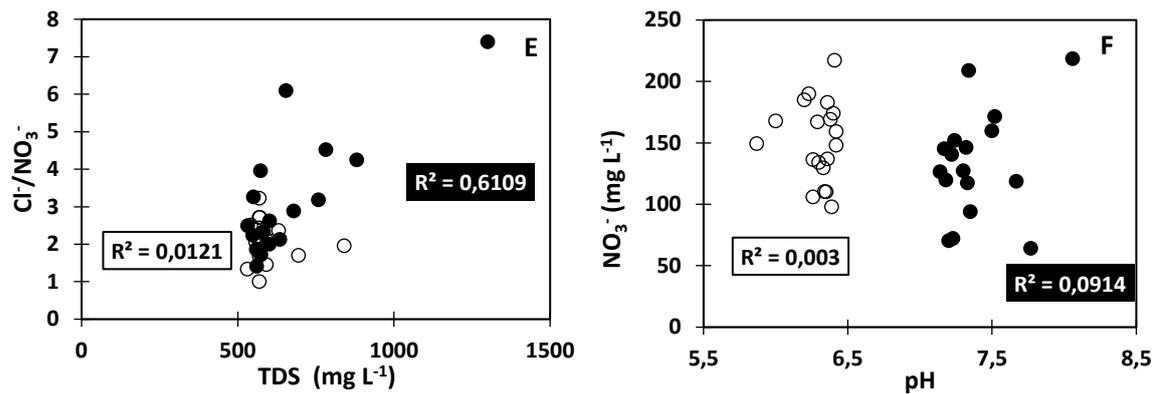


Figure 78- Nuage de points entre: NO_3^- vs Depth (profondeur) ; NO_3^- vs TDS ; NO_3^- vs HCO_3^- ; NO_3^- vs SO_4^{2-} ; Cl/NO_3^- vs TDS et NO_3^- vs pH; dans l'aquifère de Hennaya. Cercle blanc: saison humide, Cercle noir: saison sèche.

VI. CONCLUSION

À partir des analyses physico-chimiques réalisées sur les échantillons des eaux souterraines et de surface, prélevés dans les deux sous bassins, il en ressort ce qui suit:

-le pH des eaux varie en fonction des sous bassins et des saisons. Dans le bassin de Sebdu les eaux sont légèrement acides à alcalines durant les deux saisons. Dans celui de Sikkak, elles se démarquent par leur acidité (<6.42) pendant la saison humide et leur alcalinité durant la saison sèche. Cet état alcalin concerne aussi les eaux de surface des deux cours d'eau;

-la conductivité électrique des eaux de surface et souterraine est variable. Elle est plus importante dans le sous-bassin de l'Oued Sikkak dont les eaux souterraines étudiées sont aussi caractérisées par des teneurs élevées en nitrates;

-les diagrammes de Piper, de Chadha et de Durov indiquent des faciès hydrogéochimiques de type bicarbonaté calcique caractérisés par la dominance des alcalino-terreux et des acides forts et chloruré calcique pour l'aquifère de Sebdu. Ce dernier faciès est aussi représentatif des eaux souterraines de Hennaya caractérisées par la dominance des alcalins et des acides faibles. Dans la plaine de Sebdu, les corrélations importantes positives des phosphates avec les sulfates, le magnésium, le sodium, les bicarbonates et les chlorures seraient à l'origine du déversement des eaux usées et de l'utilisation des engrais. Dans la plaine de Hennaya, à vocation agricole, la corrélation significative positive entre NO_3^- et SO_4^{2-} (saison humide) montre que ces deux ions proviendraient, entre autres, de l'utilisation des produits agrochimiques.

-les indices de saturation IS indiquent que les eaux souterraines de l'aquifère de Sebdu sont sous-saturées à équilibrées en saison humide et en général, en équilibre durant la saison sèche. De même, en saison humide, cet état de sous-saturation en calcite et dolomite est observé dans les eaux souterraines de l'aquifère de Hennaya à l'exception des eaux de P4 qui indique un état d'équilibre. En saison sèche, les eaux souterraines de la plaine en question sont, en général, légèrement sursaturées surtout par rapport à la dolomite. Les valeurs de IS suggèrent, en général, une tendance à la dissolution des évaporites dans les eaux souterraines des deux aquifères.

-les valeurs des indices CAI-1 et CAI-2, en général, toutes négatives suggèrent un échange cationique traduisant un remplacement des alcalino-terreux (Ca^{2+} et Mg^{2+}) de l'eau souterraine par les alcalins (K^+ et Na^+) des formations aquifères.

-la disposition des échantillons sur les diagrammes de Gibbs TDS vs. $(\text{Na})/(\text{Na}+\text{Ca})$ et TDS vs. $(\text{Cl})/(\text{Cl}+\text{HCO}_3)$ indique que le chimisme des eaux souterraines est contrôlé principalement par l'altération des roches carbonatées.

-les valeurs de $\text{Cl}^-/\text{NO}_3^-$ de la quasi-totalité des points d'eau de l'aquifère de Sebdou témoignent de la présence d'un processus de dénitrification. Dans l'aquifère de Hennaya, ce même rapport indiquerait, la présence probable du processus de dénitrification ou éventuellement un phénomène de dilution.

Cinquième chapitre: **E**valuation de la qualité des eaux

Cinquième chapitre: **E**valuation de la qualité des eaux

I. INTRODUCTION

Nombreuses sont les études qualitatives tentées pour la consommation humaine et pour l'utilisation agricole. La première a été réalisée en comparant les résultats obtenus avec les normes de potabilité publiées par le Journal Officiel de la République Algérienne (JORA, 2011) et celle de l'organisation mondiale de la santé (OMS, 2017). La seconde a été effectuée par l'utilisation des directives publiées par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture dite FAO (AYERS & WESTCOT, 1985) et l'utilisation des indices d'irrigation tels que le pourcentage de sodium (%), le taux d'adsorption du sodium (SAR), l'indice de perméabilité, le diagramme de Wilcox, etc. Ces indices permettront de donner une idée sur l'état qualitatif des eaux souterraines et leurs aptitudes à l'utilisation agricole.

II. QUALITE DES EAUX POUR LA CONSOMMATION HUMAINE

A. Classification des eaux souterraines selon les normes de l'OMS et les normes algériennes

Globalement, les eaux échantillonnées dans l'aquifère de Sebdou, en saisons humide et sèche présentent des valeurs des paramètres analysés (T, pH, EC, Cl⁻, SO₄²⁻) inférieures aux valeurs des seuils recommandées par le JORA (2011) et l'OMS (2017) (voir Tableau 26). A l'inverse de ces derniers, la teneur en nitrates dépasse la norme exigée par le JORA et l'OMS qui est de 50 mg L⁻¹. En effet, des teneurs (62.7 à 182 mg L⁻¹) dépassant la norme dans certains échantillons ont été observées. Elles concernent les points d'eau P1 (62.7 mg L⁻¹), P3 (64 mg L⁻¹), P7 (139.1 mg L⁻¹), P9 (102.6 mg L⁻¹) et P10 (182 mg L⁻¹) de la saison humide et les points P5 (55.7 mg L⁻¹) et P8 (94.3 mg L⁻¹) de la saison sèche localisés dans la partie méridionale de l'aquifère de Sebdou.

Concernant la plaine de Hennaya, les valeurs de la conductivité électrique (hautes eaux: 1365-2130 $\mu\text{S cm}^{-1}$; basses eaux: 1314-3310 $\mu\text{S cm}^{-1}$), bien qu'inférieures à la norme algérienne (2800 $\mu\text{S cm}^{-1}$), dépassent celles de l'OMS (1000 $\mu\text{S cm}^{-1}$) dans tous les échantillons. Les teneurs en NO₃⁻ sont supérieures à la norme de 50 mg L⁻¹ dans tous les échantillons analysés (saison humide: 98 -217.26 mg L⁻¹, saison sèche : 64 – 218.58 mg L⁻¹), indiquant que les eaux souterraines de l'aquifère de Hennaya sont impropres à la consommation.

Selon les normes de l'OMS, les concentrations en Ca²⁺ et Mg²⁺ dépassent les limites de détection du goût qui sont respectivement de 75 et 50 mg L⁻¹. De même, les teneurs en Na⁺ atteignent les 551.5 mg L⁻¹ (P8) en saison sèche, dépassant ainsi le seuil de détection du goût fixé par l'OMS à 200 mg L⁻¹.

Il convient également de noter que les valeurs de pH enregistrées à travers l'aquifère, en saison humide sont toutes inférieures à la limite inférieure (6.5) des normes susmentionnées (voir Tableaux 26 et 33).

	Standards Algériens (JORA 2011)		WHO ou OMS (2017)		Aquifère de Sebdou	Aquifère de Hennaya
	Eau de surface	Eau souterraine	Valeurs guides	Remarques		
T (° C)	25	25	-	-	√	√
pH	≥ 6,5 et ≤ 9	≥ 6,5 et ≤ 9	Range 6.5–8.5	Non préoccupant pour la santé aux niveaux relevés dans l'eau de boisson	√	×
EC à 20°C (µS cm⁻¹) à	2800	2800	1000	-	√	×
TDS (mg L⁻¹)	-	-	600-1000	Aucune valeur guide basée sur la santé n'est proposée.	√	×
Ca²⁺ (mg L⁻¹)	-	-	75	Aucune valeur guide basée sur la santé n'est proposée.	√	√
Mg²⁺ (mg L⁻¹)	-	-	50	Aucune valeur guide basée sur la santé n'est proposée.	√	√
Na⁺ (mg L⁻¹)	-	-	200	Le seuil moyen de détection pour le sodium est d'environ 200 mg/l. Aucune valeur guide reposant sur des arguments sanitaires n'a été déterminée.	√	×
HCO₃⁻ (mg L⁻¹)	-	-	250	-	√	√
Cl⁻ (mg L⁻¹)	600	500	200-300	Non préoccupant pour la santé aux niveaux relevés dans l'eau de boisson. Peut donner lieu à un gout détectable dans l'eau.	√	×
SO₄²⁻ (mg L⁻¹)	400	400	-	Altération du gout est minimale à des niveaux inférieurs à 250 mg L ⁻¹ . Aucune valeur guide reposant sur des arguments sanitaires n'a été déterminée.	√	√
NO₃⁻ (mg L⁻¹)	50	50	50	Basée sur les effets à court terme, mais prudente pour les effets à long terme	×	×

Tableau 33- Standards pour la qualité de l'eau potable.

B. Risques sur la santé humaine

Les êtres vivants dépendent de l'eau; car une partie importante de leur corps en est constituée. Cette eau constitue le milieu dans lequel se déroulent les réactions nécessaires aux fonctions vivantes. Il agit comme un support de nutriments dans le corps des organismes vivants et sert de régulateur de température (EVANGÉLOU, 1998). Cependant, l'eau peut être porteuse d'éléments chimiques nocifs (à l'exemple tels des métaux lourds, les pesticides, les nitrates, les nitrites, les fluorures, etc.), potentiellement dangereux pour la santé humaine. Ces derniers sont exposés à ces substances par la consommation d'eau potable et des aliments, par contact cutané ou même par respiration (OMS, 2017).

Selon les directives de l'organisation mondiale de la santé, les effets sanitaires sont associés aux valeurs guides déterminées à partir des études épidémiologiques ou cliniques sur l'homme, généralement rapportées à une exposition à long terme.

Dans la présente étude, les concentrations très élevées de nitrates rencontrées dans les eaux souterraines des deux aquifères (voir Tableau 26) dépassent les 50 mg L⁻¹ fixées par l'OMS et présentent, de ce fait, un risque sanitaire aigu.

Notons que l'ingestion des nitrates pourrait entraîner la formation endogène de N-nitroso-composés connus comme étant cancérigènes (BRYAN & LOSCALZO, 2011; MESSIER & *al.*, 2019). Leur consommation excessive à long terme, pourrait être à l'origine des cancers (gastrique et non gastrique) chez l'homme en raison de la formation de nitrosamines (HILL, 1996; PANNALA & *al.*, 2003). Les nitrates sont connus pour être à l'origine des absorptions spontanées, des malformations congénitales, des infections des voies respiratoires et des modifications du système immunitaire (HILL, 1996; FEWTRELL & *al.*, 2004; LOHUMI & *al.*, 2004; WARD & *al.*, 2005; BRYAN & LOSCALZO, 2011; RAHMAN & *al.*, 2019). De ce fait, l'évaluation des risques de ce contaminant est très importante pour prédire le danger sur la santé humaine.

III. QUALITE DES EAUX A DES FINS D'IRRIGATION

A. Classification des eaux d'irrigation selon la FAO

Il est admis que les problèmes potentiels d'irrigation peuvent être classés dans les grands groupes suivants: (a) risque de salinité, (b) problèmes d'infiltration et de perméabilité, (c) risques de toxicité et (d) problèmes divers (AYERS & WESTCOT 1985).

En outre, les dangers de toxicité peuvent être regroupés en problèmes associés à des ions spécifiques ainsi qu'aux dangers liés à la présence des éléments traces et de métaux lourds (AYERS & WESTCOT, 1985). Vu l'absence de données, les métaux lourds ne seront pas traités dans ce présent chapitre.

La classification de la qualité de l'eau destinée à l'irrigation en fonction des différents groupes est présentée dans le tableau 34.

Problèmes potentiels d'irrigation		Unités	Néant	Léger à modéré	Sévère
Salinité	EC	$\mu\text{S cm}^{-1}$	<700	700 – 3000	>3000
	TDS	mg L^{-1}	<450	450 – 2000	>2000
Infiltration	SAR 0–3	EC =	>700	700 – 200	<200
	SAR 3–6	EC =	>1200	1200 – 300	<300
	SAR 6–12	EC =	>1900	1900 – 500	<500
	SAR 12–20	EC =	>2900	2900 – 1300	<1300
	SAR 20–40	EC =	>5000	5000 – 2900	<2900
Toxicité ionique spécifique	Sodium (Na^+)	SAR	<3	3 – 9	>9
	Chloride (Cl^-)	mg L^{-1}	<140	140 – 350	>350
Effets divers	Nitrate ($\text{NO}_3^- - \text{N}$)	mg L^{-1}	< 5	5 – 30	>30
	Bicarbonate (HCO_3^-) pH	mg L^{-1}	< 91.5 Classe normale	91.5 – 518.5 6.5 – 8.5	>518.5

Tableau 34- Directives pour l'interprétation de la qualité des eaux d'irrigation (d'après AYERS & WESTCOT, 1985).

1. Risque de salinité

Le risque de salinité survient lorsque les sels commencent à s'accumuler dans la zone racinaire de la culture réduisant la quantité d'eau disponible pour les racines (AYERS & WESTCOT, 1985). Cette disponibilité d'eau réduite atteint parfois des niveaux tels que le rendement des cultures en est lésé. Ces sels proviennent souvent de minéraux dissous dans l'eau d'irrigation ou d'une nappe d'eau à salinité élevée.

Les diminutions des rendements des cultures se produisent lorsque la teneur en sels de la zone racinaire atteint un point, tel que, la culture n'est plus en mesure d'extraire suffisamment d'eau du sol salé. Lorsque ce stress hydrique se prolonge, la plante ralentit sa croissance et des symptômes de sécheresse commencent à se développer (AYERS & WESTCOT, 1985; SIMSEK & GUNDUZ, 2007). En d'autres termes, la salinité excessive modifie la structure du sol, sa perméabilité et son aération, ce qui à son tour affecte la croissance des plantes entraînant à long terme, une baisse de la productivité agricole (JALALI, 2011; ALAM, 2013; HALLOUCHE & *al.*, 2017; AHAMED & *al.*, 2018).

1.1. Conductivité électrique et TDS

À moins que le sol ne soit lessivé avec de l'eau à faible teneur en sel, la salinisation du sol est un processus irréversible qui rend les terres agricoles inutilisables. Étant donné que la salinité est le critère de qualité de l'eau le plus influent sur la productivité des cultures, l'étendue du risque de salinité pourrait être mesurée par la capacité de l'eau à conduire un courant électrique. A noter que la conductance est une fonction importante des solides ioniques dissous totaux, une mesure de la conductivité électrique (EC) ou une analyse des solides dissous totaux (TDS) pourrait être utilisée pour évaluer la salinité de l'eau.

En général, la quantité d'eau disponible pour la culture diminue lorsque la conductivité électrique est élevée. Dans de telles circonstances, le sol semble humide mais la culture subit une "sécheresse physiologique". Étant donné que les plantes ne peuvent transpirer que de l'eau « pure », la partie utilisable de l'eau par les plantes diminue considérablement à mesure que la conductivité augmente (SIMSEK & GUNDUZ, 2007).

La figure 79, montrant les répartitions ponctuelles et spatiales, de la conductivité électrique des points d'eau échantillonnés au niveau des cours d'eau étudiés, classent les eaux de l'oued Tafna, dans la catégorie "bonne qualité" pour l'utilisation à des fins d'irrigation (Figure 79A et 79B). Quant aux eaux de l'oued Sikkak, les valeurs de CE dépassent les $700 \mu\text{S cm}^{-1}$, à l'aval de l'Oued indiquant une qualité "bonne à modérée" (Figure 79A et C).

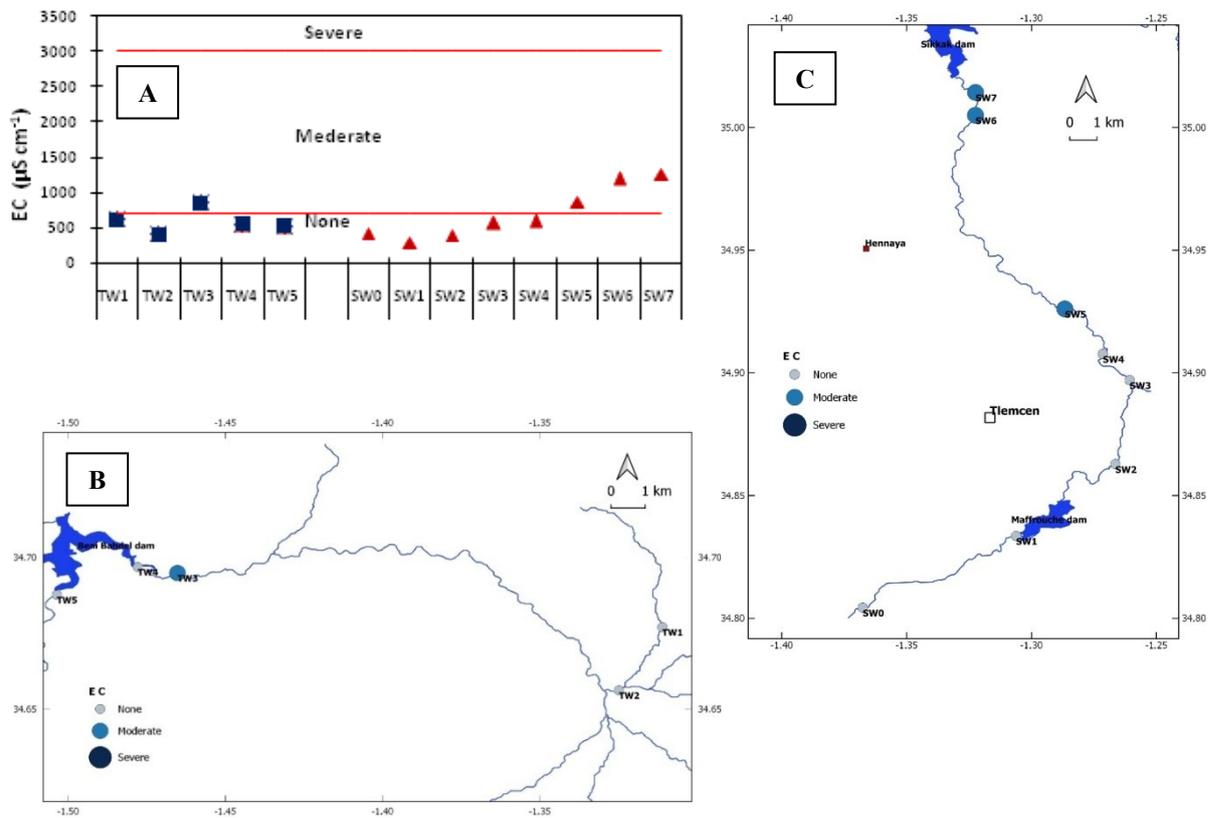


Figure 79- Variation de la conductivité électrique dans les eaux de surface.

A: variation ponctuelle de CE (Carré : Tafna wadi, Triangle : Sikkak wadi) ; B: variation spatiale des CE dans l'oued Tafna; C: variation spatiale des CE dans l'oued Sikkak.

Les figures 80A et B montrent que les eaux souterraines de l'aquifère de Sebdou sont de qualité modérée dans sa partie méridionale et de bonne qualité dans sa partie septentrionale. Pour la plaine de Hennaya, les valeurs de la conductivité indiquent une qualité modérée pendant les deux campagnes, à l'exception de P3 où l'eau est de mauvaise qualité (Figures 80C et D).

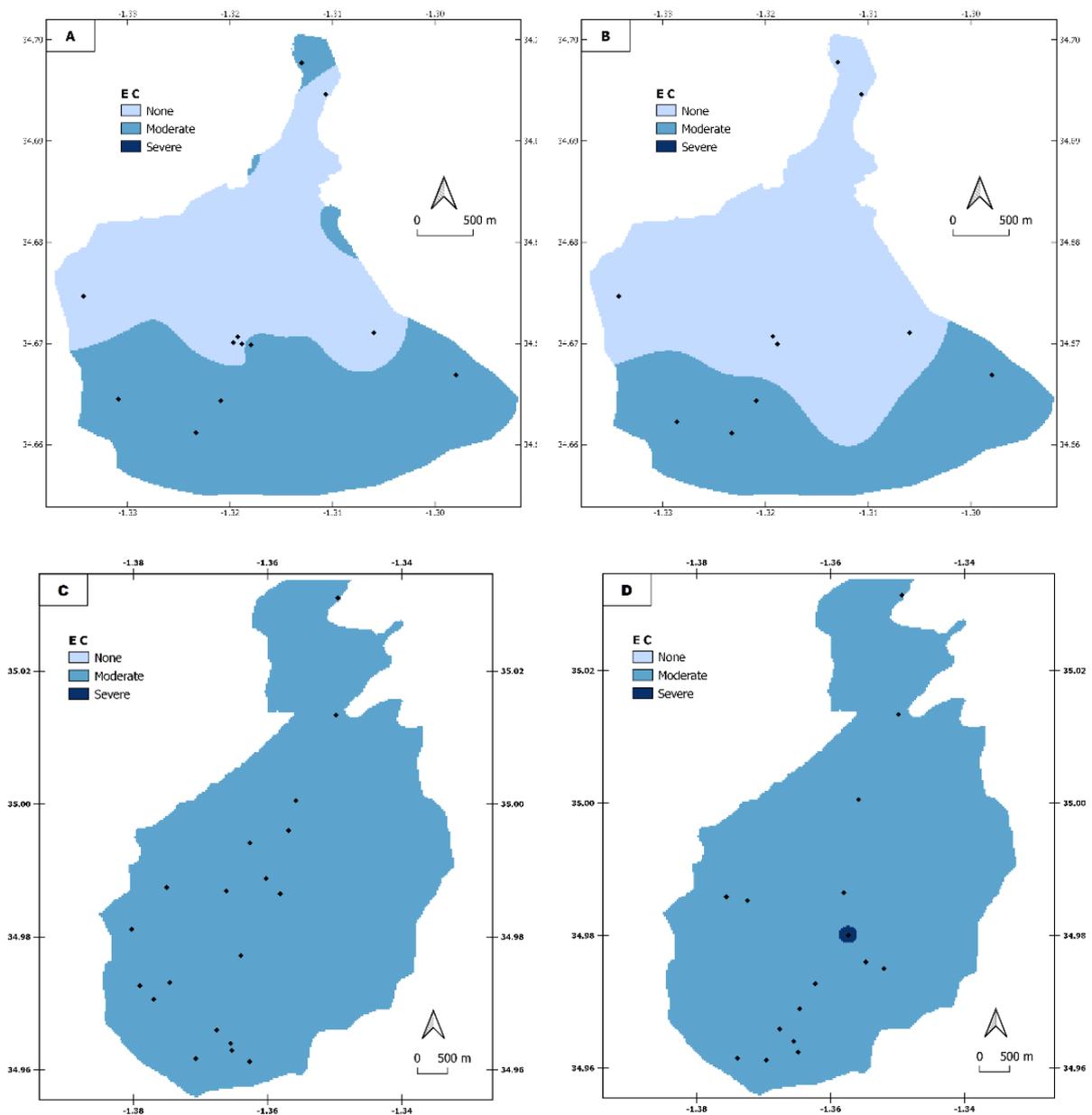


Figure 80- Variation spatiale de la conductivité électrique CE dans les eaux souterraines.

A: Aquifère de Sebdu en saison humide, B : Aquifère de Sebdu en saison, C: Aquifère de Hennaya en saison humide, D : Aquifère de Hennaya en saison sèche.

2. Perméabilité et risque d'infiltration

Bien que le taux d'infiltration de l'eau dans le sol soit fonction de nombreux paramètres, dont la qualité de l'eau d'irrigation et les facteurs du sol (structure, compaction et la teneur en matières organiques), le problème de la perméabilité et de l'infiltration se produit généralement lorsque des concentrations en ions sodium élevées diminuent le taux de percolation des eaux d'irrigation à travers les couches inférieures du sol.

La réduction du taux d'infiltration commence à avoir des effets négatifs lorsque l'eau ne peut pas s'infiltrer jusqu'aux racines de la culture dans la mesure où celle-ci en a besoin (SIMSEK & GUNDUZ, 2007).

A noter que les deux facteurs de qualité de l'eau les plus courants qui influencent le taux normal d'infiltration de l'eau sont la salinité de l'eau et les concentrations relatives en ions sodium, magnésium et calcium, appelées également taux d'adsorption du sodium (SAR).

2.1. Taux d'Adsorption de Sodium (SAR)

Le SAR est un critère d'appréciation du pouvoir alcalinisant des eaux d'irrigation (RICHARDS, 1954). Il renseigne sur la richesse relative de l'eau en sodium (cation dispersant) comparativement aux cations flocculants (calcium et magnésium). Si ce ratio est élevé dans l'eau d'irrigation, il provoque une sodification conduisant à une détérioration de la structure des sols ainsi qu'à une réduction du taux d'infiltration (TODD, 1980). La relation entre les trois cations proposés par le laboratoire de Riverside (RICHARDS, 1954), exprimant le SAR, est donnée par la relation ci-après:

$$SAR = \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]}{2}}}$$

Dans cette équation, les concentrations sont exprimées en milliéquivalents par litre.

Un critère (CE) combiné au SAR est utilisé pour évaluer le risque d'infiltration potentiel qui pourrait se développer dans un sol. Alors qu'une eau à faible salinité avec des valeurs de SAR élevées, présente un grave danger dû au taux d'infiltration. Une eau à salinité élevée avec des valeurs de SAR faibles ne rencontre aucun problème d'infiltration (Tableau 80).

Comme la conductivité électrique (salinité) et le SAR fonctionnent en même temps, les niveaux des teneurs des ions sodium dans l'eau sont des paramètres déterminants des risques d'infiltration potentiels. Il est également important de souligner que ces dangers surviennent généralement dans les premiers centimètres de la couche arable du sol et sont fortement liés à la stabilité structurelle de la surface du sol et à sa faible teneur en calcium par rapport à celle du sodium (AYERS & WESTCOT, 1985).

Il a été constaté aussi que lorsqu'un sol est irrigué avec des eaux à fortes concentrations de sodium, une surface à concentration élevée en sodium se développe, ce qui à son tour affaiblit la structure du sol (AYERS & WESTCOT, 1985). Le sol s'agrége puis se disperse en particules plus petites et obstrue ses pores. Un autre paramètre important est la teneur en argile du sol (AYERS & WESTCOT, 1985).

En ce qui concerne les éventuels problèmes d'infiltration du sol (Tableau 34), et d'après la classification (Tableau 35) établie à partir des directives de la FAO, les valeurs de la conductivité des eaux échantillonnées montrent que les eaux de surface des oueds Tafna et Sikkak et de l'aquifère de Sebdoou sont de qualité bonne (SAR 0-3 et CE >700) à modérée (SAR 0-3 et 200 < CE <700). Dans l'aquifère suscité, seules les eaux du puits P2 situé dans sa partie méridionale présentent une mauvaise qualité durant la période des basses eaux (SAR = 0.53 et CE = 143.6 $\mu\text{S cm}^{-1}$). Les eaux souterraines échantillonnées dans l'aquifère de Hennaya ne présentent aucun danger et sont, de ce fait, considérées comme étant bonnes à des fins d'irrigation.

Problème d'infiltration	Oued Tafna	Oued Sikkak	Aquifère de Sebdou		Aquifère de Hennaya	
	Ws	Ws	Ws	Ds	Ws	Ds
SAR 0-3 et EC >700	TW1-TW3	SW6-SW7	P1-P7- P10-P11	P3-P4- P5-P6	Tous les points d'eau	Tous les points d'eau excepté P19 - P21-P23
SAR 0-3 et EC 700-200	TW2-TW4- TW5	SW0- SW1- SW2- SW3-SW4	P3-P4- P5-P6- P9-S1- S2-S3	P1-P8- S1-S2-S3		
SAR 0-3 et EC < 200				P2		
SAR 6-12 et EC > 1900						P19

Tableau 35- Classification des eaux selon le SAR et la conductivité selon les directives de la FAO. CE en $\mu\text{S cm}^{-1}$; Ws-Wet season : saison humide ; Ds-Dry season : saison sèche

3. Toxicité ionique spécifique

Certains ions tels que le sodium, les chlorures et le bore posent des problèmes de toxicité pour les plantes lorsqu'ils se trouvent à des concentrations élevées dans l'eau ou dans le sol. Ces ions sont considérés comme étant toxiques (AYERS & WESTCOT, 1985), Lorsqu'ils sont absorbés par la plante et s'accumulent à des concentrations suffisamment élevées pouvant causer des dommages aux cultures ou une réduction du rendement.

A savoir que le niveau de toxicité est spécifique au type de plante et au taux d'absorption des éléments chimiques. Les cultures de type permanent et pérenne sont plus sensibles à ce type de toxicité que les cultures annuelles. On sait également que la toxicité des ions s'accompagne généralement d'autres problèmes tels que la salinité et les risques d'infiltration (AYERS & WESTCOT, 1985).

3.1. Le sodium

La détection de la toxicité du sodium est relativement difficile par rapport à celle des autres ions. Les symptômes de toxicité typiques sur la plante sont la brûlure des feuilles et la mort des tissus le long des bords extérieurs des feuilles, contrairement aux symptômes de toxicité due aux chlorures qui se manifestent à l'extrémité des feuilles (AYERS & WESTCOT, 1985). L'ion sodium peut entraîner également des dangers dans la structure du sol, créant des problèmes de réduction de perméabilité et d'infiltration d'eau. De plus, les ions calcium et magnésium sont remplacés par des ions sodium, provoquant ainsi une augmentation de la teneur en sodium du sol (TODD & MAYS, 2004; SIMSEK & GUNDUZ, 2007).

Alors que la CE est une évaluation de tous les sels solubles dans l'eau, le danger du sodium est généralement défini séparément, en raison des effets néfastes spécifiques du sodium sur les propriétés physiques du sol et la survie des plantes.

Ainsi, le risque de sodium est exprimé par le SAR qui définit les proportions relatives de sodium par rapport aux ions calcium et magnésium dans un échantillon d'eau (Tableau 34).

Il a été constaté que pour les eaux de surface des deux cours d'eau, les valeurs du SAR sont comprises entre 0.2 (TW1) et 1.29 (TW3) pour l'oued Tafna et entre 0.26 (SW0) et 2.99 (SW7) pour l'oued Sikkak. Ceci témoigne que les teneurs en sodium sont faibles dans les eaux de l'oued Tafna, et en augmentation progressive de l'amont vers aval pour l'oued Sikkak. Cependant, elles restent toujours inférieures à 3, indiquant une qualité bonne pour l'irrigation par rapport à cet indice (Figure 81).

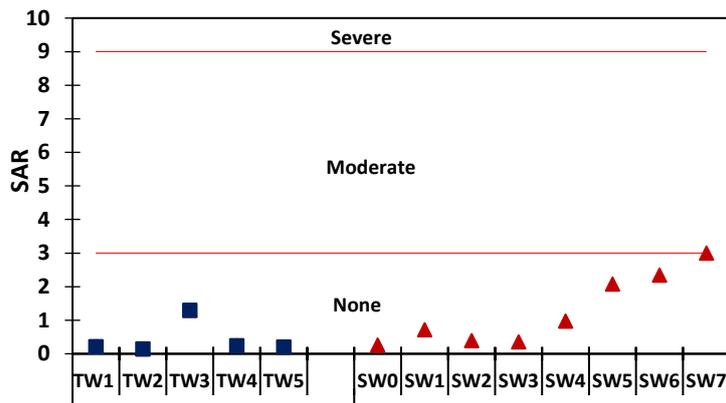


Figure 81- Variation du SAR dans les eaux de surface. Carré: Oued Tafna, Triangle : Oued Sikkak.

Les eaux souterraines de l'aquifère de Sebdou enregistrent des valeurs de SAR comprises entre 0.09 et 1.42 et des teneurs en sodium faibles à moyennes, dénotant ainsi une bonne qualité des eaux pour l'irrigation (Figure 82). A l'encontre de ce dernier, les eaux de l'aquifère de Hennaya indiquent des valeurs de SAR comprises entre 1.1 et 7.1 suggérant des concentrations plus élevées en sodium. La quasi-totalité des valeurs du SAR est inférieure à 3, à l'exception des puits P19 et P21 ($3 < SAR < 9$), témoignant ainsi de la qualité bonne à modérée des eaux souterraines (Figure 82).

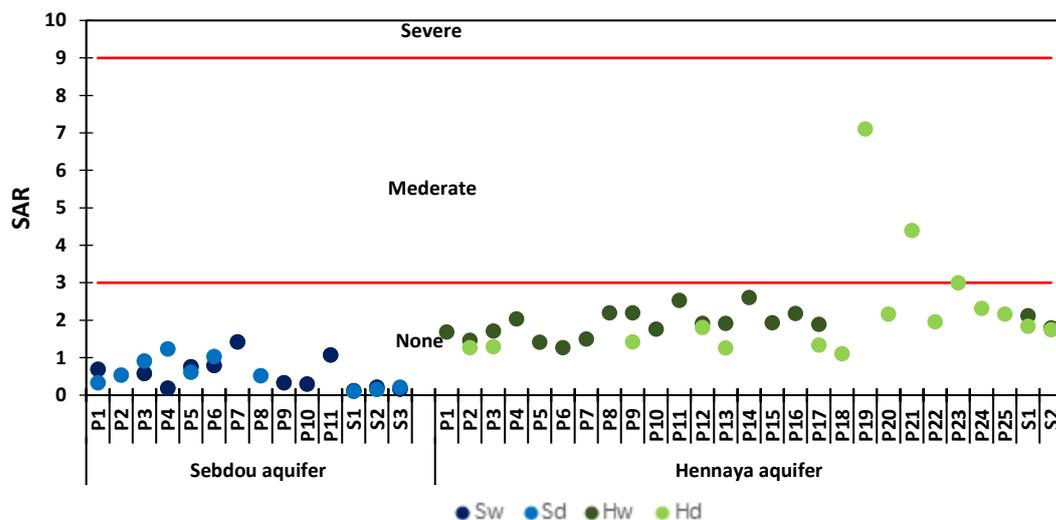
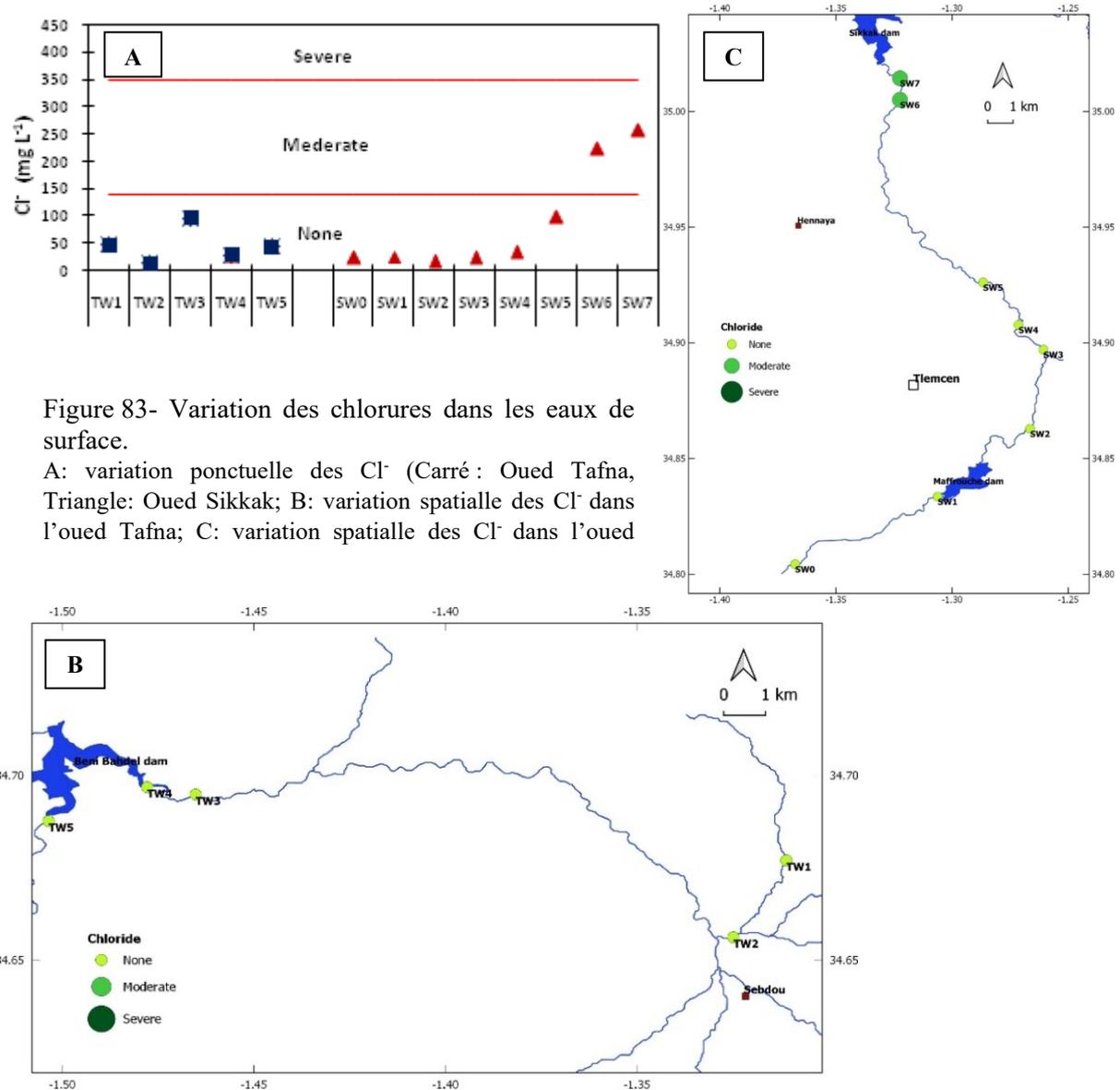


Figure 82- Variation du SAR dans les eaux souterraines
Sw: Sebdou en saison Humide, Sd: Sebdou en saison sèche, Hw: Hennaya en saison Humide, Hd: Hennaya en saison sèche.

