

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Hassiba Benbouali de Chlef

Faculté : de Génie Civil et d'Architecture (FGCA)

Département Hydraulique



# THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

## DOCTORAT EN SCIENCES

En Hydraulique

Par

**Mr : Kaddour HENNIA**

Thème :

---

**Utilisation des SIG dans la préservation et la protection des  
ressources en eau souterraines dans les zones semi-arides**

**- Application au bassin du Moyen Chelif Occidental Nord Algérie -**

---

Soutenue le : 17 / 06 / 2023, devant le jury composé de :

Mr : EZZIANE Karim	Professeur	Université UHB Chlef	Président
Mr : HAMOUDI SAAED Abdel Amir	Professeur	Université UHB Chlef	Rapporteur
Mr : BOUDERBALA Abdelkader	MCA	Université DB Khemis Miliana	Co-Rapporteur
Mr : REMINI Boualem	Professeur	Université SD Blida 1	Examineur
Mr : HABIBI Brahim	MCA	Université UHB Chlef	Examineur

Année Universitaire 2022 / 2023

# *Remerciements*

**J**e tiens à remercier en premier lieu le Professeur : HAMOUDI SAAED Abdel Amir d'avoir accepté d'encadrer cette thèse,

**J**e tiens à remercier en deuxième lieu le Dr : BOUDERBALA AEK d'avoir accepté d'être un co-encadrer cette thèse, et qui a contribué largement dans ce travail en répondant et toujours à mes diverses sollicitations,

**J**e remercie les membres du jury composé de :

Mr : EZZIANE Karim	Professeur	Université UHB Chlef	Président
Mr : REMINI Boualem	Professeur	Université SD Blida 1	Examineur
Mr : HABIBI Brahim	MCA	Université UHB Chlef	Examineur

de m'avoir fait l'honneur d'accepter de juger ce travail,

**M**erci à Madame BETTAHAR Naima pour avoir maitre les premiers pas de ce travail avec un zèle continu,

**M**erci à toutes les personnes de l'ANRH/Blida pour m'avoir accueilli dans le laboratoire d'analyse des eaux.

**J**e souhaite associer à ceux-ci des remerciements pour le personnel (enseignants et travailleurs) du département Sciences de la terre, l'Université Djillali Bounaâma Khemis Milina Ain Defla,

**M**erci à ma petite famille qui m'a accompagné dans cette aventure, à ma femme en particulier et mes enfants, et aussi mes parents et mes frères, et aussi aux personnes qui ont contribué à rendre ces années d'étude inoubliables les Promotions : DEUA 92/95, Ingénieur 95/98, et Magister 2002/03.

## RESUME

La plaine du Moyen Cheliff Occidental (MCO) abrite une nappe alluviale importante d'eau souterraine, où elle est exploitée pour divers usages, à savoir l'alimentation en eau potable, l'irrigation et l'industrie. L'essor démographique, agricole et industriel dans la plaine du MCO ont pour conséquence un accroissement des rejets des eaux usées domestiques et industriel, et d'utilisation de plus en plus intensive des engrais chimiques et pesticides, ce qui a constitué une menace éventuelle pour la pollution des eaux souterraines de la nappe alluviale.

Ce travail a été organisé en deux parties : la première vise à l'étude des caractéristiques physicochimique des eaux souterraines de la plaine pour comprendre les principaux facteurs gouvernant l'hydrogéochemie, et la deuxième partie cible une cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraine de la nappe alluviale à la pollution afin d'identifier les zones les plus sensibles à la pollution en vue d'une bonne gestion qualitative de cette ressource vitale.

Les méthodes statistiques, les diagrammes, l'indice de qualité (IQE) et les différents indices paramétriques utilisés pour l'aptitude des eaux à l'irrigation (SAR, %Na,...) ont été appliquées pour la première partie, alors que pour la deuxième partie de la vulnérabilité, la méthode SINTACS a été appliquée, et la carte SINTACS finale obtenue a été validée par la carte de l'indice de qualité.

L'approche hydrochimique basée sur les résultats des analyses physico-chimiques des eaux souterraines de 45 échantillons de l'année 2019 montrent qu'il y a des excès de concentration de certains éléments chimiques par rapport à la norme algérienne, à savoir le calcium, le magnésium, les chlorures, les sulfates, et les nitrates (11 à 16 % des échantillons dépassent la norme). Les fortes teneurs ont des origines naturel (géologie) et anthropique. Le faciès chimique le plus dominant est chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne (99 %), cela confirme la dissolution des formations carbonatées et gypseuses du Miocène, ainsi que l'impact des facteurs anthropiques tel que les rejets des eaux usées non épurées et l'utilisations des fertilisants et engrais chimiques en agriculture. L'évaluation de l'indice de qualité montre des valeurs entre 45 à 194, montrant que 60 % des points d'eau, se classent dans la catégorie de qualité excellente à bonne (IQE < 100), et le reste se classent dans la catégorie de mauvaise qualité pour l'Alimentation en eau potable (IQE > 100).

La cartographie de vulnérabilité par la méthode SINTACS montre trois classes de vulnérabilité : 17 % de la zone d'étude présente une vulnérabilité faible, 68 % une vulnérabilité modérée et 15 % une vulnérabilité forte.

**Mots Clés** : Moyen Cheliff Occidental, Nappe alluviale, qualité de l'eau, Caractérisation hydrogéochemie, SINTACS, Vulnérabilité à la pollution, Cartographie.

## ABSTRACT

The Middle Western Cheliff plain have a significant alluvial aquifer, which is exploited for various uses, namely drinking water supply, irrigation and industry. The demographic growth, agricultural and industrial development in the Middle Western Cheliff plain is resulting an increase of domestic and industrial wastewater discharge, and increasingly intensive use of chemical fertilizers and pesticides, which constitute a potential risk of pollution for groundwater of the alluvial aquifer.

This work was organized in two parts : the first one aims to study the physicochemical characteristics of the groundwater and to understand the main factors governing the hydrogeochemistry, while the second part assess the groundwater vulnerability to pollution, in order to identify the area most sensitive to pollution with a view to good quality management of this vital resource.

Statistical methods, diagrams, groundwater quality index (WQI) and various parametric indices used for the suitability of water for irrigation (SAR, % Na, etc.) were applied for the first part, while for the second part the vulnerability to pollution were assessed by using SINTACS method, and the final SINTACS map obtained was validated by the water quality index map.

The hydrochemical approach based on the results of physico-chemical analyzes of groundwater of 45 samples from the year 2019 show an excess of concentrations of certain chemical elements compared to the Algerian standard, namely calcium, magnesium, chlorides, sulfates, and nitrates (from 11 to 16 % of samples exceed the standard). The high levels are related to natural (geology) and anthropogenic origins. The most dominant chemical facies is chlorinated and sulphated calcium and magnesium (99 %), this confirms the influence of the dissolution of carbonate and gypsum formations of Miocene, as well as, the impact of anthropogenic factors such as the discharge of untreated wastewater and the uses of pesticides and chemical fertilizers in agriculture. The evaluation of quality index shows values between 45 and 194, showing 60% of water samples are classified in the category of excellent to good quality (WQI < 100), and the rest are classified in the poor quality classe for drinking water supply (WQI > 100).

Vulnerability mapping by the SINTACS method shows three classes of vuln erabilit e : 17 % of the surface area has low vulnerability, 68 % moderate vulnerability and 15 % high vulnerability to pollution.

**Keywords:** Middle Western Cheliff, Alluvial aquifer, water quality, Hydrogeochemical characterization, SINTACS, Vulnerability to pollution, Cartography.

## الملخص

يوجد في سهل الشلف الأوس ط الغربي طبقة مياه جوفية غرينية كبيرة، يتم استغلالها في مختلف الميدين، منها إمدادات مياه الشرب، الفلاحي وفي الصناعة. وفي ظل النمو الديمغرافي الكبير والتنمية الزراعية والصناعية في هذا السهل الذي يؤدي حتما إلى الزيادة في مياه الصرف الصحي المنزلية والصناعية، والاستخدام المكثف وبشكل متزايد للأسمدة الكيميائية ومبيدات، مما يشكل خطرا محتملا لتلوث المياه الجوفية لطبقة المياه الغرينية.

ينقسم هذا العمل إلى جزأين: الأول يهدف إلى دراسة الخصائص الفيزيوكيميائية للمياه الجوفية وفهم العوامل الرئيسية التي تتحكم في المكونات الكيميائية للمياه، بينما يقيّم الجزء الثاني مدى تأثير المياه الجوفية بالتلوث، من أجل تحديد المنطقة الأكثر حساسية للتلوث بغية إدارة جيدة لهذا المورد الحيوي.

تم تطبيق الأساليب الإحصائية والرسوم البيانية ومؤشر جودة المياه الجوفية (WQI) و مختلف المؤشرات المستخدمة من أجل معرفة ملائمة هذه المياه للسقي (% SAR , Na ) ، إلخ في الجزء الأول، بينما تم تقييم قابلية التأثير بالتلوث في الجزء الثاني باستخدام طريقة SINTACS ، و حيث تم الحصول على خريطة SINTACS النهائية .

يُظهر النهج الهيدروكيميائي المستند إلى نتائج التحليلات الفيزيائية والكيميائية للمياه الجوفية لـ 45 عينة خلال عام 2019 ارتفاع في تراكيزات بعض العناصر الكيميائية مقارنة بالمعيار الجزائري، وهي الكالسيوم والمغنيسيوم والكلوريدات والكبريتات والنترات من (11 إلى 16%) من العينات تتجاوز المعيار . ويعود أصل هذه التراكيزات العالية إلى الطبيعة الجيولوجية والعوامل الخارجية. الأملاح الكيميائية السائدة هي الكلور والكالسيوم الكبريت والمغنيسيوم (99%)، وهذا يؤكد تأثير انحلال تكوينات الكربونات والجبس من الميوسين، وكذلك تأثير العوامل البشرية مثل تصريف مياه الصرف الصحي غير المعالجة واستخدام المبيدات والأسمدة الكيميائية. وبيّن تقييم مؤشر نوعية المياه الشروب، أن القيم تتراوح بين 45 و194، مما يدل على أن 60% من نقاط المياه هي من الفئة الممتازة إلى جيدة النوعية (WQI أقل من 100)، والباقي من فئة النوعية الرديئة (WQI أكبر من 100).

تظهر خريطة الحساسية عن طريق SINTACS لمنطقة الدراسة، أن هناك ثلاث فئات من الحساسية للتلوث : 17% منخفضة، و68% متوسطة و 15% مرتفعة.

**الكلمات المفتاحية:** سهل الشلف الأوسط الغربي، الطبقة الغرينية، جودة المياه، الخصائص الهيدروجيوكيميائية، SINTACS، الحساسية للتلوث، رسم الخرائط.