3.2. Les chlorures

Bien que les chlorures soient essentiels pour les cultures à faibles concentrations, ils peuvent cependant être toxiques pour les cultures sensibles à des teneurs plus élevées. Leurs effets toxiques sont immédiatement perçus comme des brûlures de feuilles ou la mort de tissus foliaires. Normalement, les dommages causés à la plante surviennent en premier à l'extrémité des feuilles et progressent vers l'arrière le long des bords. Dans les cas de teneurs excessives, une défoliation précoce s'ensuit (AYERS & WESTCOT, 1985).

En général, les eaux avec des teneurs de chlorures inférieures à 140 mg L^{-1} sont considérées comme étant de bonne qualité à des fins d'irrigation (Tableau 34). Concernant cet ion, les points d'eau échantillonnés le long des deux cours d'eau présentent des concentrations inférieures à 140 mg L^{-1} , qualifiant ainsi leurs eaux comme étant bonne pour l'irrigation, à l'exception de SW6 (223.7 mg L^{-1}) et SW7 (256.9 mg L^{-1}). Ces derniers situés à l'extrémité nord de l'oued Sikkak et proche du barrage indiquent une toxicité modérée (Figure 83).



Dans les eaux souterraines de l'aquifère de Sebdu, les teneurs en chlorures ne présentent pas de toxicité pour les plantes et sont, en général, propices à l'irrigation (Figures 84A,B). A l'encontre de cet aquifère, les teneurs en chlorures des eaux souterraines de Hennaya présentent une toxicité modérée à sévère durant les deux saisons étudiées (Figures 84C, D).

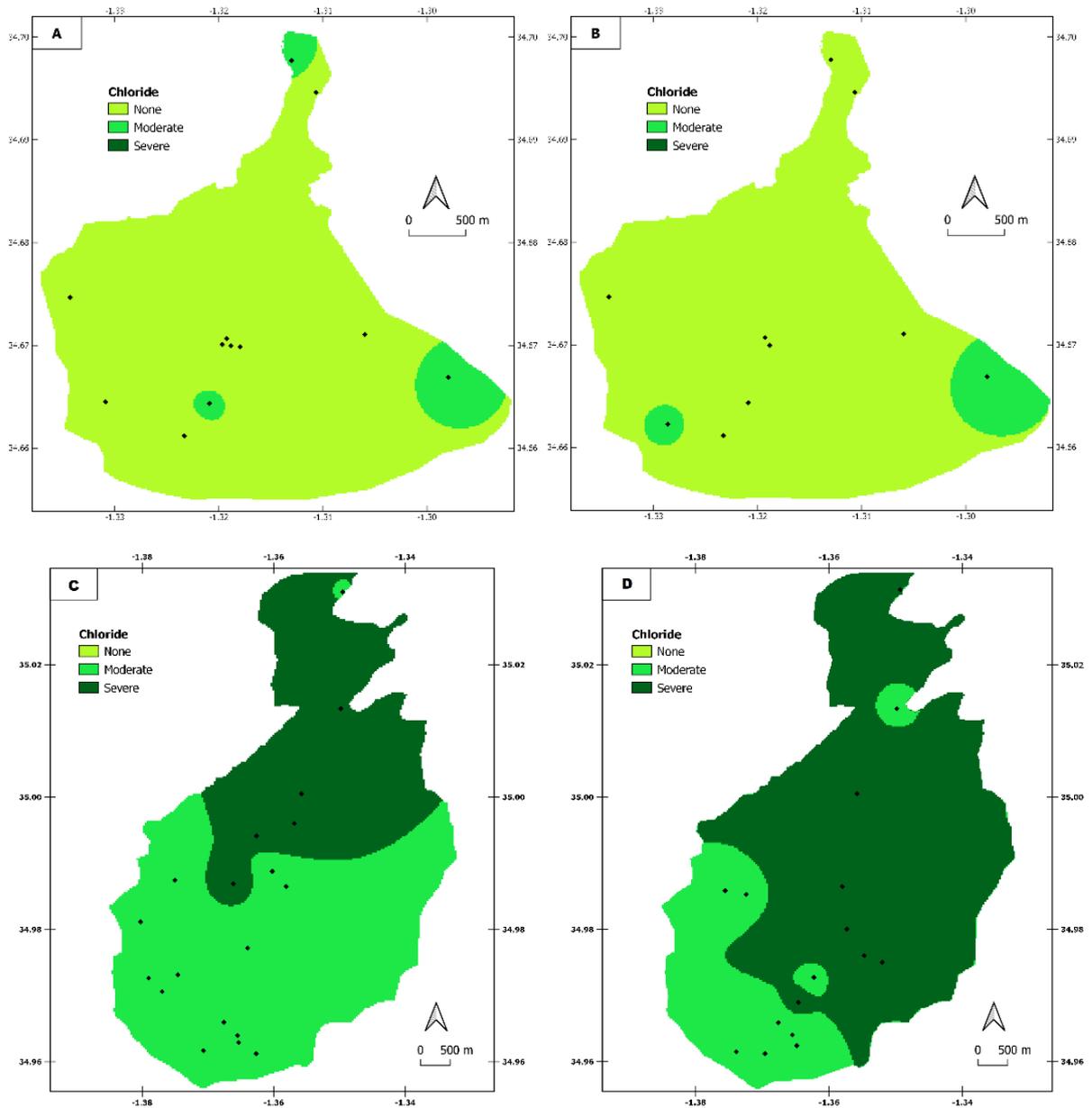


Figure 84- Variation spatiale des Chlorures dans les eaux souterraines.
A: Aquifère de Sebdu en saison humide, B: Aquifère de Sebdu en saison, C: Aquifère de Hennaya en saison humide, D: Aquifère de Hennaya en saison sèche.

4. Effets divers

Dans le cadre des effets divers sur les cultures sensibles irriguées, il existe des paramètres supplémentaires, à ceux cités précédemment, et qui doivent être évalués quant à

l'utilisation des eaux à des fins d'irrigation. Ces paramètres comprennent le pH de l'eau et les concentrations en ions bicarbonate et nitrates (Tableau 34).

4.1. Le pH

Le pH de l'eau d'irrigation varie en fonction de plusieurs paramètres, notamment la contamination par diverses sources de pollution et les pluies acides. Il influence l'équilibre carbonaté, la teneur en métaux lourds et le rapport relatif des composants azotés, qui à leur tour influence la qualité du sol et la croissance des plantes (AYERS & WESTCOT, 1985).

Dans les eaux acides, le calcium, le magnésium et l'aluminium ne sont pas correctement absorbés par les plantes. D'autre part, les eaux alcalines fournissent un meilleur environnement pour l'absorption de plusieurs métaux et nutriments par les plantes. Cependant, ces eaux basiques sont également responsables de l'accumulation de carbonate de calcium qui influence la structure physique de l'eau. En général, les valeurs de pH idéales des eaux d'irrigation sont comprises entre 7.0 et 8.0 (AYERS & WESTCOT, 1985; SIMSEK & GUNDUZ, 2007).

Selon les directives de la FAO relatives à la qualité de l'eau à des fins d'irrigation (Tableau 34), les résultats obtenus montrent que les valeurs de pH sont conformes aux normes (6.5-8.5) pour les eaux de surface (Oued Tafna et Sikkak) (Figure 85). Contrairement à la plaine de Hennaya, les valeurs du pH des eaux de l'aquifère de Sebdu (Figure 86) indiquent des eaux souterraines légèrement acides pendant la saison des pluies (Figure 86).

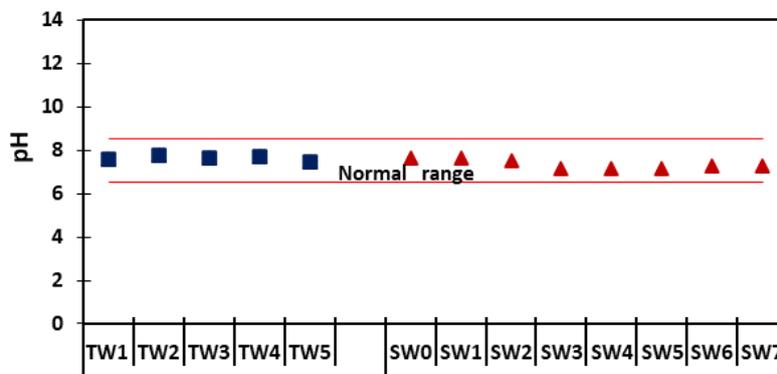


Figure 85- Variation du pH dans les eaux de surface.
Carré: Oued Tafna, Triangle: Oued Sikkak.

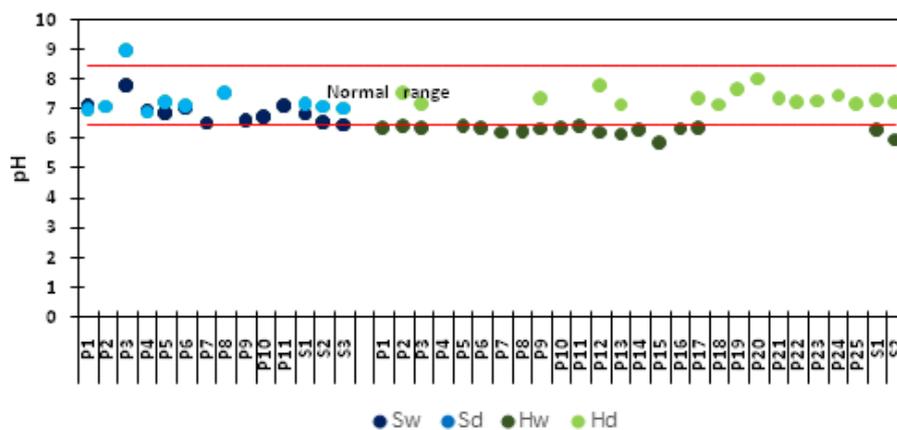


Figure 86- Variation du pH dans les eaux souterraines.
Sw: Sebdu en saison humide, Sd: Sebdu en saison sèche, Hw: Hennaya en saison humide, Hd : Hennaya en saison sèche).

4.2. Les bicarbonates

L'alcalinité est une mesure de la capacité de l'eau à neutraliser un acide ajouté. Étant le principal composant de l'alcalinité, les ions carbonate et bicarbonate sont généralement responsables des pH élevés (> 8.5) de l'eau. Des niveaux élevés de carbonates amènent les ions calcium et magnésium à former des minéraux insolubles favorisant la prédominance de l'ion sodium en solution (SIMSEK & GUNDUZ, 2007). Par conséquent, ils sont indirectement responsables des dangers que provoquent des concentrations élevées en sodium sur les cultures irriguées et le sol. Ainsi, il est possible de conclure que les eaux d'irrigation hautement alcalines pourraient intensifier les conditions du sol sodique. Dans de tels cas, il est recommandé de calculer un SAR ajusté pour refléter le risque accru de sodium (SIMSEK & GUNDUZ, 2007). En général, des concentrations en bicarbonates inférieures à 90 mg L^{-1} sont considérées comme étant idéales pour l'irrigation (SIMSEK & GUNDUZ, 2007). La figure 87 montre que majoritairement, les eaux de surface étudiées ont des teneurs en bicarbonates comprises entre 90 mg L^{-1} et 518.5 mg L^{-1} indiquant ainsi une qualité modérée des eaux. Une exception concerne quelques échantillons prélevés dans l'oued Sikkak (SW1, SW4, SW5 et SW7), et dont les concentrations en cet ion sont inférieures à 90 mg L^{-1} . De ce fait, lesdits échantillons sont considérés comme étant idéaux pour l'irrigation.

En ce qui concerne les aquifères étudiés, les concentrations en bicarbonates des eaux indiquent une toxicité modérée durant les deux campagnes d'échantillonnage (Figure 88). Il est bien connu que les eaux à forte concentration en bicarbonates ont tendance à précipiter le calcium et le magnésium, car l'eau du sol devient plus concentrée en raison de l'évaporation (SIMSEK & GUNDUZ, 2007).

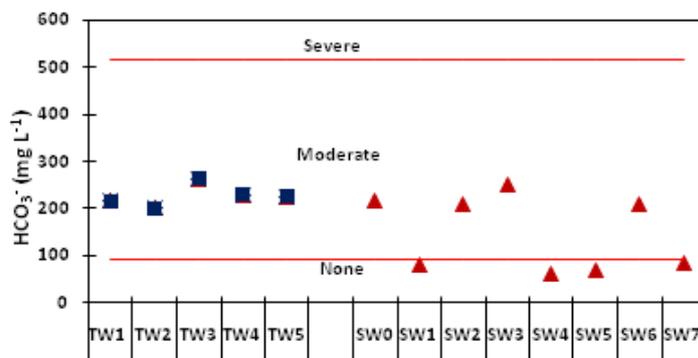


Figure 87- Variation des bicarbonates dans les eaux de surface.
Carré: Oued Tafna, Triangle: Oued Sikkak wadi).

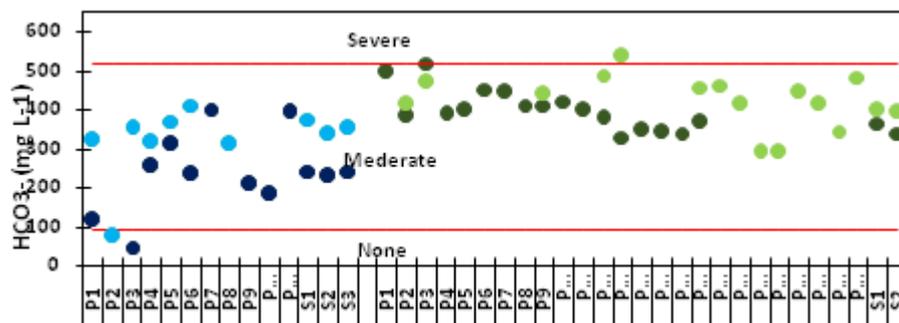


Figure 88- Variation bicarbonates dans les eaux souterraines.

Sw: Sebdu en saison humide, Sd: Sebdu en saison sèche, Hw: Hennaya en saison humide, Hd: Hennaya en saison sèche).

4.3. Les nitrates (N-Nitrate)

Il est bien connu que les nitrates représentent la principale source d'azote pour la plupart des plantes et sont couramment utilisés comme engrais (FEDKIW, 1991). Néanmoins, des quantités excessives de nitrates pourraient entraîner une réduction du rendement ou de la qualité de la culture en raison d'un retard de maturité de la récolte, d'une croissance intempestive ou de dépôts disgracieux sur le fruit ou le feuillage. Cependant, certains de ces problèmes peuvent être généralement surmontés par une bonne gestion des engrais et de l'irrigation. En outre, l'application des nitrates sur les sols doit être effectuée avec le plus grand soin, car elle pourrait facilement causer une pollution des ressources locales en eau souterraine. En général, les valeurs idéales du nitrate-azote (N-NO_3^-) des eaux d'irrigation doivent être inférieures à 5 mg L^{-1} (Tableau 34). Par rapport aux concentrations en N-NO_3^- , la toxicité varie de modérée à faible au niveau des points échantillonnés dans l'oued Tafna (Figures 89A et B), et de nulle (SW0 et SW1) à modérée au niveau de de Sikkak (Figures 89A et C).

Les teneurs en nitrates montrent, en général, une toxicité modérée à sévère (Figure 90) et modérée (Figure 90A) dans l'aquifère de Sebdou au cours des deux saisons. Cette toxicité était sévère dans l'aquifère de Hennaya, durant les deux périodes d'échantillonnage (Figures 90C, D), à l'exception de quelques points d'eau (P1, P6, P7, P9 et P10), situés dans la partie sud-ouest de la plaine (saison humide) et S1 (source Aïn Boukoura) où la qualité est relativement modérée.

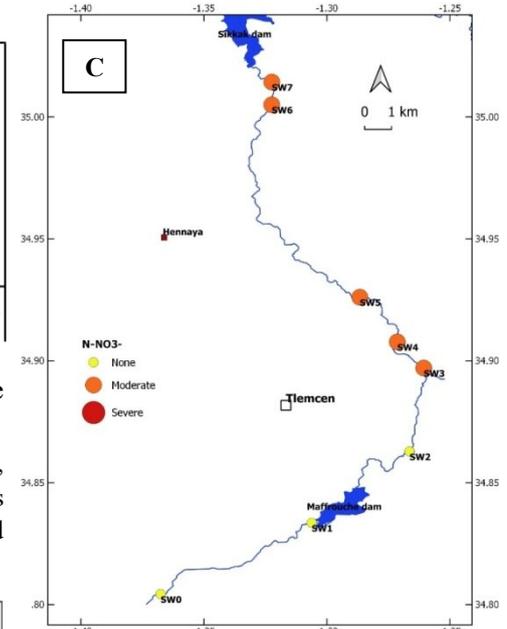
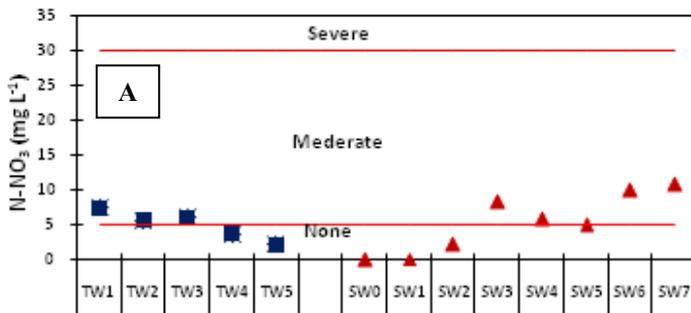
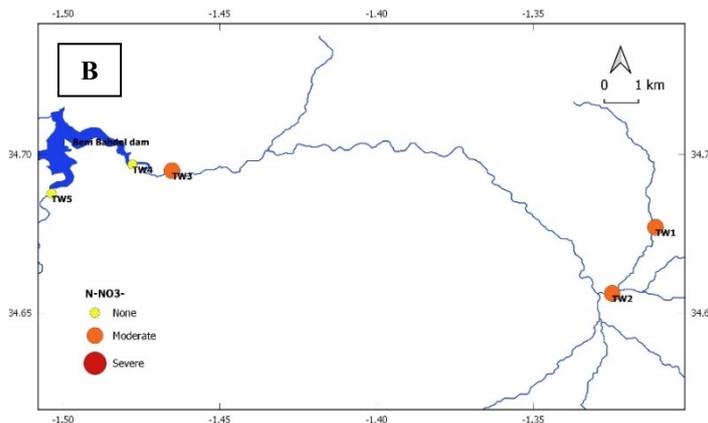


Figure 89- Variation des N-NO_3^- dans les eaux de surface.

A: Variation ponctuelle de N-NO_3^- (Carré: Oued Tafna, Triangle: Oued Sikkak); B: variation spatiale de N-NO_3^- dans l'oued Tafna; C : variation spatiale de N-NO_3^- dans l'oued Sikkak.



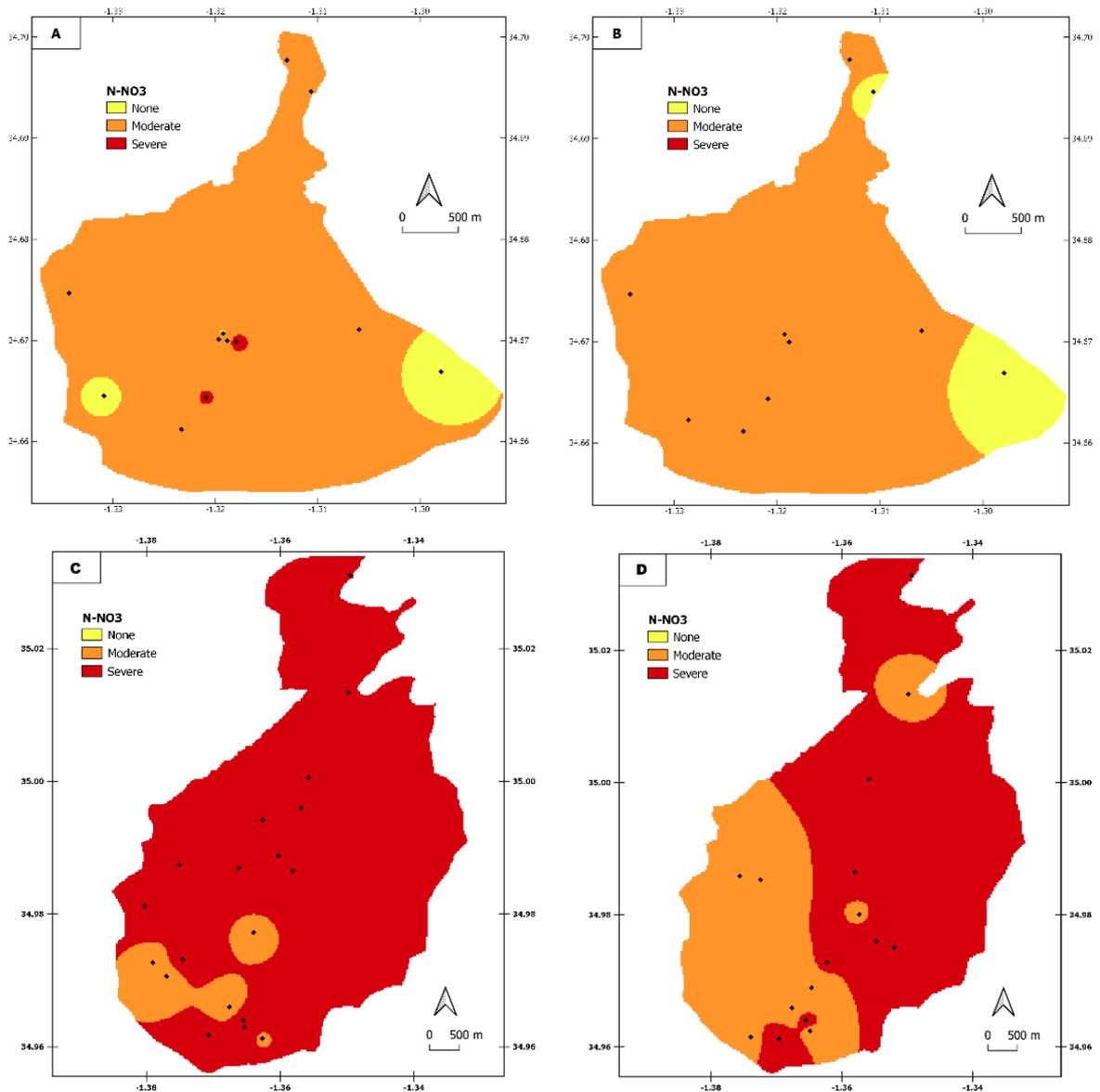


Figure 90- Variation spatiale de l'azote des Nitrates dans les eaux souterraines.

A: Aquifère de Sebdu en saison humide, B: Aquifère de Sebdu en saison, C: Aquifère de Hennaya en saison humide, D: Aquifère de Hennaya en saison sèche

B. Les indices d'irrigation

Au total, six indices ont été utilisés pour évaluer l'état actuel des eaux souterraines à des fins d'irrigation. Il s'agit de: la dureté totale (TH), le pourcentage de sodium (%), le risque du magnésium (MH), le carbonate de sodium résiduel (RSC), l'indice de perméabilité (PI), le rapport de Kelley (KR).

1. La dureté TH (Total Hardness)

La dureté résulte de la présence de cations métalliques divalents, dont le calcium et le magnésium sont les plus abondants dans les eaux souterraines. Ces ions réagissent avec le savon à partir de précipités et avec certains anions présents dans l'eau pour former du tartre.

La dureté de l'eau provient de la solution de dioxyde de carbone libéré par l'action bactérienne dans le sol et dans l'eau de pluie percolante (LEVERLY & VAN DER GOOT, 1955). Des conditions de pH faible se développent et conduisent à la solution à la mise en solution de carbonates insolubles dans le sol et les formations calcaires pour les convertir en ions bicarbonates (TODD & MAYS, 2004). Les impuretés des calcaires, à l'exemple des sulfates, des chlorures et des silicates sont exposées à l'action du solvant eau lorsque les carbonates sont dissous, de sorte qu'ils passent également en solution (TODD & MAYS, 2004). Ainsi, l'eau dure a tendance à provenir de zones où les parties sommitales des sols épais recouvrent les formations calcaires (TODD & MAYS, 2004).

La dureté TH est habituellement exprimée en équivalent de carbonate de calcium.

$$TH = Ca \times \frac{CaCO_3}{Ca} + Mg \times \frac{CaCO_3}{Ca}$$

Où: TH, Ca et Mg sont mesurés en milligrammes par litre et le rapport en poids équivalent.

L'équation peut être réduite à **TH = 2.5 Ca + 4.1 Mg**

Le degré de dureté de l'eau est généralement basé sur la classification indiquée dans le tableau 36:

Dureté (mg L ⁻¹ en CaCO ₃)	Classe d'eau
0-75	Douce
75-150	Modérément dure
150-300	Dure
> 300	Très dure

Tableau 36- Classification de la dureté de l'eau (d'après SAWYER & McCARTY, 2003).

Notons que la totalité des valeurs calculées pour la dureté totale (TH) sont inférieures à 75 mg L⁻¹. Elles indiquent que les eaux de surface des oueds Tafna et Sikkak et les eaux souterraines des aquifères de Sebdou et de Hennaya sont des eaux douces (Figures 91 et 92).

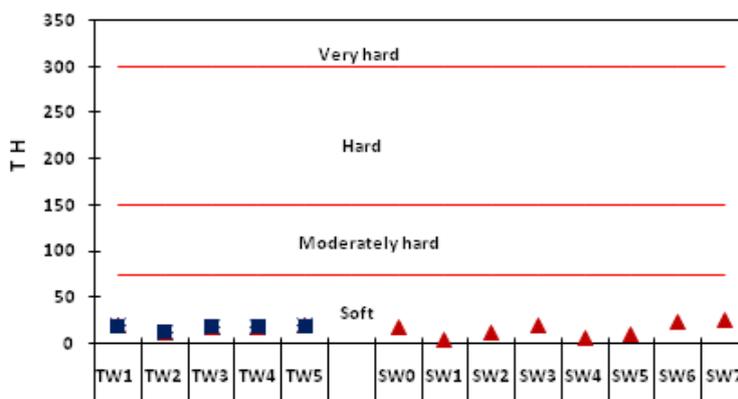


Figure 91- Variation du TH dans les eaux de surface.
Carré: Oued Tafna, Triangle: Oued Sikkak.

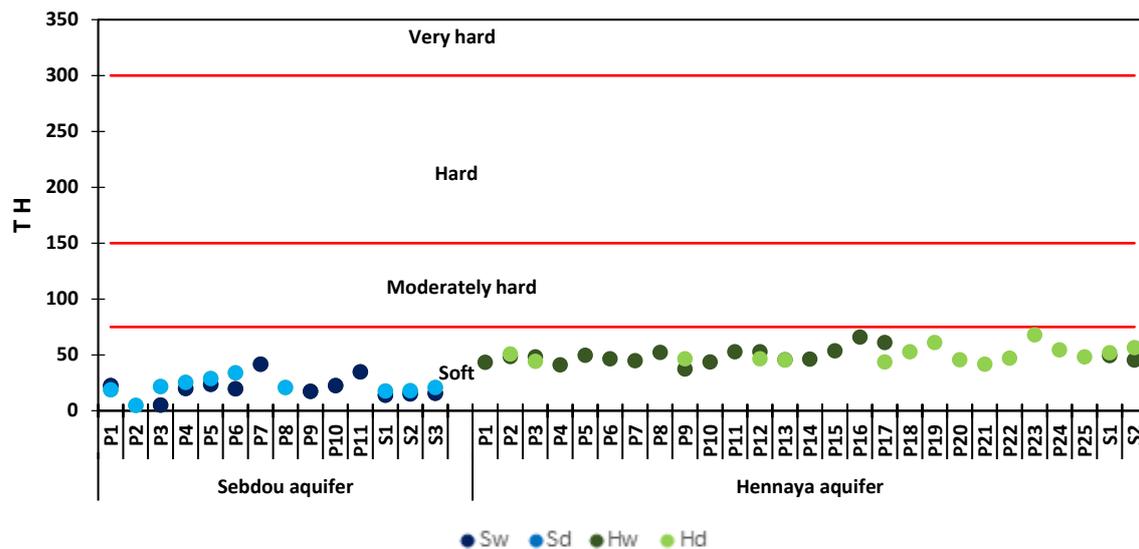


Figure 92- Variation du TH dans les eaux souterraines.

Sw: Sebdou en saison humide, Sd: Sebdou en saison sèche, Hw: Hennaya en saison humide, Hd: Hennaya en saison sèche.

2. Le pourcentage de sodium soluble (SSP ou Na%)

Défini par WILCOX (1955), le SSP ou pourcentage de sodium est donné par l'équation suivante dans laquelle les concentrations sont en exprimées en équivalent par litre.

$$SSP = Na\% = \frac{\text{Concentration de Sodium soluble}}{\text{concentration cationique totale}} \times 100$$

Utile pour caractériser une eau, cet indice indique le danger du sodium mais ne constitue pas une mesure aussi satisfaisante de ce dernier, que celui indiqué par le rapport d'adsorption du sodium SAR (WILCOX, 1955).

Il est à noter qu'une valeur élevée de cet indice indique une eau douce, par contre une valeur basse indique une eau dure.

Le tableau 37 ci-dessous affiche la classification de l'eau d'irrigation basée sur SSP.

Qualité de l'eau	Na %
Excellente	< 20
Bonne	20 - 40
Admissible	40 - 60
Médiocre	60 - 80
Inappropriée ou mauvaise	>80

Tableau 37- Limites admissibles pour les classes d'eau d'irrigation basées sur SSP (Na%) (d'après WILCOX, 1948; WILCOX, 1955).

Les variations ponctuelle et spatiale de l'indice SSP (%) des eaux de surface (figure 93) affichent une qualité excellente à bonne (Tw3) pour les eaux de l'oued Tafna (Figures 93A et B). Pour l'oued Sikkak, la qualité des eaux excellente en amont (SW0) devient admissible à son aval (Figure 93A et C).

La spatialisation du pourcentage de sodium soluble (SSP ou Na%) (Figures 94A et B) montre que les eaux souterraines de l'aquifère de Sebdou appartiennent aux classes excellente et bonne durant les deux saisons. Celles des eaux de l'aquifère de Hennaya, se rangent majoritairement dans la classe bonne, à l'exception des deux puits P19 et P21 situés au Sud-Ouest de l'aquifère, et qui en saison sèche se trouvent dans la classe admissible (Figures 94C et D).

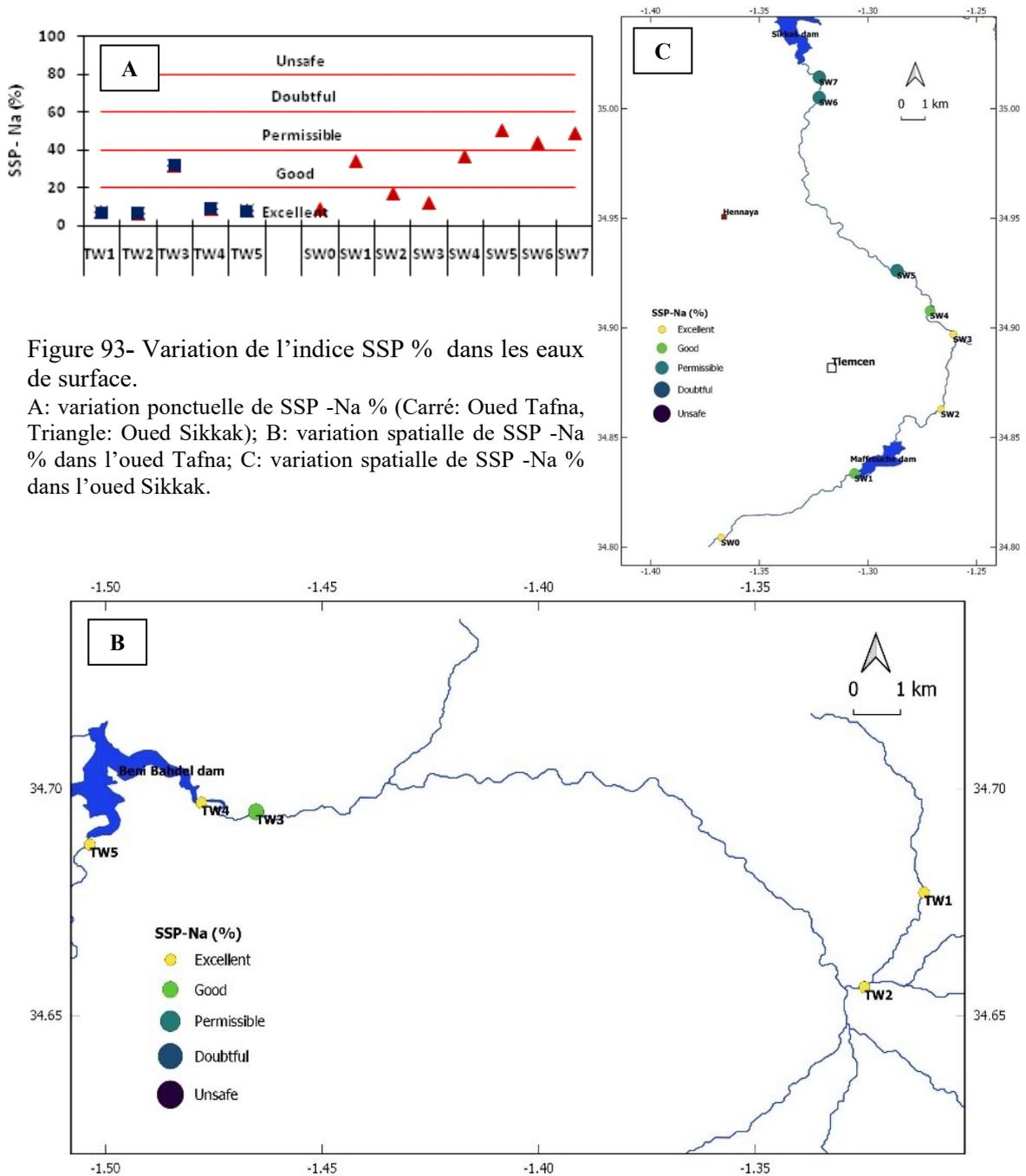


Figure 93- Variation de l'indice SSP % dans les eaux de surface.
 A: variation ponctuelle de SSP -Na % (Carré: Oued Tafna, Triangle: Oued Sikkak); B: variation spatiale de SSP -Na % dans l'oued Tafna; C: variation spatiale de SSP -Na % dans l'oued Sikkak.

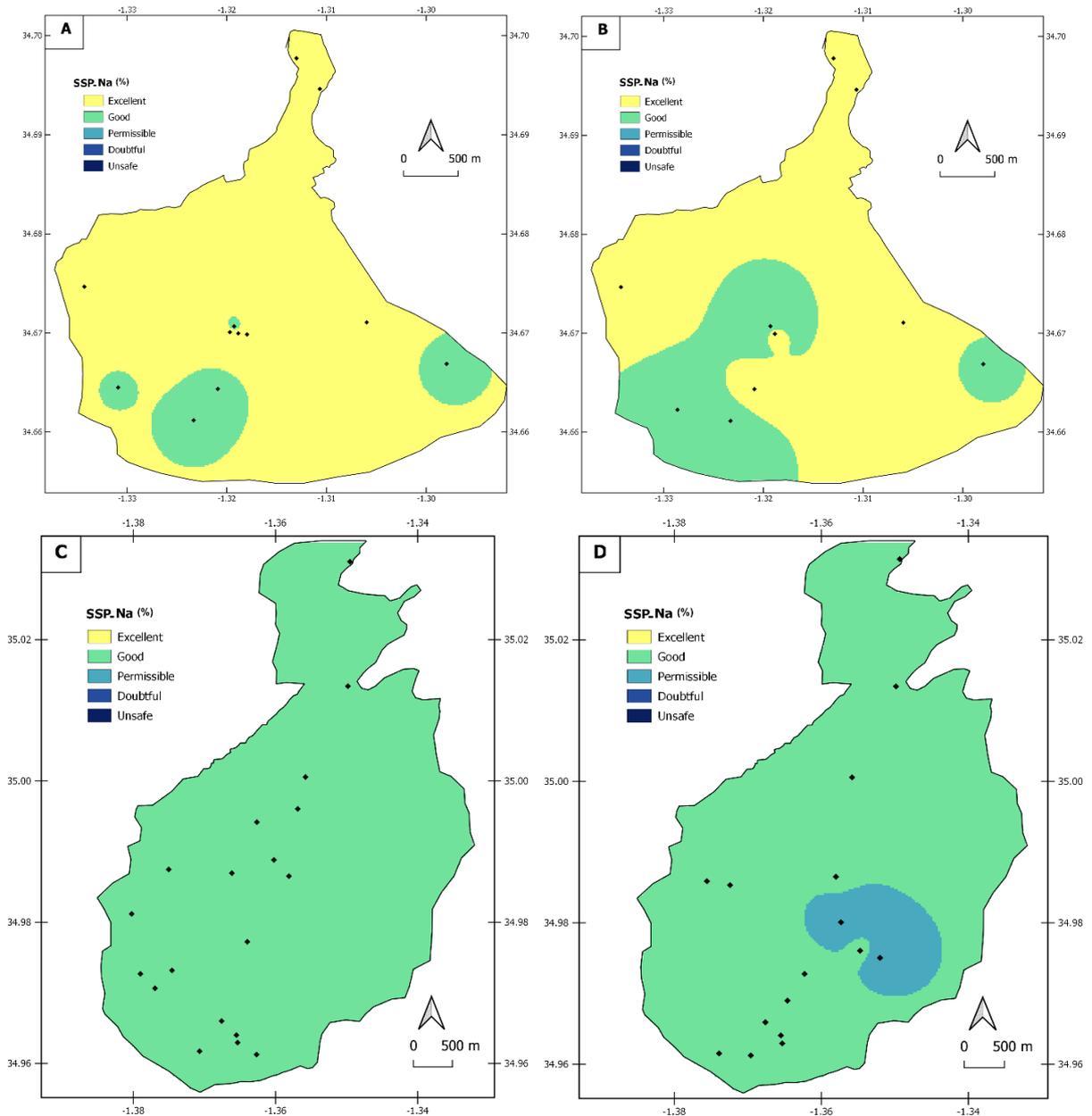


Figure 94- Variation spatiale de l'indice SSP (%) dans les eaux souterraines.
 A: Aquifère de Sebdu en saison humide, B: Aquifère de Sebdu en saison sèche, C: Aquifère de Hennaya en saison humide, D: Aquifère de Hennaya en saison sèche.