# Sommaire

<b>Résumé</b>	
<b>Liste des abréviations</b>	
<b>Liste des Tableaux</b>	
<b>Liste des Figures</b>	
<b>Introduction générale</b>	

## Chapitre I

### Introduction au Système d'information géographique

I.1. Introduction.....	02
I.2. Définitions du SIG.....	02
I.3. Structure d'un SIG .....	05
I.3.1. Matériel .....	05
I.3.2. Logiciel .....	05
I.3.2. Données.....	05
I.3.3. Utilisateurs .....	05
I.3.4. Méthode .....	05
I.4.Types de données utilisées par SIG .....	06
I.4.1. Données numériques .....	06
I.4.2. Données vectorielles .....	06
I.4.3. Données matricielles .....	07
I.4.4. Réseaux linéaires .....	07
I.5.Étapes de l'établissement d'un SIG .....	07
I.6. Avantages et les contraintes du SIG .....	08
I.7. SIG Outil d'aide à la décision (DAO) .....	08
I.8. Cartographie et SIG .....	09
I.8.1. Cartographie des lieux .....	10
I.8.2. Cartographie des quantités .....	10
I.8.3. Cartographie des densités .....	10
I.8.4. Trouver ce qui se trouve à l'intérieur .....	10
I.8.5. Trouver ce qui est à proximité .....	11
I.8.6. Modification de la cartographie .....	11
I.9. Domaines d'application des SIG .....	11
I.9.1. Cartographie .....	11
I.9.2. Arpentage (Surveying) .....	12
I.9.3. Recensement .....	12

I.9.4. Défense .....	13
I.9.5. Agriculture .....	13
I.9.6. Développement urbain .....	14
I.9.7. Transports .....	14
I.10. Application des SIG dans la modélisation des Eaux Souterraines .....	15
I.10.1. Système national d'information sur les eaux souterraines (SNIES) .....	15
I.10.2. Application dans la délimitation des Zones potentielles ou zones de Recharge .....	17
I.10.3. Application sur l'étude de la qualité des eaux souterraines .....	19
I.10.4. Application sur l'évaluation et la cartographie de la vulnérabilité à la pollution .....	20
I.11. Conclusion .....	20

## **Chapitre**

### **II Présentation de la zone d'étude**

II.1. Situation géographique .....	22
II.1.1. Cadre régional .....	22
II.1.2. Cadre local .....	23
II.1.3. Cadre administrative .....	23
II.2. Contexte morphologique et relief .....	23
II. 3. Hydrologie de la zone d'étude .....	25
II. 3.1. Hydrographie .....	25
II.3.2. Hydrométrie .....	26
II. 4. Climatologie.....	27
II. 4. 1. Précipitations.....	27
II. 4. 2. Température.....	30
II. 4. 3. Bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite .....	32
II. 5. Cadre géologique.....	34
II. 5. 1. Cadre géologique régional.....	34
II. 5. 2. Cadre géologique local.....	35
II.5.2.1. Formations Anténéogènes .....	36
II.5.2.2. Formations néogènes et quaternaires.....	36
II. 6. Cadre Hydrogéologique .....	41
II. 6.1. Identification des principaux aquifères .....	41
II. 6.2. Choix de l'aquifère étudié .....	43
II. 6.3. Identification de la nappe étudiée .....	43
II. 6.4. Hydrodynamique de la nappe étudiée.....	44

II. 6.4.1. Piézométrie .....	44
II.7. Cadre pédologique .....	46
II.7.1. Principaux types de sols de la zone d'étude.....	46
II.7.1.1. Les sols peu évolués.....	46
II.7.1.2. Les sols calci-magnésiques.....	46
II.7.1.3. Les sols halomorphes .....	47
II.7.1.4. Les sols sesquioxydes de fer .....	47
II.7.1.5. Les sols isohumiques.....	48
II.7.2. Perméabilité des sols de la zone d'étude .....	48
II.8. Contexte socio – économique .....	49
II.8.1. Population .....	49
II.8.2 Occupation du sol .....	50
II.8.3. Industrie .....	51
II.9. Conclusion.....	51

### **Chapitre III**

#### **Caractérisation Hydrochimique et évaluation de la qualité des eaux souterraines**

III.1. Introduction.....	53
III.2. Données.....	53
III.2.1. Échantillonnage .....	54
III.2.2. Analyse des éléments chimiques.....	54
III.2.2.1. In site .....	54
III.2.2.2. Laboratoire.....	54
III.3. Caractérisation géochimique.....	55
III.3.1. Méthode Statistique.....	55
III.3.1.1. Analyse descriptive.....	55
III.3.1.1.1. Potentiel d'Hydrogène (pH).....	56
III.3.1.1.2. Conductivité électrique (CE) .....	56
III.3.1.1.3. Les ions majeurs.....	57
III.3.1.2. Analyse en Composantes Principales.....	60
III.3.1.3. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH /Dendrogramme .....	62
III.3.2. Méthode des diagrammes.....	65
III.3.2.1. Les diagrammes binaires.....	65
III.3.2.2. Diagramme de Piper.....	66



III.3.2.3. Diagramme de Chadha.....	67
III.3.2.4. Diagramme de Durov.....	68
III.3.2.5. Diagramme Gibbs.....	69
III.4. Évaluation de la qualité e l'eau.....	70
III.4.1. Aptitude de l'eau à la consommation humaine.....	70
III.4.1.1. Calcul de l'Indice de qualité de l'eau .....	70
III.4.1.2. Cartographie de la qualité des eaux .....	75
III.4.2. Aptitude de l'eau de la nappe alluviale à l'irrigation.....	76
III.5. Conclusion.....	78

## **Chapitre IV**

### **Étude de vulnérabilité des eaux souterraine a la pollution**

IV.2. Pollution des eaux souterraines.....	80
IV.2.1. Définition de la pollution des eaux.....	80
IV.2.2. Origines des pollutions.....	80
IV.2.3. Migration des polluants vers les eaux souterraines.....	80
IV.3. Concept de vulnérabilité des eaux souterraine à la pollution .....	81
IV.3.1. Notion de vulnérabilité.....	81
IV.3.2. Types de vulnérabilité.....	82
IV.3.2.1. Vulnérabilité intrinsèque.....	82
IV.3.2.2. Vulnérabilité spécifique.....	82
IV.3.3. Critères de la vulnérabilité.....	82
IV.3.3.1. Critères de vulnérabilité intrinsèque.....	82
IV.3.3.1.1. Critères relatifs au sol.....	82
IV.3.3.1.2. Critères relatifs à la zone non saturée.....	83
IV.3.3.2. Critères de vulnérabilité spécifique.....	83
IV.3.3.2.1. Capacités dispersives et épuratoires des sols .....	83
IV.3.3.2.2. Qualité du réseau hydrographique.....	83
IV.3.3.2.3. Typologie de l'occupation du sol.....	83
IV.3.3.2.4. Points sensibles.....	83
IV.3.4. Méthodes d'estimation de la vulnérabilité .....	83
IV.4. Aspect théorique de la méthode SINTACS.....	86
IV.4.1. Historique de la méthode.....	86
IV.4.2. Etablissement des paramètres de SINTECS.....	86

IV.4.2.1. Profondeur da la nappe (S).....	86
IV.4.2.2 Infiltration (I).....	86
IV.4.2.3. Zone non saturée (N).....	87
IV.4.2.4. Sol (T) .....	87
IV.4.2.5. Type aquifère (A).....	87
IV.4.2.6. Conductivité hydraulique (C).....	87
IV.4.2.7. Topographie (S).....	87
IV.4.3. Détermination de l'indice SINTACS.....	89
IV.4.3.1. Indices (Côtes) des paramètres.....	89
IV.4.3.2. Poids des paramètres.....	89
IV.4.4. Classes de vulnérabilité.....	90
IV.5. Cartographie de vulnérabilité.....	91
IV.5.1. Objet de cartographie.....	91
IV.5.2. Cartographie de la vulnérabilité.....	91
IV.5.3. Évaluation des paramètres et calcul des cotes de vulnérabilité.....	93
IV.5.3.1. Données de base.....	93
IV.5.3.2. Méthodologie.....	93
IV.5.3.3. Établissement des paramètres spécifiques.....	94
IV.5.3.3.1. Paramètre de profondeur des eaux souterraines (S).....	94
IV.5.3.3.2. Paramètre d'infiltration efficace (nette) de l'aquifère (I).....	95
IV.5.3.3.3. Paramètre de la zone non saturée (impact de la zone vadose) (N).....	97
IV.5.3.3.4. Paramètre de type de sol (T).....	98
IV.5.3.3.5. Paramètre Type de l'aquifère (A).....	99
IV.5.3.3.6. Paramètre de conductivité hydraulique (perméabilité de l'aquifère) (C).....	100
IV.5.3.3.7. Paramètre Topographie (pente) (S).....	101
IV.5.3.4. Cartographie de la vulnérabilité de la nappe du moyen Cheliff occidental.....	102
IV.6. Conclusion .....	104
Conclusion générale et recommandations	
Références bibliographiques	

## Liste des abréviations

ABH CZ : Agence du Bassin Hydrographique Cheliff – Zahrez  
ACP : Analyse en Composantes Principales (méthode statistique d'analyse des données)  
ADE : Algérienne Des Eaux  
AEP : Alimentation en Eau Potable  
AGIRE : Agence Gestion Intégrée des Ressources en Eau  
ANRH : Agence National des Ressources Hydraulique  
CAH : Classification Ascendante Hiérarchique  
Da : Déficit agricole  
DAO : Outil d'Aide à la Décision  
DFP : Direction des Finances et Planification  
DPAT : Direction de la Planification et de l'Aménagement du Territoire  
DREW : Direction des Ressources en Eau de la Wilaya  
EDTA : Acide EthylèneDiaminétéTraAcétique  
FNDR : Fonds National de Développement et de Régularisation Agricole  
GPS : Global Positioning System (Système mondial de positionnement)  
IDW : Inverse Distance Weighting (Pondération inverse à la distance)  
GUI : Interface Utilisateur Graphique  
MCO : Moyen Cheliff Occidental  
MES : Matières En Suspension  
MRE : Ministère des Ressources en Eau  
OMS : Organisation Mondiale de la Santé  
ONA : Office National d'Assainissement  
ONID : Office National d'Irrigation et Drainage  
ONM : Office National de Météorologique  
PDARE : Plan Directeur d'Aménagement des Ressources en Eau  
PNE : Plan National de l'Eau  
SGDB : Système de Gestion de Base de Données  
SNIES : Système National d'Information sur les Eaux Souterraines  
UTM : Transverse Universelle de Mercator (Universal Transversal de Mercator)  
ZI : Zone d'Intérêt  
Ws : Water surcharge (surplus)  
WQI : Water quality index (Indice de qualité des eaux)

# *Liste des Tableaux*

## **Chapitre I**

### **Synthèse Bibliographique**

<b>Tableau 01</b> : Historique du SIG .....	03
<b>Tableau 02</b> : Décomposition du SIG.....	04

## **Chapitre II**

### **Présentation de la zone d'étude**

<b>Tableau 03</b> : Caractéristiques Physiographiques des sous-bassins versant du MCO.....	26
<b>Tableau 04</b> : Caractéristiques des stations hydrométriques du MCO.....	26
<b>Tableau 05</b> : Les postes pluviométriques du Moyen Cheliff Occidental .....	28
<b>Tableau 06</b> : Variations mensuelles des précipitations (mm) au niveau de la station de l'ONM Chlef (1980-20019).....	30
<b>Tableau 07</b> : Températures mensuelles relevées à la station de l'ONM Chlef (Année 2019)...	30
<b>Tableau 08</b> : Données des moyennes mensuelles et interannuelles des températures de la station de Chlef (2000-2019).....	31
<b>Tableau 09</b> : Bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite (période 2000-2019).....	33
<b>Tableau 10</b> : Résultats du bilan Hydrologique.....	34
<b>Tableau 11</b> : Évolution du niveau piézométrique de la période 1990-2019.....	45

## **Chapitre III**

### **Caractérisation Hydrochimique et évaluation de la qualité des eaux souterraines**

<b>Tableau 12</b> : Paramètres mesurés et méthodes analytiques utilisées.....	54
<b>Tableau 13</b> : Valeurs statistiques de divers paramètres.....	55
<b>Tableau 14</b> : Valeur propre.....	61
<b>Tableau 15</b> : Matrice de corrélation entre les éléments chimiques.....	61
<b>Tableau 16</b> : Caractéristiques des groupes selon la CAH.....	64
<b>Tableau 17</b> : Poids relatifs de paramètres physico-chimiques.....	71
<b>Tableau 18</b> : Classes de qualité de l'eau.....	72
<b>Tableau 19</b> : l'indice de qualité des eaux de la nappe selon la norme de OMS 2017.....	73
<b>Tableau 20</b> : l'indice de qualité des eaux de la nappe selon les normes Algériennes.....	74
<b>Tableau 21</b> : Classes de la qualité des eaux d'après les diagrammes Wilcox et Richards.....	78

## Chapitre IV

### Étude de vulnérabilité des eaux souterraine a la pollution

<b>Tableau 22</b> : Les paramètres des différentes méthodes d'évaluation de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines .....	85
<b>Tableau 23</b> : Cotes attribuées à chaque paramètre de la méthode SINTACS.....	88
<b>Tableau 24</b> : Les valeurs des poids des paramètres de la méthode SINTACS.....	89
<b>Tableau 25</b> : Classes de vulnérabilité dans la méthode SINTACS.....	90
<b>Tableau 26</b> : Données utilisées pour le calcul de la vulnérabilité.....	93
<b>Tableau 27</b> : Calcul d'Indice S selon la méthode SINTACS.....	95
<b>Tableau 28</b> : variation de la recharge nette de la période (2000-2019).....	96
<b>Tableau 29</b> : Calcul d'Indice R « recharge nette » selon la méthode SINTACS.....	96
<b>Tableau 30</b> : Calcul d'Indice N « impact de la zone vadose – non saturée » .....	97
<b>Tableau 31</b> : Calcul de l'indice T « Type de sol » selon la méthode SINTACS.....	98
<b>Tableau 32</b> : Calcul de l'indice A « nature de l'aquifère » selon la méthode SINTACS.....	99
<b>Tableur 33</b> : Calcul de l'Indice C « Conductivité hydraulique » selon la méthode SINTACS	100
<b>Tableau 34</b> : Calcul de l'indice T « Pente (Topographie) » selon la méthode SINTACS.....	101