3. Le risque du magnésium (Magnesium Hazard)

Des concentrations élevées en magnésium dans les eaux d'irrigation affecteront défavorablement la qualité du sol et le transformeront en sol alcalin réduisant ainsi la production agricole (AYERS & WESTCOT, 1985). Ceci peut être mis en évidence par le rapport proposé par SZABOLCS & DARAB (1964). Ce rapport est donné par la relation:

$$MH = \frac{Mg^{2+}}{Ca^{2+} + Mg^{2+}} \times 100$$

Où Ca^{2+} et Mg^{2+} sont exprimées en mequivalent par litre.

Des valeurs de magnesium hazard (MH) inférieures à 50% indiquent que l'eau convient à l'irrigation (LLOYD & HEATHCOAT, 1985). Les valeurs de l'indice MH (Figure 95) dans les eaux de surface montrent que ces dernières sont inaptes à l'irrigation pour la plupart des points d'eau échantillonnés, à l'exception de échantillons Tw1 et Tw2 prélevés dans l'oued Tafna (Figure 95B) et Sw0, Sw1 et Sw2 dans celui de Sikkak. L'ensemble de ces points est situé à l'amont des cours d'eau (Figure 95C).

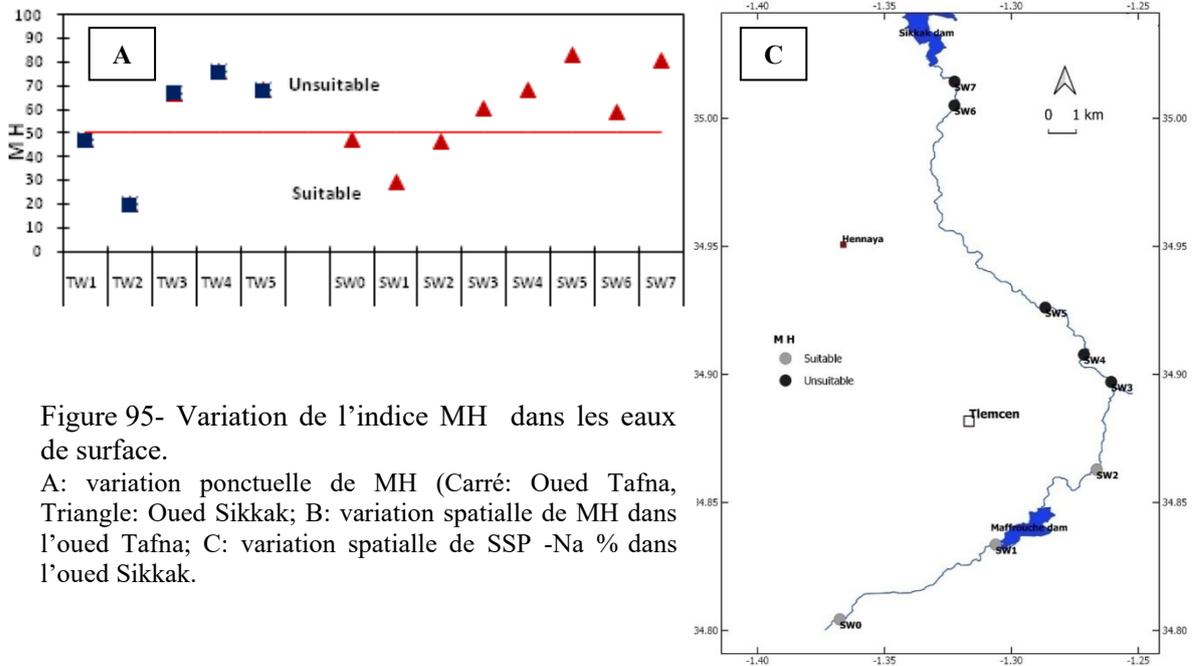
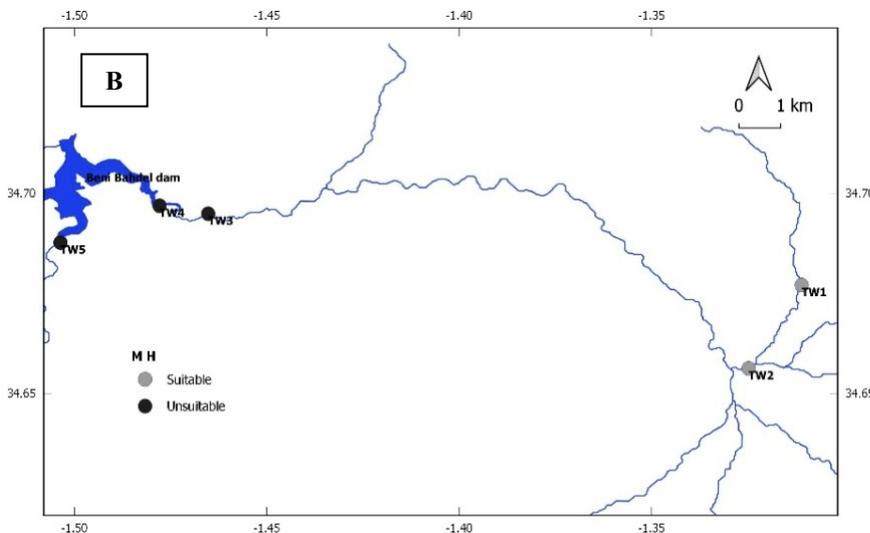


Figure 95- Variation de l'indice MH dans les eaux de surface.
A: variation ponctuelle de MH (Carré: Oued Tafna, Triangle: Oued Sikkak); B: variation spatiale de MH dans l'oued Tafna; C: variation spatiale de SSP -Na % dans l'oued Sikkak.



Dans l'aquifère de Sebdo, les résultats de MH obtenus (Figures 96A et B), indiquent que 67% des échantillons d'eau souterraine, en saison humide et 60% en saison sèche sont inférieures à 50% (MH < 50%), impliquant ainsi une aptitude de ces eaux à l'irrigation.

Pour la plaine de Hennaya (Figure 96 C et D), la saison humide est caractérisée par des eaux majoritairement inaptes à l'irrigation (79% des échantillons), et seulement 21% des échantillons sont aptes (MH < 50%). Durant la saison sèche, les points d'eaux se répartissent équitablement dans les deux classes de cet indice.

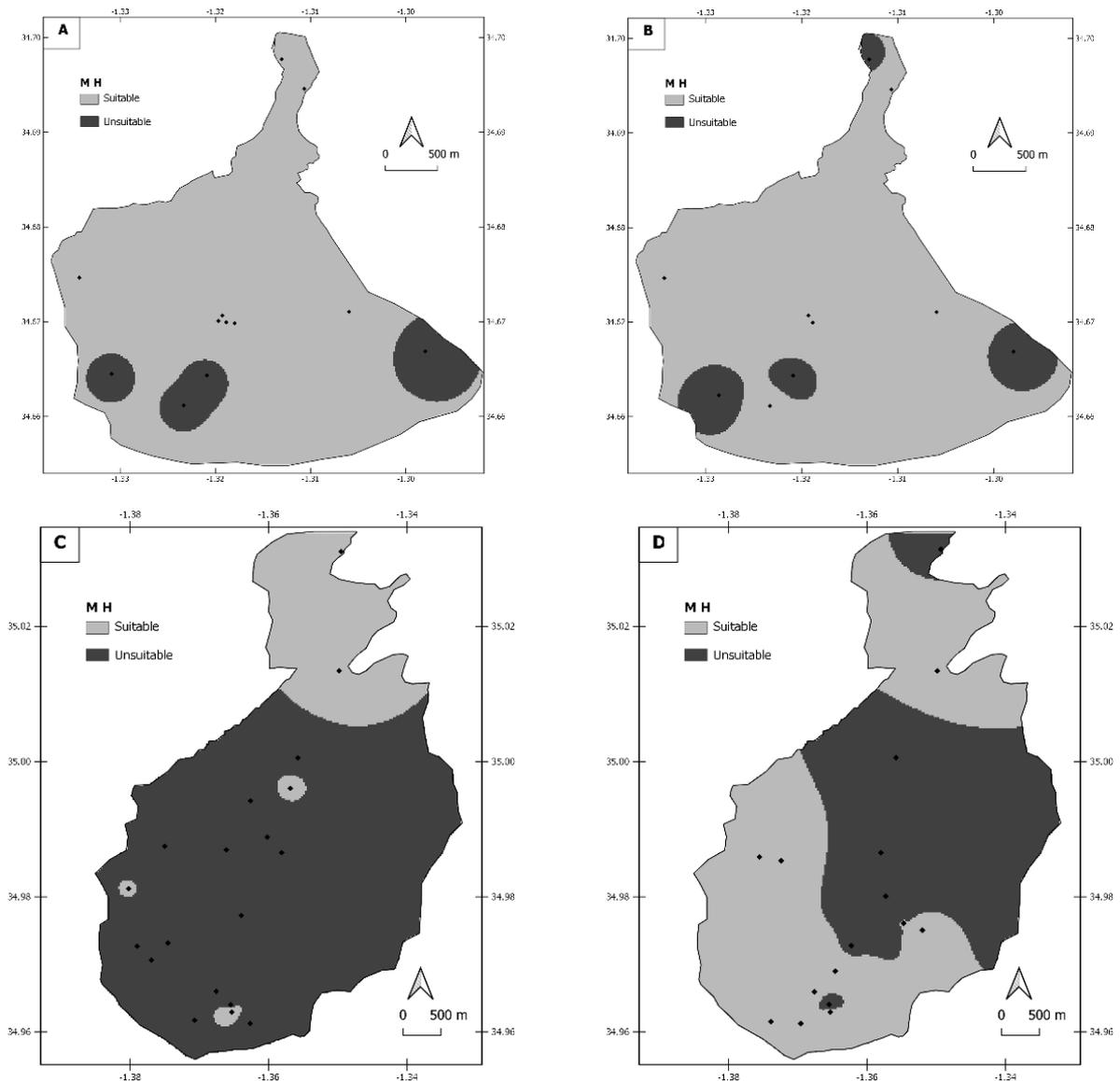


Figure 96- Variation spatiale de l'indice MH dans les eaux souterraines.

A: Aquifère de Sebdu en saison humide, B: Aquifère de Sebdu en saison, C: Aquifère de Hennaya en saison humide, D: Aquifère de Hennaya en saison sèche.

4. Le carbonate de sodium résiduel (Residual Sodium Carbonate)

Le carbonate de sodium résiduel (RSC) est principalement dû à une eau à forte concentration de bicarbonate où le calcium et le magnésium ont tendance à précipiter sous forme de carbonates (BEN ALAYA & *al.*, 2014; HALLOUCHE & *al.*, 2017. En conséquence, la proportion de sodium augmente et le sol pourrait donc adsorber plus de sodium (DURAND, 1973). Cette approche est basée sur l'équation suivante:

$$RSC = [HCO_3^- + CO_3^{2-}] - [Ca^{2+} + Mg^{2+}]$$

Où toutes les concentrations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- et CO_3^{2-}) sont en milliéquivalents par litre.

La classification de la qualité de l'eau d'irrigation, en fonction des valeurs du RSC (EATON, 1950) est mentionnée dans le tableau ci-dessous:

Qualité de l'eau	Residual sodium carbonate (RSC)
Bonne	< 1.25
Médiocre	1.25 – 2.5
Innapropriée	> 2.5

Tableau 38- Classification de l'eau d'irrigation en fonction de RSC (d'après EATON, 1950).

Les eaux des deux sous bassins étudiés indiquent des valeurs de RSC négatives (Figure 97 et 98). Ces valeurs, étant inférieures à 1.25, les eaux de surface et souterraines demeurent de bonne qualité quant à leur utilisation à des fins d'irrigation.



Figure 97- Variation de l'indice RSC dans les eaux de surface.
Carré: Oued Tafna, Triangle: Oued Sikkak.

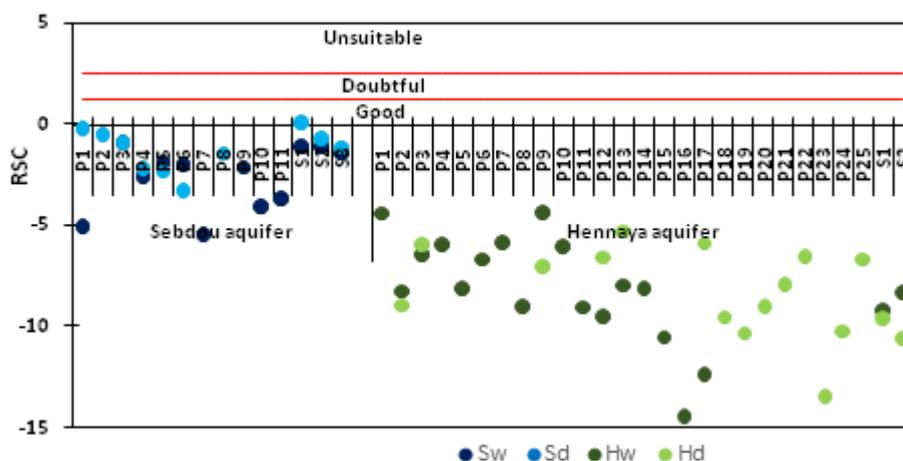


Figure 98- Variation de l'indice RSC dans les eaux souterraines.
Sw: Sebdou en saison humide, Sd: Sebdou en saison sèche, Hw: Hennaya en saison humide, Hd: Hennaya en saison sèche.

5. L'indice de perméabilité (Permeability index)

Une irrigation à long terme peut affecter la perméabilité du sol. Le sodium, le calcium, le magnésium et le bicarbonate influencent la perméabilité du sol en modifiant ses propriétés physiques et chimiques. DONEEN (1964) a classé les eaux d'irrigation sur la base de l'indice de perméabilité (PI) en utilisant la relation:

$$PI = \frac{Na^+ + \sqrt{HCO_3^-}}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+} \times 100$$

Où les concentrations des ions sont exprimées en milliéquivalents par litre.

Le tableau 39 représente la classification des eaux d'irrigation selon l'indice de perméabilité. D'après cette classification, les eaux des deux cours d'eau (Tafna et Sikkak), présentant des valeurs de PI comprises entre 36.67 et 75.53, se rangent dans la classe de la qualité modérée ($25 < PI < 75$) pour l'utilisation agricole (Figure 99).

Classes d'eau	Permeability index (PI %)
Adaptée	> 75
Modérée	25 – 75
Innapropriée	<25

Tableau 39- Classification de l'eau d'irrigation en fonction de PI (d'après DONEEN, 1964).

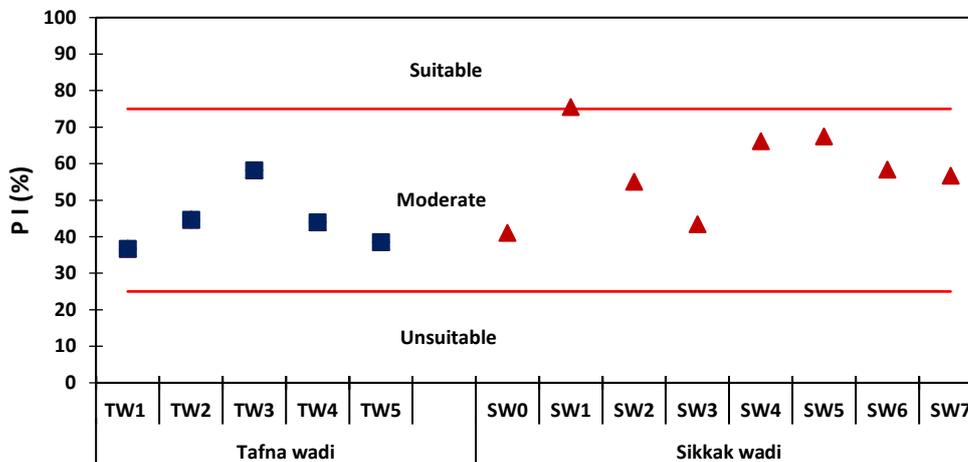


Figure 99- Variation de PI (%) dans les eaux de surface.
Carré: Oued Tafna , Triangle: Oued Sikkak.

De même, les eaux de l'aquifère de Sebduou présentent des valeurs de PI comprises entre 31.01 (P10) et 64.64 (P3) en saison humide et entre 39.47 (S3) et 72.80 (P2), en saison sèche. De ce fait, elles seront classées dans la catégorie modérée ($25 < PI < 75$) (Figure 100). Il en est de même, pour les eaux de la plaine de Hennaya où les valeurs de PI varient de 37.11(P5) à 50.9 (P9) en saison humide et de 32.40 (P18) à 64.72 (P19) en saison sèche (Figure 100).

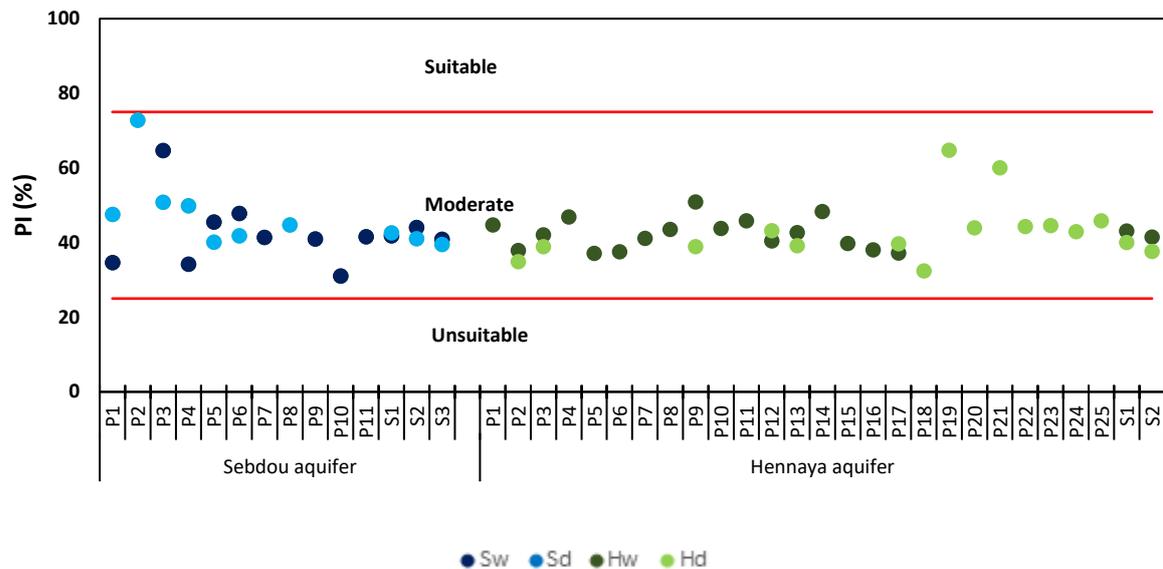


Figure 100- Variation de PI (%) dans les eaux souterraines.
 Sw: Sebdou en saison humide, Sd: Sebdou en saison sèche, Hw: Hennaya en saison humide, Hd: Hennaya en saison sèche.

6. Le rapport de Kelly (Kelly's Ratio)

Ce rapport introduit par KELLY (1940) permet l'évaluation de la qualité de l'eau d'irrigation en termes de concentration en Na^+ par rapport à Ca^{2+} et Mg^{2+} . Il est calculé en utilisant la relation:

$$KR = \frac{Na^+}{Ca^{2+} + Mg^{2+}}$$

Où Na^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+} sont en milliéquivalents par litre.

Une valeur de $KR > 1$ indique un excès de sodium dans l'eau et la rend ainsi impropre à l'irrigation, tandis qu'une eau avec $KR < 1$ lui est favorable.

Classes d'eau	Kelly 's Ratio (KR)
Adaptée	< 1
Peu convenable	1 – 2
Inappropriée	> 2

Tableau 40- Classification de l'eau d'irrigation en fonction de KR (d'après KELLY, 1963).

Les figures 101 et 102 montrent que la totalité des échantillons des eaux de surface et souterraines ont un indice KR inférieur à 1, à l'exception des deux points P19 et P21 de la plaine de Hennaya, où le KR est supérieur à 1 en saison sèche (Figure 101). Ceci, dénote la convenance de ces eaux à des fins d'irrigation.

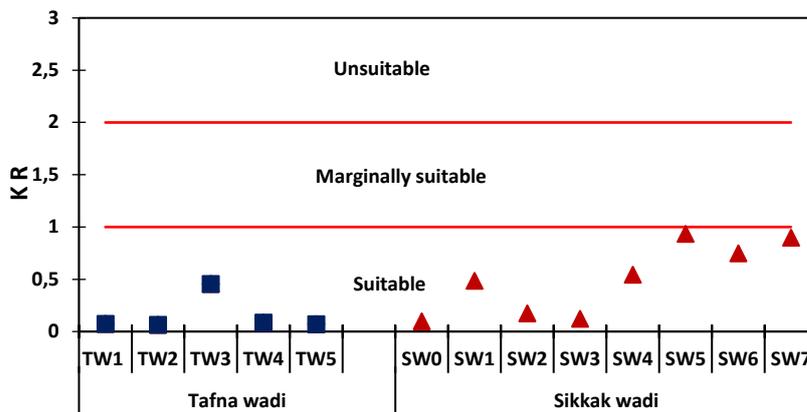


Figure 101- Variation de KR, dans les eaux de surface.

Carré : Oued Tafna, Triangle: Oued Sikkak.

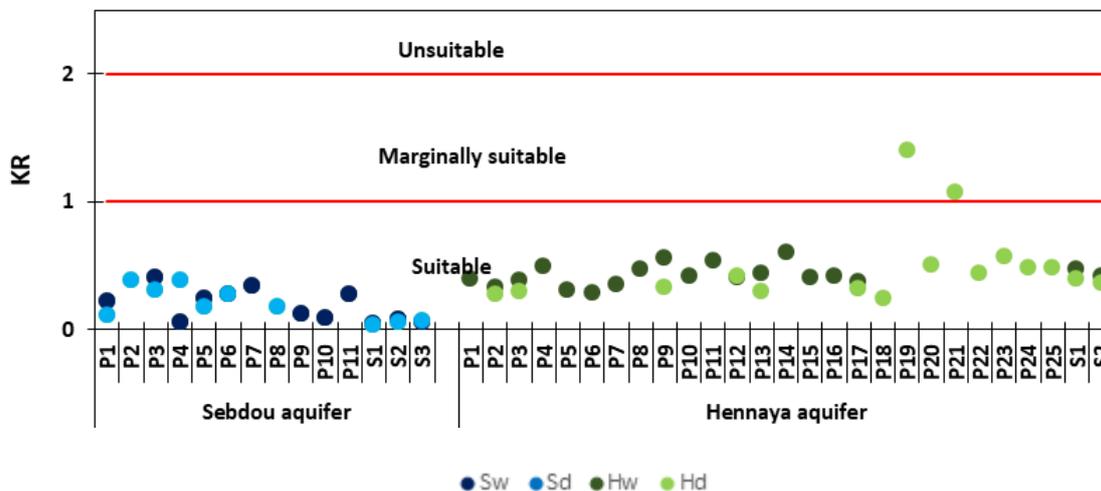


Figure 102- Variation de KR, dans les eaux souterraines.

Sw: Sebdu en saison humide, Sd: Sebdu en saison sèche, Hw: Hennaya en saison humide, Hd: Hennaya en saison sèche.

C. Diagrammes de classification des eaux d'irrigation

Les diagrammes de classification de la qualité de l'eau d'irrigation sont basés sur deux ou plusieurs facteurs (HUSSAIN & *al.*, 2010). Dans notre travail, nous retiendons les diagrammes les plus cités et les plus utilisés, à savoir:

1. Diagramme de Wilcox

WILCOX (1948) a suggéré une classification basée sur la schématisation de la relation entre le pourcentage de sodium (Na %), la conductivité électrique (EC) et la salinité (TDS), comme le montre fort bien la figure 103. La principale différence entre ce diagramme et les classifications précédentes est que les eaux ayant une faible concentration en sels associée à un pourcentage élevé de sodium (60-90%) pourraient être considérées comme étant excellentes (WILCOX, 1948).

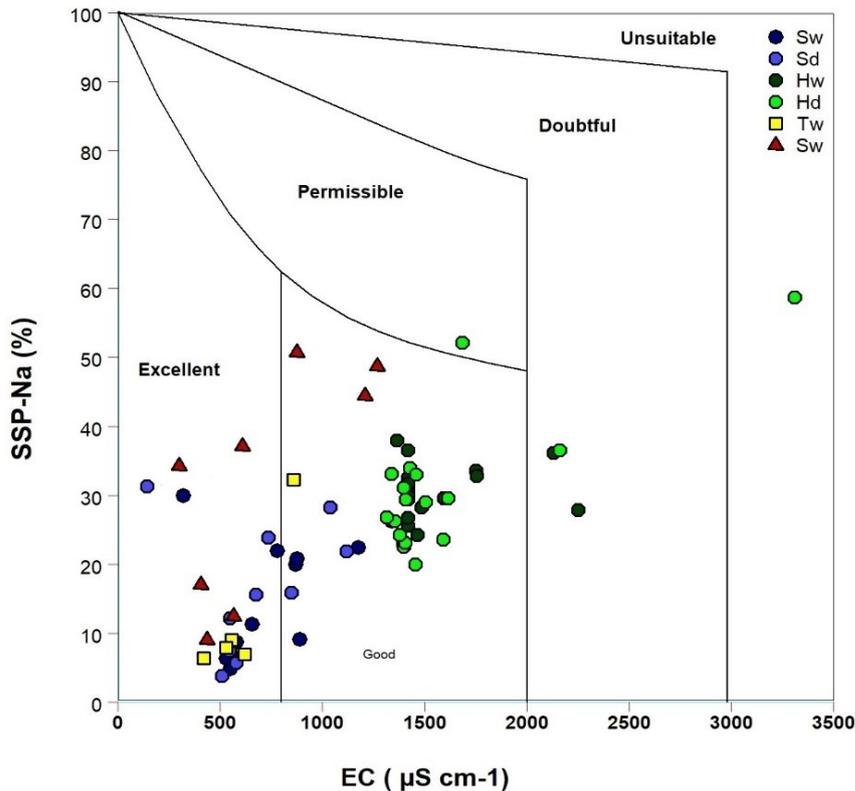


Figure 103- Diagramme de Wilcox (1948).

Sw: Sebdu en saison humide, Sd: Sebdu en saison sèche, Hw: Hennaya en saison humide, Hd: Hennaya en saison sèche, Tw: Oued Tafna, Sw: Oued Sikkak.

Le report des résultats de SSP en fonction de CE sur la figure 103, indique que la quasi-totalité des points échantillonnés dans les eaux de surface et souterraines se positionnent dans les catégories bonne et excellente et peuvent être utilisées à des fins d'irrigation. Cinq points d'eau de l'aquifère de Hennaya leur font exception : il s'agit des points P10 de qualité admissible en saison sèche, P11 et P17 (saison humide) et P12 (saisons sèche et humide) de qualité médiocre et le P8 qui se range dans la catégorie "mauvaise qualité" en saison sèche.

2. Diagramme du U.S. Salinity Laboratory pour la classification des eaux d'irrigation

Le US Salinity Laboratory (USSL)(RICHARDS, 1954) a développé un diagramme connu sous l'appellation "Diagramme de Richards". Ledit diagramme est utilisé pour déterminer la l'aptitude de l'eau à des fins d'irrigation en se basant sur les valeurs de la conductivité électrique et du taux d'adsorption du sodium. Le conception du diagramme correspond à un graphique représentant le risque de salinité (CE) sur l'axe des abscisses et celui du sodium ou de sodicité (SAR) sur l'axe ordonnées.

Le diagramme USSL (Figure 104) classe les eaux, en quatre catégories (C1, C2, C3 et C4) sur la base du risque de salinité et quatre autres (S1, S2, S3 et S4) selon le risque lié au sodum (SAR) (RICHARDS, 1954; ABUALHAIJA & *al.*, 2020). L'interprétation des classes de la qualité sur le diagramme en question (Figure 104) est résumée dans les tableaux 41 et 42.

Sur le diagramme SAR-CE (Figure 104), les résultats des analyses des eaux des aquifères et des cours d'eau étudiés sont représentés afin de catégoriser l'aptitude des eaux souterraines à des usages d'irrigation. Dans cette représentation graphique, il apparaît que les échantillons d'eau prélevés à travers les deux oueds (Tafna et Sikkak) et l'aquifère de Sebdou, au cours des deux saisons appartiennent, en général, aux classes C2S1 et C3S1 indiquant que ces eaux présentent une salinité moyenne à élevée et un risque de sodicité faible.

Concernant l'aquifère de Hennaya, la quasi-totalité des échantillons d'eau souterraine sont, durant les deux saisons, regroupés dans la classe C3S1. Ces eaux sont caractérisées par une salinité élevée et une faible teneur en sodium. Les prélèvements réalisés dans les points P10 et P8, durant la saison des basses eaux, se démarquent des précédents par leur appartenance respective aux classes C3S2 et C4S2 indiquant une salinité très élevée et un risque de sodicité moyen.

Classes d'eau	EC ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	TDS (mg L^{-1})	Qualité d'eau	Description
C1	< 250	< 150	Eau à faible salinité: Excellente pour l'irrigation	Peut être utilisée pour l'irrigation avec la plupart des cultures sur la plupart des sols, avec peu de chances qu'un problème de salinité se développe. Un certain lessivage est nécessaire, mais cela se produit dans les pratiques d'irrigation normales, sauf dans les sols de perméabilité extrêmement faible.
C2	250 – 750	150 – 500	Eau à salinité moyenne : Bonne pour l'irrigation	Peut être utilisée en cas de lessivage modéré. Les plantes ayant une tolérance modérée au sel peuvent être cultivées dans la plupart des cas, sans pratiques spéciales de contrôle de la salinité.
C3	750 – 2250	500 – 1500	Eau à salinité élevée: Admissible pour l'irrigation	Ne peut pas être utilisée sur des sols à drainage restreint. Même avec un drainage adéquat, une gestion spéciale pour le contrôle de la salinité peut être nécessaire, et des plantes ayant une bonne tolérance au sel doivent être sélectionnées.
C4	> 2250	> 1500	Eau à salinité très élevée: Mauvaise pour l'irrigation	Ne convient pas à l'irrigation dans des conditions ordinaires mais peut être utilisée occasionnellement dans des circonstances très particulières. Les sols doivent être perméables, le drainage doit être adéquat, l'eau d'irrigation doit être appliquée en excès pour permettre un lessivage considérable et des cultures très tolérantes au sel doivent être sélectionnées.

Tableau 41- Classification de l'USDA des eaux d'irrigation sur la base CE et TDS (d'après RICHARDS, 1954; WILCOX, 1955).

Classes d'eau	SAR	Qualité d'eau	Description
S1	0 – 10	Risque sodique faible: Excellente pour l'irrigation	Peut être utilisée pour l'irrigation sur presque tous les sols avec peu de risque de développement de niveaux nocifs de sodium échangeable. Cependant, les cultures sensibles au sodium, comme les arbres fruitiers à noyau, peuvent accumuler des concentrations nocives de sodium.
S2	10 – 18	Risque sodique moyen : Bonne pour l'irrigation	Présente un risque de sodium appréciable dans les sols à texture fine et à forte capacité d'échange cationique, en particulier dans des conditions de faible lessivage, à moins que du gypse ne soit présent dans le sol. Cette eau peut être utilisée sur des sols à texture grossière ou organique qui ont une bonne perméabilité.
S3	18 – 26	Risque sodique élevé: Admissible pour l'irrigation	Peut produire des niveaux nocifs de sodium échangeable dans la plupart des sols et nécessite une gestion spéciale des sols - un bon drainage, un lessivage élevé et des ajouts de matière organique. Les sols gypseux peuvent ne pas développer des niveaux nocifs de sodium de ces eaux. Des modifications chimiques peuvent être nécessaires pour remplacer le sodium échangeable, sauf que des modifications peuvent ne pas être réalisables avec des eaux de très haute salinité.
S4	> 26	Risque sodique très élevé: Mauvaise pour l'irrigation	N'est généralement pas satisfaisante pour l'irrigation, sauf à une salinité faible et peut-être moyenne où la solution de calcium du sol ou l'utilisation de gypse ou d'autres modifications peuvent rendre l'utilisation de ces eaux possible.

Tableau 42- Classifications de laboratoire de salinité de l'USDA pour l'eau d'irrigation basées sur les valeurs du SAR (d'après RICHARDS, 1954; WILCOX, 1955).

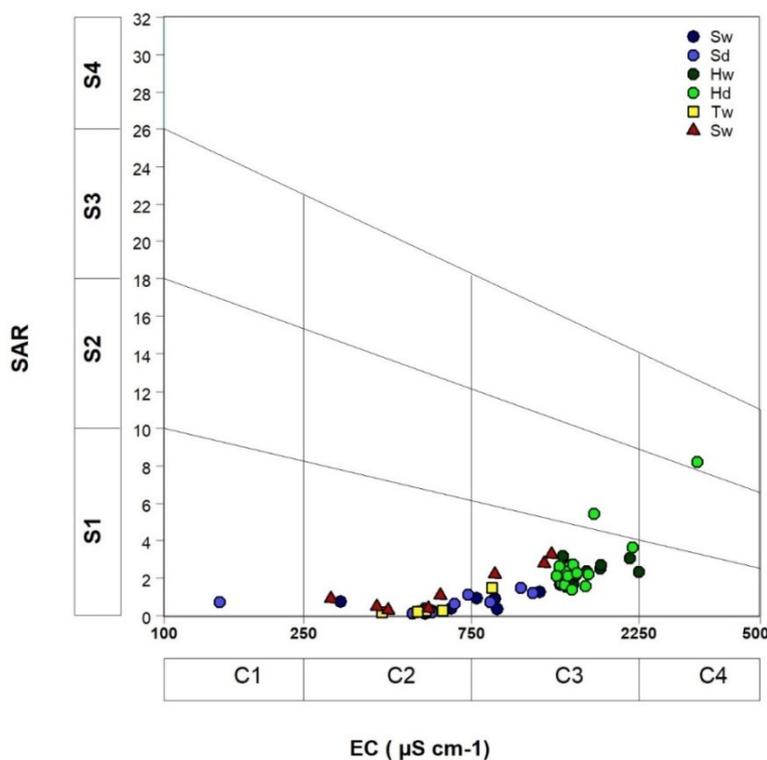


Figure -104- Diagramme du U.S. Salinity Laboratory.

Sw: Sebdu en saison humide, Sd: Sebdu en saison sèche, Hw: Hennaya en saison humide, Hd : Hennaya en saison sèche, Tw: Oued Tafna, Sw: Oued Sikkak.

IV. CONCLUSION

Dans ce chapitre consacré à l'étude qualitative des eaux, les normes de l'OMS et du JORA ont été utilisées pour évaluer leur convenance à la consommation humaine. Celles de la FAO et les indices de qualité sont utilisés pour l'appréciation de leur aptitude à des fins d'irrigation.

Comparées aux normes de qualité, relatives à la consommation humaine, la quasi-totalité des paramètres physico-chimiques des eaux de l'aquifère de Sebdou leur sont conformes, à l'exception de quelques points d'eau où des concentrations dépassant les standards, rendent ces eaux impropres à la consommation. Dans le cas de l'aquifère de Hennaya, quoique la majorité des points d'eau indiquent des valeurs de conductivité et des teneurs en certains éléments inférieures aux normes susmentionnées, celles du pH et des ions nitrates les excèdent altérant ainsi la qualité de ces eaux à des fins de consommation.

Basées sur les standards de la FAO et les indices de qualité, il en ressort qu'à l'exception de échantillons prélevés en amont, les valeurs des indices MH des eaux de surface montrent que ces dernières ne sont pas convenables à l'irrigation. Celles du PI les classe dans la catégorie de qualité modérée et celles du SAR en fonction de CE indiquent l'absence des risques de sodicité et de salinité.

La spatialisation du pourcentage de sodium des eaux souterraines indique une qualité bonne à excellente de l'aquifère de Sebdou et, en général, bonne pour l'aquifère de Hennaya.

En ce qui concerne le MH, les résultats obtenus indiquent que les eaux souterraines de Sebdou sont convenables à l'irrigation et localement non convenable. Ce même indice indique que les eaux de l'aquifère de Hennaya sont, en général, inaptes à l'irrigation à l'exception des localités nord et sud-ouest en saison sèche. Dans ces dernières, les concentrations élevées en magnésium dans les eaux d'irrigation affecteront probablement la qualité du sol et le transformeront en sol alcalin réduisant ainsi la production agricole.