# *Liste des Figures*

## **Chapitre I**

### **Synthèse bibliographique**

<b>Figure 01</b> : Fonctionnement d'un SIG.....	06
<b>Figure 02</b> : Contexte d'implantation d'un SIG.....	09
<b>Figure 03</b> : Domaines d'application des SIG.....	14
<b>Figure 04</b> : système national d'information sur les eaux souterraines.....	16
<b>Figure 05</b> : Organigramme méthodologique adopté pour délimiter les zones potentielles d'eaux souterraines.....	18
<b>Figure 06</b> : Méthodologie adoptée pour cartographie de l'indice de qualité des eaux souterraines.....	19

## **Chapitre II**

### **Présentation de la zone d'étude**

<b>Figure 07</b> : Carte de la situation géographique de la zone d'étude.....	22
<b>Figure 08</b> : Carte des classes d'altitudes dans le moyen Cheliff occidental.....	24
<b>Figure 09</b> : Carte du réseau hydrographique du moyen Cheliff occidental.....	25
<b>Figure 10</b> : Situation des postes pluviométriques et hydrométriques dans le bassin versant du MCO.....	28
<b>Figure 11</b> : Distribution des pluies moyennes annuelles dans le MCO (1968-2001).....	29
<b>Figure 12</b> : Représentation graphique des moyennes mensuelles de température.....	31
<b>Figure 13</b> : Représentation graphique du bilan de Thornthwaite pour la période 2000-2019...33	
<b>Figure 14</b> : Coupe géologique.....	35
<b>Figure 15</b> : Stratigraphie synthétique du moyen-Chéiff occidental.....	39
<b>Figure 16</b> : Carte géologique de zone d'étude.....	40
<b>Figure 17</b> : Coupe Hydrogéologique dans la zone d'étude.....	42
<b>Figure 18</b> : Localisation du réseau de surveillance dans la zone d'étude.....	43
<b>Figure 19</b> : Carte piézométrique de la nappe alluviale du MCO (basses Eaux 2014).....	45
<b>Figure 20</b> : Carte pédologique de la zone d'étude.....	47
<b>Figure 21</b> : Communes situées dans la vallée du moyen Cheliff occidental.....	49
<b>Figure 22</b> : Carte d'occupation du sol de la région d'étude .....	50

## Chapitre III

### Caractérisation Hydrochimique et évaluation de la qualité des eaux souterraines

<b>Figure 23</b> : Localisation des points d'échantillonnage.....	53
<b>Figure 24</b> : Variation des conductivités électriques des eaux de la nappe alluviale pour l'année 2019.....	57
<b>Figure 25</b> : Cercle de corrélation des variables (plan $F_1$ - $F_2$ et $F_1$ - $F_3$ ) .....	62
<b>Figure 26</b> : Dendrogramme des points d'eau.....	64
<b>Figure 27</b> : Diagramme binaire pour les éléments (a): Ca Vs $\text{HCO}_3$ , (b) : Ca Vs $\text{SO}_4$ , (c) : Ca Vs Mg , (d) : Mg Vs $\text{HCO}_3$ , (e) : Mg Vs $\text{SO}_4$ , (f) : Cl Vs Na Diagramme (g) : $\text{Ca}+\text{Mg}+\text{HCO}_3/\text{Na}+\text{Cl}+\text{SO}_4$ vs CE.....	66
<b>Figure 28</b> : Diagrammes de Piper, et Chadha des eaux de la nappe de zone d'étude.....	67
<b>Figure 29</b> : Diagrammes Durov, et Gibbs des eaux de la nappe alluvial du MCO.....	69
<b>Figure 30</b> : Répartition spatiale de l'indice de qualité des eaux de la nappe alluvial du MCO selon les normes OMS 2017.....	75
<b>Figure 31</b> : Répartition spatiale de l'indice de qualité des eaux de la nappe alluvial du MCO selon les normes Algérienne.....	76
<b>Figure 32</b> : Diagrammes de Wilcox et Richards.....	77

## Chapitre IV

### Étude de vulnérabilité des eaux souterraine a la pollution

<b>Figure 33</b> : Les étapes d'élaboration de la carte de vulnérabilité par SIG.....	92
<b>Figure 34</b> : Calcul de l'indice de vulnérabilité global par la somme des sept cartes Raster...	94
<b>Figure 35</b> : Répartition de l'indice S (profondeur d'eau) selon SINTACS.....	95
<b>Figure 36</b> : Répartition spatiale d'indice I (recharge d'eau de la nappe).....	96
<b>Figure 37</b> : Répartition spatial d'indice N (zone non saturée).....	97
<b>Figure 38</b> : Répartition spatial d'indice T (Type de sol).....	99
<b>Figure 39</b> : Répartition spatial de l'indice A.....	100
<b>Figure 40</b> : Répartition spatial de l'indice C.....	101
<b>Figure 41</b> : Répartition spatial de l'indice S.....	102
<b>Figure 42</b> : Carte de la vulnérabilité de la nappe alluviale du MCO à la pollution selon la méthode SINTACS.....	103

# Introduction Générale



## Introduction Générale

L'eau est un élément indispensable à la vie et revêt de l'importance pour d'innombrables activités humaines. L'eau peut être rare à certains endroits, comme les zones arides et semi-arides, ou tout simplement d'une qualité médiocre à d'autres endroits. Il est certain que l'augmentation de la demande en eau pour les activités humaines accentuera les contraintes sur cette ressource. En outre, les facteurs naturels, telle que la sécheresse ou les contraintes géologiques, ont un effet sur l'approvisionnement en eau potable et sa distribution. Il est donc essentiel de quantifier et d'analyser la quantité et la qualité des réserves en eau et de trouver le moyen de gérer cette ressource pour en assurer la durabilité.

La dégradation de la qualité des eaux souterraines peut avoir un certain nombre d'impacts socio-économiques, à savoir la dégradation des écosystèmes, les problèmes sanitaires, les impacts directs ou indirects sur l'agriculture et le tourisme, ...etc. Les risques de dégradation de la qualité des eaux souterraines sont nombreux et variés (Bouderbala et al. 2016). Les rejets des eaux usées domestiques et industrielles non traitées, et les utilisations intensives des engrais et pesticides en agriculture sont considérés comme les principales sources de pollution des eaux souterraines (Bouderbala et Gharbi 2017).

Les caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines sont très importantes pour déterminer les processus naturels qui se produisent dans un aquifère (par exemple, la dissolution ou la précipitation des minéraux, l'échange eau-roche, l'évaporation ...) et/ou les influences des activités anthropiques. Cela va permettre de déterminer l'origine de la composition chimique des eaux souterraines et par conséquent pour une gestion rationnelle des eaux souterraines (Touhari et al. 2014 ; Bouderbala 2019).

Cependant, l'évaluation de la qualité de l'eau peut être déterminée à l'aide de divers indices de qualité de l'eau, dont l'indice de qualité de l'eau (IQE) est l'un des outils les plus couramment utilisés pour évaluer la qualité de l'eau (Bouderbala 2017). Cet indice est une technique d'évaluation et de classification de la qualité de l'eau, et qui peut être cartographié au moyen des outils de géo-spatialisation afin de définir les changements spatio-temporels de la qualité des eaux (Mishra and Patel 2001 ; Fijani, et al. 2017).

Dans la plaine du Moyen Cheliff Occidental (MCO), les eaux souterraines jouent un rôle de plus en plus important dans le développement économique, et la sécurité hydrique. Elles sont considérées comme source potentielle d'approvisionnement en eau potable, l'irrigation et pour l'industrie. Cependant, l'absence, et la négligence d'un système de gestion, protection et préservation de ces eaux a provoqué une surexploitation de la nappe d'une part, et d'autre part la dégradation et la contamination de ces eaux par les différentes sources de pollution anthropique (les rejets des eaux usées non-traités, et l'utilisation intensive des fertilisants agricoles), ce qui a répercuté sur la qualité des eaux souterraines.

Devant cette situation délicate, il est devenu nécessaire de protéger et préserver cette ressource à l'aide des systèmes modernes tel que les systèmes d'information géographique, avec une caractérisation hydrogéochimique et l'évaluation de la qualité des eaux est une priorité pour les gestionnaires afin de mieux gérer ces ressources.

Dans la région du MCO, de nombreux travaux traitant des sujets en relation avec les eaux souterraines, comme les études hydrogéologiques réalisées par : [Achour \(1990 et 1997\)](#), [Salhi \(1994\)](#) et son aptitude à l'AEP et l'irrigation [Bradaï \(2005\)](#), alors que les eaux superficielles de la région ont l'objet des travaux de [Bettahar \(1996\)](#), et [Mokadem \(1998\)](#), et des solutions pour le traitement des eaux usées industrielles ont été traitées par [Hadbi \(1998\)](#). Ces travaux avaient pour but principal de proposer des solutions pour une bonne gestion quantitative et qualitative de ces ressources naturelles. Un autre aspect particulier a été traité, c'est la contamination des eaux souterraines de la nappe alluviale dans la plaine du MCO par les nitrates, dans les travaux de [Hennia \(2007\)](#), [Bettahar \(2010\)](#), et [Belmiloud \(2017\)](#).

Ce travail vise une l'étude des caractéristiques physicochimique des eaux souterraines de la plaine alluviale du MCO pour comprendre les principaux facteurs gouvernant l'hydrogéochimie, une évaluation de l'aptitude physico-chimique des eaux souterraines à l'alimentation en eau et à l'irrigation, une cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraine de la nappe alluviale à la pollution afin d'identifier les zones les plus sensibles à la pollution en vue d'une bonne gestion qualitative de cette ressource vitale en utilisant le système d'information géographique. Cette dernière est considérée comme un outil efficace pour la préservation et la protection des eaux souterraines de la nappe alluviale, et un outil de la prise de décision en matière de gestion des eaux.

Pour mieux répondre aux objectifs de ces étapes, cette thèse s'articule autour de quatre parties principales, et qui sont :

**Premier Chapitre :**

Il est essentiellement théorique, c'est une synthèse bibliographique sur les systèmes d'information géographique et leur utilisation dans le domaine de gestion et protection des eaux souterraines ;

**Deuxième Chapitre :**

Il est consacré à l'identification du site d'étude, tel que les caractéristiques géomorphologiques, hydro-climatologiques, géologiques, hydrogéologiques, et socio-économiques ;

**Troisième Chapitre :**

Il est réservé pour l'étude de caractérisation hydrochimique à l'aide des méthodes statistiques et diagrammes afin de déterminer le mécanisme qui contrôle la minéralisation des eaux souterraines de la nappe alluviale du Moyen Cheliff Occidental à travers les 45 analyses physico-chimiques, et sur l'évaluation et la cartographie de la qualité des eaux souterraines à la base de l'indice de qualité des eaux,

**Quatrième Chapitre :**

Il vise l'étude et la cartographie de la vulnérabilité des eaux à la pollution de la plaine alluviale de moyen Chélif Occidental à l'aide des systèmes d'information géographique, évidemment qui va conduire à la protection et préservation des eaux souterraine de la région d'étude.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale et recommandations.

*Chapitre I*

*Synthèse*

*Bibliographique*

## I.1. Introduction

Auparavant, les territoires et leur environnement étaient appréhendés soit par une représentation géographique traditionnelle à l'aide de plans et de cartes, soit par une approche comptable en constituant et en exploitant des bases de données alphanumériques (automatisées ou non). L'apport d'un Système d'Information Géographique (SIG) est de permettre une vision globale de ces territoires en proposant, par la mise en œuvre d'outils qui associent chiffres et cartes, de lier les deux domaines, de les enrichir, de les synthétiser. Les systèmes d'information géographique (SIG) sont devenus un moyen de plus en plus important de comprendre et de traiter les problèmes urgents de la gestion de l'eau et des ressources connexes dans notre monde. Les concepts et technologies SIG nous aident à recueillir et à organiser les données sur ces problèmes et à comprendre leurs relations spatiales. Les capacités d'analyse des SIG permettent de modéliser et de synthétiser l'information qui contribue à appuyer les décisions de gestion des ressources à un large éventail d'échelles, du local au mondial. Un SIG permet également de visualiser les caractéristiques des ressources, améliorant ainsi la compréhension à l'appui de la prise de décisions

Le système d'information géographique est une technologie qui permet l'analyse de données liées à des entités ayant une distribution géographique spatiale. Les SIG aident à comprendre l'analyse spatiale et sont donc applicables à une grande variété de disciplines.