Bien que les résultats du PI confèrent aux eaux une qualité modérée, une irrigation à long terme avec de telles eaux pourrait affecter la perméabilité du sol en modifiant ses propriétés physiques et chimiques.

Les indices RSC et KR, de par leurs valeurs indiquent, qu'en général, les eaux sont convenables à l'irrigation.

Les représentations des résultats du SSP et du SAR en fonction de la conductivité indiquent que la quasi-totalité des eaux souterraines de Sebdou sont dans les catégories bonne et excellente et leur appartenance aux classes C2S1 et C3S1 témoignent que ces eaux présentent un risque de salinité moyen à élevé et un risque de sodicité faible.

A l'encontre de l'aquifère de Sebdou, les points échantillonnés à Hennaya sont regroupées dans la classe C3S1 et présentent un risque de salinité assez élevé, mais ne posent pas de problème de sodicité.

Parmi les indices de qualité utilisés, le MH indiquent une inaptitude des eaux de surface à des fins d'irrigation, à l'aval des deux cours. Les autres indices, tels que KR et SSP catégorisent les eaux de convenable, à l'exception du PI qui les leur octroie une qualité modérée.

Enfin, le résultat du SAR montre que ces eaux de surface appartenant aux classes C2S1 et C3S1 sont de salinité moyenne à élevée et présentent un risque de sodicité faible.

Sixième chapitre: **V**ulnérabilité des eaux

Sixième chapitre: **V**ulnérabilité des eaux

I. INTRODUCTION

Dans ce dernier chapitre, la problématique de la vulnérabilité des eaux de surface et souterraines des sous-bassins versants est traitée, en ciblant particulièrement, les deux principaux secteurs d'utilisation, à savoir la potabilité et l'irrigation.

Cette approche est réalisée par l'utilisation de modèle simplifié, constitué d'indice de qualité d'eau potable (DWQI), de l'indice de qualité d'eau d'irrigation IWQI de SIMSEK & GUNDUZ (2007) et enfin de l'indice de MEIRELES (2010). Ces indices de qualité permettent de donner une idée sur l'adéquation des eaux à des fins spécifiques d'utilisation, soit de consommation où d'utilisation agricole. Une évaluation de ces indices couplée d'une cartographie des zones vulnérables à la pollution chimique des nappes aquifères étudiées sera conduite. Elle sera accompagnée d'une application du modèle de vulnérabilité appelé « SINTACS », typique aux pays méditerranéens. Ce schéma de modèle établi pour les paramètres hydrogéologiques, climatiques et de paramètres d'impact permettra la validation de la vulnérabilité intrinsèque et spécifique des aquifères étudiés à la contamination chimique sous l'effet des activités agro-pastorales. Toutes les procédures cartographiques sont réalisées à l'aide du logiciel QGIS 3.14.15.

II. INDICES DE QUALITE DES EAUX (WQI)

A. Indice de qualité de l'eau potable DWQI

1. Description

L'indice de qualité de l'eau potable DWQI (Drinking Water Quality Index) est défini comme étant une méthode d'évaluation permettant de montrer l'importance des effets des variations de concentrations des paramètres de la qualité de l'eau sur sa qualité générale. La qualité de l'eau et son aptitude à la consommation peuvent être examinées à travers la détermination de cet indice de qualité. Nous tenons à rappeler ici que les normes d'eau potable recommandées par l'OMS sont utilisées dans l'évaluation du DWQI (SADAT-NOORI & *al.*, 2014; KARAKUS, 2020).

Dans un terme simplifié, l'indice de qualité d'eau potable est calculé pour évaluer l'adéquation de la qualité des eaux souterraines à des fins de consommation. Il s'agit d'un outil mathématique permettant de fournir un modèle complet de la qualité des eaux souterraines en un seul nombre (VAROL & DAVRAZ, 2015; NARSIMHA & *al.*, 2018; RAMYAPRIYA & ELANGO, 2018, SUBBA RAO & *al.*, 2019). Le calcul de l'indice de

qualité de l'eau potable pour l'examen des paramètres physico-chimiques implique le suivi de cinq étapes.

1.1 Attribution du poids à chaque paramètre chimique

Dans cette première étape, une valeur pondérée (w_i) à chaque paramètre chimique est attribuée en fonction de l'importance relative du paramètre en termes de qualité de l'eau pour la consommation humaine (la valeur 5 est affectée au paramètre ayant la plus grande importance relative et la valeur 1 est affectée à celle qui a la plus faible importance relative). A titre d'exemple, la valeur 5 est assignée aux nitrates (NO_3^-), car ils ont la plus grande importance relative parmi les paramètres dont le moins significatif à un poids de 1 (Tableau 43).

1.2. Evaluation du poids relatif à l'aide d'un indice arithmétique pondéré

L'équation permettant l'évaluation du poids relatif est donnée par l'expression suivante :

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

Où W_i est le poids relatif, w_i le poids de chaque paramètre et n le nombre de paramètres.

Paramètres	Normes	Poids (Weight)	Poids relatif (Relative weight)
pH	6.5-8.5	4	0.111111111
CE	1000	4	0.111111111
TDS	600-1000	4	0.111111111
Ca	75	2	0.055555556
Mg	50	2	0.055555556
Na	200	3	0.083333333
K	10	2	0.055555556
HCO_3	250	3	0.083333333
Cl	200-300	3	0.083333333
SO_4	400	4	0.111111111
NO_3	50	5	0.138888889
		$\sum w_i = 36$	$\sum W_i = 1$

Tableau 43- Poids et poids relatifs attribués pour DWQI basés sur les standards du JORA (2011) et de l'OMS (2017).

1.3. Calcul de l'échelle d'évaluation de la qualité de l'eau (Q_i)

Dans cette étape, le calcul de l'échelle d'évaluation s'effectue par le rapport de l'ensemble des valeurs des concentrations et de celles des concentrations seuils spécifiques à la consommation humaine. Ces dernières sont fixées par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS, 2017) et le Journal Officiel de la République Algérienne (JORA, 2011) pour chacun des paramètres chimiques et pour chaque type d'eau.

$$Qi = \frac{Ci}{Si} \times 100$$

Où **Qi** représente l'échelle d'évaluation de la qualité, **Ci** la concentration de chaque paramètre chimique dans chaque échantillon d'eau (mgL⁻¹) et **Si** les normes d'eau potable spécifiées par l'OMS (2017) pour chaque paramètre chimique (mgL⁻¹).

1.4. Calcul des sous-indices de la qualité de l'eau pour chaque paramètre chimique

$$Si_i = Wi \times Qi$$

Où **Si** représente la valeur de sous-indice du paramètre *i*, **Qi** l'échelle d'évaluation de la qualité basée sur la concentration du paramètre *i*, et **Wi** le poids relatif.

1.5. Estimation de l'indice de la qualité de l'eau potable

Cet indice est donné par la relation:

$$DWQI = \sum_{i=1}^n Si_i$$

La somme des sous-indices de chaque échantillon d'eau donne la valeur de DWQI. Les valeurs de DWQI calculées sont classées en cinq catégories (classe excellente, bonne, pauvre, très pauvre et inappropriée (Tableau 44) (SAHU & SIKDAR, 2008; RAMAKRISHNAIAH & *al.*, 2009; ŞENER & *al.*, 2017; ASADI & *al.*, 2019).

Classification de la qualité de l'eau potable		
DWQI	Classe	Type d'eau
< 5	I	Excellente
5-100	II	Bonne
100-200	III	Pauvre
200-300	IV	Très pauvre
> à 300	V	Impropres à la consommation

Tableau 44- Classification de la qualité de l'eau basée sur les valeurs de DWQI.

2. Application

Sur l'ensemble des échantillons d'eau souterraine des deux aquifères plio-quaternaires étudiés, le calcul de l'indice de qualité d'eau potable (DWQI) a révélé que:

-les eaux de l'aquifère de Sebdou sont de qualité excellente en saison humide (Figure 105A) et bonne en saison sèche (Figure 105B) ;

-les eaux de Hennaya sont de mauvaise qualité, à l'exception du puits P4 où la qualité de ses eaux était bonne, en saison humide (Figures 105C et D).

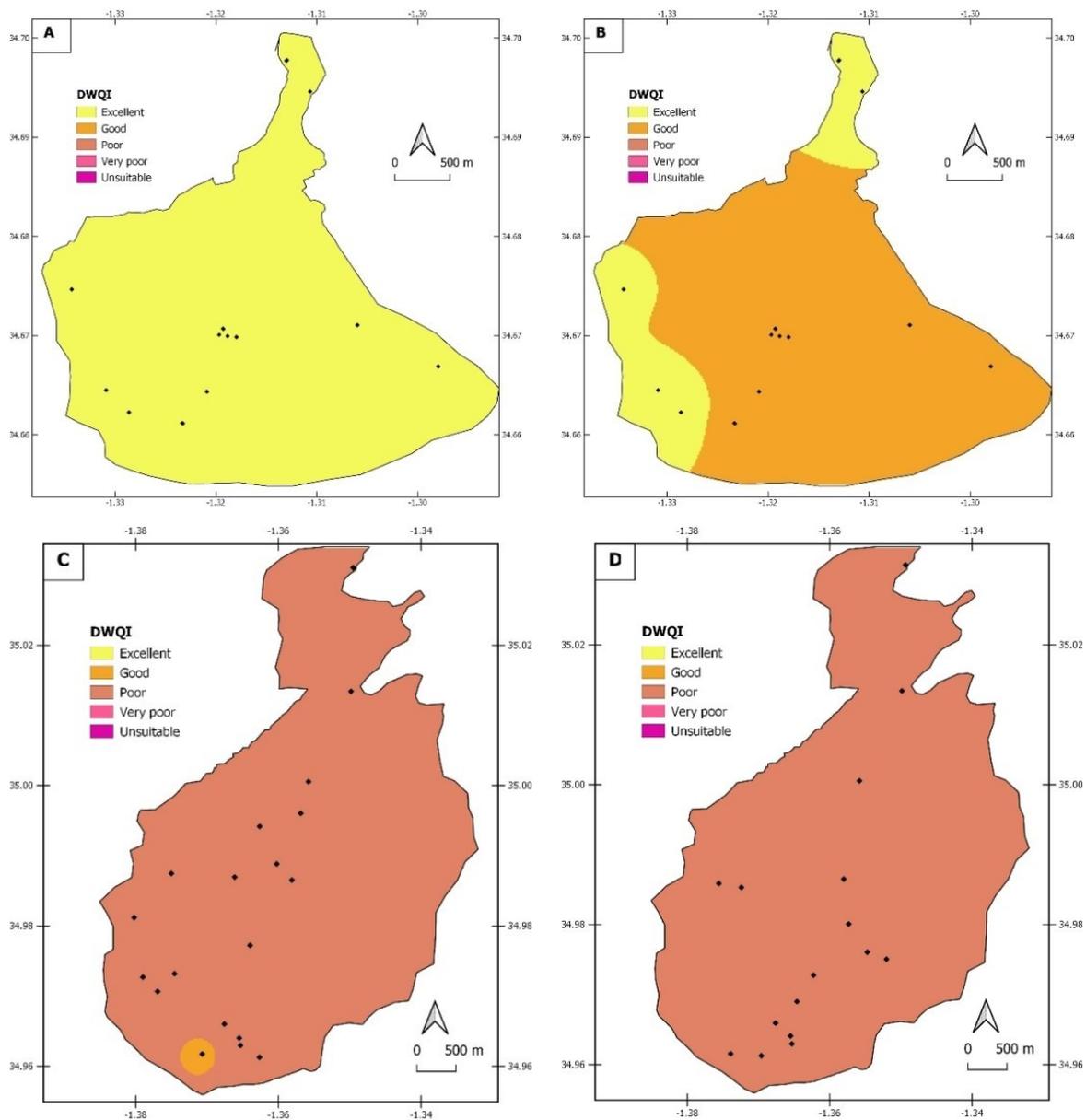


Figure 105- Variation spatiale de l'indice DWQI dans les eaux souterraines.
 A : Aquifère de Sebdu en saison humide, B: Aquifère de Sebdu en saison, C: Aquifère de Hennaya en saison humide, D: Aquifère de Hennaya en saison sèche.

B. Indices de qualité de l'eau d'Irrigation (IWQI)

1. IWQI (Irrigation Water Quality Index) de SIMSEK & GUNDUZ (2007)

En 2007, SIMSEK & GUNDUZ proposèrent un indice de qualité des eaux d'irrigation (IWQ), par une méthode intégrée au SIG. Cette dernière est basée sur la combinaison linéaire des cinq groupes différents de paramètres de qualité de l'eau qui peuvent avoir des impacts négatifs potentiels sur la qualité du sol et le rendement des cultures.

Dans cette technique, les cinq groupes sont simultanément inclus dans l'analyse et sont combinés pour former une valeur d'indice unique, qui est ensuite évaluée pour déterminer l'aptitude de l'eau d'irrigation.

Les paramètres de qualité de l'eau de ces groupes sont sélectionnés sur la base des valeurs limites des différents paramètres (AYERS & WESTCOT, 1985).

A noter que l'indice proposé par SIMSEK & GUNDUZ (2007) utilise la conductivité électrique et le SAR pour déterminer à la fois les risques de salinité et les problèmes d'infiltration et de perméabilité. Cet indice intègre également, la toxicité ionique spécifique en incluant des ions de bore, de chlorure et de sodium et la toxicité des éléments traces, en incluant les paramètres décrits dans le tableau 45. Une moyenne pondérée des éléments en trace est utilisée; car certains d'entre eux peuvent ne pas être mesurés à tous les emplacements. Cependant, l'utilisateur doit être conscient du fait que de telles limites dans les données pourraient créer des résultats qui ne représenteraient pas les conditions réelles sur le terrain pour plusieurs paramètres et éventuellement entraîner des erreurs dans l'évaluation globale de l'aptitude. Bien que le calcul de l'indice soit conçu pour permettre à l'utilisateur d'incorporer uniquement les éléments mesurés sans provoquer d'erreur dans l'analyse, il est recommandé de mesurer tous les métaux en traces (tableau 45) pour atteindre un objectif optimal de l'utilisation de cet indice (SIMSEK & GUNDUZ, 2007).

Elément	Intervalle	Classe	Aptitude
Aluminium (mg L ⁻¹)	Al < 5	3	Elevée
	5 ≤ Al ≤ 20	2	Moyenne
	<20	1	Faible
Arsenic (mg L ⁻¹)	As < 0.1	3	Elevée
	0.1 ≤ As ≤ 0.2	2	Moyenne
	As < 0.2	1	Faible
Béryllium (mg L ⁻¹)	Be < 0.1	3	Elevée
	0.1 ≤ Be ≤ 0.5	2	Moyenne
	Be < 0.5	1	Faible
Cadmium (mg L ⁻¹)	Cd < 0.01	3	Elevée
	0.01 ≤ Cd ≤ 0.05	2	Moyenne
	Cd < 0.05	1	Faible
Chrome (mg L ⁻¹)	Cr < 0.1	3	Elevée
	0.1 ≤ Cr ≤ 1.0	2	Moyenne
	Cr < 1.0	1	Faible
Cobalt (mg L ⁻¹)	Co < 0.05	3	Elevée
	0.05 ≤ Co ≤ 5.0	2	Moyenne
	Co < 5.0	1	Faible
Cuivre (mg L ⁻¹)	Cu < 0.2	3	Elevée
	0.2 ≤ Cu ≤ 5.0	2	Moyenne
	Cu < 5.0	1	Faible
Fluorure (mg L ⁻¹)	F < 1.0	3	Elevée
	1.0 ≤ F ≤ 15.0	2	Moyenne
	F < 15.0	1	Faible
Fer (mg L ⁻¹)	Fe < 5.0	3	Elevée
	5.0 ≤ Fe ≤ 20.0	2	Moyenne
	Fe < 20.0	1	Faible
Plomb (mg L ⁻¹)	Pb < 5.0	3	Elevée
	5.0 ≤ Pb ≤ 10.0	2	Moyenne
	Pb < 10.0	1	Faible
Lithium (mg L ⁻¹)	Li < 2.5	3	Elevée
	2.5 ≤ Li ≤ 5.0	2	Moyenne
	Li < 5.0	1	Faible
Manganèse (mg L ⁻¹)	Mn < 0.2	3	Elevée
	0.2 ≤ Mn ≤ 10.0	2	Moyenne
	Mn < 10.0	1	Faible
Molybdène (mg L ⁻¹)	Mo < 0.01	3	Elevée

	$0.01 \leq \text{Mo} \leq 0.05$	2	Moyenne
	$\text{Mo} < 0.05$	1	Faible
Nickel (mg L ⁻¹)	$\text{Ni} < 0.2$	3	Elevée
	$0.2 \leq \text{Ni} \leq 2.0$	2	Moyenne
	$\text{Ni} < 2.0$	1	Faible
Sélénium (mg L ⁻¹)	$\text{Se} < 0.01$	3	Elevée
	$0.01 \leq \text{Se} \leq 0.02$	2	Moyenne
	$\text{Se} < 0.02$	1	Faible
Vanadium (mg L ⁻¹)	$\text{V} < 0.1$	3	Elevée
	$0.1 \leq \text{V} \leq 1.0$	2	Moyenne
	$\text{V} < 1.0$	1	Faible
Zinc (mg L ⁻¹)	$\text{Zn} < 2$	3	Elevée
	$2 \leq \text{Zn} \leq 10.0$	2	Moyenne
	$\text{Zn} < 10.0$	1	Faible

Tableau 45- Classification de la toxicité des éléments traces (d'après SIMSEK & GUNDUZ, 2007).

Enfin, cet indice intègre l'influence d'effets divers aux cultures sensibles en incluant une combinaison linéaire de l'azote-nitrate, de bicarbonate et de pH.

Dans la technique proposée, chacun de ces paramètres se voit attribuer un coefficient de pondération (Tableaux 46 et 47) de 1 à 5 de sorte que les groupes les plus importants de la qualité de l'eau d'irrigation soient affectés par les facteurs les plus élevés (5) et les plus bas (1).

Etant considéré comme le facteur le plus important dans l'évaluation de la qualité de l'eau d'irrigation, le risque de salinité se voit attribuer à une pondération la plus élevée. En revanche, les effets divers sur les cultures sensibles sont, généralement, considérés comme le facteur le moins important influençant la qualité de l'eau d'irrigation. Entre ces deux extrêmes, les risques d'infiltration et de perméabilité, la toxicité des ions spécifiques et la toxicité des éléments traces sont classés par ordre décroissant d'importance.

Risque	Poids	Paramètre	Intervalle	Classe	Aptitude
Risqué de salinité	5	CE (μS cm ⁻¹)	$\text{EC} < 700$	3	Elevée
			$700 \leq \text{EC} \leq 3000$	2	Moyenne
			$\text{EC} > 3000$	1	Faible
Risqué d'infiltration et de perméabilité	4				
Toxicité d'ions spécifiques	3	SAR	$\text{SAR} < 3$	3	Elevée
			$3.0 \leq \text{SAR} \leq 9$	2	Moyenne
			$\text{SAR} > 9$	1	Faible
		Bore (mg L ⁻¹)	$\text{B} < 0.7$	3	Elevée
			$0.7 \leq \text{B} \leq 3.0$	2	Moyenne
			$\text{B} > 3.0$	1	Faible
		Cl ⁻ (mg L ⁻¹)	$\text{Cl} < 140$	3	Elevée
$140 \leq \text{Cl} \leq 350$	2		Moyenne		
$\text{Cl} > 350$	1		Faible		
Toxicité des éléments en traces	2				
Effets divers sur les cultures sensibles	1	N-NO ₃ ⁻ (mg L ⁻¹)	$\text{N-NO}_3 < 5$	3	Elevée
			$5 \leq \text{N-NO}_3 \leq 30$	2	Moyenne
			$\text{N-NO}_3 > 30$	1	Faible
		HCO ₃ ⁻ (mg L ⁻¹)	$\text{HCO}_3 < 90$	3	Elevée
			$90 \leq \text{HCO}_3 \leq 500$	2	Moyenne
			$\text{HCO}_3 > 500$	1	Faible
		pH	$7.0 \leq \text{pH} \leq 8.0$	3	Elevée

6.5 ≤ pH < 7.0 et 8.0 < pH ≤ 8.5	2	Moyenne
pH < 6.5 et pH > 8.5	1	Faible

Tableau 46- Classification des paramètres de l'indice IWQ (d'après SIMSEK & GUNDUZ, 2007).

	SAR					Classe	Aptitude
	< 3	3 – 6	6 – 12	12 – 20	> 20		
EC	> 700	> 1200	> 1900	> 2900	> 5000	3	Elevée
(μS cm ⁻¹)	700 – 200	1200 – 300	1900 – 500	2900 – 1300	5000 – 2900	2	Moyenne
	< 200	< 300	< 500	< 1300	< 2900	1	Faible

Tableau 47- Classification pour risque d'infiltration et de perméabilité (d'après SIMSEK & GUNDUZ, 2007).

L'indice IWQ proposé est ensuite calculé par l'équation suivante:

$$IWQ\ index = \sum_{i=1}^5 G_i$$

Où i est un indice incrémentiel et G représente la contribution de chacune des cinq catégories de danger qui sont importantes dans l'évaluation de la qualité d'une ressource en eau à des fins d'irrigation. La première catégorie, concerne le risque de salinité qui est représenté par la conductivité électrique de l'eau. Il est exprimé par la relation suivante:

$$G_1 = w_1 \times r_1$$

Où w est la valeur pondérale de ce groupe et r la valeur nominale du paramètre comme indiqué dans le tableau 46.

La deuxième catégorie au risque d'infiltration et de perméabilité qui est représenté par la combinaison EC-SAR donné par l'équation:

$$G_2 = w_2 \times r_2$$

Où w est la valeur pondérale de ce groupe et r la valeur nominale du paramètre (Tableau 47).

La troisième catégorie est la toxicité ionique spécifique qui est représentée par le SAR et les ions chlorure et ceux du bore dans l'eau. Elle est considérée comme étant une moyenne pondérée des trois paramètres et est exprimée par la relation :

$$G_3 = \frac{w_3}{3} \sum_{j=3}^3 r_j$$

Où j est un indice incrémentiel, w est la valeur pondérée de ce groupe (Tableau 46) et r est la valeur de notation de chaque paramètre (Tableau 47).

La quatrième catégorie est la toxicité des éléments en traces, qui est représentée par les éléments donnés dans le tableau 45. Elle est formulée comme une moyenne pondérée de tous les ions disponibles pour l'analyse est:

$$G_4 = \frac{w_4}{N} \sum_{k=1}^N r_k$$

Où k est un indice incrémental, N est le nombre total d'oligo-éléments disponibles pour l'analyse, w est la valeur pondérale de ce groupe et r est la valeur d'évaluation de chaque paramètre comme il est indiqué dans le tableau 45.

Enfin, la dernière catégorie concerne les effets divers sur les cultures sensibles, représentés par l'azote des ions nitrate, les ions bicarbonates et le pH de l'eau. Elle est formulée sous forme de moyenne pondérée:

$$G_5 = \frac{w_5}{3} \sum_{m=1}^3 r_m$$

Où m est un indice incrémental, w est la valeur du poids de ce groupe et r la valeur de notation de chaque paramètre (Tableau 46).

Une fois la valeur totale de l'indice calculée, une analyse de pertinence est effectuée sur la base des trois classes indiquées dans le tableau 48.

Indice IWQ	Aptitude de l'eau à l'irrigation
< 22	Faible
22 – 37	Moyenne
> 37	Elevée

Tableau 48- Classification des eaux d'irrigation selon d'indice IWQ de SIMSEK & GUNDUZ (2007).

Il est à noter que dans d'application de cet indice, la catégorie G3 relative à l'utilisation des éléments en trace, n'a pas été utilisée dans le calcul de l'indice.

2. IWQI de MEIRELES & al. (2010)

L'indice IWQI est un outil spécifique développé principalement par MEIRELES & al. (2010) pour l'évaluation de la qualité de l'eau à des fins agricoles. Il existe de légères différences entre cet indice et celui de qualité spécifique utilisé par l'OMS (ABBASNIA & al., 2018).

Dans cette méthode, la première étape consiste en une définition des valeurs de mesure de la qualité (q_i) et des poids d'agrégation (w_i) établis. Les valeurs de q_i sont estimées sur la base de chaque paramètre spécifique à la qualité des eaux d'irrigation, proposés par le comité de consultants de l'Université de Californie (UCCC) et aussi selon les critères établis par AYERS & WESTCOT (1999)(Tableau 49). Les paramètres sont

représentés par un nombre non dimensionnel. Plus la valeur est élevée, meilleure est la qualité de l'eau (MEIRELES & *al.*, 2010).

Les valeurs de qi ont été calculées à l'aide de l'équation ci-dessous:

$$qi = qimax - \left[\frac{(xij - xinf) \times qiamp}{qamp} \right]$$

Où $qimax$ est la valeur maximale de qi pour la classe, xij est la valeur observée pour le paramètre, $xinf$ est la variable correspondante à la limite inférieure de la classe à laquelle appartient le paramètre, $qiamp$ est l'amplitude de la classe et enfin $xamp$ est l'amplitude de classe à laquelle appartient le paramètre. Cette dernière est basée sur les limites de tolérance indiquées dans le tableau 49 et les résultats des analyses chimiques de l'eau.

qi	CE	SAR	Na ⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻
	$\mu\text{S cm}^{-1}$	$(\text{mmol L}^{-1})^{1/2}$	Meq L ⁻¹		
85 - 100	$200 \leq \text{CE} < 750$	$2 \leq \text{SAR} < 3$	$2 \leq \text{Na} < 3$	$1 \leq \text{Cl} < 4$	$1 \leq \text{HCO}_3 < 1.5$
60 - 85	$750 \leq \text{CE} < 1500$	$3 \leq \text{SAR} < 6$	$3 \leq \text{Na} < 6$	$4 \leq \text{Cl} < 7$	$1.5 \leq \text{HCO}_3 < 4.5$
35 - 60	$1500 \leq \text{CE} < 3000$	$6 \leq \text{SAR} < 12$	$6 \leq \text{Na} < 9$	$7 \leq \text{Cl} < 10$	$4.5 \leq \text{HCO}_3 < 8.5$
0 - 35	EC < 200 ou EC ≥ 3000	SAR < 2 ou SAR ≥ 12	Na < 2 ou Na ≥ 9	Cl < 1 ou Cl ≥ 10	HCO ₃ < 1 ou HCO ₃ ≥ 8.5

Tableau 49- Valeurs limites des paramètres de la qualité (qi) (d'après MEIRELES & *al.*, 2010).

Afin d'évaluer l'amplitude de la dernière classe de chaque paramètre, la limite supérieure a été considérée comme étant la valeur la plus élevée déterminée lors de l'analyse physico-chimique des échantillons d'eau. Le poids de chaque paramètre utilisé dans le calcul du WQI a été obtenu à partir du rapport composantes principales et analyse factorielle (PC / FA). Il est représenté par la somme de tous les facteurs multipliés par le caractère explicable de chaque paramètre. Ensuite, les valeurs wi ont été normalisées par l'utilisation de l'équation suivante de telle sorte que leur somme soit égale à l'unité:

$$wi = \frac{\sum_{j=1}^k F_j A_{ij}}{\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n F_j A_{ij}}$$

Où wi est le poids du paramètre du WQI, F est la valeur automatique du composant 1, A_{ij} est le caractère explicable du paramètre i par le facteur j , i est le nombre de sélectionnés par le modèle et j est le nombre de facteurs sélectionnés dans le modèle.

Paramètres	Wi
Conductivité électrique (CE)	0.211
Sodium (Na ⁺)	0.204
Bicarbonate (HCO ₃ ⁻)	0.202
Chlorure (Cl ⁻)	0.194
SAR	0.189
Total	1.000

Tableau 50- Poids des paramètres du IWQI (d'après MEIRELES & *al.*, 2010).

L'indice de qualité de l'eau est calculé selon l'équation suivante:

$$IWQI = \sum_{i=1}^n qiWi$$

IWQI est un paramètre sans dimension, variant de 0 à 100, **qi** est la qualité du *i*ème paramètre (il a un nombre de 0 à 100, en fonction de sa concentration ou de sa mesure), **wi** fait référence au poids normalisé du *i*ème paramètre, en fonction de son importance pour expliquer la variabilité globale de la qualité de l'eau (MEIRELES & *al.*, 2010).

La division en classes selon l'indice de qualité de l'eau d'irrigation (IWQI) a été basée sur les indices de qualité de l'eau existants. Les classes ont été définies en tenant compte du risque de problèmes de salinité, de la réduction de l'infiltration de l'eau dans le sol ainsi que de la toxicité pour les plantes (MEIRELES & *al.*, 2010). Les restrictions aux classes d'utilisation de l'eau sont indiquées dans le tabelau 51.

IWQI	Restriction d'utilisation de l'eau	Recommandation	
		Sol	Plante
85 ≤ 100	Pas de restriction (N R)	Peut être utilisée pour la majorité des sols à faible probabilité de causer des problèmes de salinité et de sodicité. Le lessivage dans les pratiques d'irrigation est recommandé, sauf dans les sols à très faible perméabilité.	Aucun risque de toxicité pour la plupart des plantes.
70 ≤ 85	Faible restriction (L R)	Recommandé pour l'utilisation dans les sols irrigués avec une texture légère ou une perméabilité modérée, étant recommandé le lessivage du sel. La sodicité du sol peut se produire dans les sols à texture lourde, étant recommandé d'éviter son utilisation dans les sols avec des niveaux élevés d'argile.	Évitez les plantes sensibles au sel.
55 ≤ 70	Restriction modérée (M R)	Peut être utilisé dans les sols ayant des valeurs de perméabilité modérées à élevées, étant suggéré un lessivage modéré des sels.	Les plantes ayant une tolérance modérée aux sels peuvent être cultivées.
40 ≤ 55	Restriction élevée (H R)	Peut être utilisée dans des sols à haute perméabilité sans couches compactes. Un programme d'irrigation à haute fréquence doit être adopté pour l'eau dont la CE est supérieure à 2000 µS cm ⁻¹ et le SAR supérieur à 7.	Doit être utilisé pour l'irrigation des plantes à tolérance aux sels avec des pratiques spéciales de contrôle de la salinité, à l'exception de l'eau à faibles valeurs de Na, Cl et HCO ₃ .

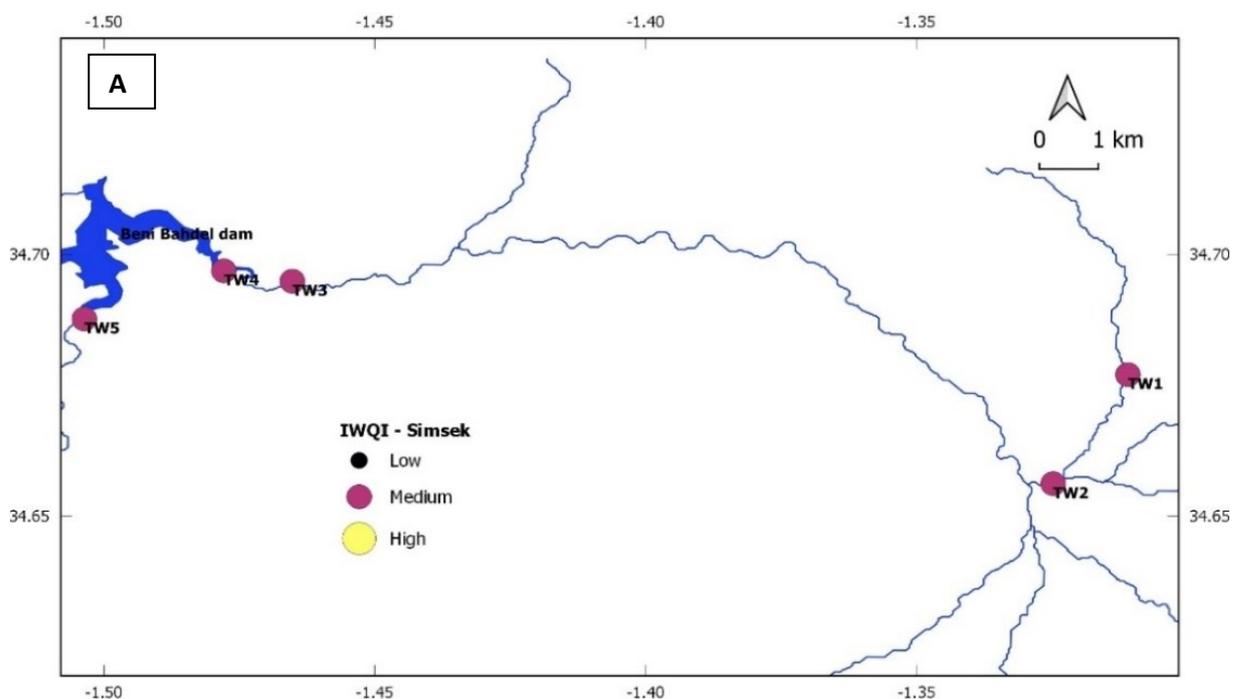
$0 \leq 40$ Restriction sévère (S R)	Son utilisation doit être évitée pour l'irrigation dans des conditions normales. Dans des cas particuliers, peut être utilisée occasionnellement. L'eau avec de faibles niveaux de sels et un SAR élevé nécessite une application de gypse. Dans les sols à haute teneur en eau saline, les sols doivent avoir une perméabilité élevée et un excès d'eau doit être appliqué pour éviter l'accumulation de sel.	Uniquement les plantes avec une tolérance élevée aux sels, sauf pour les eaux avec des concentrations extrêmement faibles en, Na, Cl et HCO ₃ .
---------------------------------------	--	--

Tableau 51- Caractéristiques des indices de qualité des eaux d’irrigation d’après MEIRELES & *al.*, 2010).

3. Applications

3.1. Eau de surface

A l’oued Tafna, les valeurs de l’indice de qualité des eaux d’irrigation de SIMSEK (IWQI-Simsek) sont comprises entre 22 et 37 et appartiennent de ce fait, à la catégorie moyenne (Figure 106A). L’utilisation de l’indice de MEIRELES catégorise les eaux de ce même cours d’eau en restriction élevée ($55 < IWQI < 70$) et moyenne ($40 < IWQI < 55$). Trois points d’eau de surface (TW1, TW3 et TW5) appartiennent à la première catégorie, alors que les échantillons (TW2 et TW4) appartiennent à la seconde (Figure 106B).



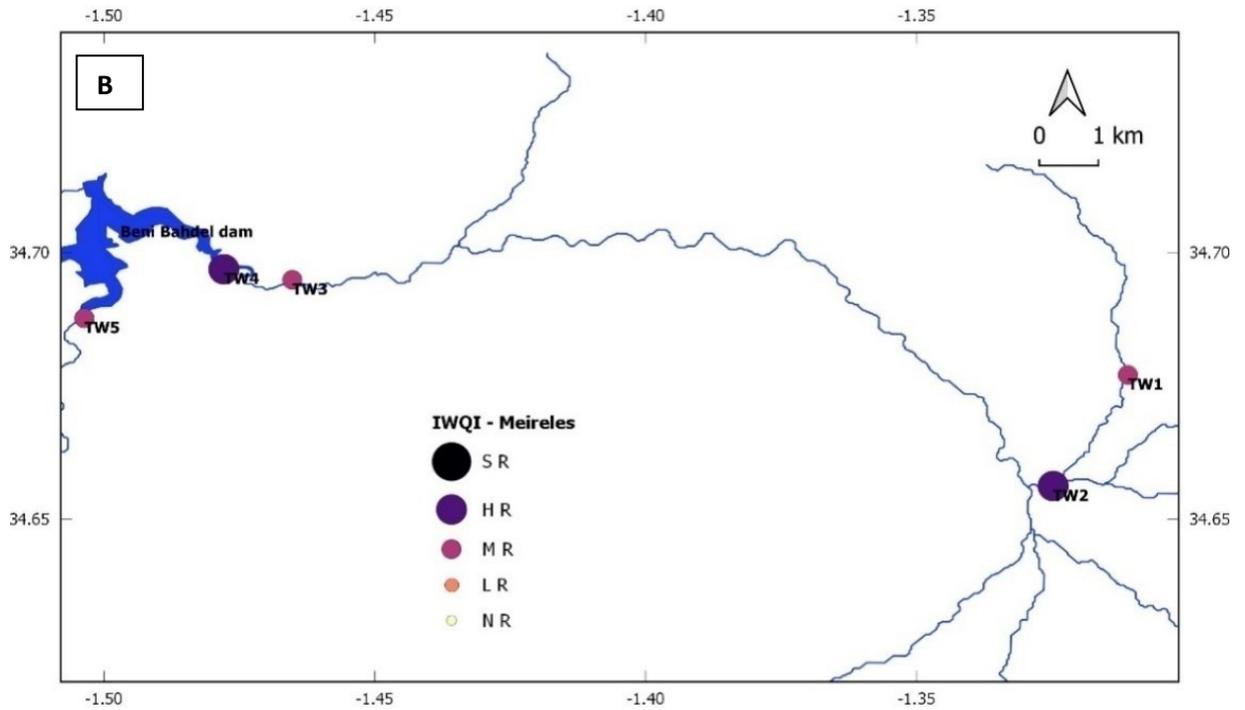


Figure 106- Spatialisation des indices IWQI dans les eaux de l'oued Tafna. (A. IWQI -simsek, B. IWQI-Meireles).

Concernant les eaux prélevées dans l'oued Sikkak, il a été constaté que leur aptitude à l'irrigation moyennant, l'indice de qualité de SIMSEK (2007) varie de faible aux points SW0 (21.66) et SW1 (20.99)(à moyenne dans le reste des prélèvements (Figure 107A). A l'encontre de cet indice, celui de MEIRELES (2010) classe ces eaux dans les catégories à restriction, sévère (SW4) et sans restriction (SW5) (Figure 107B).