## I.2. Définitions du SIG

Les systèmes d'information géographique, ou SIG, sont des outils informatiques et logiciels permettant de recueillir et d'analyser des données liées à des lieux géographiques et à leur relation avec l'activité humaine ou naturelle sur Terre. Les données SIG peuvent être utilisées pour collecter et analyser des données sur la surface de la terre, et pour créer des cartes en couches, des graphiques et des modèles 3D d'éléments géographiques tels que des montagnes, des rivières, des forêts, des rues ou des bâtiments. Les industries et les gouvernements utilisent les outils SIG pour mieux comprendre toutes sortes de choses, de la planification urbaine au changement climatique

Un système d'information géographique (SIG) est un outil informatique permettant de cartographier les événements qui existent, et qui se produisent sur Terre. La technologie SIG intègre des opérations de base de données courantes telles que l'analyse de requêtes et d'analyses statistiques avec les avantages uniques de visualisation et d'analyse géographique offerts par les cartes.

Il y'a plusieurs acronymes pour le mot SIG ;

- Système d'Information Géographique : **SIG** ;
- Système d'Information à Référence Spatiale : **SIRS** ;
- Système d'Information Localisée : **SIL** ;
- Système d'Information ..... : **SI.....** ;

**Tableau 01** : Historique du SIG

1920 - 1940	Première utilisation de machines à base électronique
1940 -1950	Les premiers systèmes informatiques ont évolué à partir de multiplicateurs et de calculatrices électroniques : calculateurs automatisés à séquence contrôlée (ASCC), calculateur électronique à séquence sélective (SSEC), UNIVAC, ordinateurs de la série IBM 600.
1950 - 1960	Des systèmes d'exploitation, des langages de haut niveau, des appareils d'impression ont été développés pour améliorer informatique
1960 - 1970	Les terminaux d'affichage ont d'abord été installés sur des systèmes informatiques ; les premiers systèmes d'information Géographique et les techniques de base de traitement des données spatiales sont entrés dans la technologie computer ; les ordinateurs centraux ont été développés.
1970 -1980	Les ordinateurs centraux et les mini-ordinateurs ont été popularisés en raison de leur grande capacité de traitement et de manipulation des données ; des SIG améliorés ont été mis au point grâce à une technologie plus avancée et ont été commercialisés ; les ordinateurs personnels ont été développé.
1980 - 1990	Applications des SIG dans les sciences naturelles et l'ingénierie, percées technologiques dans la technologie des SIG ; les ordinateurs personnels ont pris une forte emprise sur le marché informatique ; des postes de travail ont été développés
1990 - présent	Poursuite de la mise en œuvre du SIG dans les domaines de l'ingénierie et des ressources en eau ; popularité croissante des postes de travail ; installations mondiales de progiciels de SIG estimées à 510000, avec environ 750000 utilisateurs ; ces chiffres continuent d'augmenter.

La création et l'analyse géographique des cartes ne sont pas nouvelles, mais un SIG effectue ces tâches plus rapidement et mieux que les anciennes méthodes manuelles. Et, avant la technologie SIG, seules quelques personnes possédaient les compétences nécessaires pour utiliser l'information géographique afin d'aider à la prise de décision aux problèmes résoudre.

On peut donc retenir qu'un système d'information géographique est un outil d'aide à la décision destiné à gérer des données géoréférencées. Il vise à modéliser par des méthodes informatiques, le monde réel, et à utiliser la dimension spatiale des données pour effectuer des analyses. Le tableau suivant résume la définition d'un SIG :

**Tableau 02** : Décomposition du SIG

S	Système	Ensemble d'objet reliés et interagissant dans un but commun
I	Information	Elément de connaissance qui peut être stocké, traité ou communiqué
S.I	Système d'Information	Procédé, chaîne d'opération pour recueillir, stocker, analyser, manipuler et visualiser des données
G	Géographie	Science qui a pour objet la description et l'explication de l'aspect naturel et humain de la surface de la terre
SIG	Système d'Information Géographique	Ensemble logiciel permettant de gérer toute donnée localisée. Un tel système doit permettre de gérer simultanément les deux types de données, Graphiques et Alphanumériques

Les questions de base auxquelles un système d'information géographique doit répondre :

**OU ?** Inventaire d'un type d'objet dans tous les endroits où il se trouve, mise en évidence de sa répartition spatiale.

**QUOI ?** A tel ou tel endroit, que trouve-t-on ? Inventaire de tous les objets de l'espace concerné, nature des objets selon leur localisation, quantité, superpositions, proximités.

**COMMENT ?** Quelles relations existent entre les objets ou phénomènes ? Que traduit leur répartition spatiale ? Problématique de l'analyse spatiale, au cœur de la Géographie.

**QUAND ?** Des changements sont-ils intervenus, et si oui, quand ? Âge, évolution de tel objet ou phénomène, historique et actualisation des données, analyse temporelle

**ET SI ?** Que se passerait-il si tel scénario d'évolution se produisait ? Projection dans l'avenir, simulation, études de projet ou d'impact.

### **I.3. Structure d'un SIG**

Un SIG se compose de cinq composants principaux qui sont :

#### **I.3.1. Matériel**

Le matériel est l'ordinateur sur lequel fonctionne un SIG. Aujourd'hui, les logiciels SIG fonctionnent sur un large éventail de types de matériel, des serveurs informatiques centralisés aux ordinateurs de bureau utilisés dans des configurations autonomes ou en réseau.

#### **I.3.2. Logiciel**

Le logiciel SIG fournit les fonctions et les outils nécessaires pour stocker, analyser et afficher des zones d'information géographiques. Les principaux composants logiciels sont les suivants :

- Outils de saisie et de manipulation de l'information géographique
- Un système de gestion de base de données (SGBD)
- Outils prenant en charge les requêtes, les analyses et les visualisations géographiques
- Une interface utilisateur graphique (GUI) pour un accès facile aux outils

#### **I.3.2. Données**

L'élément le plus important d'un SIG est peut-être les données. Les données géographiques et les données tabulaires connexes peuvent être collectées à l'interne ou achetées auprès d'un fournisseur de données commercial. Un SIG intégrera une base de données SGBD, qui contient des données spatiales à d'autres ressources de données.

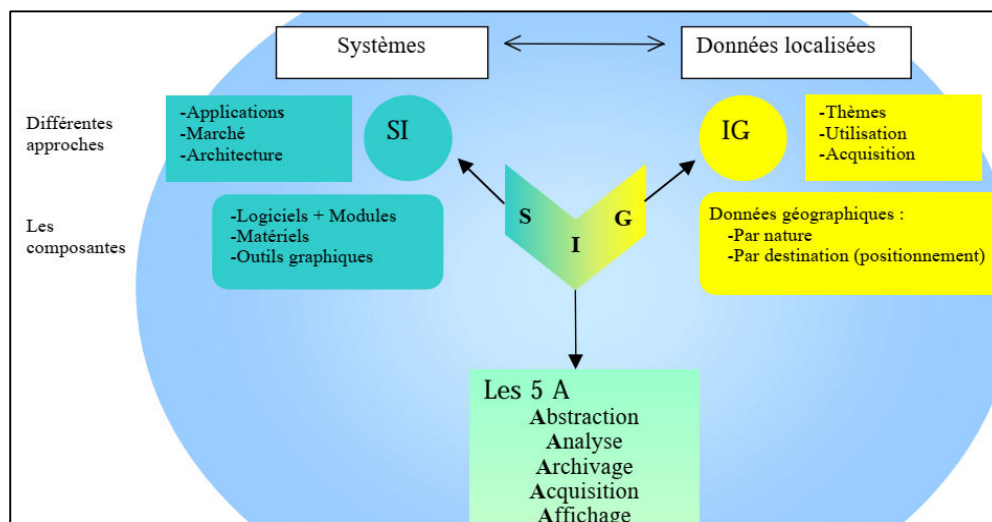
#### **I.3.3. Utilisateurs**

La technologie SIG est d'une valeur limitée sans les utilisateurs (personnes) qui gèrent le système et élaborent des plans pour l'appliquer à des problèmes du monde réel. Les utilisateurs de SIG vont des spécialistes techniques qui conçoivent et entretiennent le système à ceux qui l'utilisent pour les aider à effectuer leur travail quotidien.

#### **I.3.4. Méthode**

Un SIG réussi fonctionne selon un plan et des règles d'affaires bien conçus, qui sont les modèles et les pratiques opérationnelles uniques à chaque organisation.





**Figure 01 :** Fonctionnement d'un SIG (Source Ravalet, S. Panet, I. 2001)

Ces composants traduisent cinq fonctionnalités générales qui forment toute la capacité d'abstraction des SIG : Acquérir, Archiver, Analyser et Afficher. Cette description des SIG en termes de fonctionnalités est dite des "5 A" (Figure 01).

\* **Acquérir (Acquisition) :** Fonctions d'intégration et échange de données (numérisation, importation et exportation de données)

\* **Accéder :** Accéder aux Informations même à distance ;

\* **Archiver :** structuration et stockage de l'information géographique sous forme numérique. Transfert de données de l'espace de travail (en cours d'utilisation) vers l'espace d'archivage (Stockage) ;

\* **Analyser :** Analyse des données (méthodes quantitatives et statistiques) et analyse spatiale (opérateurs topologiques) ;

\* **Afficher :** Visualiser l'information géographique (Cartes, tables, documents textes .....).

#### I.4.Types de données utilisées par SIG

Les types de données dans les SIG, comprennent :

##### I.4.1. Données numériques

Données statistiques collectées avec une composante géographique et affichées sous forme de couche sur une carte. Les données démographiques du recensement d'une zone sont un exemple de données numériques.

##### I.4.2. Données vectorielles

Constituées de coordonnées X et Y, les données vectorielles peuvent décrire des points, des lignes ou des polygones reliés à un espace géographique. Les formats vectoriels conviennent le mieux aux données ayant des limites strictes, comme une rue ou un district politique.

### I.4.3. Données matricielles

Généralement des images numériques au format JPEG, TIF ou GIF, les données matricielles sont formées de grilles de cellules ou de pixels. L'imagerie satellitaire est un bon exemple de données matricielles.

### I.4.4. Réseaux linéaires

Une ligne en couches qui peut représenter plusieurs éléments, comme une route qui est également la limite d'une ville ou d'autres.

### I.5. Étapes de l'établissement d'un SIG

La façon dont le SIG est conçu dépendra de la façon dont l'information sera utilisée dans le processus décisionnel. L'établissement d'un SIG passe par au moins quatre étapes :

- Définition des objectifs ;
- Construction des bases de données spatiales et d'attributs ;
- Gestion des bases de données pour l'analyse géographique ;
- Présentation des résultats sous forme de cartes, etc.

La définition des objectifs ou le problème à résoudre à l'aide des SIG est essentiel au choix des bases de données spatiales et d'attributs. Une fois le problème défini et les couches et les données d'attributs sont identifiées, la création de bases de données implique :

- Conception de base de données ;
- Saisie de données spatiales ;
- Création de topologie ;
- Saisie des données sur les attributs.

La conception de la base de données nécessite d'identifier :

- Limites de la zone d'étude ;
- Système de coordonnées ;
- Couches de données ;
- Caractéristiques de chaque couche ;
- Attributs pour chaque type d'élément.

Les sources cartographiques sont des cartes bidimensionnelles de la zone ou des images de télédétection, les données sont saisies sous forme vectorielle ou raster. Dans le format vectoriel, la saisie de données spatiales et la création d'une topologie sont des composantes du processus global de numérisation.

Les données raster devront être vectorisées avant que les topologies puissent être créées. Les données attributaires sont créées sous la forme de fichiers de base de données avec un champ, le champ d'identification des entités, en commun avec la base de données spatiales créée lors du processus de saisie des données spatiales.

La gestion de la base de données consiste à traduire la carte numérisée en coordonnées réelle, à identifier et déterminer les couvertures à analyser et à maintenir la base de données à jours.

La présentation des cartes pour la prise de décision est facilitée par la création de cartes personnalisées à l'aide des diverses facilités disponibles dans les logiciels SIG.

### **I.6. Avantages et les contraintes du SIG**

Le système d'information géographique est fondamentalement utilisé pour répondre aux questions et prendre des décisions. Le SIG présente de nombreux avantages, notamment :

- Analyse de données spatiales dans un environnement complexe
- Capacité à intégrer différentes bases de données dans un même environnement
- Capacité à afficher et gérer des données spatiales dans un contexte spatial
- Production rapide de cartes et de produits graphiques spécialisés
- Effectue des analyses spatiales complexes
- Économies de coûts résultant d'une plus grande efficacité.
- Communication améliorée
- Meilleure information géographique et tenue de dossiers.
- Gérer l'information et les résultats géographiquement

Tandis que les contraintes des SIG se résument comme suit :

- Le manque de personnel spécialisé et compétant
- Coût élevé et problèmes techniques pour l'acquisition des données fiables.
- Non Standardisation des formats de données.
- Normes (ISO, AFNOR, ANSI, IEEE, OSF)
- Terminologie, Termes impropres et Vocabulaire immature.
- Contrôle de l'information et confidentialité.

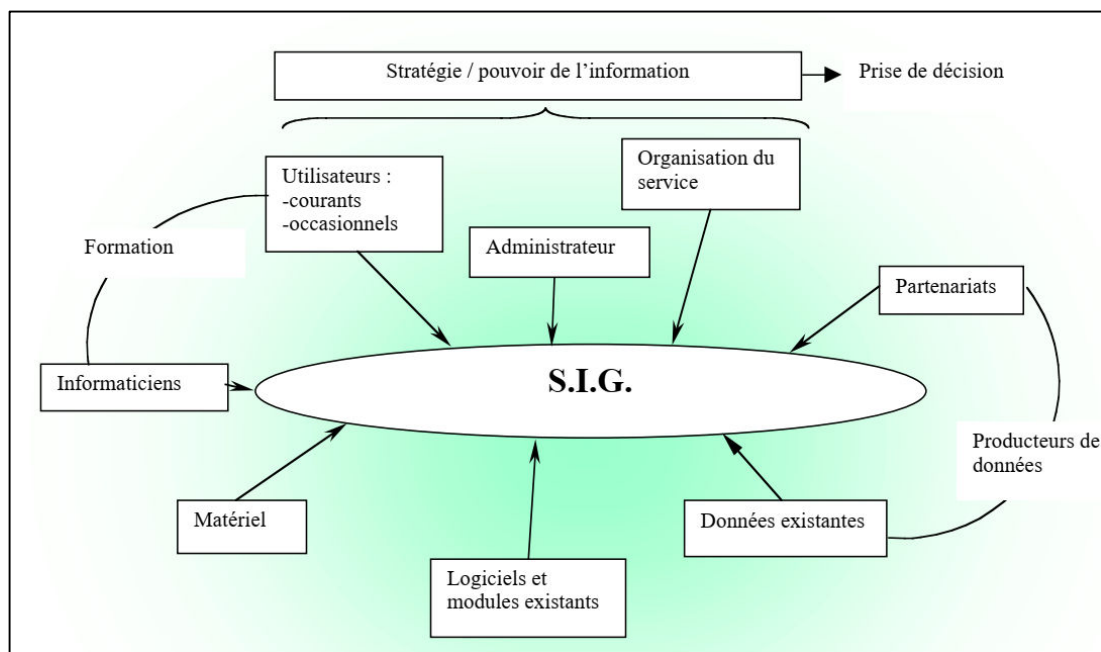
### **I.7. SIG Outil d'aide à la décision (DAO)**

DAO concerne la mesure les décisions, qui consistent à leur tour à faire des choix. DAO efficace consiste à faire les bons choix. Faire les bons choix dépend (a) de l'approche, (b) de l'information et (c) de la capacité et de l'autorité de suivre la ligne de conduite déterminée.

Il est clair que les décisions relatives aux urgences sont du type le plus difficile, liées à de multiples objectifs définis par un éventail de groupes, qu'elles ne sont généralement pas structurées au début d'un incident et qu'une gamme de niveaux de commandement et de contrôle sont impliqués.

Les premiers travaux ont établi ce que l'on appelle le modèle rationnel de prise de décision. Les gens sont confrontés à un problème, ils recueillent les données pertinentes pour le résoudre, analysent les données appropriées pour générer des informations à l'appui, évaluent les différentes options et prennent ensuite la décision optimale dans les circonstances. Il y a bien sûr un certain nombre d'hypothèses qui sous-tendent cela, à savoir que :

1. le problème est clairement défini ;
2. les données nécessaires pour comprendre les dimensions du problème sont disponibles ;
3. les outils permettant de générer des informations sur le problème sont disponibles et correctement appliqués ;
4. les différentes options sont identifiées avec précision ;
5. Ce qui constitue la décision optimale est compris et convenu.



**Figure 02 :** Contexte d'implantation d'un SIG. (Source Ravalet, S. Panet, I. 2001)

## I.8. Cartographie et SIG

Les SIG peuvent être utilisés à la fois pour résoudre des problèmes et prendre des décisions, ainsi que pour visualiser des données dans un environnement spatial. Les données géospatiales peuvent être analysées pour déterminer :

- (1) l'emplacement des caractéristiques et les liens avec d'autres caractéristiques,
- (2) l'endroit où se trouvent le plus ou le moins de certaines caractéristiques,
- (3) la densité des caractéristiques dans un espace donné,
- (4) ce qui se passe à l'intérieur d'une zone d'intérêt (ZI),
- (5) ce qui se passe à proximité d'une caractéristique ou d'un phénomène,
- (6) et comment une zone spécifique a changé au fil du temps (et de quelle façon).

### **I.8.1. Cartographie des lieux**

Nous pouvons cartographier l'emplacement spatial des caractéristiques du monde réel et visualiser les relations spatiales entre elles. Exemple : nous pouvons voir une carte des emplacements des mines de sable de fracturation et des zones de grès dans un carrière pour une zone X. Nous pouvons voir les modèles visuels dans les données en déterminant que l'activité d'extraction de sable de fracturation se produit dans la zone X avec un type spécifique de géologie.

### **I.8.2. Cartographie des quantités**

Les gens cartographient les quantités, comme les endroits les plus et les moins nombreux, pour trouver des endroits qui répondent à leurs critères ou pour voir les relations entre les endroits. Exemple : une carte de l'emplacement des cimetières dans une ville X. La carte elle peut montrer les emplacements des cimetières sous forme de points (densité de points) pour montrer où sont le plus et le moins.

### **I.8.3. Cartographie des densités**

Parfois, il est plus important de cartographier les concentrations, ou une quantité normalisée par superficie ou nombre total. Exemple : nous pouvons cartographier la densité de population d'une ville quel comme (chiffres de population totaux normalisés par la région en kilomètres carrés de secteurs de recensement.)

### **I.8.4. Trouver ce qui se trouve à l'intérieur**

Nous pouvons utiliser le SIG pour déterminer ce qui se passe ou les caractéristiques qui se trouvent à l'intérieur d'une zone ou d'une région particulière. Nous pouvons déterminer les caractéristiques de "l'intérieur" en créant des critères spécifiques pour définir une zone d'intérêt (ZI). Exemple : Voici une carte montrant un événement d'inondation ainsi que les parcelles et bâtiments visés par les taxes dans le canal de dérivation.

Nous pouvons utiliser des outils comme l'outil CLIP pour déterminer quels colis tombent à l'intérieur de l'inondation. De plus, nous pouvons utiliser les attributs des parcelles pour déterminer les coûts potentiels des dommages matériels.

### **I.8.5. Trouver ce qui est à proximité**

Nous pouvons découvrir ce qui se passe à une distance prédéterminée d'une caractéristique ou d'un événement en cartographiant ce qui se trouve à proximité à l'aide d'outils de géotraitement comme BUFFER. Exemple : nous pouvons voir une carte des temps de conduite à partir d'un emplacement X. Nous pouvons utiliser les rues comme un réseau et ajouter des critères spécifiques comme la limite de vitesse et les contrôles d'intersection pour déterminer jusqu'où un conducteur peut généralement obtenir dans 5, 10 ou 15 minutes.

### **I.8.6. Modification de la cartographie**

Nous pouvons cartographier le changement dans une zone géographique précise pour prévoir les conditions futures, décider d'une ligne de conduite ou évaluer les résultats d'une action ou d'une politique. Exemple : nous pouvons voir les cartes d'utilisation des terres d'une région donnée, montrant les changements dans le développement résidentiel pendant une série des années bien déterminée. Par exemple Le vert foncé montre la forêt, tandis que le jaune montre le développement résidentiel. Avec le SIG peut aider à éclairer les processus et les politiques de planification communautaire.

## **I.9. Domaines d'application des SIG**

Les systèmes d'information géographique sont appliqués dans divers domaines. Le nombre de ses applications ne fait que croître de jour en jour. Voici quelques-unes des applications bien connues concernant l'application des SIG :

### **I.9.1. Cartographie**

L'une des bases du SIG est la cartographie. Les gens ont appris à utiliser et à apprécier la valeur des cartes « nouveaux médias » et le SIG peut l'exploiter. Les cartes sont utilisées aux fins suivantes :

- Les gens utilisent des cartes pour de nombreuses activités, par exemple : pour communiquer et transmettre de grandes quantités d'information.
- Pour trouver certaines tendances, par exemple : âge médian de la criminalité.
- Pour voir les informations heures supplémentaires.
- Dériver de nouvelles informations en utilisant certaines analyses.
- Communiquer des idées, des concepts et des conceptions.
- Pour obtenir le rapport.
- Compiler de l'information géographique, c.-à-d. compiler et tenir à jour des inventaires d'information (par exemple : hydrologie, sols, géologie, transport et limites).

### **I.9.2. Arpentage (Surveying)**

Le SIG est également applicable ou utile pour les enquêtes. Le logiciel SIG fournit les outils nécessaires pour saisir et créer de nouvelles données avec des capacités mobiles avancées qui peuvent améliorer la collecte de données de terrain, les inventaires et l'intégration dans l'arpentage. L'aménagement des terres par l'arpentage comprend plusieurs domaines à prendre en considération, dont les suivants :

- Géométrie du site.
- Routes.
- Systèmes de drainage.
- Services publics.
- Limites de la propriété.
- Chantier.

### **I.9.3. Recensement**

L'application du Système d'Information Géographique (SIG) dans les sciences socioéconomiques est en croissance rapide, en particulier pour les données de recensement, qui est un outil puissant pour le développement mondial et la réduction de la pauvreté. Comme à l'heure actuelle, tous les pays du monde utilisent certains éléments du SIG pour effectuer leurs recensements de population. Le SIG en tant que système informatisé permet de saisir, de stocker, d'éditer, d'afficher, d'analyser et d'imprimer des données géographiquement référencées. Avec ce dispositif, le recensement de n'importe quel pays peut être analysé pour faire ressortir les faits suivants :

- Taille de la population.
- Estimations des revenus.
- Prévoit les besoins économiques futurs.
- Détermination du niveau de chômage.
- Détermination du niveau de vie.
- Formulation des politiques économiques.
- Nombre d'immigrants.
- Répartition des ressources.
- Fourniture d'équipements sociaux.
- Décisions d'investissement.
- Révèle le niveau de main-d'œuvre.
- Répartition des sièges parlementaires.

#### I.9.4. Défense

Le Système d'information géographique (SIG) joue un rôle très important dans les opérations militaires puisqu'il s'agit essentiellement d'opérations spatiales. Les concepts de commandement, de contrôle, de communication et de coordination dans les opérations militaires dépendent en grande partie de la disponibilité de renseignements exacts pour prendre des décisions rapides concernant les ordres opérationnels. Dans l'ère numérique actuelle, le SIG est un excellent outil pour les commandants militaires dans les opérations. L'utilisation des applications du SIG dans les forces de défense a révolutionné la façon dont ces forces fonctionnent. Le SIG est très utile pour l'armée, la marine, la police et l'aviation. Le commandement militaire qui exige des informations rapidement et les utilise rapidement pour se positionner dans une guerre future. Les forces militaires utilisent le SIG dans diverses applications, notamment :

- Cartographie.
- Renseignement.
- Gestion des champs de bataille.
- Analyse du terrain.
- Télédétection.
- Gestion des installations militaires.
- Surveillance des activités terroristes possibles.

#### I.9.5. Agriculture

L'application du SIG en agriculture examine comment cette technologie puissante peut aider les agriculteurs à produire une plus grande abondance de cultures et d'animaux avec plus d'efficacité et à moindre coût. La demande de SIG en agriculture comprend :

- Production de cultures de qualité avec des rendements élevés.
- Production d'animaux d'élevage avec un rendement maximal dans un court laps de temps en bovins, navires, chèvres, porcs, volailles, etc.
- Il accède à la qualité des nutriments du sol et à son amélioration possible grâce aux engrais et au fumier.
- Il fournit également des moyens possibles de stockage des produits alimentaires pour des utilisations futures.
- Il fournit également des moyens possibles de culture en utilisant le système d'irrigation en particulier pendant la saison sèche.