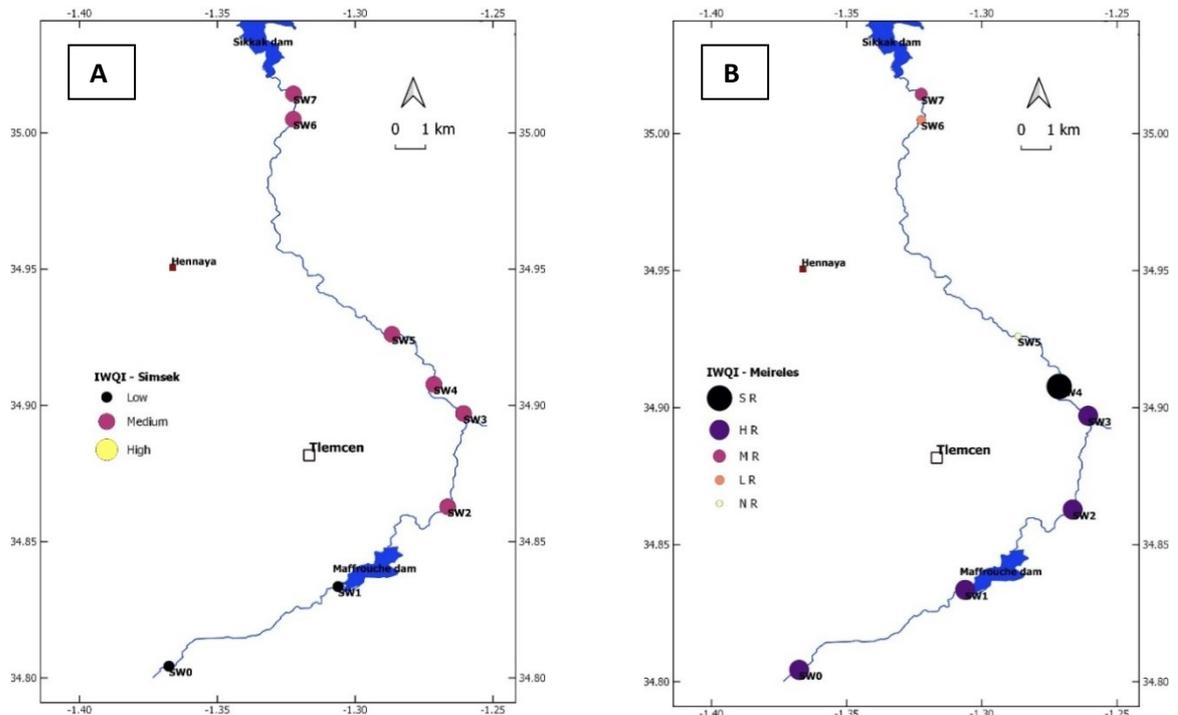


Figure 107- Spatialisation des indices IWQI dans les eaux de l'oued Sikkak. (A. IWQI -simsek, B. IWQI-Meireles).

3.2. Eaux souterraines

La spatialisation des données ponctuelles représentées sur les figures 108 et 109 montre que les eaux souterraines des deux aquifères plio-quaternaires, appartiennent à la classe d'aptitude moyenne par rapport à l'indice de SIMSEK.

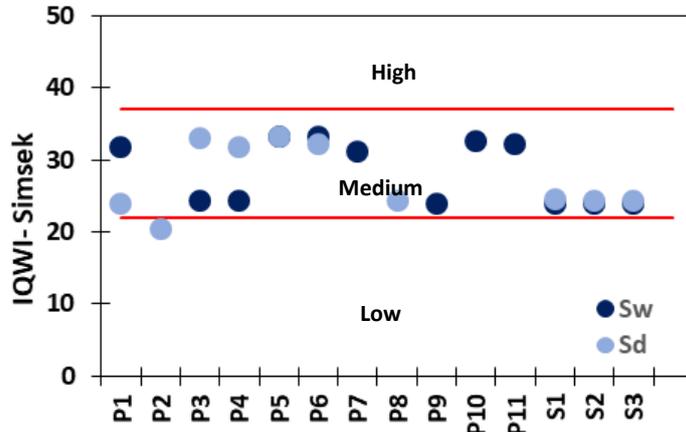


Figure 108- Variation de l'indice IWQI-SIMSEK dans les eaux de l'aquifère de Sebdou. (Sw : Sebdou en saison humide, Sd : Sebdou en saison sèche).

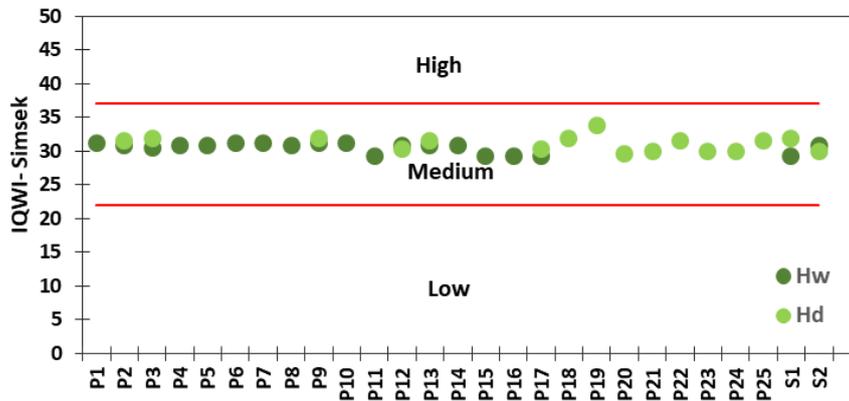


Figure 109- Variation de l'indice IWQI-SIMSEK dans les eaux de l'aquifère de Hennaya. (Hw : Hennaya en saison Humide, Hd : Hennaya en saison sèche).

La figure 110 représente les variations spatiales de l'indice IWQI de MEIRELES à travers les aquifères de Sebdou et de Hennaya durant les deux saisons d'échantillonnage.

Pour l'aquifère de Sebdou, la restriction d'utilisation de ses eaux souterraines pour l'irrigation est globalement élevée. Ainsi, certains points font l'exception, à l'exemple des points P7, P10 et P11 (en saison humide) et P2, P5, P6 et P11 (en saison sèche) où la restriction est moyenne (Figures 110A et B). Le P3 est caractérisé par une restriction sévère. De même, la restriction d'utilisation des eaux souterraines de Hennaya est majoritairement élevée (Figure 110C), avec l'apparition d'une zone à restriction élevée au centre de la plaine en saison sèche (Figure 110D).

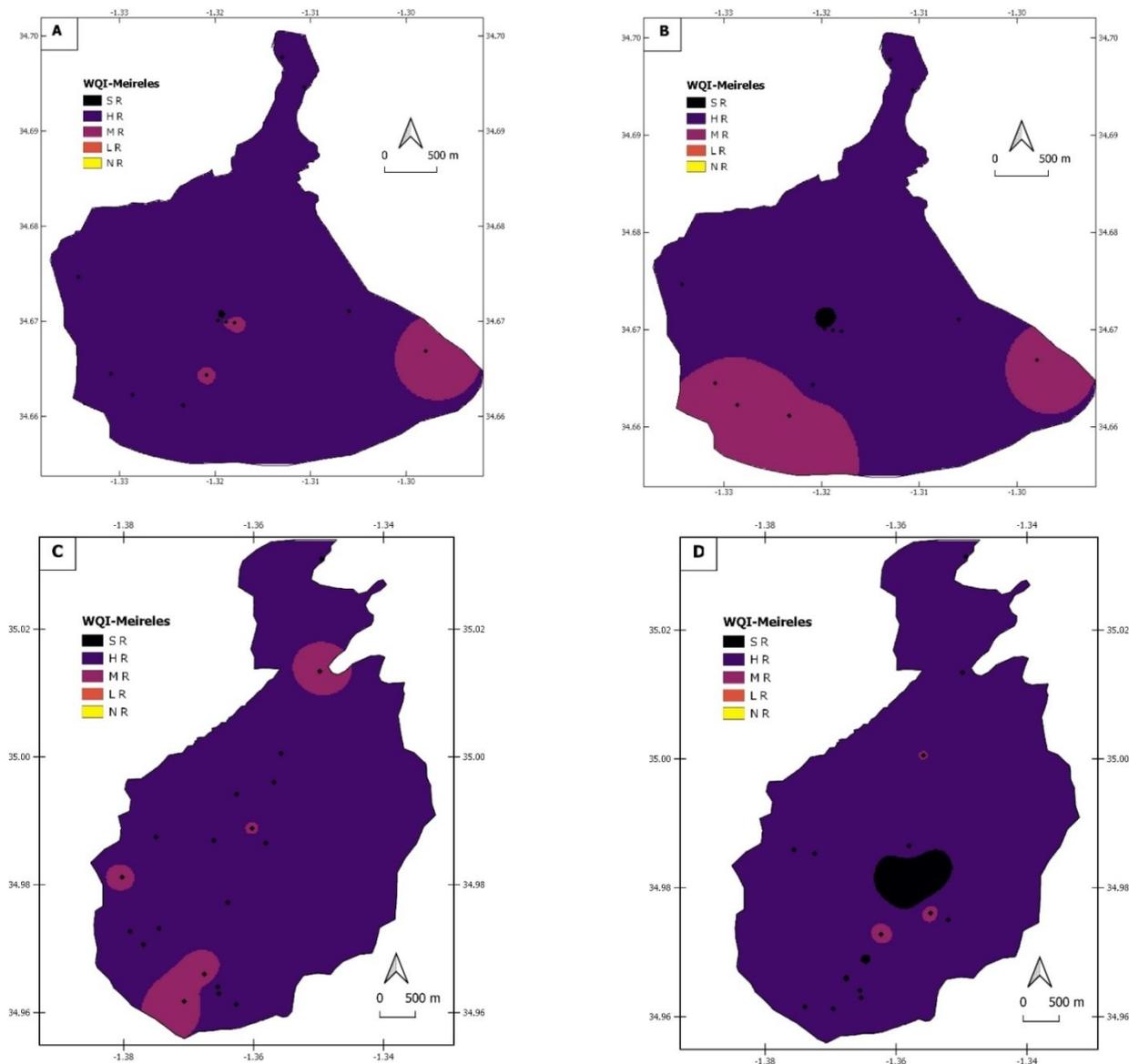


Figure 110- Variation spatiale de l'indice IWQI-MEIRELES dans les eaux souterraines. (A : Aquifère de Sebdo en saison humide, B : Aquifère de Sebdo en saison, C : Aquifère de Hennaya en saison humide, D : Aquifère de Hennaya en saison sèche).

III. MODELE SINTACS

A. Indice de vulnérabilité intrinsèque SINTACS

Les sept paramètres du modèle de vulnérabilité intrinsèque, à savoir: la profondeur de la nappe phréatique (S), l'infiltration effective (I), la zone non saturée (N), le milieu sol (T), le milieu aquifère (A), zone de conductivité hydraulique (C) et la pente topographique (S) déjà présentés au chapitre 2, sont classés pour représenter divers contextes hydrogéologiques. Chaque classe a des valeurs de notation sur une échelle de 1 à 10 (voir Tableau 7), et comme l'importance de ces paramètres dans l'évaluation de la vulnérabilité est inégale, des poids sur une échelle de 1 à 5 sont attribués et pris en compte pour chacun des paramètres du modèle (voir Tableau 7). L'indice de vulnérabilité intrinsèque SINTACS (*SIVI*: *SINTACS Intrinsic Vulnerability Index*) est calculé à l'aide de l'équation suivante (CIVITA & DE MAIO, 1997):

$$I_{\text{SINTACS}} = \sum_{j=1}^7 P_j W_j$$

Où **P** représente l'évaluation de chaque paramètre et **W** le poids correspondant tel que mentionné dans le tableau 7. Cet indice (I_{SINTACS}) a été divisé en six (06) classes selon le degré de vulnérabilité (voir tableau 9). Sachant que les deux aquifères étudiés sont des aquifères plio-quaternaires peu profonds à nappe libre. Les deux premiers scénarios de la vulnérabilité (voir chapitre 2) sont:

-le scénario **Impact normal** pour l'aquifère de Sebdu, appartenant aux aquifères constitués par des sédiments non consolidés, localisés dans les aires à sols épais, avec une profondeur du plan d'eau faible, des zones peu transformables, des périmètres agricoles faibles à absents (utilisation très faible de pesticides, de fertilisants et d'irrigation) et des périmètres urbains très dispersés;

-le scénario **Impact sévère** pour l'aquifère de Hennaya, correspond aux aquifères à perméabilité intrinsèque des régions où l'occupation des sols est intensive, avec des terres cultivées à forte utilisation de pesticides, de fertilisants et d'irrigation.

Notons que les poids attribués aux différents paramètres des deux scénarios sont présentés dans le tableau 8 du chapitre 2.

1. Préparation des paramètres SINTACS

1.1. Profondeur de la nappe phréatique (S)

Le paramètre profondeur est déduit des relevés piézométriques des 12 points d'eau (puits et sources) de l'aquifère de Sebdu et des 29 points (puits et sources) de l'aquifère de Hennaya, réalisés durant la campagne piézométrique de Mars 2017. Les profondeurs du niveau piézométrique varient entre 0 et 12.7 m pour l'aquifère de Sebdu et 0 et 22.2 m pour l'aquifère de Hennaya. Le calcul de ce paramètre est donné dans le tableau 52. Le poids du paramètre profondeur de la nappe phréatique dans ce modèle SINTACS est de 5 (CIVITA & DE MAIO, 2004).

Aquifère	Poids	Classes (m)	Notations utilisées	Points d'eau	Valeurs (S)
Sebdu	5	0-2	10	S1- S2- S3- P5	50
		3	9	P1- P7	45
		4-5	8	P11	40
		6-7	7	P3- P6	35
		8-9	6	P4	30
		10	5	P9- P10	25
Hennaya	5	0-2	10	S1- S2	50
		3	9	P21	45
		6-7	7	P22- P23	35
		8-9	6	P7-P8-P16- P24- P25	30
		10	5	P1- P2- P6-P12- P13- P15- P17-P18-P19- P20- P26.	25
		20	4	P3-P4-P5-P9-P10-P11- P14- P27	20

Tableau 52- Valeurs du paramètre profondeur de la nappe (S) des deux aquifères considérés selon la classification et le poids attribué par le modèle SINTACS.

1.2. Infiltration efficace ou recharge nette (I)

L'infiltration efficace représente la quantité d'eau par unité de surface de terrain qui pénètre la surface du sol et atteint la nappe d'eau. Cette eau de recharge est ainsi disponible pour transporter un contaminant verticalement vers la nappe et horizontalement au sein de l'aquifère. Selon, KUMAR & *al.* (2013) et AWAWDEH & *al.* (2020), plus la recharge est importante, plus le potentiel de pollution des eaux souterraines est grand. L'infiltration directe est la seule composante ou largement répandue de la recharge nette dans toutes les zones où il n'y a pas d'inter-flux reliant les aquifères ou les masses d'eau superficielles ou aucune pratique d'irrigation utilisant de grands volumes d'eau (CIVITA & DE MAIO, 2004).

Dans cette étude, l'infiltration efficace est calculée sur la base des données climatiques au niveau des deux stations (Sebdou et Zenata), en utilisant la méthode du bilan hydrique de THORNTHWAITE (Tableau 53). En outre, la valeur du flux d'irrigation a également été ajoutée pour l'estimation de la recharge nette des aquifères étudiés.

Pour la plaine de Sebdou, l'irrigation s'effectue principalement par pompage des eaux souterraines. Une partie de ces eaux peut revenir à la nappe de l'aquifère par infiltration directe (RUFINO & *al.*, 2019). L'absence de canaux d'irrigation artificiels qui permettent l'irrigation diffuse, deviennent alors un apport négligeable dans le calcul de la recharge nette du dit-aquifère.

Pour la plaine de Hennaya, et en plus de la grande quantité d'eau pompée utilisée pour l'irrigation, elle bénéficie d'un apport supplémentaire des eaux usées traitées de la station d'épuration d'Aïn El Hout, dont la capacité annuelle s'élève à 11 millions de m³ par an, soit 30000 m³ par jour, pour un périmètre irrigable de 920 hectares. La valeur de la recharge minimale due à l'utilisation des eaux traitées est estimée à 92 mm (BEMMOUSSAT & *al.*, 2019).

Les valeurs de la recharge nette (I) des deux aquifères sont consignées dans le tableau 53.

Aquifère	Poids	Classes (mm)	Notations utilisées	Valeurs (I)
Sebdou	4	0-25	1	4
Hennaya	5	75-100	4	20

Tableau 53- Valeurs du paramètre de recharge nette (I) des deux aquifères selon la classification et le poids attribué par le modèle SINTACS.

1.3. Zone non saturée (N)

La zone non saturée est décrite comme étant la zone sous l'horizon typique du sol et au-dessus de la nappe d'eau qui est non saturée ou saturée de manière discontinue. Le paramètre de zone insaturée est l'un des paramètres les plus importants dans l'évaluation de la vulnérabilité, et par conséquent, on lui attribue un poids de 5 (KUMAR & *al.*, 2013). Les notes attribuées selon le modèle SINTACS aux paramètres des zones insaturées sont données dans le tableau 54.

Aquifère	Poids	Classes (mm)	Notations utilisées	Points d'eau	Valeurs (N)
Sebdou	5	Alluvions grossières	6-9	P3-P4-P5-P6-P7-P9-P10-P11-S2	30-45
		Calcaires fissurés	4-9	P1-S1-S3	20-45
Hennaya	4	Alluvions grossières	6-9	P1-P2-P25-P26-P27	24-36
		Grès	5-8	P9-P10-P11	20-32
		Alluvions fins	3-6	P3-P4-P5-P6-P7-P8-P12-P13-P14-P15-P16-P17-P18-P19-P20-P21-P22-P23-P24-S1-S2	12-24

Tableau 54- Valeurs du paramètre Zone non saturée (N) des deux aquifères selon la classification et le poids attribué par le modèle SINTACS.

1.4. Milieu du sol (T)

Le milieu pédologique fait référence à la partie supérieure de la zone non saturée et constitue la première ligne de défense du régime hydrogéologique (CIVITA & DE MAIO, 1997). Par conséquent, il joue un rôle primordial dans l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines. Le milieu du sol a montré un impact significatif sur la quantité de recharge qui s'infiltrer dans le sol et donc sur la capacité d'un contaminant à se déplacer verticalement dans la zone vadose (ALAMOUSH & *al.*, 2010; AWAWDEH & *al.*, 2020). A défaut de cartes pédologiques des sous-bassins considérés, le paramètre T est calculé sur la base des affleurements superficiels cités dans les travaux de BENEST (1985) et de HAYANE (1983)(Tableau 55).

Aquifère	Poids	Classes (mm)	Notations utilisées	Valeurs (T)
Sebdou	4	Limons argileux	3-4	12-16
Hennaya	5	Limons argileux	3-4	15-20

Tableau 55- Valeurs du paramètre milieu du sol (T) des deux aquifères selon la classification et le poids attribué par le modèle SINTACS.

1.5. Milieu aquifère (A)

Un aquifère contient suffisamment de matériaux perméables saturés pour fournir des quantités importantes d'eau au puits ou aux sources. Le paramètre du milieu aquifère a été préparé à l'aide des cartes géologiques du sous-sol (voir figures 48 et 52). Les côtes attribuées selon le modèle SINTACS aux paramètres des milieux aquifères sont données dans le tableau 56.

Aquifère	Poids	Classes (mm)	Notations utilisées	Points d'eau	Valeurs (A)
Sebdou	3	Calcaires fissurés	6-9	P1-S1-S2.	18-27
		Alluvions grossières	8-9	P3- P4-P5-P6-P7-P10-P11-S3.	24-27
Hennaya	3	Calcaires fissurés	6-9	P12-P17-P18-P24	18-27
		Alluvions grossières	8-9	P1-P2-P25-P26-P27.	24-27
		Alluvions fines	6-8	P3-P4-P5-P6-P7-P8-P13-P14-P15-P16-P19-P20-P21- P22-P23.	18-24
		Grès et conglomérats	4-9	P9-P10-P11- S1-S2.	12-27

Tableau 56- Valeurs du paramètre milieu aquifère (A) des deux aquifères selon la classification et le poids attribué par le modèle SINTACS.

1.6. Conductivité hydraulique (C)

Elle représente la capacité de l'eau souterraine à se déplacer à l'intérieur du milieu saturé connue sous le nom de la perméabilité ($m s^{-1}$), donc le potentiel de mobilité d'un contaminant dont la densité et la viscosité sont presque identiques à celles de l'eau souterraine. Des valeurs de conductivité hydraulique plus élevées correspondent généralement à une vulnérabilité élevée aux contaminants (CIVITA & DE MAIO, 2004; CITIVA, 2010). A défaut des données de perméabilité, les valeurs moyennes des travaux antérieurs cités précédemment (chapitre 3) ont été utilisées pour le calcul du paramètre selon la classification du modèle SINTACS (Tableau 57).

Aquifère	Poids	Classes ($m s^{-1}$)	Notations utilisées	Valeurs (C)
Sebdou	3	$10^{-6} - 10^{-5}$	3-5	9 - 15
Hennaya	2	10^{-4}	7	14

Tableau 57- Valeurs du paramètre Conductivité hydraulique (C) des deux aquifères selon la classification et le poids attribué par le modèle SINTACS.

1.7. Pente topographique (S)

La pente topographique est un facteur important dans l'évaluation de la vulnérabilité, par rapport au fait que l'eau et le polluant peuvent ruisseler ou rester en surface suffisamment longtemps pour s'infiltrer (CIVITA & DE MAIO, 2004; KUMAR & *al.*, 2013; CANORA & *al.*, 2022). La notification la plus élevée est attribuée aux pentes faibles, c'est-à-dire aux zones de surface où un polluant peut se déplacer lentement sous l'action de la gravité, voire s'arrêter à l'endroit de l'exutoire favorisant la percolation (voir tableau 7)(CIVITA & DE MAIO, 2004).

Les cartes des pentes des sous bassins de Sebdou et de Hennaya utilisées sont dérivées des données du modèle DEM déjà utilisé au chapitre 3. Les notations attribuées selon le modèle SINTACS aux paramètres topographiques sont données dans le tableau 58.

Aquifère	Poids	Classes ($m s^{-1}$)	Notations utilisées	Points d'eau	Valeurs (S)
Sebdou	2	0 - 2%	10	P4- P6-P7	20
		3 - 4%	9	P1	18
		5 - 6%	8	S1- S2- S3- P5- P9- P10	16
		7 - 9%	7	P3	14
		10 - 12%	6	P11	12
Hennaya	2	0 - 2%	10	P9-P2-P25-P3- P4-P24-P23-P18- P17-P13-P20- P19-P12-P22-P7- P8-P6-P10-P11	20
		3 - 4%	9	S2-P21-P16-P15- P14-P5- P26-P1	18
		5 - 6%	8	S1-P27	16

Tableau 58- Valeurs du paramètre Pente topographique (S) des deux aquifères selon la classification et le poids attribué par le modèle SINTACS.

2. Résultats du modèle SIVI

Proposée par la méthode SINTACS, l'estimation des différents paramètres et leur utilisation dans l'équation de l'indice de vulnérabilité intrinsèque ont abouti à l'évaluation du degré de risque à la contamination des eaux souterraines des aquifères susmentionnés.

Dans cette optique, les indices de vulnérabilité intrinsèques résultants sont représentés sur la figure 111A et B.

Selon la procédure d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque de la méthode SINTACS donnée par CIVITA & DE MAIO (1997) (voir tableau 10), les résultats de l'élaboration des paramètres SINTACS montrent que:

-pour l'aquifère de Sebdu, l'indice de vulnérabilité des eaux souterraines varie de 124 à 149, le classant dans la catégorie de vulnérabilité moyenne (110–150) et couvrant ainsi la totalité de l'aquifère (100 %) (Figure 111A).

-pour l'aquifère de Hennaya, l'indice de vulnérabilité SIVI varie de 124 à 173 témoignant de son appartenance à une zone de vulnérabilité moyenne (110–150) représentant 79 % de sa surface totale et une zone de vulnérabilité élevée couvrant les 21 % de sa superficie. Cette dernière est située aux extrémités nord et sud de la zone d'étude (Figure 111B).

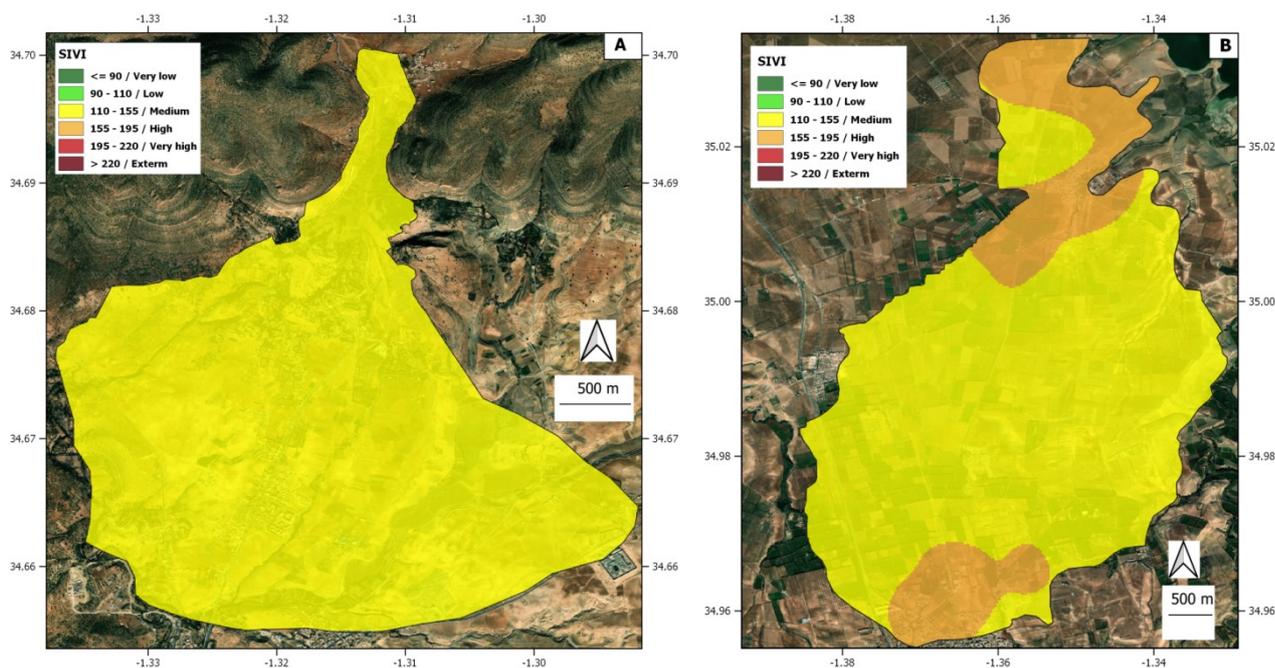


Figure 111- Carte des vulnérabilités intrinsèques. A. Aquifère de Sebdu; B. Aquifère de Hennaya.

En termes de susceptibilité intrinsèque à la pollution, les eaux de l'aquifère de Sebdu sont à vulnérabilité modérée, alors que les eaux souterraines de l'aquifère de Hennaya sont à vulnérabilité modérée à élevée.

B. Indice de vulnérabilité spécifique SSVI

L'impact sur la vulnérabilité a été pris en compte en incluant le paramètre d'occupation du sol, considéré comme un paramètre d'impact anthropologique (AI (Anthropogenic impact) sur le modèle SINTACS.

Dans les deux aquifères étudiés, la qualité des eaux souterraines est soumise à une dégradation due à l'impact anthropique principalement des pressions agricoles et urbaines. En particulier, la plaine de Hennaya conditionnée par des activités agricoles intensives.

Les données relatives aux multiples utilisations des terres utilisées dans lesdits aquifères proviennent de la carte d'occupation des sols de la région de Tlemcen réalisée par le Bureau National d'Etude pour le Développement Rural (BNEDER) (voir figure 3), ainsi que la carte ESRI-Satellite (Environmental Systems Research Institute) téléchargeable sur QGIS version 3.14.

La classification de l'indice SINTACS a été modifiée ($I_{SINTACS-S}$) en fonction de l'utilisation des terres et pondéré avec une valeur de 5 (voir tableau 10). Le calcul est effectué à l'aide de l'équation suivante:

$$I_{SINTACS-S} = S_r S_w + I_r I_w + N_r N_w + T_r T_w + A_r A_w + C_r C_w + S_r S_w + AI_r AI_w$$

Où **S**, **I**, **N**, **T**, **A**, **C**, **S** et **AI** sont les paramètres indiqués précédemment; **r** est la classe et enfin **w** est le poids attribué à chaque paramètre.

1. Préparation du paramètre AI

L'occupation du sol des plaines de Sebdou et Hennaya comporte principalement une couverture végétale due principalement aux activités agricoles et une couverture urbaine restreinte.

Le développement des activités agricoles a entraîné une augmentation générale de la taille des zones cultivées. Ainsi, les deux plaines sont caractérisées par la présence des grandes cultures en sec ou en irrigué (voir figure 3).

Certaines zones sont caractérisées aussi par des parcelles affectées à des cultures permanentes dites aussi annuelles, principalement des vignes, des oliviers, des arbres fruitiers et des terres ensemencées.

Notons aussi la présence des cultures permanentes et des espaces bâtis considérés comme des zones urbanisées.

L'impact de l'utilisation des terres sur la vulnérabilité a été considéré, en calculant le paramètre AI (Tableau 59).

Aquifère	Poids	Occupation du sol	Points d'eau	Classes	Notations utilisées	Valeurs (AI)
Sebdou	5	Grande culture	S1-S2-S3-P11	Agriculture intensive	9	45
		Oléiculture	P6	Cultures annuelles, Arbres fruitiers, Zones urbaines	7	35
		Culture arboricole	P5			
		Culture maraîchère	P4-P9-P10			
		Espace bâti	P1-P7 -P3			
Hennaya	5	Grande culture	S2-P23-P14-P11-P5-P6-P8-P19-P21	Agriculture intensive	9	45
		Oléiculture	P22-P24	Cultures annuelles, Arbres fruitiers, Zones urbaines	7	35
		Culture arboricole	S1-P17-P18-P9-P26-P27-P7-P20-P4-P1			
		Culture maraîchère	P12-P16-P13-P15-P3			
		Espace bâti	S1-P2-P25			

Tableau 59- Valeurs du paramètre impact anthropique (AI) des deux aquifères selon la classification et le poids attribué par le modèle SINTACS.

2. Résultat du modèle SSVI (SINTACS Specific Vulnerability Index)

Les cartes de l'indice de vulnérabilité spécifique SINTACS résultantes montrent deux classes de vulnérabilité, et qui sont:

-vulnérabilité élevée (SSVI: 159 – 188), avec un risque élevé de contamination des eaux souterraines sur la totalité de la plaine de Sebdou (Figure 112A);

-vulnérabilité élevée à très élevée (SSVI: 161 – 218) pour la plaine de Hennaya (Figure 112B). La carte des risques montre que les zones placées dans la catégorie de vulnérabilité très élevée situées dans les parties méridionales et septentrionales de l'aquifère présentent un risque très élevé de contamination des eaux souterraines.

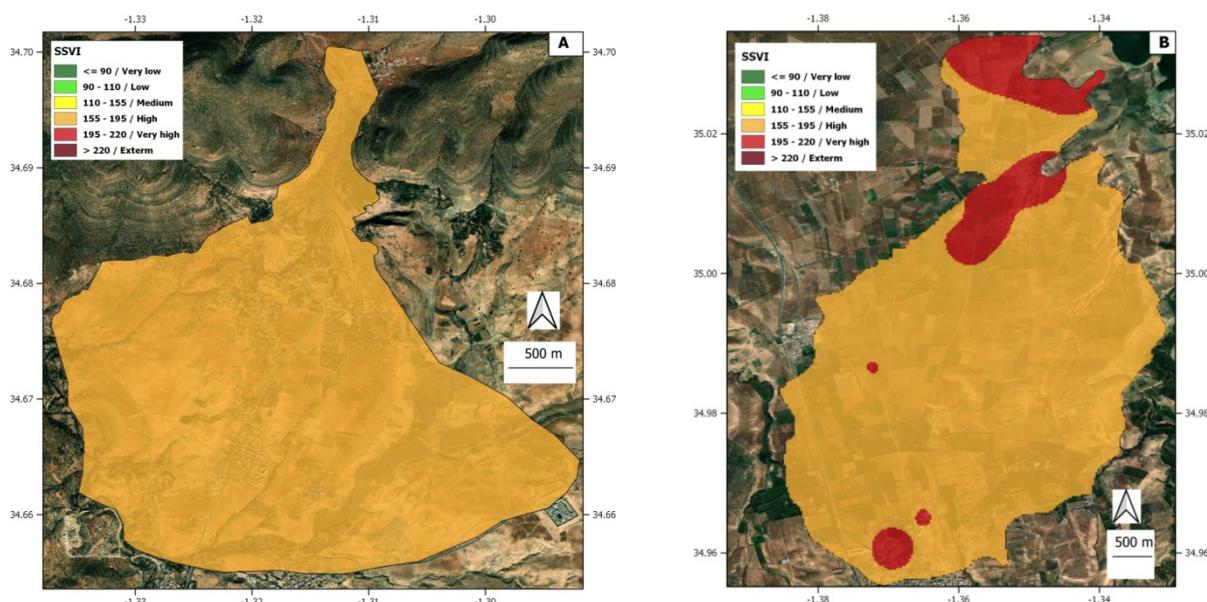


Figure 112- Carte des vulnérabilités spécifiques. A. Aquifère de Sebdou ; B. Aquifère de Hennaya.

C. Discussion et validation des modèles SIVI et SSVI

L'évaluation de la vulnérabilité des aquifères reste incomplète sans la validation du modèle avec des données de terrain. Ainsi, les résultats de son évaluation doivent être comparés avec les observations du terrain.

Dans la présente étude, l'évaluation de la vulnérabilité des aquifères considérés a été réalisée moyennant les concentrations des nitrates mesurées lors des deux campagnes d'échantillonnage.

La validation des modèles a été tentée par rapport à la limite permise des teneurs en nitrates (50 mg L^{-1}), pour l'eau potable selon les normes préconisées par le JORA (2011) et l'OMS (2017). Six classes de concentration de NO_3^- (mg L^{-1}) ont été discernées et une cote qualitative leur a été attribuée de manière à être analogues aux cartes de vulnérabilité. Les niveaux de contamination très bas ($<25 \text{ mg L}^{-1}$) et bas ($25\text{-}50 \text{ mg L}^{-1}$) ont été définis comme inférieurs au seuil de potabilité présentant un faible risque sur la santé humaine et sur l'environnement. Entre 50 et 100 mg L^{-1} , le niveau de concentration est moyen, au-delà de cette classe, les niveaux de concentration sont élevés ($100\text{-}150 \text{ mg L}^{-1}$), très élevés ($150\text{-}200$) et même extrêmement élevé ($>200 \text{ mg L}^{-1}$) (STIGTER & *al.*, 2006; HAMZA & *al.*, 2007; KAZAKIS & *al.*, 2015; BUSICO & *al.*, 2017).

Les méthodes SINTACS intrinsèques et spécifiques ont été toutes les deux appliquées à la fois dans les aquifères plio-quaternaires de Sebdou et de Hennaya. La distribution des valeurs des concentrations des nitrates est présentée en superposition avec les valeurs de vulnérabilité SINTACS (Figure 113).

Pour l'aquifère de Sebdou, la superposition des cartes SIVI et SSVI surestiment la vulnérabilité aux nitrates (Figure 113A et B), soit 64.3 % des valeurs sont inférieures à 50 mg L^{-1} et ne coïncident pas avec les deux classes trouvées par les deux modèles.

L'homogénéité de la vulnérabilité sur la totalité de la zone d'étude (classe modérée pour SIVI et élevée pour SSVI) confirme les inconvénients de la méconnaissance des valeurs réelles des caractéristiques du milieu naturel et l'utilisation des estimations moyennes appliquées sur la totalité de la surface du terrain étudié. Néanmoins, il faut savoir que la notion de vulnérabilité n'est pas synonyme d'une pollution actuelle, mais plutôt d'une prédisposition de ces zones à une contamination éventuelle.

D'autre part, la superposition des cartes de vulnérabilité intrinsèque et spécifique avec la carte d'évolution spatiale des nitrates des eaux de l'aquifère de Hennaya (Figure 113.C et D) montrent une assez bonne coïncidence entre les zones de forte teneur en nitrates avec celles où les valeurs des indices SIVI sont élevées notamment dans les parties méridionales et septentrionales de la région d'étude (Figure 113A). Pour le modèle SSVI, ces valeurs d'indice de vulnérabilité coïncident à plus de 80 % avec les teneurs de nitrates des points d'eau prélevée dans le secteur d'étude. La plupart des zones avec des concentrations élevées en nitrates localisées sous les propriétés agricoles ou zone urbanisée démontrent le grand intérêt de la prise en compte de l'utilisation du sol comme paramètre de conditionnement de la vulnérabilité. Ceci pour assurer l'efficacité du modèle SINTACS spécifique SSVI et garantir également la validité des résultats acquis.