### I.9.6. Développement urbain

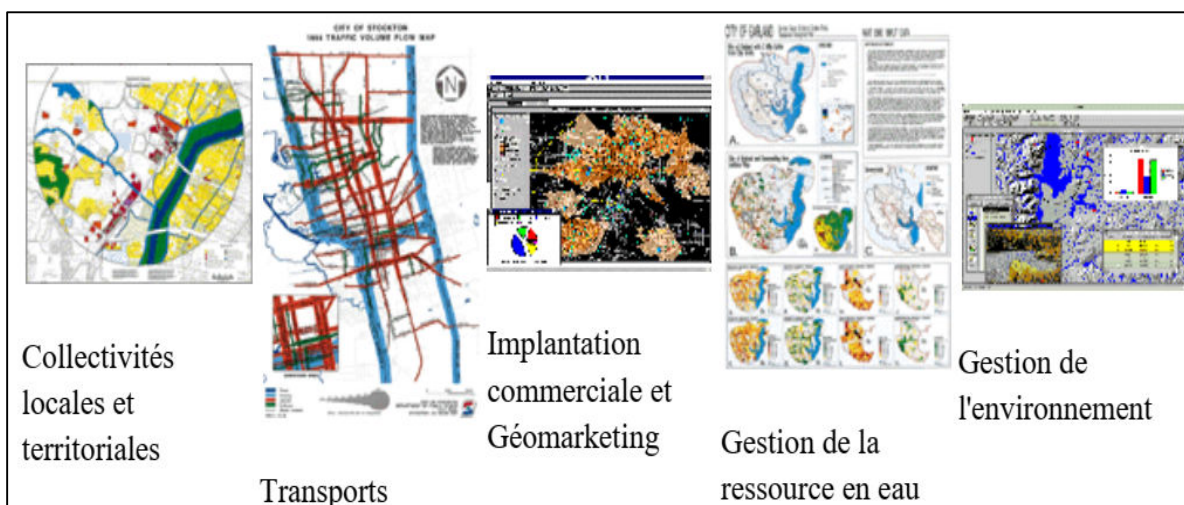
Le SIG est également utile et applicable au développement urbain. La base de données SIG fournit des données précieuses non seulement pour la planification des infrastructures comme les routes, les égouts et l'eau potable, mais aussi pour la gestion de services importants pour divers intervenants. Une base de données SIG adéquate fournit des données de planification essentielles pour le développement urbain, de la manière suivante :

- Planification des infrastructures.
- Aménagement du territoire.
- Planification environnementale.
- Planification du développement des bidonvilles.
- Développement économique local.
- Soutien aux moyens de subsistance.
- Planification liée à la santé et à l'éducation.

### I.9.7. Transports

Le SIG est un système d'information spécialisé dans l'entrée, la gestion, l'analyse et la communication d'informations géographiques sur le système de transport. Les SIG sont applicables au transport de la manière suivante :

- Le SIG contribue à améliorer la fluidité de toutes les routes.
- Le SIG aide les avions à voler facilement dans les airs,
- Il prévient également l'incidence des dangers du ciel sur terre et dans l'air.
- Il aide également les marins à naviguer dans les plans d'eau, y compris son départ et son arrivée à ses destinations.



**Figure 03 :** Domaines d'application des SIG (Abdelbaki, C 2012 ).

## **I.10. Application des SIG dans la modélisation des Eaux Souterraines**

Dans de nombreux cas, les données sur les eaux souterraines sont largement diffusées géographiquement. L'analyse des eaux souterraines et l'élaboration de modèles, en particulier sur de grandes superficies, exigent que les données soient consolidées et présentées dans un format dans lequel les données peuvent être consultées. Le système d'information géographique fournit la plateforme pour le faire en raison de sa puissance dans l'affichage de données spatiales. Les données provenant d'un grand nombre de puits peuvent être visualisées sur une seule carte et des tendances peuvent être observées. Les données peuvent être visualisées à grande échelle, ce qui permet de dégager des tendances qui n'ont peut-être pas été observées à petite échelle.

La modélisation des eaux souterraines est utile pour déterminer la quantité d'eau souterraine, la vulnérabilité à la pollution, et la recharge des aquifères..... Les outils SIG permettent de visualiser les nombreux facteurs qui ont un effet spatial.

Les bases de données SIG sur les eaux souterraines peuvent être utilisées comme des modèles simples pour montrer les attributs des eaux souterraines. Par exemple, une base de données SIG avec des lectures de niveau d'eau souterraine provenant de puits dans une zone donnée peut être utilisée pour développer des contours d'eau souterraine. En outre, les contours des eaux souterraines peuvent être extrapolés aux zones où les données sont rares. Il s'agit d'une application simple, mais importante, du SIG pour la modélisation des eaux souterraines.

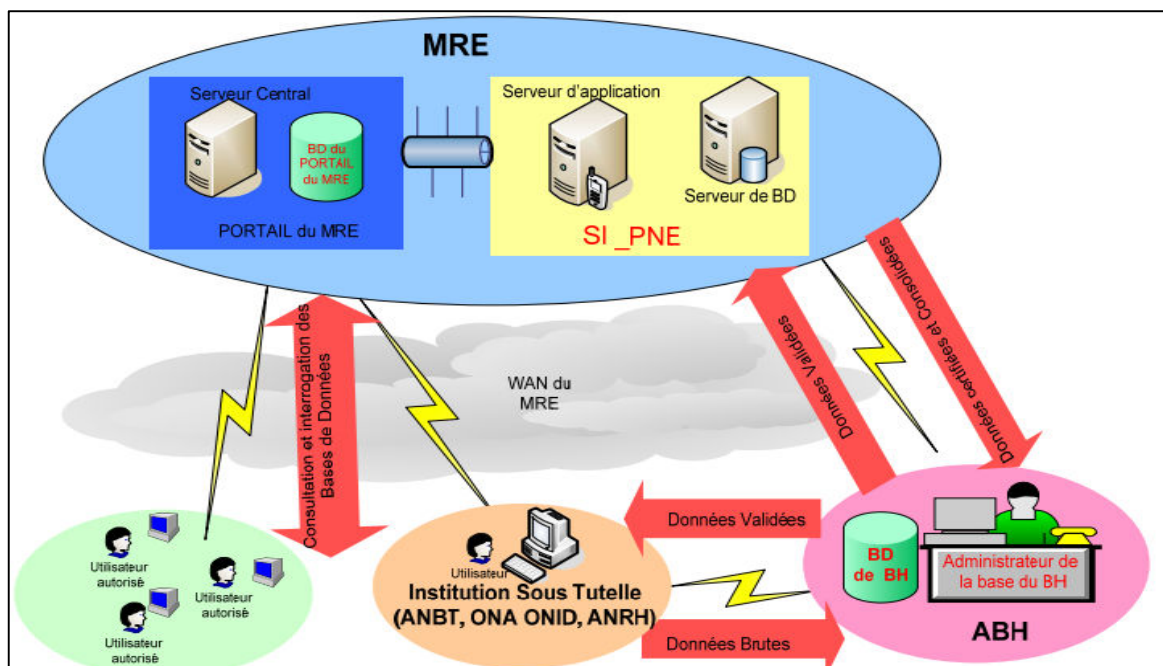
### **I.10.1. Système national d'information sur les eaux souterraines (SNIES)**

L'accès à l'information sur les eaux souterraines, est essentiel pour prendre les décisions nécessaires. Le Système national d'information sur les eaux souterraines est une base de données spatiale qui fournit cette information aux intervenants dans le domaine de l'eau. Cette base de données contient une grande gamme d'informations sur les eaux souterraines soumises par l'État, tel que le réseau des forages, ainsi que les coupes lithostratigraphiques, ainsi les zones des champs de captage des eaux souterraines et des limites de l'aquifère.

Les décideurs doivent avoir accès à l'information à l'échelle nationale, car les réseaux d'eaux souterraines chevauchent souvent les frontières administratives. Le système fera en sorte que des données uniformes à l'échelle nationale soient librement accessibles en ligne afin que des décisions plus éclairées puissent être prises sur la façon dont nous gérons les ressources en eaux souterraines vitales.

Le système peut être utilisé par une grande variété d'intervenants de l'eau, y compris les organismes responsables de l'eau (MRE, AGIRE, ANRH, DREW, ONA, ONID, ADE.etc), et même d'autre intervenants comme : les universitaires, et les établissements d'enseignement, les agriculteurs et l'industrie privée, et cela à diverses fins, notamment :

- Evaluations intergouvernementales des ressources en eaux souterraines ;
- Comptabilité de l'eau ;
- Evaluations du bilan hydrique ;
- Création de géovolumes 3D pour l'analyse d'une gamme d'informations, y compris la disponibilité des eaux souterraines, la modélisation et les volumes d'extraction annuels ;
- Analyse les Changements d'épaisseur de l'aquifère ;
- Création d'ensembles de données pour l'évaluation des ressources en eaux souterraines ;
- Modèles conceptuels et tridimensionnels des eaux souterraines à diverses fins, y compris l'analyse des interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface et l'évaluation des ressources en eaux souterraines.



**Figure 04** : système national d'information sur les eaux souterraines (Source : PNE 2010).

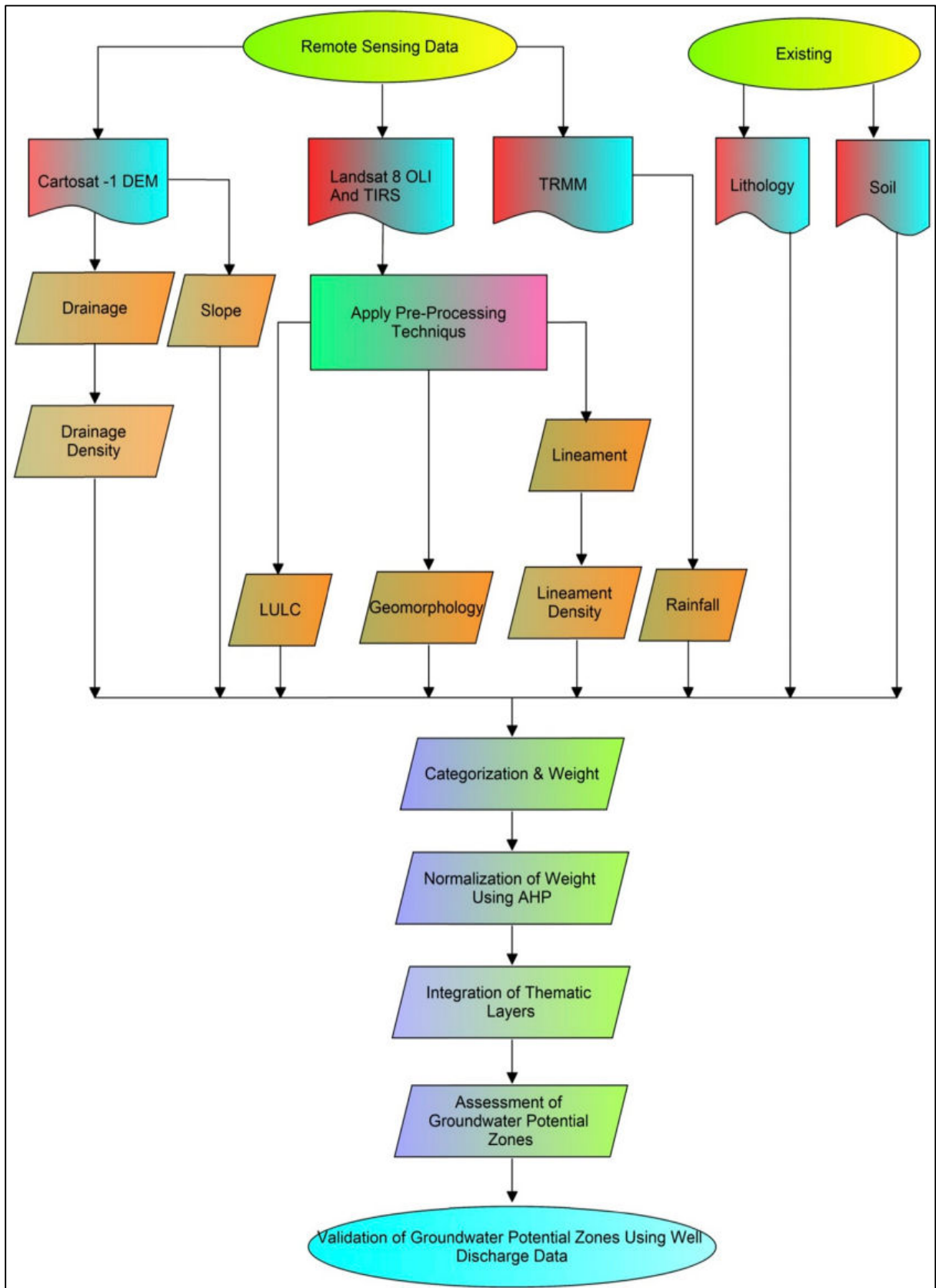
### **I.10.2. Application dans la délimitation des Zones potentielles ou zones de Recharge**

Le système d'information géographique est l'un des outils géospatiaux essentiels pour analyser de grandes quantités de données hydrogéologiques et modéliser les caractéristiques complexes. En outre, la capacité de générer des informations dans les domaines spatiaux et temporels, ce qui est essentiel pour une analyse, une prévision et une validation réussie, est l'un des avantages les plus importants de l'utilisation des SIG dans la surveillance et l'investigation hydrogéologique.