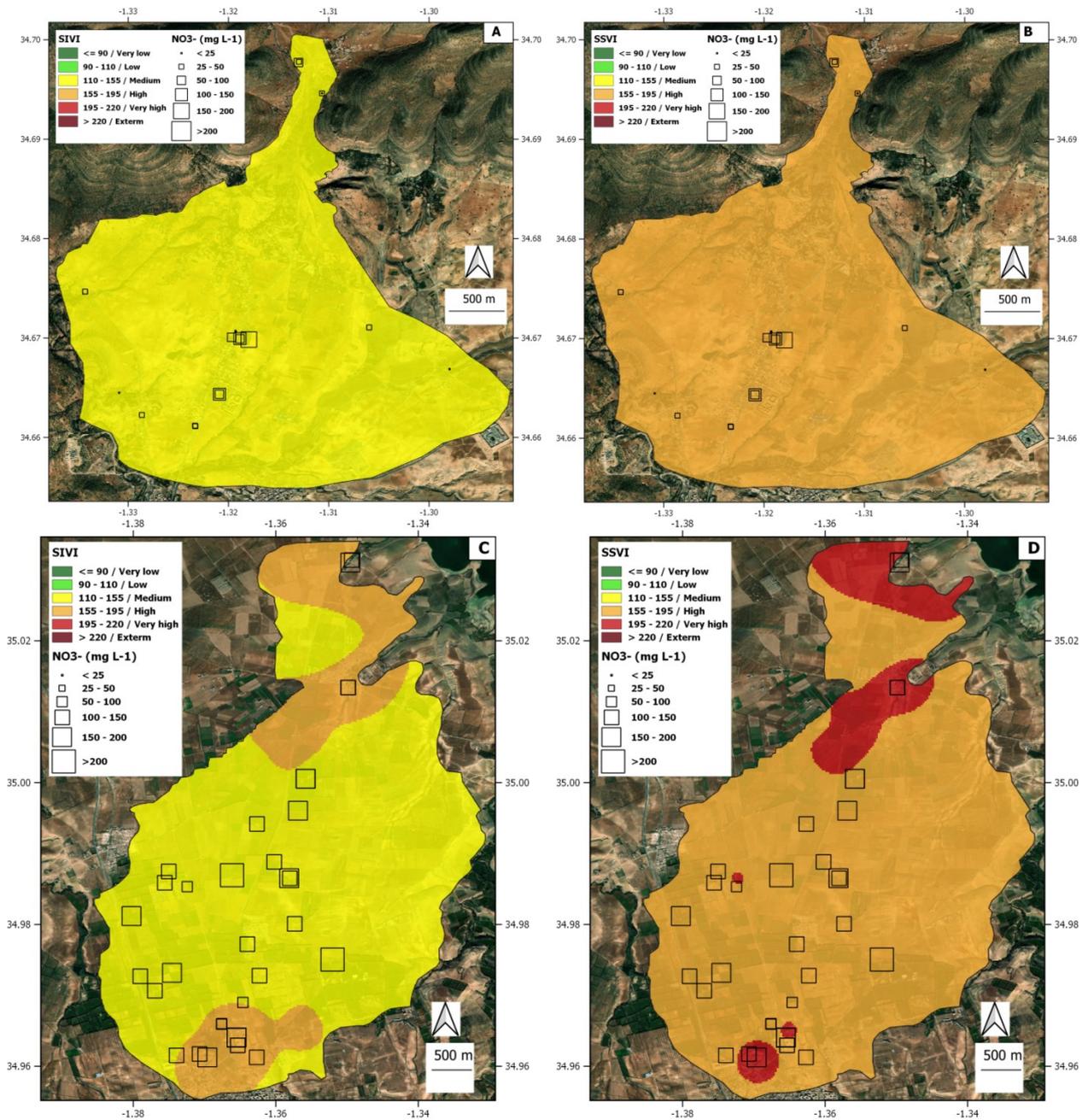


Figure 113- Répartition des classes SINTACS (SIVI & SSVI) comparées par rapport aux classes de nitrates. A: Sebdu (SIVI & NO₃⁻); B: Sebdu (SSVI & NO₃⁻); C: Hennaya (SIVI & NO₃⁻); D: Hennaya (SSVI & NO₃⁻).

IV. CONCLUSION

A partir de l'étude de la vulnérabilité des eaux des aquifères réalisée sur la base de modèles simplifiés, à savoir ; des indices de qualité de l'eau potable (DWQI) et de l'indice de qualité d'eau d'irrigation (IWQI), il en ressort que lorsque l'ensemble des valeurs de concentrations comparés aux normes fixées par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) et par le Journal Officiel de la République Algérienne (JORA) sont additionnés, les valeurs du DWQI indiquent que les eaux de l'aquifère de Sebdu sont de qualité excellente en saison humide et bonne en saison sèche et que celles de Hennaya sont, en général, de

mauvaise qualité et sont, de ce fait, impropres à la consommation humaine. La qualité de ces eaux souterraines est altérée par la présence de fortes concentrations de nitrates.

Concernant les eaux d'irrigation, les indices de qualité (IWQI) et leur spatialisation montre que les eaux souterraines des deux aquifères plio-quaternaires appartiennent à la classe d'aptitude moyenne par rapport à l'indice de SIMSEK.

Quant à l'indice de MEIRELES, il indique que les eaux de Sebdou sont à restriction moyenne à élevée et celles de Hennaya à restriction élevée à très élevée.

La vulnérabilité, évaluée à partir des modèles intrinsèques et spécifiques indiquent que les eaux souterraines de l'aquifère de Sebdou disposent d'une vulnérabilité moyenne selon le premier modèle couvrant la totalité de sa superficie et élevée selon le second. Concernant, l'aquifère de Hennaya, les valeurs de l'indice de vulnérabilité des eaux témoignent d'une vulnérabilité moyenne, couvrant les 79 % de sa surface totale, à élevée selon le modèle SIVI et élevée à très élevée selon la méthode SSVI présentant ainsi un risque de contamination élevé.

La superposition des cartes de vulnérabilité intrinsèque et spécifique avec celle des nitrates des eaux de l'aquifère de Hennaya montrent, en général, une assez bonne coïncidence entre les zones à fortes teneurs en nitrates avec celles des valeurs des indices SIVI et SSVI. Dans l'aquifère de Sebdou, la superposition des cartes SIVI et SSVI indiquent une surestimation de la vulnérabilité aux nitrates.

Conclusions & perspectives

Conclusions & perspectives

I. CONCLUSIONS

Au terme de ce travail consacré à l'étude des eaux souterraines et de surface des sous-bassins de la Haute Tafna et de Sikkak, les principaux résultats obtenus seront ici brièvement résumés:

A. Sur le plan morphométrique

La délimitation des sous-bassins de la Haute Tafna et de Sikkak et la détermination de leurs caractéristiques morphométriques ont été conduites moyennant la cartographie thématique sous Système d'Information Géographique.

Ainsi, le premier sous-bassin de la Haute Tafna dispose d'une superficie de 992.68 km² et d'une forme géométrique assez allongée ($K_c = 2.3$). Son réseau hydrographique peu développé et de forme dendritique présente une longueur de 145.45 km. Le profil en long de son cours d'eau principal est à pente assez régulière et faible. Les faibles valeurs de la densité de drainage ($D_d = 0.14$ km/km²), de la fréquence de drainage ($F=0.02$) et du rapport de confluence ($R_c = 1.57$) de son réseau hydrographique dénotent la présence de terrains perméables. Ces derniers favorisent le processus d'infiltration par rapport à celui du ruissellement.

Quant au deuxième sous-bassin de Sikkak, avec une superficie plus réduite (259.41 km²) est aussi de forme assez allongée ($K_c = 2.25$). Son réseau hydrographique, peu développé et de forme dendritique a une longueur de 134.96 km. Son profil en long présente des pentes irrégulières et fortes avec des ruptures à plusieurs niveaux d'altitude. Les valeurs de la densité de drainage ($D_d = 0.29$ km/km²), la fréquence des cours d'eau ($F=0.06$) et le rapport de confluence ($R_c = 2.51$) sont plus importantes par rapport au sous-bassin susmentionné, mais restent faibles.

B. Sur le plan climatique

Ces deux sous-bassins sont caractérisés par un climat de type semi-aride à hivers froids (Sikkak) à très froids (Haute Tafna) où, la pluviométrie interannuelle est respectivement, de l'ordre de 442 mm et de 485 mm, avec une hauteur maximale enregistrée au mois de novembre. D'une manière générale, les régimes pluviométriques annuels sont irréguliers, mais présentent une certaine régularité durant la période concernée par l'étude.

L'utilisation du SPI, indicateur des conditions sèches et humides dénote que les seuils de sécheresse successive n'ont pas été atteints, mais indique une tendance vers un assèchement décelé à travers les différentes séries chronologiques étudiées.

L'évapotranspiration réelle estimée par la méthode de THORNTHWAITE à 378.37 et 422 mm, respectivement aux sous-bassins de la Haute Tafna et de Sikkak a permis l'estimation de l'infiltration par le bilan hydrique. La hauteur de celle-ci a été évaluée à 19.52 mm, soit 4.5 % des précipitations annuelles pour le sous bassin de la Haute Tafna et 13.24 mm, soit 2.7% de la lame d'eau précipitée sur celui de Sikkak. La hauteur de la lame d'eau ruisselée, déterminée par la méthode de TIXERONT-BERKALOFF est comprise entre 43 et 51.93 mm par an. Il a été noté que plus de 60 % des débits moyens annuels sont inférieurs aux moyennes interannuelles et que les deux sous-bassins considérés sont marqués par une saison de crue s'étalant principalement du mois de novembre au mois de mai et une saison d'étiage allant de juin à octobre.

C. Sur le plan hydrogéologique

La nappe alluviale de l'aquifère plio-quaternaire de Sebdou représenté par des alluvions récentes, des terrasses, des croûtes calcaires du Quaternaire ancien et des conglomérats qui comblent le fossé de Sebdou est limitée dans sa partie inférieure par sur un substratum marno-calcaires d'âge mésozoïque. Le tracé de la carte piézométrique indique un écoulement général du Nord vers le Sud avec un gradient compris entre $1.21 \cdot 10^{-1}$ (au Nord) à $5.6 \cdot 10^{-2}$ (au Sud-Ouest). Cette nappe est alimentée directement par son impluvium et/ou latéralement à partir des formations adjacentes.

La nappe de Hennaya s'écoulant dans les grès, conglomérats, travertins, graviers et graviers argileux du Tortonien repose sur un substratum marneux et a pour exutoire des sources qui émergent au contact des conglomérats. Elle est rechargée principalement par les formations dolomitiques du Sud de la plaine. Son tracé piézométrique indique un écoulement souterrain de direction SW-NE, avec un gradient hydraulique compris entre $2.83 \cdot 10^{-2}$ au Sud et $9.25 \cdot 10^{-3}$ au Nord.

D. Sur le plan hydrogéochimique

Lors de cette étude, les analyses physico-chimiques ont rendu possible la caractérisation des eaux souterraines et de surface des deux sous-bassins. A partir des résultats qui en sont issus, des variations spatiales et/ou temporelles et des différences notables entre les valeurs des paramètres analysés ont été mises en évidence. Ainsi, il en ressort que la minéralisation la plus importante a été enregistrée dans les eaux souterraines de l'aquifère de Hennaya. Celles-ci, à pH acide (<6.42) en saison humide sont caractérisées par des teneurs en nitrates élevées.

Les diagrammes de PIPER, de CHADHA et de DUROV ont permis l'individualisation, au sein de l'aquifère de Sebdou, d'un faciès hydrogéochimique de type bicarbonaté calcique caractérisé par la prépondérance des alcalino-terreux et des acides faibles et d'un autre type chloruré calcique. Ce faciès caractérise aussi les eaux souterraines de Hennaya où une dominance des alcalins et des acides forts est décelée.

Dans la plaine de Sebdu, les ions sulfates, magnésium, sodium, bicarbonates et chlorures, de par leurs corrélations importantes et positives avec les phosphates seraient à l'origine du déversement des eaux usées et de l'utilisation des engrais. Dans l'aquifère de Hennaya, la corrélation significative positive entre NO_3^- et SO_4^{2-} , durant la saison humide indique que ces deux ions seraient issus, entre autres, de l'utilisation des fertilisants lors des pratiques culturales dans cette plaine à vocation agricole.

Les indices de saturation calculés révèlent que les eaux souterraines de l'aquifère de Sebdu, qui sont sous-saturées à équilibrées en saison humide sont en général, en équilibre durant la saison sèche. Concernant l'aquifère de Hennaya, un état de sous-saturation en calcite et dolomite est mis en évidence dans les eaux souterraines en saison humide, et de sursaturation légère par rapport à la dolomite en saison sèche. En outre, une tendance à la dissolution des évaporites est observée dans les eaux des deux aquifères.

L'utilisation des indices chloroalcalins (CAI-1 et CAI-2) dont les valeurs sont, en général négatives traduisent un échange cationique dénotant un remplacement des alcalino-terreux des eaux (Ca^{2+} et Mg^{2+}) de l'eau souterraine par les alcalins (K^+ et Na^+) des formations aquifères.

les diagrammes de GIBBS $(\text{Na})/(\text{Na}+\text{Ca})$ et $(\text{Cl})/(\text{Cl}+\text{HCO}_3)$ indiquent que le chimisme des eaux souterraines est notamment contrôlé par l'altération des roches carbonatées.

Les indices d'échange de base et de genèse météorique montrent que 60 % des points d'eau de l'aquifère de Sebdu sont de type Na-HCO_3 , que ceux de la plaine de Hennaya sont de type Na-SO_4 et révèlent une source d'eau météorique profonde pour les deux aquifères.

Les faibles valeurs de Cl/NO_3^- de la quasi-totalité des points d'eau de l'aquifère de Sebdu, la corrélation inverse établie entre le pH et les nitrates et la corrélation faible et positive entre les nitrates et bicarbonates témoignent de la présence d'un processus de dénitrification selon la relation $\text{NO}_3^- + \text{H}^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NH}_3 + 2 \text{O}_2$ au niveau de certains points d'eau. Un processus de dénitrification selon l'équation $5\text{CH}_2\text{O} + 4\text{NO}_3^- \rightarrow 2\text{N}_2 + 4\text{HCO}_3^- + \text{H}_2\text{CO}_3 + 2\text{H}_2\text{O}$ ou un phénomène de dilution éventuel dans la plaine de Hennaya durant la saison sèche a été mis en évidence.

Les principaux processus géochimiques, dont les précipitations de la calcite en basses eaux, les échanges cationiques directes dans des eaux d'origine peu profonde et la dégradation de la qualité des eaux confirment l'importance des influences des flux d'irrigation et l'utilisation des produit agrochimiques sur l'aquifère de Hennaya.

E. Sur le plan qualitatif des eaux et leur vulnérabilité à la pollution

Parmi les 13 paramètres des 53 échantillons d'eau analysés, il a été constaté que les nitrates étaient prédominants dans les eaux souterraines, créant ainsi une menace potentielle pour la santé humaine. Des teneurs élevées en cet ion dépassant la norme du JORA et de l'OMS (50 mg L^{-1}) ont été décelées dans la totalité des puits et sources de la plaine de Hennaya et dans quelques points d'eau localisés dans la partie méridionale de l'aquifère de Sebdu.

Par ailleurs, les valeurs de pH des eaux de l'aquifère de Hennaya, sont inférieures à la première limite du standard, soit 6.5, indiquant une dégradation de la qualité des eaux devenues impropres à la consommation. Ces valeurs de pH, lorsqu'elles sont comparées aux normes de la FAO confèrent une inaptitude de ces eaux à des fins d'irrigation.

La confrontation des valeurs du SAR à celles de la conductivité indiquent l'appartenance de la quasitotalité des points d'eau de l'aquifère de Sebdo aux classes C₂S₁ et C₃S₁ traduisant ainsi un risque de salinité moyen à élevé et un risque de sodicité faible. A l'encontre de cet aquifère, les points échantillonnés à Hennaya regroupés, en général dans la classe C₃S₁ présentent un risque de salinité assez élevé mais ne posent pas de problème de sodicité.

Certains indices ayant permis l'évaluation de la qualité des eaux, à l'exemple du pourcentage sodium, du RSC et du KR indiquent en général, que les eaux sont convenables à l'irrigation. Ce n'est pas le cas du MH, dont les valeurs obtenues confèrent aux eaux de l'aquifère de Hennaya une inaptitude à l'irrigation à l'exception des localités nord et sud-ouest en saison sèche. Cette même qualité est observée aussi dans certaines localités de l'aquifère de Sebdo.

Il est à noter que des eaux d'irrigation à concentrations élevées en magnésium pourraient modifier la qualité du sol en le transformant en sol alcalin réduisant ainsi son rendement agricole. De même, bien que les valeurs du PI attribuent aux eaux une qualité modérée, une irrigation à long terme avec de telles eaux pourrait altérer la perméabilité du sol en modifiant ses propriétés physiques et chimiques.

Concernant les cours d'eau, le MH confère aux eaux de surface une inaptitude à des fins d'irrigation dans leur partie avale et les autres indices, tels que KR et SSP, les catégorisent de convenable, à l'exception du PI qui leur attribue une qualité modérée. Moyennant le SAR, ces eaux de surface appartenant aux classes C₂S₁ et C₃S₁ sont de salinité moyenne à élevée et présentent un risque de sodicité faible. Au vu de la dégradation de leur qualité, il est clair que les eaux suscitent une surveillance appropriée via un suivi d'analyses des paramètres et une utilisation rationnelle des engrais et des pesticides et des techniques d'irrigation appropriées.

L'utilisation des indices de qualité des eaux potables (DWQI) et d'irrigation (IWQI) couplée au Système d'Information Géographique (SIG) a permis de montrer que:

- les eaux de l'aquifère de Sebdo sont de qualité bonne (saison sèche) à excellente (saison humide) et que celles de Hennaya, altérée par la présence de fortes concentrations en nitrates sont en général, impropres à la consommation humaine;
- les eaux souterraines des deux aquifères appartiennent à la classe d'aptitude moyenne selon l'indice d'irrigation de SIMSEK;
- les eaux de Sebdo sont à restriction moyenne à élevée et celles de Hennaya à restriction élevée à très élevée par rapport à l'indice de MEIRELES.

La vulnérabilité déterminée à partir des modèles intrinsèques (SIVI) et spécifiques (SSVI) confère aux eaux de l'aquifère de Sebdo une vulnérabilité moyenne selon le modèle SIVI et élevée selon le SSVI. L'aquifère de Hennaya, avec une vulnérabilité moyenne, ne couvrant que les 79 % de sa surface totale, à élevée selon le premier modèle

et élevée à très élevée selon le second révèle un risque de contamination élevé. La superposition des cartes de vulnérabilité intrinsèque et spécifique avec celle des nitrates des eaux de l'aquifère de Hennaya montrent, en général, une assez bonne coïncidence entre les zones à fortes teneurs en nitrates et des valeurs des indices SIVI et SSVI. Alors que dans l'aquifère de Sebdu, la superposition de ces mêmes cartes indique une surestimation de la vulnérabilité aux nitrates.

Enfin, la méthode SINTACS spécifique (SSVI), avec un degré élevé et très élevé du risque de vulnérabilité se révèle être celle qui reflète le mieux la réalité du terrain.

II. PERSPECTIVES

A l'issue des résultats obtenus dans cette thèse, de nombreuses perspectives nous apparaissent, en particulier:

- **Réaliser la délimitation de l'ensemble des sous-bassins de la Tafna utilisant le Système d'Information Géographique:** cette pratique aura comme objectifs la détermination des paramètres morphométriques et ceux du réseau hydrographique qui régissent les écoulements de surface et l'infiltration permettant la recharge des aquifères superficiels.

- **Etablir les bilans hydriques:** c'est étudier les éléments permettant d'établir les bilans hydriques du bassin et/ou des sous-bassins tout en gardant à l'esprit que les événements météorologiques extrêmes associés au réchauffement climatique pourraient affecter la recharge des nappes superficielles.

- **Effectuer des études hydrogéologiques à l'échelle du bassin de la Tafna afin de faire une identification exhaustive des aquifères, de déterminer leurs caractéristiques hydrodynamiques et d'établir des cartes hydrogéologiques:** ces études permettront de dresser les documents nécessaires pour une meilleure compréhension du mode de fonctionnement des aquifères au sein du bassin et serviront à une meilleure cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines.

- **Dresser des schémas de pompages pour une exploitation optimale des ressources souterraines:** les pompages en hausse peuvent conduire à la baisse extrême des niveaux des nappes d'eau. La surexploitation est, entre autres, liée aux conséquences des prélèvements intensifs des nappes. Des pompages de longue durée à débits élevés pourraient être à l'origine d'une baisse irréversible des nappes d'eau, de l'affaissement des sols entraînant ainsi un abaissement de la surface du sol après compaction.

- **Etendre et actualiser les études climatiques et hydrologiques à l'échelle du bassin de la Tafna:** il s'agit d'établir les documents nécessaires afin de pouvoir les exploiter dans les études de vulnérabilité.

- **Actualiser la carte de l'occupation des sols du bassin:** ce paramètre reste important dans l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution.

- **Faire un suivi de la qualité des eaux souterraines et de surface:** ce travail doit se faire par la mise en place d'un réseau de surveillance qui permettra d'établir des

diagnostics spatio-temporels et l'intervention par la prise de décisions efficaces des services concernés aux moments opportuns.

- **Veiller à l'utilisation rationnelle des fertilisants et pesticides et des systèmes d'irrigation appropriés par la sensibilisation des agriculteurs:** Cette pratique permettra de diminuer le flux des eaux d'irrigation qui s'infiltreront en direction des nappes amoindrissant ainsi les taux des polluants issus des activités agricoles.
- **Interdire formellement aux industriels de déverser des eaux usées sans traitement préalable et en sensibiliser la population riveraine:** dans ce contexte, des campagnes de sensibilisation portant sur les risques écologiques et de santé pouvant être engendrés..
- **Réaliser des études de vulnérabilité des eaux souterraines:** ces études permettraient de limiter et d'éviter les pollutions en limitant ainsi le traitement des eaux souterraines. Lesdites études serviraient également à définir les périmètres et les zones de protection des captages d'eau souterraine pour leur exploitation.
- **Elaborer des cartes de vulnérabilité:** en plus de la réalisation des cartes, il faut impérativement veiller à leur mise à jour par le choix des indicateurs de pollution appropriés et par l'intégration d'une masse de données plus importante permettant d'aboutir à des résultats fiables.
- **Mettre au point un modèle de vulnérabilité:** il s'agit d'un modèle propre au bassin de la Tafna, en intégrant des pondérations spécifiques aux caractéristiques du bassin.

Références bibliographiques

Références Bibliographiques

A

- ABBASI T., ABBASI S.A. (2012) - Water quality indices. *Elsevier Science, Amsterdam*, 375 p.
- ABBASNIA A., RADFARD M., MAHVI A.H., NABIZADEH R., YOUSEFI M., SOLEIMANI H. & ALIMOHAMMADI M. (2018) - Groundwater quality assessment for irrigation purposes based on irrigation water quality index and its zoning with GIS in the villages of Chabahar, Sistan and Baluchistan, Iran. *Data in Brief*, 19, pp. 623–631.
- ABUALHAIJA M.M., ABU HILAL A.H., SHAMMOUT M.W. & MOHAMMAD A.H. (2020) - Assessment of Reservoir Water Quality Using Water Quality Indices: A Case Study from Jordan. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 13, pp. 397-406.
- AHAMAD A., MADHA V.S., SINGH P., PANDEY J. & KHAN A.H. (2018) - Assessment of groundwater quality with special emphasis on nitrate contamination in parts of Varanasi City, Uttar Pradesh, India. *Applied Water Science* (8): 115. <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0759-x>.
- AHMED N., BODRUD-DOZA M., DIDAR-UI ISLAM SMSMDU, CHOUDHRY M.A, MUHIB M.I., ZAH I A., HOSSAIN S., MONIRUZZAMAN M., DEB N. & BHUIYAN M.A.Q. (2018) - Hydrogeochemical evaluation and statistical analysis of groundwater of Sylhet, north-eastern Bangladesh. *Acta Geochimica*, 38, pp. 440-455.
- AL-AMOUSH H., HAMMOURI N., ZUNIC F. & SALAMEH E. (2010) - Intrinsic Vulnerability Assessment for the Alluvial Aquifer in the Northern Part of Jordan Valley. *Water Resources Management*, 24 (13), pp. 3461-3485.
- ALAM F. (2013) - Evaluation of hydrogeochemical parameters of groundwater for suitability of domestic and irrigational purposes: a case study from central Ganga Plain, India. *The Arabian Journal of Geosciences*, 7, pp. 4121-4131.
- ALLER L., BENNET T. & PETTY R. (1987) - DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. *U.S. Environmental Protection Agency: Washington, DC, USA*, 455 p.
- ALTMAN S.J. & PARIZEK R.R. (1995) - Dilution of Nonpoint-Source Nitrate in Groundwater. *Journal of Environmental Quality*, 24, pp. 707-718.
- ALVIN C.R. (2002) - Methods of multivariate analysis. *Wiley Interscience*, 729 p.
- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (1996) - Hydrology handbook, 2nd Ed., ASCE, manuals and reports on engineering practice, New York. 325 p.

AMEUR-CHEHBEUR A. (1988) - Biochronologie des formations continentales du Néogène et du Quaternaire de l'Algérie. Contribution des micromammifères. *Thèse Doctorat d'Etat*, Université d'Oran, 432 p.

APPELO C.A.J. & POSTMA D. (2005) - Geochemistry, groundwater and pollution, 2nd Ed., CRC Press, *Taylor & Francis Group*, Boca Raton London New York. 634 p.

ASADI E., ISAZADEH M., SAMADIANFARD S., RAMLI M.F., MOSAVI A., SHAMSHIRBAND S. & CHAU K.W. (2019) - Groundwater Quality Assessment for Drinking and Agricultural Purposes in Tabriz Aquifer, Iran. *Preprint-Engineering, Civil Engineering*. <https://doi:10.20944/preprints201907.0339.v1>.

AWAWDEH M., AL-KHARABSHEH N., OBEIDAT M. & AWAWDEH MH. (2020) - Groundwater vulnerability assessment using modified SINTACS model in Wadi Shueib, Jordan, *Annals of GIS*, 26 (4), pp. 377-394.

AYERS R.S. & WESTCOT D.W. (1985) - Water quality for agriculture, FAO irrigation and Drainage. 29 *Paper, Rev I*. Food and Agriculture Organisation, Rome. 174 p.

AYERS R.S. & WESTCOT D.W.A. (1999) - Qualidade da Água para Agricultura. 2nd Ed., Campina Grande: UFPB, 218 p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 29)

B

BAGNOULS F. & GAUSSEN H. (1953) - Saison sèche et indice xéothermique. *Bulletin de la société d'histoire naturelle de Toulouse*, 88, pp.193-240.

BANKS D. & FRENGSTAD B. (2006) - Evolution of groundwater chemical composition by plagioclase hydrolysis in Norwegian anorthosites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70, pp. 1337- 1355.

BARNES C.J. & SMITH G.D. (1992) - The origin of high-nitrate ground waters in the Australian arid zone. *Journal of Hydrology*, 137, pp. 181-197.

BELLON H., GUARDIA P. & MAGNE J. (1984) - Les associations volcaniques du Miocène Supérieur de la région oranaise (Algérie occidentale). Conséquences géodynamiques. *Géologie Méditerranéenne*. Tome XI, (03), pp. 255-264.

BEMMOUSSAT A., ADJIM M. & BENSOUFLA F. (2019) - Irrigation with treated wastewaters and the protection of Hennaya groundwater-Tlemcen, Algeria. *Journal of Water and Land Development*, 43 (X–XII), pp. 19-27.

BEN ALAYA M., SAIDI S., ZEMNI T. & ZARGOUNI F. (2014) - Suitability assessment of deep groundwater for drinking and irrigation uses in the Djeffara aquifers (Northern Gabes, south-eastern Tunisia). *Environmental Earth Sciences*, 71, pp. 3387-3421.

BENEST M. (1971) - Importance des mouvements de coulissage et de rotation dans la mise en place de la partie occidentale de la dépression de Sebdo (Monts de Tlemcen, Algérie). *Bulletin de la Société d'histoire naturelle d'Afrique du Nord*, t. 62, fasc. 1-2, pp. 21-38.

BENEST M. (1982) - Importance des décrochements sénestres (N-S) et dextres (E-W) dans les Monts de Tlemcen et de Daïa (Algérie Occidentale). *Revue de Géologie dynamique et de Géographie physique*, 23, pp. 345-362.

BENEST M. (1985) - Evolution 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. *Documents des Laboratoires de Géologie de Lyon*, n°95, 581 p.

- BENEST M., BENSALAH M., BOUABDELLAH H. & OUARDAS T. (1999) - La couverture Mésozoïques et Cénozoïque du domaine Tlemcenien (Avant-pays Tellien d'Algérie Occidentale): Stratigraphie, paléoenvironnement, dynamique sédimentaire et tectogenèse Alpine. *Bulletin du Service Géologique de l'Algérie*, vol .10, n°2, p.127-157.
- BENSEFIA K.E. (2021) - Les dépôts Triasiques de l'Oranie : Géométrie et caractérisation minéralogique et géochimique des argiles. *Thèse de Doctorat*, Université de Tlemcen, 177p.
- B.N.E.D.E.R. (2011), Bureau National d'Études pour le Développement Rural, placé sous la tutelle du *Ministère de l'Agriculture, du Développement Rural et de la Pêche*, Algérie.
- BHARTI N., KATYAL D. (2011) - Water quality indices used for surface water vulnerability assessment. *International Journal of Environmental Science*, 2, pp. 154-173.
- BHUIYAN M.A.H., BODRUD-DOZA M., ISLAM A.T., RAKIB M.A., RAHMAN M.S. & RAMANATHAN A.L. (2016) - Assessment of groundwater quality of Lakshimpur district of Bangladesh using water quality indices, geostatistical methods, and multivariate analysis. *Environmental Earth Sciences*, 75:1020. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5823-y>.
- BIDDAU R., CIDU R., LORRAI M. & MULAS M.G. (2017) - Assessing background values of chloride, sulfate and fluoride in groundwater: a geochemical-statistical approach at a regional scale. *Journal of Geochemical Exploration*, 181, pp. 243-255.
- BONNET M., DELAROZIERE-BOUILLIN O., JUSSERAND Cl. & ROU P. (1970) - Calcul automatique des 'Bilan d'eau' mensuels et annuels par les méthodes de Thornthwaite et de Turc. *BRGM: 70 SGN 107 HYD*, 20 p.
- BORDALO A. A., TEIXEIRA R. & WIEBE W.J. (2006) - A water quality index applied to an international shared river basin: The case of the Douro River, *Environmental Management*, 38, pp. 910-920.
- BOYACIOGLU H. (2007) - Development of a water quality index based on a European classification scheme. *Water*, 33, pp. 101-106.
- BRINDHA K., PAUL R., WALTER J., TAN M.L. & SINGH M.K. (2020) - Trace metals contamination in groundwater and implications on human health: comprehensive assessment using hydrogeochemical and geostatistical methods. *Environmental Geochemistry and Health*, 42, pp. 3819–3839.
- BROWN R.M., MCLELLAND N.I., DEININGER R.A. & O'CONNOR M.F. (1972) - A water quality index - crashing the psychological barrier. *Indicators of Environmental Quality*, 1 (1), pp. 173-178.
- BRYAN N.S. & LOSCALZO J. (2011) - Nitrite and Nitrate in Human Health and Disease. *Humana Press, Totowa, NJ*. 306 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-60761-616-0>.
- BUROW KR., NOLAN BT., RUPERT MG., DUBROVSKY NM. (2010) - Nitrate in groundwater of the United States, 1991–2003. *Environmental Science & Technology*, 44 (13), pp. 4988-4997.
- BUSICO G., KAZAKIS N., COLOMBANI N., MASTROCICCO M., VOUDOURIS K. & TEDESCO D. (2017) - A modified SINTACS method for groundwater vulnerability and pollution risk assessment in highly anthropized regions based on NO₃⁻ and SO₄²⁻ concentrations. *Science of The Total Environment* ,609, pp. 1512-1523.

C

- CANORA F., MUZZILLO R. & SDAO F (2022) - Groundwater Vulnerability Assessment in the Metaponto Coastal Plain (Basilicata, Italy). *Water*, 14 (12), 1851. <https://doi.org/10.3390/w14121851>.
- CAPRI E., CIVITA M., CORNIELLO A., CUSIMANO G., DE MAIO M., DUCCI D., FAIT G., FIORUCCI A., HAUSER S., PISCIOTTA A., PRANZINI G., TREVISAN M., DELGADO HUERTAS A., FERRARI F., FRULLINI R., NISI B., OFFI M., VASELLI O. & VASSALLO M. (2009) - Assessment of nitrate contamination risk: the Italian experience. *Journal of Geochemical Exploration*, 102 (02), pp.71-86.
- CHADHA D.K. (1999) - A proposed new diagram for geochemical classification of natural waters and interpretation of chemical data. *Hydrogeology Journal*, 7, pp. 431-439.
- CHATURVEDI M.K. & BASSIN J.K. (2010) - Assessing the water quality index of water treatment plant and bore wells, in Delhi, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 163, pp. 449-453.
- CHAUHAN A. & SINGH S. (2010) - Evaluation of Ganga water for drinking purpose by water quality index at Rishikesh, Uttarakhand, India, *Report Opinion*, 2 (9), pp. 53-61.
- CHEN J., WU H., QIAN H. (2016) - Groundwater nitrate contamination and associated health risk for the rural communities in an agricultural area of Ningxia, northwest China. *Exposure and Health*, 8, pp. 349-359. <https://doi.org/10.1007/s12403-016-0208-8>.
- CHIDAMBARAM S., ANANDHAN P., PRASANNA M.V., SRINIVASAMOORTHY K. & VASANTHAVIGAR M. (2012) - Major ion chemistry and identification of hydrogeochemical processes controlling groundwater in and around Neyveli Lignite Mines, Tamil Nadu, South India. *The Arabian Journal of Geosciences*, 6 (9), pp. 3451-3467.
- CHKIRBENE A., TSUJIMURA M., CHAREF A. & TANAKA T. (2009) - Hydrogeochemical evolution of groundwater in an alluvial aquifer: case of Kurokawa aquifer, Tochigi Prefecture, Japan. *Desalination*, 264, pp. 485-495.
- CHOI W.J., HAN J.H., RO H.M., YOO S.H. & LEE S.M. (2002) - Evaluation of nitrate contamination sources of unconfined groundwater in the North Han River basin of Korea using nitrogen isotope ratios. *Geosciences Journal*, 6, pp. 47-55.
- CHOWDHURY R.M., MUNTASIR S.Y. & HOSSAIN M.M. (2012) - Water quality index of water bodies along Faridpur-Barisal Road in Bangladesh. *Global Engineers & Technologists Review*, 2 (3), pp.1-8.
- CIVITA M. (1987) - La previsione e la prevenzione del rischio d'inquinamento delle acque sotterranee a livello regionale mediante le Carte di Vulnerabilità. Atti Conv. "Inquinamento delle Acque Sotterranee: Previsione e Prevenzione", *Mantova*, pp. 9-18.
- CIVITA M. (1990) - La valutazione della vulnerabilità degli acquiferi. Atti 1° Conv. Naz. "Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee: Metodologie, Tecnologie e Obiettivi", 3, *Marano sul Panaro*, pp. 39-86.
- CIVITA M. (2010) - The Combined Approach When Assessing and Mapping Groundwater Vulnerability to Contamination. *Journal of Water Resource and Protection*, 2 (1), pp. 14-28.

CIVITA M. & DE MAIO M. (1997) - SINTACS Un sistema paramétrico per la valutazione e la cartografia della vulnerabilità degli all'inquinamento metodologia e automazione. *Ed. Pitagora, Bologna*, 191 p.

CIVITA M. & DE MAIO M. (2004) - Assessing and mapping groundwater vulnerability to contamination: The Italian "combined" approach. *Geofísica Internacional*, 43, pp. 513-532.

CIVITA M. & DE REGIBUS C. (1995) - Sperimentazione di alcune metodologie per la valutazione della vulnerabilità degli acquiferi. *Attività 2° Convegno Nazionale Protezione e gestione delle acque sotterranee: metodologie, tecnologie e obiettivi, Nonantola (MO)*, 17-19 Maggio 1995, Quaderni Geologia Applicata, pp. 363-371.

COLLIGNON B. (1984) - Contribution de la spéléologie à la compréhension de l'hydrogéologie des Monts de Tlemcen. *Colloque de l'eau, clé du développement au Maghreb*, Oran, pp.3-12.

COLLIGNON B. (1986) - Hydrogéologie appliquée des aquifères karstiques des monts de Tlemcen (Algérie). *Thèse de Doctorat*, Université d'Avignon, 282 p.

COUTAGNE A. (1954) - Quelques considérations sur le pouvoir évaporant de l'atmosphère, le déficit d'écoulement effectif et le déficit d'écoulement maximum. *La Houille Blanche*, 40:3, pp.360-374.

CURIE F. (2006) - Rétention de Nitrates dans les zones humides riveraines : Rôle des facteurs hydrologiques, géomorphologiques et biogéochimiques. Approche multi échelle dans le bassin de la Seine. *Thèse de Doctorat*. Université de Paris VI, 211 p.

D

DABGERWAL D.K. & TRIPATHI S.K. (2016) - Assessment of surface water quality using hierarchical cluster analysis. *International Journal of Environment*, 5 (1), pp. 32-44.

DAVIS A., LONG M. & WIREMAN A. (2002) - *KARSTIC*: a sensitivity method for carbonate aquifers in karst terrain. *Environmental Geology*, 42 (1), pp. 65-72.

DAVIS J.C. (1986) - Statistics and data analysis in geology. 2nd Ed. *John Wiley & Sons Inc*, New York. 645 p.

DE MARTONNE E. (1923) - Aridité et indices d'aridité. *Comptes Rendus, Académie des Sciences*, 182(23), pp. 1935-1938.

DONEEN L.D. (1964) - Notes on water quality in agriculture, published as a water science and engineering, Paper 4001, Department of Water Sciences and Engineering, University of California, 48 p.

DUBREUIL P. (1966) -Les caractéristiques physiques et morphologiques des bassins versants : leur détermination avec une précision acceptable. *Service d'Hydrologie, office de la recherche scientifique et technique Outre-mer*, France. 31 p.

DURAND J.H. (1973) - Utilisation des eaux salines pour l'irrigation. *Bulletin Technique d'Information (B.T.I)*, 276, pp. 39-58.

DUROV S.A. (1948) - Natural Waters and Graphic Representation of Their Composition. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 59, pp. 87-90.

E

- EATON F.M. (1950) - Significance of carbonates in irrigated water. *Soil Sciences*, 69, pp. 127-128.
- EDWARDS D.C. & MCKEE T.B. (1997) - Characteristics of 20th Century Drought in the United States at Multiple Time Scales. *Climatology Report Number*, 97 (2). Colorado State University, Fort Collins, 155 p.
- EL JANAYANI S. (2013) - Incidence des bétoires et de la karstogenèse des plateaux crayeux de la Haute-Normandie sur le fonctionnement hydrologique de l'aquifère de la craie Modélisation hydrogéologique des influences climatiques à différentes échelles spatio-temporelles. *Thèse de Doctorat*. Université de Rouen-UFR des Sciences et Techniques, 216 p.
- ELMI S. (1970) - Rôle des accidents décrochant de direction SSW-NNE dans la structure des Monts de Tlemcen (Ouest algérien). *Bulletin de la Société d'histoire naturelle d'Afrique du Nord*, t. 61, 3-4, pp. 3-8.
- EVANGELOU V.P. (1998) - Environmental soil and water chemistry: Principles and applications. *Wiley*, 592 p.
- EVERITT B.S., LANDAU S., LEESE M. & STAHL D. (2011) - Cluster Analysis, 5th ed. *John Wiley & Sons, Ltd.*, West Sussex, PO19 8SQ, United Kingdom, 330 p.

F

- FARNHAM I.M., STETZENBACH K.J., SINGH A.K. & JOHANNESSON K.H. (2000) - Deciphering Groundwater Flow Systems in Oasis Valley, Nevada, Using Trace Element Chemistry, Multivariate Statistics, and Geographical Information System. *Mathematical Geology*, 32, pp. 943-968.
- FEDKIW J. (1991) - Nitrate occurrence in U.S. waters and related questions: A referenced summary of published sources from an agricultural perspective. Washington, *District of Columbia*, U.S. Department of Agriculture, 35 p.
- FENET B. (1975) - Recherche sur l'alpinisation de la bordure septentrionale du bouclier africain à partir de l'étude d'un élément de l'orogène nord-maghrébin, les monts du Djebel Tessala et les massifs du littoral oranais. *Thèse de Doctorat d'Etat*, Université de Nice, 301 p.
- FENG F., JIA Y., YANG Y., HUAN H., LIAN X., XU X., XIA F., HAN X. & JIANG Y. (2020) - Hydrogeochemical and statistical analysis of high fluoride groundwater in northern China. *Environmental Science and Pollution Research (ESPR)*, 27, pp. 34840-34861.
- FERNÁNDEZ N., RAMIREZ A. & SOLANO F. (2004) - Physico-chemical water quality indices- a comparative review. *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 1, (4), pp. 19-30.
- FEWTRELL L. (2004) - Drinking-water nitrate, methemoglobinemia, and global burden of disease: A discussion. *Environmental Health Perspectives*, 112, pp. 1371-1374.
- FISHER R. S. & MULLICAN W.F. (1997) - Hydrochemical evolution of sodium-sulfate and sodium-chloride groundwater beneath the northern Chihuahuan Desert, Trans-Pecos, Texas, USA. *Hydrogeology Journal*, 5 (2), pp. 4-16.
- FOSTER S.S.D. (1987) - Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. *Vulnerability of Soil and Groundwater Pollutants*, TNO Committee on hydrological Research Information, The Hague, 38, pp.69-86.
- FREEZE R.A. & CHERRY J.A. (1979) - Groundwater. *Prentice-Hall*, Englewood Cliffs, New Jersey, USA. 604 p.

G

GAILLARDET J., DUPRÉ B., LOUVAT P. & ALLÈGRE C.J. (1999) - Global silicate weathering and CO₂ consumption rates deduced from the chemistry of large rivers. *Chemical Geology*, 159, pp. 3-30.

GALLARDO A.H. & TASE N. (2007) - Hydrogeology and geochemical characterization of groundwater in a typical small-scale agricultural area of Japan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 29, pp. 18-28. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2005.12.005>.

GENTIL L. (1902) - Esquisse stratigraphique et pétrographique du bassin de la Tafna (Algérie). (Eds.) *Adolphe Jordan*, 275 p.

GIBBS R.J. (1970) - Mechanism controlling world water chemistry. *Sciences*, 170, pp. 795-840.

GOLDSCHIEDER N., KLUTE M., STURM S. & HÖTZL H. (2000) - The PI method: a GIS based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers. *Zeitschrift für Angewandte Geologie, Band*, 46, pp. 157- 166.

GRAVELIUS H. (1914) - Grundrifi der gesamten Gewcisserkunde. *Band I: Flufikunde. Compendium of Hydrology*, Vol. I. Rivers, pp. 265-278.

GUARDIA P. (1975) - Géodynamique de la marge alpine du continent africain d'après l'étude de l'Oranie nord-occidentale. *Thèse de Doctorat d'Etat*, Université de Nice, 289 p.

GÜLER C., KURT M.A., ALPASLAN M. & AKBULUT C. (2012) - Assessment of the impact of anthropogenic activities on the groundwater hydrology and chemistry in Tarsus coastal plain (Mersin, SE Turkey) using fuzzy clustering, multivariate statistics and GIS techniques. *Journal of Hydrology*, Vol. 414-415, pp.435–451.

H

HADJI F. (2020) - Les marnes Miocènes de l'Oranie : Caractérisation minéralogique et géochimique. *Thèse de Doctorat*, Université de Tlemcen, 186 p.

HADJI F., GUASMI I. & DJABRI L. (2013) - Suitability of Surface Water from Mouillah Wadi of Algeria for Irrigation Purposes. In : Soil Salinity Assessment and Reclamation. Shabbir AS, Mahmoud AA, Faisal KT (Ed.), Springer, pp. 723-735.

HALLAIRE M. (1961) - Circulation de l'eau dans le sol sous l'effet de l'évapotranspiration. In: *L'hydraulique souterraine*. Compte rendu des sixièmes journées de l'hydraulique, Nancy, 28-30 juin 1960. Tome 1, pp. 162-168.

HALLOUCHE B., HADJI F., MAROK A. & BENAABIDATE L. (2017) - Spatial mapping of irrigation groundwater quality of the High Mekerra watershed (Northern Algeria). *Arabian Journal of Geosciences*, 10, 233. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3019-8>.

HAMDAN A., DAWOOD A. & NAEEM D. (2018) - Assessment study of water quality index (WQI) for Shatt Al-arab River and its branches, Iraq. *MATEC Web Conference*, 162, pp. 1-7.

HAMERLINCK J.D. & ARNESON C.S. (1998) - Wyoming Ground Water Vulnerability Assessment Handbook, Volume 2: Assessing Ground Water Vulnerability to Pesticides. *Spatial Data and Visualization Center Publication*, SDVC, Report 98-01-2,

HAMLAT A., GUIDOUM A. & KOULALA I. (2017) - Status and trends of water quality in the Tafna catchment: a comparative study using water quality indices. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 7 (2), pp. 228-245. <https://doi.org/10.2166/wrd.2016.155>

HAMLAT A. & GUIDOUM A. (2018) - Assessment of groundwater quality in a semiarid region of Northwestern Algeria using water quality index (WQI). *Applied Water Science*, 8 (220), <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0863-y>.

HAMMER M.J. (1986) - Water and waste water technology. *John Wiley*, New York, 550 p.

HAMZA M.H., ADDED A., FRANCES A. & RODRÍGUEZ R. (2007) - Validité de l'application des méthodes de vulnérabilité DRASTIC, SINTACS et SI à l'étude de la pollution par les nitrates dans la nappe phréatique de Metline-Ras Jebel-Raf Raf (Nord-Est tunisien). *Comptes Rendus Geoscience* (339), pp. 493-505.

HAN G. & LIU C.Q. (2004) - Water geochemistry controlled by carbonate dissolution: a study of the river waters draining karst-dominated terrain, Guizhou Province, China. *Chemical Geology* 204, pp.1-21.

HAYANE S.M. (1983) - Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du bassin versant de l'oued sikkak (Région de Tlemcen). *Thèse de Doctorat 3^{ème} cycle*. Université d'Oran, 215 p.

HILL M. (1996) - Nitrates and nitrites in food and water. *Woodhead Publishing Limited*, Cambridge, 196 p.

HIRSCH F. (1962) - l'Analyse morphométrique des réseaux fluviaux - Application à la prévision des débits des cours d'eau. *Revue de Géomorphologie dynamique*, 3, pp. 97-106.

HOCINE F., BELHADJ-AISSA M., HADDOUD F., OUARZEDDINE M. & BELHADJ-AISSA A. (2008) - Simulation du comportement des écoulements d'eau en utilisant le réseau hydrologique d'un bassin versant : cas de l'oued Benimessous, Algérie. *Téledétection* (8), Ed., *Archives Contemporaines / Gordon and Breach Scientific Publishers*, 8 (3), pp. 179-191.

HÖLTING B., HAERTLE T., HOHBERGER K.H., NACHTIGALL K.H., VILLINGER E., WEINZIERL W. & WROBEL J.P. (1995) - Konzept zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung. *Geologisches Jahrbuch*, C63, pp. 5-24.

HORTON R.K. (1965) - An index number system for rating water quality. *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 37 (3), pp. 300-305.

HUANG G., SUN J., ZHANG Y., CHEN Z. & LIU F. (2013) - Impact of anthropogenic and natural processes on the evolution of groundwater chemistry in a rapidly urbanized coastal area, South China. *Science of The Total Environment*, Vol, 463-464, pp. 209-221.

HUSSAIN G., ALQUWAIZANY A. & AL-ZARAH A. (2010) - Guidelines for Irrigation Water Quality and Water Management in The Kingdom of Saudi Arabia: An Overview. *Journal of Applied Sciences*, 10, pp. 79-96.

I

ISLAM M.A., RAHMAN M.M., BODRUD-DOZA M., MUHIB M.I., SHAMMI M., ZAHID A., AKTER Y. & KURASAKI M. (2018) - A study of groundwater irrigation water quality in south-central Bangladesh: a geo-statistical model approach using GIS and multivariate statistics. *Acta Geochimica*, 37, pp. 193-214.

J

JALALI M. (2009) - Geochemistry characterization of groundwater in an agricultural area of Razan, Hamadan, Iran. *Environmental Geology*, 56, pp. 1479-1488.

JALALI M. (2011) - Hydrogeochemistry of Groundwater and Its Suitability for Drinking and Agricultural Use in Nahavand, Western Iran. *Natural Resources Research*, 20, pp.65-73.

JAVADI S., KAVEHKAR N., MOUSAVIZADEH M.H. & MOHAMMADI K. (2011) - Modification of DRASTIC model to map groundwater vulnerability to pollution using nitrate measurements in agricultural areas. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 13, pp. 239-249.

JIMENEZ-MADRID A., CARRASCO F., MARTINEZ C. & GOGU R.C. (2013)- DRISTPI, a new groundwater vulnerability mapping method for use in karstic and non-karstic aquifers. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology (QJEGH)*, 46, pp. 245-255.

JOLLIFFE I.T. (2002) - Principal component analysis. *Springer*, New York City, 271 p.

Journal Officiel de la République Algérienne (J.O.R.A.) (2011)-. Décret exécutif n° 11-125 du 22 mars 2011 relatif à la qualité de l'eau de consommation humaine.

K

KACHROUD M., TROLARD F., KEFI M., JEBARI S. & BOURRIÉ G. (2019) - Water Quality Indices: Challenges and Application Limits in the Literature. *Water*, 11, 361 p.

KARAKUŞ C.B. (2020) - Evaluation of water quality of Kızılırmak River (Sivas/Turkey) using geo-statistical and multivariable statistical approaches. *Environment, Development and Sustainability*, 22, pp. 4735-4769.

KAUFMAN L. (1990) - Finding groups in data: an introduction to cluster analysis. *Wiley*, New York City, 335 p.

KAZAKIS N. & VOUDOURIS K.S. (2015) - Groundwater vulnerability and pollution risk assessment of porous aquifers to nitrate: Modifying the DRASTIC method using quantitative parameters. *Journal of Hydrology*, 525, pp. 13-25.

KELLEY W.P. (1963) - Use of Saline Irrigation Water. *Soil Science*, 95, pp. 385-391.

KHAN S., GABRIEL H.F. & RANAT. (2008) - Standard precipitation index to track drought and assess impact of rainfall on watertables in irrigation areas. *Irrigation and Drainage Systems*, 22, pp. 159-177.

KOUTSI R., STOURNARAS G. (2011) - Groundwater vulnerability assessment in the Loussi polje area. the PRESK method. In: *Lambrakis N., Stournaras G. & Katsanou K., (eds) Advances in the Research of Aquatic Environment. Environmental Earth Sciences. Springer, Berlin, Heidelberg*, pp. 335-342. https://doi.org/10.1007/978-3-642-24076-8_39.

KRAIEM Z., ZOUARI K., CHKIR N. & AGOUNE A. (2014) - Geochemical characteristics of arid shallow aquifers in ChottDjerid, south-western Tunisia. *Journal of Hydro-environment Research*, 8, pp. 460-473.

KRIMGOLD D.B. (1963) - Quantitative geomorphology in Soil and Water. Conservation Research. *U. S. Dep. Agriculture*, 380 p.

KUISI M.A., EL-NAQA A. & HAMMOURI N. (2006) - Vulnerability mapping of shallow groundwater aquifer using SINTACS model in the Jordan Valley area, Jordan. *Environmental Geology*, 50, pp. 645-650.

KUMAR S., THIRUMALAIIVASAN D., RADHAKRISHNAN N. & MATHEW S. (2013) - Groundwater vulnerability assessment using SINTACS model. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 4, pp. 339-354.

L

LANGGUTH H.R. (1966) - Groundwater verhältnisse in Bereich Des Velberter Sattels. *Der Minister Für Ernährung, Land Wirtsch Forste Duesseldorf*, 127 p.

LEOPOLD L. B. & MILLER J. P. (1956) - Ephemeral streams: Hydraulic factors and their relation to the drainage net (vol. 282). *US Government Printing Office*, 37 p.

LEPOM P., BROWN B., HANKE G., LOOS R., QUEVAUVILLER P. & WOLLGAST J. (2009) - Review Needs for reliable analytical methods for monitoring chemical pollutants in surface water under the European Water Framework Directive. *Journal of Chromatography A*, 1216, pp. 302-315.

LEVERLY F.B. & VAN DER GOOT H.A. (1955) - Development of a fresh-water barrier in southern California for the prevention of sea-water intrusion. *Journal American Water Works Association*, 47 (9), pp. 886-908.

LI P., QIAN H., WU J., ZHANG Y. & ZHANG H. (2013) - Major Ion Chemistry of Shallow Groundwater in the Dongsheng Coalfield, Ordos Basin, China. *Mine Water and Environment*, 32, pp. 195-206.

LI P., TIAN R., LIU R. (2019) - Solute geochemistry and multivariate analysis of water quality in the Guohua phosphorite mine, Guizhou Province, China. *Exposure and Health*, 11, pp. 81-94.

LI P., WU J., QIAN H., LYU X. & LIU H. (2014) - Origin and assessment of groundwater pollution and associated health risk: a case study in an industrial park, northwest China. *Environmental Geochemistry and Health*, 36 (4), pp. 693-712.

LI X., TANG C., CAO Y. & LI D. (2020) - A multiple isotope (H, O, N, C and S) approach to elucidate the hydrochemical evolution of shallow groundwater in a rapidly urbanized area of the Pearl River Delta, China. *Science of the Total Environment*, 724, 137930. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137930.

LI Z., YANG Q., YANG Y., MA H., WANG H., LUO J., BIAN J. & MARTIN J.D. (2019) - Isotopic and geochemical interpretation of groundwater under the influences of anthropogenic activities. *Journal of Hydrology*, Vol, 576, pp. 685-697. doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.06.037.

LIN C.Y., ABDULLAH M.H., PRAVEENA S.M., YAHAYA A.H.B. & MUSTA B. (2012) - Delineation of temporal variability and governing factors influencing the spatial variability of shallow groundwater chemistry in a tropical sedimentary island. *Journal of Hydrology*, Vol, 432-433, pp. 26-42.

LIU J. & DIAMOND J. (2005) - China's environment in a globalizing world. *Nature*, 435, pp.1179-1186.

LIU J., WANG H., JIN D., XU F. & ZHAO C. (2020) - Hydrochemical characteristics and evolution processes of karst groundwater in Carboniferous Taiyuan formation in the Pingdingshan coalfield. *Environmental Earth Sciences*, 79, 151. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-8898-4>.

LLAMAS J. (1993) - Hydrologie générale. Principes et Applications, 2^{ème} Edition, Morin (Ed.), 527 p.

LLOYD J.W. & HEATHCOAT J.A. (1985) - Natural inorganic hydrochemistry in relation to groundwater: an introduction. *Oxford University Press*, New York, 296 p.

LOHUMI N., GOSAIN S., JAIN A., GUPTA V.K. & VERMA K.K. (2004) - Determination of nitrate in environmental water samples by conversion into nitrophenols and solid phase extraction spectrophotometry, liquid chromatography or gas chromatography–mass spectrometry, *Analytica Chimica Acta*, 505, pp. 231–237.

LUMB A., HALLIWELL D. & SHARMA T. (2002) - Canadian water quality index to monitor the changes in water quality in the Mackenzie river-Great Bear". *Proceedings of the 29th Annual Aquatic Toxicity Workshop*, Whistler, B.C., Canada, pp.106-107.

M

MACHIWAL D. & JHA M.K. (2015) - Identifying sources of groundwater contamination in a hard-rock aquifer system using multivariate statistical analyses and GIS-based geostatistical modeling techniques. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 4, Part A, pp. 80-110.

MADISON R.J. & BRUNETT J.O. (1985) - Overview of the occurrence of nitrate in groundwater of the United States, National Water Summary 1984 Hydrologic Events, Selected Water-Quality Trends, and Ground-Water Resources. U.S. *Geological Survey Water-Supply Paper*, 2275, pp. 93-105.

MALAMOS N. & KOUTSOYIANNIS D. (2018) - Field survey and modelling of irrigation water quality indices in a Mediterranean island catchment: a comparison between spatial interpolation methods. *Hydrological Sciences Journal*, 63 (10), pp. 1447-1467.

MARANDI A. & SHAND P. (2018) - Groundwater chemistry and the Gibbs Diagram. *Applied Geochemistry*, 97, pp. 209-212.

MAROK A. (1996) - Stratigraphie, sédimentologie et interprétations géodynamiques du Lias-début du Dogger : Exemple de sédimentation carbonatée de plate-forme en Oranie (Monts de Sidi el Abed, Hautes Plaines, Algérie occidentale). *Documents des Laboratoires de Géologie de Lyon*, 141, 199 p.

MAROK A. (2021) - Patrimoine Géologique et Géoarchéologique tlemcenien : Intérêt scientifique et visée socio-économique. *Edition Konouz*, 279 p.

MASSART D. L. & KAUFMAN L. (1983) - The interpretation of analytical chemical data by the use of cluster analysis. New York: *Wiley*, 237 p.

MATTHESS G. (1982)- The properties of groundwater. Department of Environmental Science, *John Wiley and Sons* , New York, 406 p.

MCKEE T.B., DOESKEN N.J. & KLEIST J. (1993) - The relationship of drought frequency and duration to time scale. *In: Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology*, Anaheim, California. *Boston, American Meteorological Society*, pp.179-184.

MEBARKI A. (2010) - La région du Maghreb face à la rareté de l'eau. L'exemple du défi algérien : mobilisation et gestion durable des ressources. ICID+18, 2nd *International Conference « Climate, Sustainability and Development in semi-arid regions»*, Fortaleza - Ceará, Brazil.

MEIRELES A.C.M., ANDRADE E.M., CHAVES L.C.G., FRISCHKORN H. & CRISOSTOMO L.A. (2010) - A new proposal of the classification of irrigation water. *Revista Ciência Agronômica*, 41, pp. 349-357.

MENCIO' A. & MAS-PLA J. (2008) - Assessment by multivariate analysis of groundwater-surface water interactions in urbanized Mediterranean streams. *Journal of Hydrologie*, 352, pp. 355-366.

MENGIS M., SCHIFF SF., HARRIS M., ENGLISH MC., ARAVENA R., ELGOOD R.J. & MACLEAN A. (1999) Multiple geochemical and isotopic approaches for assessing ground water NO₃-elimination in a riparian zone. *Ground Water*, 37, pp. 448-457.

MERKEL B., PLANER-FRIEDRICH B. & NORDSTROM D. (2008) - Groundwater Geochemistry: A Practical Guide to Modeling of Natural and Contaminated Aquatic Systems. *Groundwater Geochemistry. Ed., D.K. Nordstrom, Springer*, 200 p.

MESSIER K.P., WHEELER D.C., FLORY A.R., JONES R.R., PATEL D., NOLAN B.T. & WARD M.H. (2019) - Modelling groundwater nitrate exposure in private wells of North Carolina for the agricultural health study. *Science of the Total Environment journal*, 655, pp. 512-519.

MGBENU C.N. & EGBUERI J.C. (2019) - The hydrogeochemical signatures, quality indices and health risk assessment of water resources in Umunya district, southeast Nigeria. *Applied Water Science*, 9 (22). <https://doi.org/10.1007/s13201-019-0900-5>.

MILLER W.W., JOUNG H.M., MAHANNAH C.N. & GARRET J.R. (1986) - Identification of water quality differences in Nevada through index application. *Journal of Environmental Quality*, 15, pp. 265-272.

MODARRES R. (2007) - Streamflow drought time series forecasting. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 21, pp.223-233.

MUELLER D.K. & HELSEL D.R. (1996) - Nutrients in the Nation's Waters--Too Much of a Good Thing? *Report, USGS Numbered Series, Circular, 1136. Geological Survey (U.S.)*, 24 p.

MUSY A. (2001) - Cours polycopié d'hydrologie générale, 2^{ème} année : Enseignement à distance, EPFL, Lausanne, Suisse. <https://echo2.epfl.ch/e-drologie>.

N

NARSIMHA A., LI P. & VENKATAYOGI S. (2018) - Hydrogeochemical evaluation of groundwater quality for drinking and irrigation purposes and integrated interpretation with water quality index studies. *Environmental Processes*, 5 (2), pp. 363-383.

NEMČIĆ-JUREC J. & JAZBEC A. (2017) - Point source pollution and variability of nitrate concentrations in water from shallow aquifers. *Applied Water Science*, 7, pp.1337-1348. <https://doi.org/10.1007/s13201-015-0369-9>.

NIKBAKHT M. (2004) - The Effect Assessment of Ahvaz N^o.1,2 Water Treatment Plant on Karoon Water Quality. *Thesis (M.Sc)*, Ahvaz: IA University, 111 p.

NIU C.C., WANG Q., WEN X.Y., GUO Y., ZHAGN P.L., ZHU R.Y. & HE X.H. (2011) - Application of principal component analysis to evaluation of black soil degradation in Jilin. *Journal of Global Geology Global*, 14 (1), pp. 54-58.

NOWAK B. (1998) - Contents and relationship of elements in human hair for a non-industrialised population in Poland. *Science of the Total Environment*, 209, pp. 59-68.

NUSRET D. & ĐUG S. (2012) - Application of the Inverse Distance Weighting and Kriging Methods of the Spatial Interpolation on the Mapping the Annual Amount of Precipitation in Bosnia and Herzegovina. *International Environmental Modelling and Software Society (IEMSS)*, Leipzig, Germany.

O

O.M.S. (Organisation Mondiale de la Santé) (2017) -. Directives de qualité pour l'eau de boisson : 4e éd. Intégrant le premier additif [Guidelines for drinking-water quality: 4th Ed. Incorporating first addendum, 539 p.

P

PANNALA A.S., MANI A.R., SPENCER J.P.E., SKINNER V., BRUCKDORFER K.R., MOORE K.P. & RICEEVANS C.A. (2003) - The effect of dietary nitrate on salivary, plasma, and urinary nitrate metabolism in humans. *Free radical biology and medicine*, 34, pp. 576-584.

PANNO S.V., KELLY W.R., MARTINSEK A.T. & HACKLEY K.C. (2006) - Estimating background and threshold nitrate concentrations using probability graphs. *Ground Water*, 44 (5), pp. 697-709.

PARKHURST D.L. (1995) - User's guide to PHREEQC - A computer program for speciation, reaction-path, advective-transport, and inverse geochemical calculations. *U S Geol. Survey Water Resources Investigations Report*, 95-4227, 143 p.

PARKHURST D.L. & APPELO C.A.J. (1999) - User's guide to PHREEQC (Version 2)- a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. *U S Geological Survey Water-Resources Investigations Report*, 99-4259, 312 p.

PARKHURST D.L., PLUMMER L.N. & THORSTENSON D.C. (1980) - PHREEQE - A computer program for geochemical calculations. *Rev.U S Geol.Survey Water Resources Investigations Report*, 80-96, 280 p.

PATEL P., RAJU N.J., REDDY B.C.S.R., SURESH U., GOSSEL W. & WYCISK P. (2016) - Geochemical processes and multivariate statistical analysis for the assessment of groundwater quality in the Swarnamukhi River basin, Andhra Pradesh, India. *Environmental Earth Sciences*, 75: 611. [https:// doi.org/10.1007/s12665-015-5108-x](https://doi.org/10.1007/s12665-015-5108-x).

PEDELABORDE P. (1968) - Les bilans hydriques. *Cahiers de géographie du Québec*, 12 (25), pp. 5-23.

PERRODON A. (1957) - Etude géologique des bassins néogènes sublittoraux de l'Algérie occidentale. *Bulletin du Service de la Carte géologique d'Algérie*, 12, 328 p.

PIPER A.M. (1944) - A graphical interpretation of water-analysis. *Transactions of the American Geophysical Union*, 25, pp. 914-928.

PRATI L., PAVANELLO R. & PESARIN F. (1971) - Assessment of surface water quality by a single index of pollution. *Water Ressources*, 5, pp. 741-751.

PROBST J.I. & TARDY Y. (1985) - Fluctuations hydroclimatiques du bassin d'Aquitaine au cours des 70 dernières années, *Revue de géographie physique et de géologie dynamique*, 26 (1), pp. 59-76.

Q

QGIS-User guide (2020) – version 3.4, QGIS project, 641p. <https://www.qgis.org/fr/docs/>.

R

RAHMAN M., BODRUD-DOZA M., MUHIB M.I., HOSSAIN K.F.B., HOSSAIN M.S., AKTER S., SIKDER M.T., SHAMMI M. & UDDIN M.K. (2019) - Human Health Risk Assessment of Nitrate and Trace Metals Via Groundwater in Central Bangladesh (preprint). *Earth Sciences*. <https://doi.org/10.20944/preprints201901.0075.v1>

RAMAKRISHNAIAH C.R., SADASHIVAIAH C. & RANGANNA G. (2009) - Assessment of water quality index for the groundwater in Tumkur Taluk, Karnataka State, India. *Journal of Chemistry*, 6 (2), pp. 523-530.

RAMYAPRIYA R. & ELANGO L. (2018) - Evaluation of geogenic and anthropogenic impacts on spatio-temporal variation in quality of surface water and groundwater along Cauvery River, India. *Environmental Earth Sciences* 77:2. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7176-6>.

RAO C.S., RAO B.S., HARIHARAN A.V.L.N.S.H. & BHARATHI N.M. (2010) - Determination of water quality index of some areas in Guntur district Andhra Pradesh". *International Journal of Applied Biology and Pharmaceutical Technology*, I (1), pp 79-86.

RAVIKUMAR P., SOMASHEKAR R.K. & PRAKASH KI. (2015) - A comparative study on usage of Durov and Piper diagrams to interpret hydrochemical processes in groundwater from SRLIS river basin, Karnataka, India. *Elixir Earth Sciences Journal*, 80, pp. 31073-31077.

RAWLS W.J. & BRAKENSIEK D.L. (1982) - Estimating Soil Water Retention from Soil Properties. *Journal of Irrigation and Drainage, ASCE*, Vol, 108, IR2, pp. 166-171.

RE V., SACCHI E., KAMMOUN S., TRINGALI C., TRABELSI R., ZOUARI K. & DANIELE S. (2017) - Integrated socio-hydrogeological approach to tackle nitrate contamination in groundwater resources. The case of Grombalia Basin (Tunisia). *Science of the Total Environment*, 593, pp. 664-676.

REZAEI M., NIKBAKHT M. & SHAKERI A. (2017) - Geochemistry and sources of fluoride and nitrate contamination of groundwater in Lar area, south Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, pp.15471-15487.

RICHARDS L. (1954) - Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Handbook, 60. *US Department of Agriculture, Washington, DC*, 160 p.

RIDDER W.E. & OEHME F.W. (1974) - Nitrates as an environmental, animal, and human hazard. *Clinical Toxicology*, 2, pp.145-159.

RIEHL H. (1979) - Climate and weather in the tropics. *Academic Press*, London, New York, San Francisco, 611 p.

ROCHE M. (1963) - (Hydrologie de surface » O.R.S.T.O.M. et *Gauthier-Villars Ed.*, Paris, 431 p.

RODIER J., LEGUBE B., MERLET R. & BRUNET R. (2009) - L'analyse de l'eau. 9^{ème} Ed., *Dunod*, Paris. 1526 p.

ROUESSAC F. (1992) - Analyse chimique. In : Généralités sur la méthode. *Ed., Masson*, pp. 55-69.

RUFINO F., BUSICO G., CUOCO E. DARRAH T. H. & TEDESCO D. (2019) - Evaluating the suitability of urban groundwater resources for drinking water and irrigation purposes: an integrated approach in the Agro-Aversano area of Southern Italy. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191,768. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7978-y>.

S

SADAT-NOORI S.M., EBRAHIMI K. & LIAGHAT A.M. (2014) - Groundwater quality assessment using the water quality index and GIS in Saveh-Nobaran aquifer, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 71, pp. 3827–3843.

SAHOO P.K., KIM K. & POWELL M.A. (2016) - Managing Groundwater Nitrate Contamination from Livestock Farms: Implication for Nitrate Management Guidelines. *Current Pollution Reports 2- Water Pollution*, pp.178-187.

SAHU P. & SIKDAR P.K. (2008) - Hydrochemical framework of the aquifer in and around East Kolkata wetlands, West Bengal, India. *Environmental Geology*, 55, pp. 823-835.

SAKRAM G. & ADIMALLA N. (2018) - Hydrogeochemical characterization and assessment of water suitability for drinking and irrigation in crystalline rocks of Mothkur region, Telangana, South India. *Applied Water Science Journal*, 8, 143. <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0787-6>.

SAPORTA G. (2006) - Probabilités, analyse des données et statistique, *Ed., Technip*, Paris, 622 p.

SAWYER C.N., MACARTHY P.L. & PARKIN G.F. (2003) - Chemistry for environmental engineering and science. *McGraw-Hill, New York 5 Ed.*, 752 p.

SCHAUG J., RAMBÆK J.P., STEINNES E. & HENRY R.C. (1990) - Multivariate analysis of trace element data from moss samples used to monitor atmospheric deposition. *Atmospheric Environment. Part A. G Topics*, 24A (10), pp. 2625-2631

SCHOELLER H. (1965) - Qualitative evaluation of groundwater resources. Methods and techniques of groundwater investigation and development. *Water Rese Series*,-33, UNESCO, Delft, pp. 54-83.

SCHOELLER H. (1977) - Geochemistry of groundwater. In: Groundwater studies-an international guide for research and practice, supplement no. 3 to groundwater studies. *UNESCO Technical Papers Hydrology*, 7, UNESCO, Paris, chap. 15, pp 1-18.

SCHUMM S. (1963) - Sinuosity of Alluvial Rivers on the Great Plains. *Geological Society of America Bulletin*, 74, pp. 1089-1100.

ŞENER Ş., ŞENER E. & DAVRAZ A. (2017) - Evaluation of water quality using water quality index (WQI) method and GIS in Aksu River (SW-Turkey). *Science of the Total Environment*, 584, pp. 131-144.

SIMEONOV V., STRATIS J. A., SAMARA C., ZACHARIADIS G., VOUTSA D., ANTHEMIDIS A., SOFONIOU M. & KOUIMTZIS T. (2003)- Assessment of the surface water quality in Northern Greece. *Water Research*, 37, pp. 4119-4124.

SIMSEK C. & GUNDUZ O. (2007) - IWQ Index: A GIS-Integrated Technique to Assess Irrigation Water Quality. *Environmental Monitoring and Assessment*, 128, pp. 277-300.

SINGH C.K., SHASHTRI S. & MUKHERJEE S. (2011) - Integrating multivariate statistical analysis with GIS for geochemical assessment of groundwater quality in Shiwaliks of Punjab, India. *Environmental Earth Sciences*, 62, 1387-1405.

SOLTAN M.E. (1998) - Characterization, classification, and evaluation of some groundwater samples in upper Egypt. *Chemosphere*, 37, pp. 735-745.

STIGTER T.Y., RIBEIRO L. & DILL A.M.M.C. (2006) - Evaluation of an intrinsic and a specific vulnerability assessment method in comparison with groundwater salinisation and nitrate contamination levels in two agricultural regions in the south of Portugal. *Hydrogeology Journal*, 14, pp. 79-99.

STRAHLER A. (1957) - Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology. *Transactions, American Geophysical Union*, 38, pp. 913-920.

SU X., WANG H. & ZHANG Y. (2013) - Health risk assessment of nitrate contamination in groundwater: a case study of an agricultural area in Northeast China. *Water Resources Management*, 27 (8), pp.3025-3034.

SUBBA RAO N., SRIHARI CH., DEEPTHI SPANDANA B., SRAVANTHI M., KAMALESH T. & ABRAHAM JAYADEEP V. (2019) - Comprehensive understanding of groundwater quality and hydrogeochemistry for the sustainable development of suburban area of Visakhapatnam, Andhra Pradesh, India. Human and Ecological Risk Assessment: *An International Journal*, 25, pp. 52-80.

SUTADIAN A.D., MUTTIL N., YILMAZ A.G. & PERERA B.J.C. (2015) - Development of river water quality indices-A review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188, 58. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-5050-0>

SVOBODOVA Z., LLOYD R. & VYKUSOVA J.M.B. (1993) - Water quality and fish health. *EIFAC Technical Paper n°54, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)*, 67 p.

SZABOLCS I., DARAB C. (1964) - "The influence of irrigation water of high sodium carbonate content of soils. *Proceedings of 8th international congress of ISSS, Trans*, pp. 803-812.

T

TALEB A., BELAIDI N. & GAGNEUR J. (2004) - Water Quality before and after AAM building on a heavily polluted river in semi-arid Algeria. *River Research and Applications*, 20, pp. 943-956.

TALEB A. (2004) - Etude du fonctionnement de l'écosystème oued. Rôle du milieu hyporhéique dans l'évolution de la qualité des eaux en aval du barrage de Hammam Boughrara sur la Tafna. *Thèse de Doctorat*. Université de Tlemcen, 104 p.

TARMOUL S. (2018) - Etude comparative de l'écoulement sur les bassins versants endoréiques du Hodna et des Hauts plateaux constantinois. Cas d'étude des oueds L'ham, Lougmane, Soubella et chemorah (Algérie orientale). *Thèse de Doctorat 3^{ème} cycle (L.M.D.)*, Université de Constantine 1, 251 p.

TEEGAVARAPU R.S.V. & CHANDRAMOULI V. (2005) - Improved weighting methods, deterministic and stochastic data-driven models for estimation of missing precipitation records. *Journal of Hydrology*, 312, pp. 191-206.

THOMAS H. (1985) - Géodynamique d'un bassin intramontagneux: Le bassin du Bas Chélif occidental durant le Mio-Plio-Quaternaire. *Thèse Doctorat d'Etat*, Université de Pau et Pays de l'Adour, France, 594 p.

THORNTHWAITE C.W. (1948) - An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38, pp. 55-94.

TODD D.K. (1980) - Groundwater Hydrology. Second edition. *Wiley, New York*. 552 p.

TODD D.K. & MAYS L.W. (2004) - Groundwater hydrology (3rd Ed.). *Wiley, New York*, 656 p.

TYAGI S., SHARMA B., SINGH P. & DOBHAL R. (2013)- Water quality assessment in terms of water quality index. *American Journal of Water Resources*, 1, pp. 34-38.

TZIRITIS E., PISINARAS V., PANAGOPOULOS A. & ARAMPATZIS G. (2020) - RIVA: a new proposed method for assessing intrinsic groundwater vulnerability. *Environmental Science and Pollution Research (ESPR)*, pp. 7043-7067.

V

VAN BEEK C.L., HEINEN M. & CLEVERING O.A. (2007) - Reduced nitrate concentrations in shallow ground water under a non-fertilised grass buffer strip. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 79, pp. 81-91.

VAN STEMPVOORT D., EWERT L. & WASSENAAR L. (1992) - AVI: a method for groundwater protection mapping in the Prairie Provinces of Canada. Regina, Saskatchewan: Prairie Provinces Water Board. 26 p.

VAROL S. & DAVRAZ A. (2015) - Evaluation of the groundwater quality with WQI (water quality Index) and Multivariate analysis: a case Study of the Tefenni Plain (Burdur/Turkey). *Environmental Earth Sciences*, 73, pp. 1725-44.

VÍAS J.M., ANDREO B., PERLES M.J., CARRASCO F., VADILLO I. & JIMÉNEZ P. (2002) - Preliminary proposal of a method for vulnerability mapping in carbonate aquifers. In: Carrasco F, Durán JJ, Andreo B (Ed.) *Karst and Environment. Patronato de la Cueva de Nerja*, Málaga, pp 75-83.

VIEUX B.E. (2001) - Distributed Hydrologic Modeling using GIS. *Water Science and Technology Library*. Springer - Science +Business Media, B.V., 295 p.

W

WANG L., DONG Y., XU Z. & QIAO X. (2017) - Hydrochemical and isotopic characteristics of groundwater in the northeastern Tennger Desert, northern China. *Hydrogeology Journal*, 25, pp. 2363-2375.

WANG L. & LIU H. (2006) - An Efficient Method for Identifying and Filling Surface. Depressions in Digital Elevation Models for Hydrologic Analysis and Modelling. *International Journal of Geographical Information Science*, 20, pp. 193-213.

WARD M.H., DEKOK T.M., LEVALLOIS P., BRENDER J., GULIS G., NOLAN B.T. & DERSLICE J.V. (2005) - Workgroup report: Drinking-water nitrate and health- Recent findings and research needs. *Environmental Health Perspectives*, 113, pp. 1607-1614.

WARD M.H., JONES R.R., BRENDER J.D., DE KOK T.M., WEYER P.J., NOLAN B.T., VILLANUEVA C.M., SIMONE G. & VAN BREDA S.G. (2018) - Drinking Water Nitrate and Human Health: An Updated Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15 (7), pp.15-57.

WHO (2003) - Chloride in drinking-water. Background document for preparation of WHO Guidelines for drinking-water quality. Geneva, World Health Organization (WHO/SDE/WSH/03.04/3), 9 p.

WILCOX L.V. (1948) - The Quality of Water for Irrigation Use. *Technical Bulletins*, 962, United States Department of Agriculture, Economic Research Service. 40 p.

WILCOX L.V. (1955) - Classification and use of the irrigation waters. *U.S. Department of Agriculture Circular*, 969, Washington, District of Columbia, 19 p.