Il s'agit d'une technique plus fiable et plus rentable pour évaluer les zones de potentielles des eaux souterraines que les méthodes traditionnelles. Par conséquent, les SIG ont été largement utilisés dans la recherche hydrogéologique dans ces dernières années.

Au cours de la dernière décennie les systèmes d'information géographique (SIG) s'est révélée être une technique efficace pour déterminer les zones potentielles des eaux souterraines dans divers bassins versants et unités administratives, on utilisant les couches des données suivantes : les données topographiques, tels que la pente, l'altitude et la courbure du profil ; les facteurs liés à l'hydrologie tels que les précipitations, les débits et la densité de drainage ; et les facteurs géologiques tels que les failles, les plis, la lithologie, les facteurs du sol, tels que la géomorphologie, pédologie et l'occupation du sol, en suite ces données sont analysées et interpolés spatialement à l'aide d'une méthode d'interpolation en SIG, et à la fin un reclassées de la carte en plusieurs classes (très faible, faible, moyenne, élevée, très élevée par exemple), selon une classification bien déterminée pour délimiter les différentes zones des potentielles des eaux souterraines ([Derdour, et al 2022](#)).

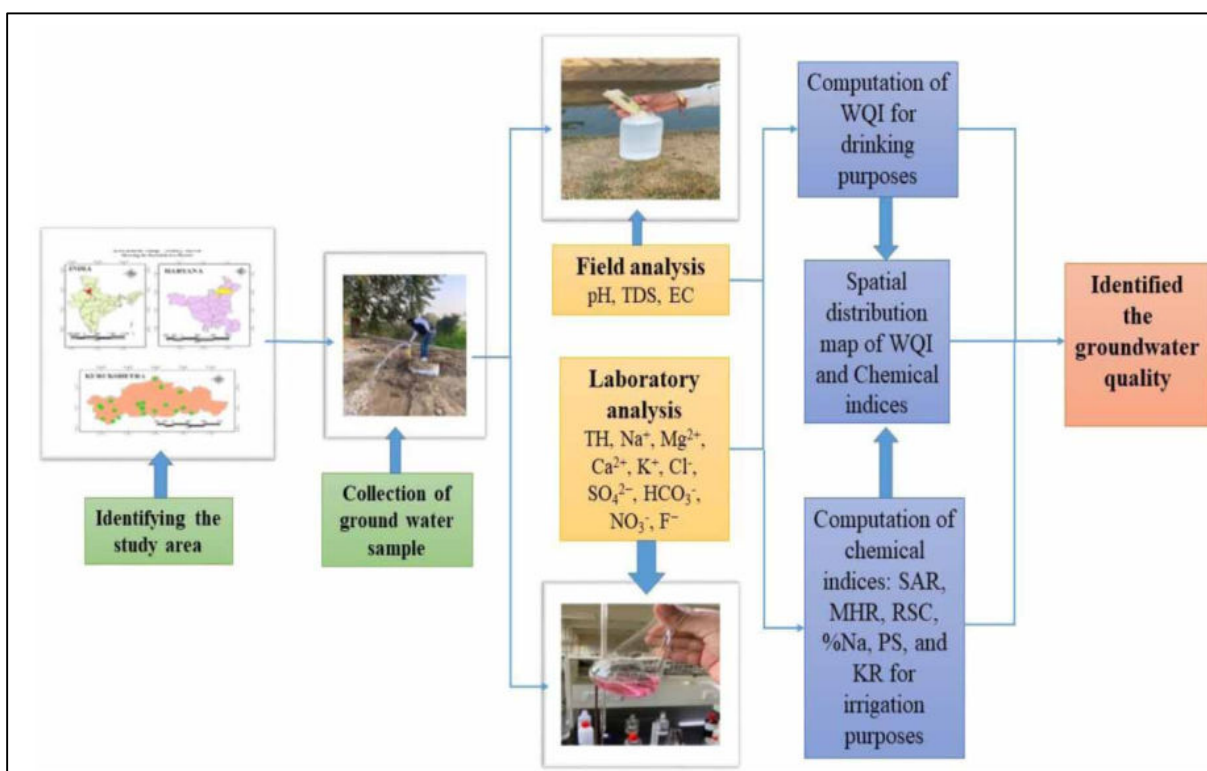
La méthodologie globale est illustrée dans la figure ci-dessous



**Figure 05 :** Organigramme méthodologique adopté pour délimiter les zones potentielles d’eaux souterraines (Source : Preetilata, M, et al. 2019).

### I.10.3. Application sur l'étude de la qualité des eaux souterraines

Dans ce dernier temps l'étude de la qualité des eaux souterraines à travers les systèmes d'information géographique, est devenue une technique rapide et rentable, pour créer des diverses cartes et projections de la distribution spatiale de la qualité des eaux souterraines à l'aide de l'indice de qualité (WQI) et le système d'information géographique (SIG), en utilisant des paramètres hydrochimiques tels que  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^{2-}$ , CE, pH et d'autres. Le SIG est utilisé pour l'évaluation de la répartition spatiale des divers paramètres de la qualité des eaux souterraines, en se basant sur la méthode d'interpolation pondérée en fonction inverse de la distance (IDW) par exemple (Ram et al., 2021), pour obtenir des cartes de distribution spatiale des classes de la qualité des eaux (Excellente, Bonne, Moyenne, Mauvaise, et Médiocre).



**Figure 06 :** Méthodologie adoptée pour cartographie de l'indice de qualité des eaux souterraines (Source : Ram et al., 2021).

#### **I.10.4. Application sur l'évaluation et la cartographie de la vulnérabilité à la pollution**

Un système d'information géographique est utilisé pour évaluer et cartographier la vulnérabilité des eaux souterraines. Les cartes de vulnérabilité peuvent être créées à partir des données sous forme des couches géographiques, tel que les données : l'hydrologiques, géologiques, hydrogéologiques, pédologiques, géomorphologies et topographiques, avec de nombreuses méthodes comme : DRASTIC, SINTACS, GOD, et SI..... (Oroji, B. 2019 ; Kirilas 2022). Par exemple, le logiciel ARCGIS utilise l'extension Spatial « Analyst » pour l'intégration et la répartition spatiale des scores pondérés, attribués aux paramètres de la méthode utilisée et leur représentation sous format shapefile. Avec l'extension « Spatial Analyst » les shapefiles sont convertis en Raster. Chaque raster représente la variation spatiale des scores pondérés. Le calcul des indices de vulnérabilité selon la méthode choisie se fait directement par un calcul d'addition appliquée sur les paramètres sous forme raster. Le résultat de ce calcul est l'élaboration d'une nouvelle couche d'information sous le format Raster représente la variation de l'indice de vulnérabilité dans la zone d'étude.

Les étapes de l'élaboration de la carte de vulnérabilité sont les suivantes :

- Collecte des données ;
- Numérisation et vectorisation des données ;
- Calcul des scores ;
- Attribution des scores pondérés ;
- Conversion des Shape files en Raster ;
- Calcul de l'indice de vulnérabilité.
- Elaboration de la carte indice de vulnérabilité
- Classification et élaboration de la carte de vulnérabilité.

#### **I.11. Conclusion :**

Dans ce présent chapitre, une petite synthèse bibliographique sur les systèmes d'information géographique d'une manière générale a été présentée, afin de montrer la structure, les types de données utilisées dans un SIG, et leur domaine d'application.

L'application des nouvelles technologies informatiques comme les SIG dans l'étude et l'investigation des eaux souterraines a permis l'analyse, et la prise des bonnes décisions pour la bonne gestion et protection des ressources en eau d'une manière générale.

# *CHAPITRE II*

## *Présentation de la Zone d'étude*



## II.1. Situation géographique

### II.1.1. Cadre régional

La zone d'étude (plaine du moyen Cheliff occidental) occupe un territoire d'environ 321 km<sup>2</sup> dans le bassin versant du moyen Cheliff occidental qui est formé par trois sous bassins versants codés respectivement 0122, 0123 et 0124, et appartenant lui-même au grand bassin hydrographique du Cheliff-Zahrez (Nord-Ouest de l'Algérie) à environ 200 Km à l'Ouest d'Alger la capitale, et à 30 Km vol d'oiseau de la mer méditerranée (Figure 07). La plaine est située dans le fuseau 31 et comprise entre les coordonnées UTM: 320 Km < X < 360,5 Km et 3980,5 < Y < 4010,5 Km

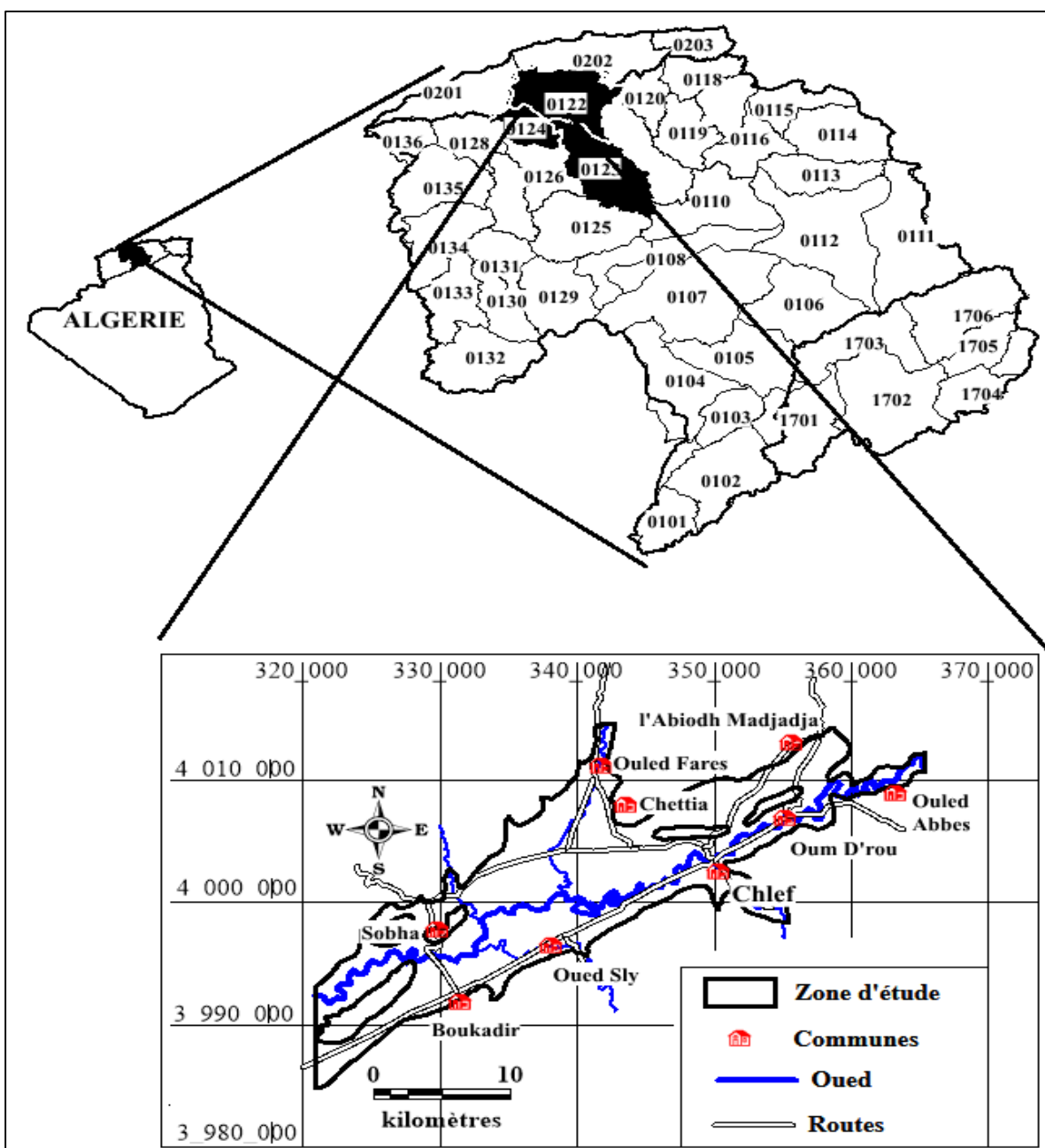


Figure 07 : Carte de la situation géographique de la zone d'étude

### II.1.2. Cadre local

La zone du moyen Cheliff occidental est située entre les coordonnées géographiques 36°3' & 36°15' de latitude Nord et 01°4' & 01°27' de longitude Est, et elle bordée géographiquement par :

- Au Nord par la partie Sud de la chaîne du Dahra d'altitude moyenne 600 m ;
- Au Sud par le massif de l'Ouarsenis d'altitude moyenne 1200 m ;
- Au l'Est par le seuil d'Oum Drou (ex : Pontéba) ;
- Au l'Ouest par le seuil de Boukadir (ex : Charone).