WU C., WU X., QIAN C. & ZHU G. (2018) - Hydrogeochemistry and groundwater quality assessment of high fluoride levels in the Yanchi endorheic region, northwest China [J]. *Applied Geochemistry*, 98, pp. 404-417.

WU J. & SUN Z. (2016) - Evaluation of shallow groundwater contamination and associated human health risk in an alluvial plain impacted by agricultural and industrial activities, mid-west China. *Exposure and Health*, 8 (3), pp. 311-329.

Y

YEBDRI L., HADJI F., HAREK Y. & MAROK A. (2021) - Quality assessment of water used for human consumption and irrigation purpose in parts of Tafna watershed (NW Algeria). *Environmental Earth Sciences*, 80, 502. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09805-1>.

YIDANA S.M. (2010) - Groundwater classification using multivariate statistical methods: Southern Ghana. *Journal of African Earth Sciences*, 57 (5), pp. 455-469.

Z

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. *Thèse de Doctorat 3^{ème} cycle (L.M.D)*, Université de Tlemcen, 223 p.

ZOETEMAN B.C.J. (1980) - Sensory assessment of water quality. New York, NY, *Pergamon Press*, 147 p.

Liste des figures

Liste des figures

	P.
Figure 1	15
Figure 2	16
Figure 3	18
Figure 4	19
Figure 5	20
Figure 6	21
Figure 7	24
Figure 8	25
Figure 9	26
Figure 10	28
Figure 11	30
Figure 12	30
Figure 13a	32
Figure 13b	32
Figure 14	34
Figure 15	35
Figure 16	40
Figure 17	41
Figure 18	43
Figure 19	44
Figure 20	49
Figure 21	57
Figure 22	57
Figure 23	58
Figure 24	61
Figure 25	62
Figure 26	63
Figure 27	64
Figure 28	65
Figure 29	65
Figure 30	66
Figure 31	67
Figure 32	67

Figure 33	Précipitations inter-saisonniers aux stations météorologiques	68
Figure 34	Précipitations mensuelles aux stations météorologiques	68
Figure 35	Diagrammes ombrothermiques des stations météorologiques des sous-bassins étudiés	71
Figure 36	Diagramme d'Emberger des stations étudiées	72
Figure 37	Évolution des indices SPI, et PI à l'échelle annuelle et semestrielle de 1981/1982 à 2019/2020 au sous bassin de la haute Tafna	75
Figure 38	Évolution des indices SPI, et PI à l'échelle annuelle et semestrielle de 1982/1983 à 2019/2020 au sous bassin de Sikkak	76
Figure 39	Humidité relative interannuelle aux stations météorologiques	77
Figure 40	Humidité relative mensuelle aux stations météorologiques.....	77
Figure 41	Boîtes à moustache représentatives des vitesses des vents moyennes, minimales et moyennes aux stations étudiées	78
Figure 42	Abaque de Wundt modifié par Coutagne	83
Figure 43	Débites moyens interannuels aux stations hydrométriques	85
Figure 44	Débites moyens saisonniers aux stations hydrométriques	86
Figure 45	Débites moyens mensuels et intermensuels aux stations hydrométriques	87
Figure 46	Variations annuelles des écarts à la moyenne des débits aux niveaux des stations hydrométriques étudiées	88
Figure 47	Évolution de l'indice SSFI à l'échelle inter mensuelle	89
Figure 48	Carte géologique de Sebdu (Benest 1985 modifié)	91
Figure 49	Coupe géologique à travers le secteur de Sebdu (d'après BENEST, 1985, modifiée)	91
Figure 50	Quelques sources émergentes au fossé de Sebdu	92
Figure 51	Carte piézométrique de la nappe de Sebdu	92
Figure 52	Carte géologique de la plaine de Hennaya (d'après l'ANRH, 2002)	93
Figure 53	Coupe géologique de la plaine de Hennaya (d'après HAYANE, 1983, modifiée)	94
Figure 54	Carte piézométrique de la nappe de Hennaya	94
Figure 55	Formations conglomératiques de la plaine de Hennaya avec ses émergences ..	95
Figure 56	Analyse par box-plots	98
Figure 57	Variations spatiales des paramètres des eaux de l'Oued Tafna	102
Figure 58	Variation spatiale des paramètres des eaux de l'Oued Sikkak	102
Figure 59	Diagramme de Piper montrant l'abondance relative des cations et anions communs dans les échantillons d'eau souterraine	103
Figure 60	Diagramme de Durov	104
Figure 61	Diagramme de Chadha pour les eaux souterraines	105
Figure 62	Diagrammes ACP et CAH des variables des eaux souterraines de l'aquifère de Sebdu en saison humide	109
Figure 63	Diagrammes ACP et CAH des variables des eaux souterraines de l'aquifère de Sebdu en saison sèche	110
Figure 64	Projections des individus des eaux souterraines de l'aquifère de Sebdu sur les axes factoriels CP1-CP2	111
Figure 65	Dendrogrammes des classes hiérarchiques des individus des eaux souterraines de l'aquifère de Sebdu	111
Figure 66	Diagrammes ACP et CHA des variables des eaux souterraines de l'aquifère de Hennaya, en saison humide	113
Figure 67	Diagrammes ACP et CAH des variables des eaux souterraines de l'aquifère de Hennaya, en saison sèche	113
Figure 68	Projections des individus des eaux souterraines de l'aquifère de Hennaya, sur les axes factoriels CP1-CP2	114
Figure 69	Dendrogrammes des classes des individus des eaux souterraines de l'aquifère de Hennaya	115
Figure 70	Evolution des indices de saturation dans l'aquifère de Sebdu	116

Figure 71	Evolution des indices de saturation dans l'aquifère de Hennaya	116
Figure 72	Indices de Saturation	117
Figure 73	Diagrammes de Gibbs (1970) montrant les processus chimiques dominants ...	118
Figure 74	Corrélation entre: A: CAI-1 vs CAI-2, B.: $(Ca^{2+} + Mg^{2+}) - (SO_4^{2-} + HCO_3^-)$ vs $(Na^+ + K^+) - Cl$	120
Figure 75	les indices IEB et IMG	121
Figure 76	IEB vs IMG	121
Figure 77	Nuage de points entre : NO_3^- vs Depth (profondeur); NO_3^- vs TDS; NO_3^- vs HCO_3^- ; NO_3^- vs SO_4^{2-} ; Cl/NO_3^- vs TDS et NO_3^- vs pH; dans l'aquifère de Sebdou	123
Figure 78	Nuage de points entre: NO_3^- vs Depth (profondeur) ; NO_3^- vs TDS ; NO_3^- vs HCO_3^- ; NO_3^- vs SO_4^{2-} ; Cl/NO_3^- vs TDS et NO_3^- vs pH; dans l'aquifère de Hennaya	124
Figure 79	Variation de la conductivité électrique dans les eaux de surface	130
Figure 80	Variation spatiale de la conductivité électrique CE dans les eaux souterraines.	131
Figure 81	Variation du SAR dans les eaux de surface	134
Figure 82	Variation du SAR dans les eaux souterraines	134
Figure 83	Variation des chlorures dans les eaux de surface	135
Figure 84	Variation spatiale des Chlorures dans les eaux souterraines	136
Figure 85	Variation du pH dans les eaux de surface	137
Figure 86	Variation du pH dans les eaux souterraines	137
Figure 87	Variation des bicarbonates dans les eaux de surface	138
Figure 88	Variation bicarbonates dans les eaux souterraines	138
Figure 89	Variation des N- NO_3^- dans les eaux de surface	139
Figure 90	Variation spatiale de l'azote des Nitrates dans les eaux souterraines	140
Figure 91	Variation du TH dans les eaux de surface	141
Figure 92	Variation du TH dans les eaux souterraines	142
Figure 93	Variation de l'indice SSP % dans les eaux de surface	143
Figure 94	Variation spatiale de l'indice SSP (%) dans les eaux souterraines	144
Figure 95	Variation de l'indice MH dans les eaux de surface	145
Figure 96	Variation spatiale de l'indice MH dans les eaux souterraines	146
Figure 97	Variation de l'indice RSC dans les eaux de surface.....	147
Figure 98	Variation de l'indice RSC dans les eaux souterraines	147
Figure 99	Variation de PI (%) dans les eaux de surface	148
Figure 100	Variation de PI (%) dans les eaux souterraines	149
Figure 101	Variation de KR, dans les eaux de surface	150
Figure 102	Variation de KR, dans les eaux souterraines	150
Figure 103	Diagramme de Wilcox (1948)	151
Figure 104	Diagramme du U.S. Salinity Laboratory	153
Figure 105	Variation spatiale de l'indice DWQI dans les eaux souterraines	159
Figure 106	Spatialisation des indices IWQI dans les eaux de l'oued Tafna	167
Figure 107	Spatialisation des indices IWQI dans les eaux de l'oued Sikkak	167
Figure 108	Variation de l'indice IWQI-SIMSEK dans les eaux de l'aquifère de Sebdou ...	168
Figure 109	Variation de l'indice IWQI-SIMSEK dans les eaux de l'aquifère de Hennaya.	168
Figure 110	Variation spatiale de l'indice IWQI-MEIRELES dans les eaux souterraines....	169
Figure 111	Carte des vulnérabilités intrinsèques	174
Figure 112	Carte des vulnérabilités spécifiques	176
Figure 113	Répartition des classes SINTACS (SIVI & SSVI) comparées par rapport aux classes de nitrates	178

Liste des tableaux

Liste des tableaux

	P.
Tableau 1	Barrages édifiés dans le bassin versant de la Tafna (d'après MAROK, 2021).. 17
Tableau 2	Caractéristiques des stations météorologiques et hydrométriques des sous-bassins étudiés 28
Tableau 3	Localisation des points d'échantillonnage des eaux de surface 31
Tableau 4	Caractéristiques générales des points d'échantillonnage des eaux souterraines..... 32
Tableau 5	Classification des eaux selon le diagramme de Durov (d'après LLOYD & HEATHCOAT, 1985) 41
Tableau 6	Evaluation de la qualité de l'eau selon la méthode de l'indice de qualité WQI (d'après TYAGI & <i>al.</i> , 2013) 51
Tableau 7	Valeurs de classification (R) relatives à SINTACS pour les différents paramètres hydrogéologiques (d'après CIVITA & DE MAIO, 2004) 53
Tableau 8	Poids attribués aux paramètres SINTACS dans les différents scénarios de la méthode (d'après CIVITA & DE MAIO, 2004) 54
Tableau 9	Critères d'évaluation de la vulnérabilité de la méthode SINTACS (d'après CIVITA & De MAIO 1997) 54
Tableau 10	Évaluation de l'impact anthropique selon le modèle SINTACS (d'après CIVITA & DE MAIO, 2004; CIVITA, 2010) 55
Tableau 11	Récapitulatif de tous les paramètres morphométriques quantitatifs extraits grâce au modèle DEM sous SIG 60
Tableau 12	Paramètres descriptifs des spécificités physiques des sous bassins versants considérés 60
Tableau 13	Températures minimales, moyennes et maximales des stations étudiées 66
Tableau 14	Classification du climat (d'après DE MARTONNE, 1923) 69
Tableau 15	Valeurs d'indice d'aridité des stations météorologiques 69
Tableau 16	Valeurs de l'indice d'aridité mensuelle des stations météorologiques 70
Tableau 17	Quotients pluviothermiques des stations étudiées 71
Tableau 18	Classification de la sécheresse basée sur la valeur SPI (d'après McKEE & <i>al.</i> 1993; MODARRES, 2007) 73
Tableau 19	Vitesses des vents minimales, moyennes, maximales enregistrées aux stations étudiées 78
Tableau 20	ETP annuelles et mensuelles calculées pour les stations considérées..... 79
Tableau 21	Bilans hydrologiques calculés par la méthode de Thornthwaite 81
Tableau 22	Valeurs de l'évapotranspiration réelle selon Turc 82
Tableau 23	Valeurs de l'évapotranspiration réelle selon Coutagne 82
Tableau 24	Valeurs de ruissellement selon Tixeront- Berkaloff 83
Tableau 25	Valeurs d'infiltration aux sous bassins considérés 84
Tableau 26	Statistiques descriptives des données chimiques des eaux souterraines et de surface 99
Tableau 27	Matrice de corrélation entre paramètres physicochimiques des eaux de l'aquifère de Sebdou 107
Tableau 28	Matrice de corrélation entre paramètres physicochimiques des eaux de l'aquifère de Hennaya 107
Tableau 29	Chargements factoriels des valeurs propres extraits dans l'ACP 109

Tableau 30	Composition ionique de chaque classe (barycentre des classes individus)	111
Tableau 31	Chargements factoriels des valeurs propres extraites dans l'ACP	112
Tableau 32	Composition ionique de chaque classe (barycentre des classes individus)	115
Tableau 33	Standards pour la qualité de l'eau potable	127
Tableau 34	Directives pour l'interprétation de la qualité des eaux d'irrigation (d'après AYERS & WESTCOT, 1985)	129
Tableau 35	Classification des eaux selon le SAR et la conductivité selon les directives de la FAO	133
Tableau 36	Classification de la dureté de l'eau (d'après SAWYER & McCARTY, 2003).	141
Tableau 37	Limites admissibles pour les classes d'eau d'irrigation basées sur SSP (Na%) (d'après WILCOX, 1948; WILCOX, 1955)	142
Tableau 38	Classification de l'eau d'irrigation en fonction de RSC (d'après EATON, 1950)	147
Tableau 39	Classification de l'eau d'irrigation en fonction de PI (d'après DONEEN, 1964)	148
Tableau 40	Classification de l'eau d'irrigation en fonction de KR (d'après KELLY, 1963)	149
Tableau 41	Classification de l'USDA des eaux d'irrigation sur la base CE et TDS (d'après RICHARDS, 1954; WILCOX, 1955)	152
Tableau 42	Classifications de laboratoire de salinité de l'USDA pour l'eau d'irrigation basées sur les valeurs du SAR (d'après RICHARDS, 1954; WILCOX, 1955).	153
Tableau 43	Poids et poids relatifs attribués pour DWQI basés sur les standards du JORA (2011) et de l'OMS (2017)	157
Tableau 44	Classification de la qualité de l'eau basée sur les valeurs de DWQI	158
Tableau 45	Classification de la toxicité des éléments traces (d'après SIMSEK & GUNDUZ, 2007)	161
Tableau 46	Classification des paramètres de l'indice IWQ (d'après SIMSEK & GUNDUZ, 2007)	162
Tableau 47	Classification pour risque d'infiltration et de perméabilité (d'après SIMSEK & GUNDUZ, 2007)	162
Tableau 48	Classification des eaux d'irrigation selon d'indice IWQ de SIMSEK & GUNDUZ (2007)	163
Tableau 49	Valeurs limites des paramètres de la qualité (qi) (d'après MEIRELES & <i>al.</i> , 2010)	164
Tableau 50	Poids des paramètres du IWQI (d'après MEIRELES & <i>al.</i> , 2010)	164
Tableau 51	Caractéristiques des indices de qualité des eaux d'irrigation d'après MEIRELES & <i>al.</i> , 2010)	166
Tableau 52	Valeurs du paramètre profondeur de la nappe (S) des deux aquifères considérés selon la classification et le poids attribué par le modèle SINTACS.	170
Tableau 53	Valeurs du paramètre de recharge nette (I) des deux aquifères selon la classification et le poids attribué par le modèle SINTACS	171
Tableau 54	Valeurs du paramètre Zone non saturée (N) des deux aquifères selon la classification et le poids attribué par le modèle SINTACS	172
Tableau 55	Valeurs du paramètre milieu du sol (T) des deux aquifères selon la classification et le poids attribué par le modèle SINTACS	172
Tableau 56	Valeurs du paramètre milieu aquifère (A) des deux aquifères selon la classification et le poids attribué par le modèle SINTACS	172
Tableau 57	Valeurs du paramètre Conductivité hydraulique (C) des deux aquifères selon la classification et le poids attribué par le modèle SINTACS	173
Tableau 58	Valeurs du paramètre Pente topographique (S) des deux aquifères selon la classification et le poids attribué par le modèle SINTACS	173
Tableau 59	Valeurs du paramètre impact anthropique (AI) des deux aquifères selon la classification et le poids attribué par le modèle SINTACS	176

Annexes

ANNEXE I : Valeurs des indices SPI (12 mois), SPI (6 mois) et d'indice PI.

Année	Sebdou				Béni Bahdel				El Maffrouch				Zénata			
	SPI (12m)	SPI -1 (6m)	SPI -2 (6m)	PI	SPI (12m)	SPI -1 (6m)	SPI -2 (6m)	PI	SPI (12m)	SPI -1 (6m)	SPI -2 (6m)	PI	SPI (12m)	SPI -1 (6m)	SPI -2 (6m)	PI
1981/82	-0.388	0.465	-0.791	0.904	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
1982/83	-0.966	-1.159	-0.170	0.761	/	/	/	/	/	/	/	/	-1.183	-1.845	-0.772	0.727
1983/84	-1.118	0.209	-1.399	0.724	/	/	/	/	/	/	/	/	-1.068	-1.845	-1.225	0.754
1984/85	-1.284	-0.506	-1.027	0.683	-1.343	-0.510	-1.089	0.672	0.672	/	/	/	-1.216	0.263	-0.690	0.720
1985/86	0.269	-0.117	0.389	1.066	0.199	-0.128	0.322	1.049	0.257	1.004	0.660	1.057	0.351	-1.162	1.113	1.081
1986/87	0.292	-1.420	1.426	1.072	0.222	-1.405	1.356	1.054	0.312	0.073	0.662	1.069	0.406	0.714	0.158	1.093
1987/88	-0.744	-0.871	-0.147	0.816	-0.807	-0.867	-0.212	0.803	-0.866	-0.873	-0.273	0.809	-0.746	-0.195	-0.809	0.828
1988/89	-0.285	0.939	-1.044	0.930	-0.351	0.907	-1.106	0.914	-0.525	-0.222	-0.856	0.884	-0.402	-0.703	-0.144	0.907
1989/90	0.001	0.470	-0.364	1.000	-0.067	0.448	-0.428	0.984	-0.370	-0.373	-0.493	0.918	-0.223	-0.451	-0.346	0.949
1990/91	1.734	1.888	0.452	1.428	1.653	1.839	0.385	1.404	0.753	1.297	-0.366	1.166	1.047	-0.101	1.637	1.241
1991/92	0.628	2.486	-1.236	1.155	0.555	2.425	-1.297	1.136	0.213	-0.688	-0.471	1.047	0.461	-0.363	-0.535	1.106
1992/93	-0.565	0.479	-0.998	0.860	-0.630	0.457	-1.060	0.846	-0.850	-0.732	0.798	0.812	-0.725	1.035	-0.667	0.833
1993/94	-0.403	-1.085	0.398	0.901	-0.468	-1.078	0.331	0.886	-0.675	-0.321	0.542	0.851	-0.457	0.558	-0.105	0.895
1994/95	-0.173	0.783	-0.800	0.957	-0.240	0.754	-0.862	0.941	-0.231	-0.212	-0.649	0.949	-0.320	-0.589	-0.332	0.926
1995/96	0.701	0.751	0.193	1.173	0.628	0.723	0.127	1.154	0.866	1.306	-0.911	1.192	0.806	-0.798	1.235	1.186
1996/97	-1.181	-0.729	-0.742	0.708	-1.241	-0.728	-0.804	0.696	-1.293	-1.248	-0.203	0.714	-1.164	-0.128	-1.191	0.732
1997/98	-0.749	-0.703	-0.283	0.815	-0.812	-0.702	-0.347	0.802	-0.969	-1.115	-0.172	0.786	-0.852	-0.076	-1.062	0.804
1998/99	-0.748	-1.079	0.011	0.815	-0.810	-1.072	-0.054	0.802	-1.296	-0.377	-0.955	0.714	-1.080	-0.847	-0.195	0.751
1999/00	-1.497	-1.214	-0.714	0.630	-1.555	-1.204	-0.777	0.620	-1.516	-1.463	-1.189	0.665	-1.388	-1.093	-1.413	0.680
2000/01	-0.592	-1.520	0.526	0.854	-0.656	-1.504	0.459	0.840	-0.636	-0.465	0.109	0.859	-0.530	0.175	-0.406	0.878
2001/02	0.378	0.867	-0.255	1.093	0.307	0.838	-0.320	1.075	0.218	-0.077	-1.057	1.048	0.314	-0.955	0.004	1.072
2002/03	0.806	-0.333	1.150	1.199	0.732	-0.340	1.081	1.179	0.620	1.292	-0.107	1.137	0.419	-0.020	1.068	1.096
2003/04	2.051	1.769	0.895	1.506	1.968	1.722	0.827	1.481	1.509	0.860	-0.002	1.334	1.582	0.043	0.980	1.364
2004/05	-0.746	-0.888	-0.136	0.816	-0.809	-0.884	-0.201	0.802	-0.776	-0.376	0.995	0.828	-0.667	1.034	-0.301	0.846
2005/06	0.697	0.165	0.643	1.172	0.624	0.149	0.576	1.153	0.272	-0.132	-0.581	1.060	0.371	-0.500	-0.063	1.085
2006/07	-0.389	0.935	-1.157	0.904	-0.454	0.904	-1.218	0.889	-0.912	-0.151	-0.515	0.798	-0.837	-0.405	-0.112	0.807
2007/08	0.162	-0.312	0.421	1.040	0.093	-0.319	0.355	1.023	-0.132	-1.598	1.406	0.971	-0.024	1.434	-1.551	0.994
2008/09	2.971	-0.588	3.745	1.734	2.882	-0.589	3.667	1.705	2.601	1.684	3.512	1.575	2.673	3.478	1.822	1.616
2009/10	1.388	1.108	0.675	1.343	1.310	1.073	0.608	1.320	1.540	1.158	-0.066	1.340	1.611	0.017	1.208	1.371
2010/11	0.280	1.161	-0.592	1.069	0.210	1.125	-0.655	1.051	0.126	-1.007	0.798	1.028	0.255	0.932	-0.917	1.059
2011/12	0.001	-0.245	0.191	1.000	-0.067	-0.253	0.125	0.984	-0.156	0.300	1.693	0.965	-0.055	1.735	0.392	0.987
2012/13	2.047	0.234	2.083	1.505	1.964	0.217	2.011	1.480	2.642	2.601	-0.489	1.584	2.694	-0.405	2.745	1.621

2013/14	-0.099	-0.615	0.368	0.975	-0.167	-0.616	0.301	0.959	-0.020	0.282	-0.342	0.996	0.080	-0.263	0.373	1.019
2014/15	0.107	-0.525	0.527	1.026	0.038	-0.528	0.460	1.009	0.578	0.380	-0.451	1.128	0.654	-0.369	0.473	1.151
2015/16	-1.011	-0.411	-0.800	0.750	-1.072	-0.416	-0.862	0.738	-0.886	-0.924	0.982	0.804	-0.794	0.945	-0.858	0.817
2016/17	-0.391	-1.095	0.418	0.903	-0.457	-1.087	0.351	0.888	-0.312	0.226	-1.016	0.931	-0.207	-0.907	0.314	0.952
2017/18	0.339	1.613	-0.878	1.084	0.268	1.568	-0.940	1.066	0.964	1.507	-1.167	1.213	1.047	-1.073	1.525	1.241
2018/19	-0.714	-0.673	-0.267	0.824	-0.777	-0.674	-0.331	0.810	-0.543	-1.187	1.355	0.880	-0.433	1.279	-0.996	0.900
2019/20	-0.809	-0.235	-0.712	0.800	-0.871	-0.244	-0.775	0.787	-0.506	-0.429	-0.523	0.888	-0.397	-0.393	-0.355	0.908

ANNEXE II : Valeurs du Coefficient d'irrégularité interannuelle des débits moyens (Ec) et indices SSFI.

	Sebdou		Béni Bahdel		El Maffrouch		Zénata	
	Ec	SSFI	Ec	SSFI	Ec	SSFI	Ec	SSFI
1989/90	/	/	/	/	-100.000	-0.717	/	/
1990/91	/	/	/	/	-88.540	-0.635	/	/
1991/92	/	/	/	/	196.919	1.412	/	/
1992/93	/	/	/	/	-36.449	-0.261	/	/
1993/94	/	/	/	/	-30.198	-0.217	/	/
1994/95	/	/	/	/	-39.574	-0.284	/	/
1995/96	/	/	/	/	75.026	0.538	/	/
1996/97	/	/	/	/	67.733	0.486	/	/
1997/98	/	/	/	/	-96.875	-0.695	/	/
1998/99	/	/	/	/	-92.707	-0.665	/	/
1999/00	/	/	/	/	20.851	0.150	/	/
2000/01	/	/	/	/	-98.958	-0.710	/	/
2000/01	158.322	1.930	-13.516	-0.199	11.475	0.082	-82.402	-0.691
2001/02	-55.441	-0.676	-41.462	-0.612	-79.164	-0.568	-41.396	-0.347
2002/03	7.516	0.092	-26.314	-0.388	15.642	0.112	196.942	1.651
2003/04	-64.489	-0.786	-60.672	-0.895	-54.160	-0.388	195.207	1.636
2004/05	-79.722	-0.972	-70.517	-1.040	-86.456	-0.620	-80.666	-0.676
2005/06	-31.852	-0.388	-59.706	-0.881	-82.289	-0.590	-73.247	-0.614
2006/07	16.914	0.206	-61.672	-0.910	-88.540	-0.635	99.692	0.836
2007/08	-69.891	-0.852	-67.569	-0.997	-100.000	-0.717	-92.365	-0.774
2008/09	189.453	2.309	146.675	2.164	287.558	2.062	6.252	0.052
2009/10	-38.630	-0.471	20.881	0.308	-48.951	-0.351	-56.491	-0.473
2010/11	-93.036	-1.134	-43.982	-0.649	-89.398	-0.641	-71.525	-0.599
2011/12	60.854	0.742	-12.534	-0.185	-53.466	-0.383	/	/
2012/13	/	/	132.916	1.961	477.243	3.423	/	/
2013/14	/	/	77.881	1.149	113.276	0.812	/	/
2014/15	/	/	23.829	0.352	/	/	/	/
2015/16	/	/	42.501	0.627	/	/	/	/
2016/17	/	/	-5.654	-0.083	/	/	/	/
2017/18	/	/	18.915	0.279	/	/	/	/

ANNEXE III. Résultats des relevés piézométriques des campagnes aux aquifères de Sebdou et de Hennaya.

Points d'eau	Latitude	Longitude	Altitude	N.S.	N.P.
Aquifère de Sebdou					
P1	34.6977167	-1.3130167	1084	3.4	1080.6
P3	34.6706667	-1.3192667	925	5.7	919.3
P4	34.6700833	-1.3196833	925	7.8	917.2
P5	34.6645	-1.3309	872	1.6	870.4
P6	34.6611833	-1.323333	899	5.7	893.3
P7	34.66435	-1.3209	906	2.5	903.5
P9	34.66995	-1.31885	930	12.7	917.3
P10	34.66985	-1.3179667	927	9.5	917.5
P11	34.6668833	-1.29795	923	3.9	919.1
Aquifère de Hennaya					
S1	34.6946167	-1.3106667	1083	0	1083
S2	34.6710667	-1.3059667	915	0	915
S3	34.6746667	-1.3343	877	0	877
P1	34.96595	-1.36765	386	12,1	373,9
P2	34.96515	-1.36515	381	9,5	371,5
P3	34.9720167	-1.3745666	370	22,2	347,8
P4	34.9706333	-1.37696667	370	21,6	348,4
P5	34.9741	-1.3785	354	17,2	336,8
P6	34.98095	-1.3802833	346	10,8	335,2
P7	34.9858333	-1.3756	336	8,8	327,2
P8	34.98655	-1.37236667	344	8,5	335,5
P9	34.9799833	-1.35741667	370	17	353
P10	34.977233	-1.36396667	364	14,5	349,5
P11	34.9747833	-1.35261667	353	16,7	336,3
P12	34.9863833	-1.35816667	337	12,2	324,8
P13	34.9959667	-1.35686667	323	10,1	312,9
P14	34.9934667	-1.35306667	327	15,6	311,4
P15	34.9969667	-1.3487833	322	12,2	309,8
P16	34.9980333	-1.35006667	322	8,4	313,6
P17	35.0004	-1.347833	319	10	309
P18	35.0014666	-1.3457833	315	9,8	305,2
P19	34.99065	-1.36378333	328	10,7	317,3
P20	34.9917	-1.36025	332	13,3	318,7
P21	35.0069166	-1.3566333	308	3,2	304,8
P22	35.0087	-1.36085	307	6,3	300,7
P23	35.0036666	-1.3581333	302	6	296
P24	35.019333	-1.353	295	9,3	285,7
P25	34.9611667	-1.36965	390	9	381
P26	34.9662	-1.3557	372	12,2	359,8
P27	34.9680666	-1.35255	383	15,1	367,9
S1	35.0136166	-1.3497166	290	0	290
S2	35.0310833	-1.3495166	275	0	275

N.S. Niveau statique ; N.P. Niveau piézométrique

ملخص

في هذا العمل المخصص للأحواض الفرعية لواديان تافنا العليا وسكاك (شمال غرب الجزائر)، كنا مهتمين بالدراسة الهيدروجيوكيميائية للمياه، و تقييم جودة المياه من أجل قابلية الشرب والري، وأخيرا في تقدير درجات ضعفها.

في هذا السياق، تم أخذ وتحليل ثلاثة وخمسين (53) عينة، بما في ذلك واحد وأربعون (41) في المياه الجوفية لطبقات المياه الجوفية في مايو- يونيو- الحقبية الرابعة في سبدو وحناية والتي عشر (12) في المياه السطحية لواديان تافنا العليا وسكاك خلال المواسم الرطبة (مارس-أبريل 2017) والجافة (أكتوبر-نوفمبر 2017). وتتعلق التحليلات الفيزيائية والكيميائية بدرجة الحرارة (T)، ودرجة الحموضة (pH)، والتوصيل الكهربائي (EC)، والمواد الصلبة الذائبة (TDS) والأيونات الرئيسية (NO_3^- ، SO_4^{2-} ، HCO_3^- ، Cl^- ، K^+ ، Na^+ ، Mg^{2+} ، Ca^{2+}). تشير المخططات المستخدمة لتحديد الوجوه الهيدروجيوكيميائية إلى أن المياه الجوفية في سبدو من نوع بيكربونات الكالسيوم، والتي تتميز بغلبة الأتربة القلوية والأحماض الضعيفة، وكلوريد الكالسيوم. هذا الأخير يميز أيضا المياه الجوفية في حناية التي تتميز بهيمنة الفلويات والأحماض القوية.

علاوة على ذلك، فإن محتويات النترات في المياه الجوفية في حوض الفرعي لسكاك مرتفعة وتتجاوز معيار مياه الشرب الذي تقتضيه اللوائح الجزائرية ومنظمة الصحة العالمية (50 مجم لتر⁻¹). وينطبق الشيء نفسه على الرقم الهيدروجيني أو (نسبة الحموضة) الذي لا تتوافق قيمه المسجلة في موسم الأمطار (>6.42) مع المعايير التي تم رفعها. وبالنسبة للحوض الفرعي لتافنا العليا، يبدو الوضع أقل إثارة للقلق في أجزاء معينة من هذه المنطقة فيما يتعلق باستخدامها لأغراض الاستهلاك البشري. ويعكس نقل العينات في مخطط البحث (SAR) لخطر الملوحة المتوسطة إلى العالية بالنسبة لطبقة المياه الجوفية في سبدو، كما يشير إلى خطر الملوحة العالية نسبيا ولكنه لا يشكل مشكلة ملوحة بالنسبة لمياه الحناية. إن قيم مؤشر (MH) بشكل عام تجعل خزاني المياه الجوفية غير مناسبة للري، وبالتالي يمكن أن تغير من جودة التربة وتقلل من محصولها الزراعي. تشير مؤشرات جودة مياه الشرب (DWQI) والري (IWQI) إلى أن طبقة المياه الجوفية لسبدو ذات نوعية جيدة إلى ممتازة وأن مياه الجوفية للحناية، التي تغيرت بمسويات عالية من النترات، غير مناسبة للشرب. أما بالنسبة لاستخدامها لأغراض الري، فإن المياه، وفقا لمؤشر Meireles، متوسطة إلى عالية بالنسبة لطبقة المياه الجوفية لسبدو وعالية إلى عالية جدا بالنسبة للمياه الجوفية لمنطقة الحناية.

وتكشف نماذج الضعف (SINTACS) التي تم وضعها أن خطر الضعف معتدل إلى مرتفع بالنسبة للمياه الجوفية الخاصة بسبدو ومن مرتفع إلى شديد بالنسبة للمياه الجوفية في حناية.

الكلمات المفتاحية: تافنا، سكاك، الأحواض الفرعية، المياه، الكيمياء الهيدروجيولوجية، الجودة، النماذج، الضعف.

Résumé

Dans le présent travail réservé aux sous-bassins de la Haute Tafna et de Sikkak (Nord-Ouest algérien), nous nous sommes intéressés à l'étude hydrogéochimique des eaux, à l'évaluation de la qualité des eaux à des fins de consommation humaine et d'irrigation et enfin à l'estimation des degrés de vulnérabilité.

Dans ce contexte, cinquante-trois (53) échantillons ont été prélevés et analysés, dont quarante et un (41) dans les eaux souterraines des aquifères mio-plio-quatennaires de Sebdo et de Hennaya et douze (12) dans les eaux de surface des oueds de la Tafna supérieure et de Sikkak durant les saisons humide (Mars-Avril 2017) et sèche (Octobre-Novembre 2017). Les analyses physico-chimiques ont concerné la température (T), le pH, la conductivité électrique (EC), la TDS et les ions majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- et NO_3^-). Les diagrammes utilisés pour la détermination des faciès hydrogéochimiques indiquent que les eaux de l'aquifère de Sebdo, sont de type bicarbonaté calcique, caractérisées par la prépondérance des alcalino-terreux et des acides faibles, et chloruré calcique. Ce dernier caractérise aussi les eaux souterraines de Hennaya marquées par une dominance des alcalins et des acides forts.

Par ailleurs, les teneurs en nitrates des eaux souterraines dans le sous-bassin de Sikkak sont élevées et dépassent la norme de potabilité exigée par la réglementation algérienne et celle de l'OMS (50 mg L⁻¹). Il en est de même pour le pH dont les valeurs enregistrées en saison humide (<6.42) ne sont pas conformes aux normes suscitées. Pour le sous-bassin de la Haute Tafna, la situation semble moins préoccupante dans certaines parties de cette zone quant à leur utilisation à des fins de consommation humaine. Le report des échantillons sur le diagramme du SAR, traduit un risque de salinité moyen à élevé et un risque de sodicité faible pour l'aquifère de Sebdo. Pour le cas de l'aquifère de Hennaya, le risque de salinité assez élevé, ne pose pas de problème de sodicité. Les valeurs de l'indice MH confèrent, en général, aux eaux des deux aquifères une inaptitude à l'irrigation et pourraient de ce fait modifier la qualité du sol et réduire son rendement agricole. Les indices de qualité des eaux potables (DWQI) et d'irrigation (IWQI) indiquent que les eaux souterraines de l'aquifère de Sebdo sont de qualité bonne à excellente et que celles de Hennaya, altérée par des teneurs élevées en nitrates sont impropres à la consommation humaine. Quant à leur utilisation à des fins d'irrigation, les eaux sont, selon l'indice de Meireles, à restriction moyenne à élevée pour l'aquifère de Sebdo et élevée à très élevée pour celui de Hennaya.

Enfin, les modèles de vulnérabilité (SINTACS) établis révèlent que le risque de vulnérabilité est modéré à élevé pour les eaux souterraines de l'aquifère de Sebdo et élevé à sévère pour celui de Hennaya.

Mots clés: Tafna, Sikkak, Sous-bassins, Eaux, Hydrogéochimie, Qualité, Modèles, Vulnérabilité.

Abstract

In the present work, reserved for the Upper Tafna and Sikkak sub-watersheds (North-West Algeria), we are interested in the hydrogeochemical study of the waters, an assessment of water quality for human consumption and irrigation purposes and finally an estimation of degrees of vulnerability.

In this context, fifty-three samples were analyzed, including forty-one, in the groundwater of the Mio-Plio-Quaternary aquifers of Sebdo and Hennaya and twelve in the surface waters of the upper Tafna and Sikkak wadis during the wet (March-April 2017) and dry (October/November 2017) seasons. The physical and chemical analyzes carried out concerned temperature (T), pH, electrical conductivity (EC), TDS and major ions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- and NO_3^-). The diagrams used to determine the hydrogeochemical facies indicate that Sebdo groundwater aquifer is of calcium bicarbonate type, characterized by the preponderance of alkaline earth metals and weak acids, and calcium chloride type. This latter facies characterizes, also Hennaya groundwater marked by a dominance of alkaline and strong acids.

Furthermore, the nitrate contents of groundwater in Sikkak sub-watersheds are high and exceed the Algerian and the WHO drinking standard (50 mg L⁻¹). Regarding pH, the recorded values during the wet season (<6.42) do not comply with the aforementioned standards. For the upper Tafna sub-watershed, the situation seems less worrying in certain parts of this area as regards their use for human consumption. The plots of the samples on the SAR diagram indicates a medium to high salinity risk and a low sodicity risk for the Sebdo aquifer. In the case of the Hennaya aquifer, the fairly high salinity risk does not pose any sodicity problems. Concerning the MH index, its calculated values suggest that waters of the two aquifers are unsuitable for irrigation and could therefore modify the soil quality and reduce its agricultural yield. The drinking (DWQI) and irrigation (IWQI) water quality indices reveal that groundwater of Sebdo aquifer is of good to excellent quality and that of Hennaya, which is altered by high nitrate levels, is unsuitable for human consumption.

As for their use for irrigation purposes and according to the Meireles index, groundwater are of moderate to high restriction for Sebdo aquifer and high to very high for that of Hennaya.

The established vulnerability models (SINTACS) reveal that the risk of vulnerability is moderate to high in Sebdo aquifer and high to severe for that of Hennaya

Keywords: Tafna, Sikkak, Sub-watersheds, Waters, Hydrogeochemistry, Quality, Models, Vulnerability.