### II.1.3. Cadre administrative

La zone ainsi définie couvre la vallée du Cheliff, depuis 6 Km à l'amont d'Oum Drou, jusqu'à 3 Km en aval de Boukadir. Elle s'étend dans la partie centrale jusqu'à Ouled Fares dans la vallée de l'affluent dit Oued Ouahrane

Le moyen Cheliff occidental s'étend sur les communes : Sobha, Boukadir, Oued Sly, Chlef, Ouled Abbes, Oum Drou, L'Abiodh Medjadja, Chettia et Ouled Fares.

## II.2. Contexte morphologique et relief

Le bassin du moyen Cheliff occidental qui correspond à un bassin sédimentaire d'orientation Est – Ouest, est étroitement lié à son historique géologique depuis le tertiaire jusqu'à nos jours ; sa vallée constitue un vaste ensemble découpé en plusieurs unités par le réseau hydrographique et les reliefs, on distingue :

- ❖ La plaine de L'Abiodh Medjadja séparée de la plaine de Chlef, sur une dizaine de kilomètres, par l'anticlinal des montagnes rouges dont l'altitude varie de 160 à 200 m,
- ❖ La basse vallée de l'Oued Ouahrane formée par le triangle Ouled Fares, Ouled El Djillali et Ech Chettia,
- ❖ La zone alluviale du rive droite de l'oued Cheliff, représentant l'ensemble compris entre le Cheliff d'une part, les montagnes rouges prolongées par la route d'Ain Merane d'autre part,
- ❖ La zone alluviale du rive gauche de l'oued Cheliff qui se développe pour l'essentiel sur les alluvions du Cheliff et de ses affluents,
- ❖ La cuvette de Boukadir qui correspond à une zone déprimée des formations alluviales, limitée à l'est par le bourrelet de l'oued Taflout, au sud par les colluvions issues des calcaires et à l'ouest par le cône de déjection de l'oued Touchait.

La zone d'étude forme une étroite bande dans sa partie orientale d'une dizaine de kilomètres de largeur qui draine le Cheliff, avec des pentes variant de 0 à 3 % (Figure 08).

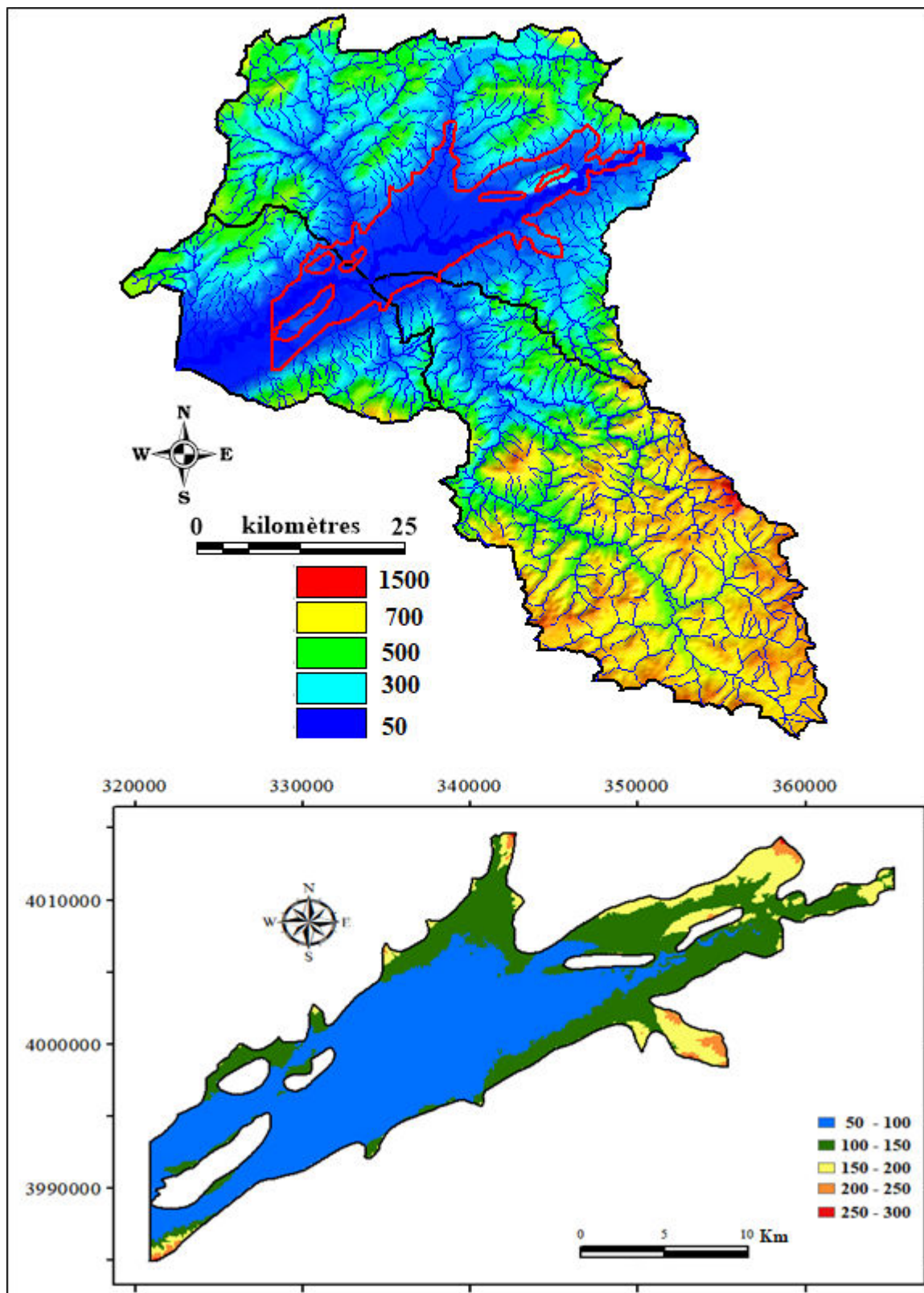


Figure 08 : Carte des classes d'altitudes dans le moyen Cheliff occidental

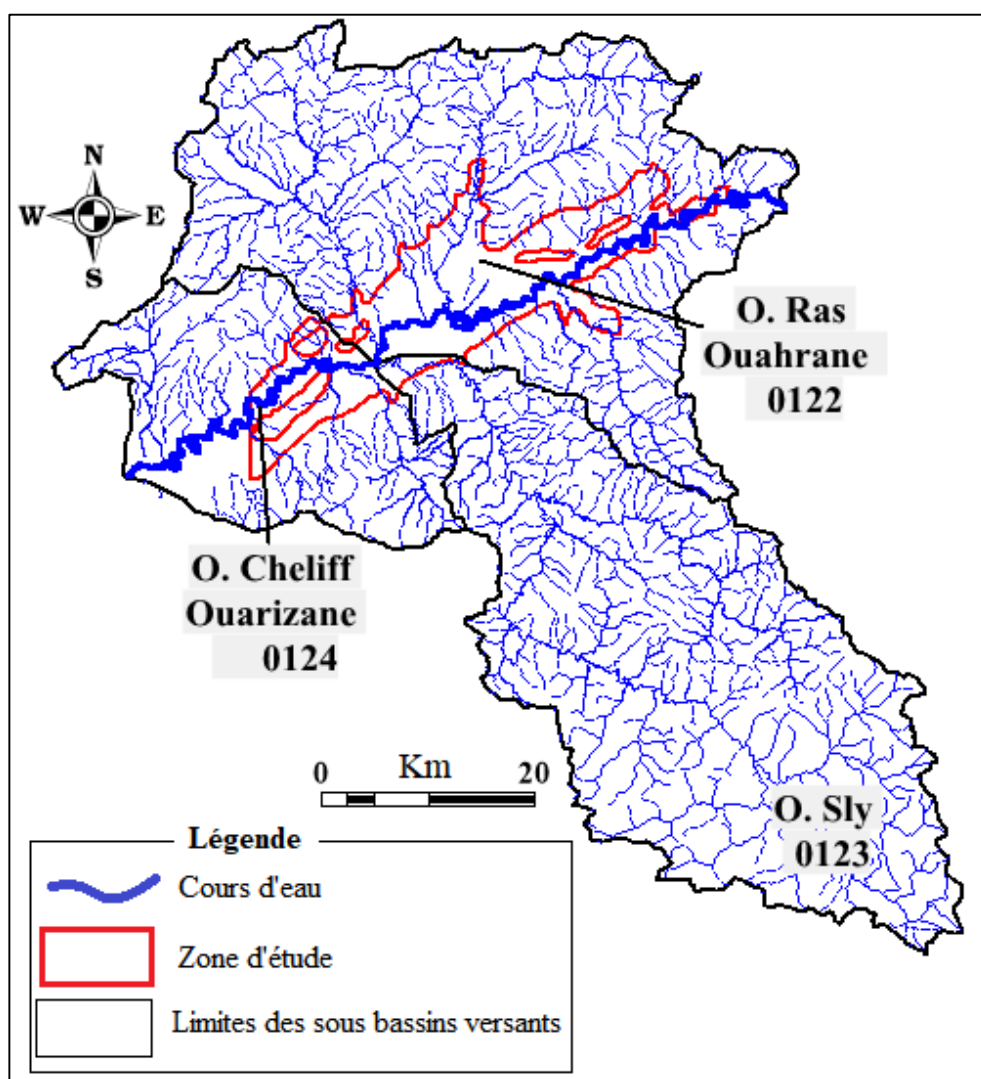
## II. 3. Hydrologie de la zone d'étude

### II. 3. 1. Hydrographie

Le bassin versant du moyen Cheliff occidental comprend les bassins collecteurs des Oueds suivants : l'oued Sly qui prend sa source dans les montagnes de l'Ouarsenis et se déverse dans le l'ouest Cheliff dans la localité du même nom (Oued Sly) située à une quinzaine de kilomètres de la ville de Chlef, l'oued Ras et l'oued Ouahrane prennent leur source dans les monts du Dahra, l'oued Tsighaout et l'oued Tafelout prennent naissance au niveau des piémonts des montagnes de l'Ouarsenis.

Les caractéristiques physiographiques des sous bassins ainsi définis sont présentés dans le tableau 03.

Le réseau hydrographique du bassin versant du moyen Cheliff occidental présente donc un chevelu hydrographique dense, avec une longueur totale de 1967 Km dont 646 Km à écoulement permanent et 1321 Km à écoulement temporaire (Figure 09).



**Figure 09** : Carte du réseau hydrographique du moyen Cheliff occidental

Le principal cours d'eau est l'Oued Cheliff, il traverse la zone d'étude sur 70 Km, et reçoit le long de son trajet les affluents principaux suivants :

- ✓ sur la rive droite : l'Oued Ras et l'Oued Ouahrane.
- ✓ sur la rive gauche : l'Oued Tsighaout et l'Oued Sly.

**Tableau 03** : Caractéristiques Physiographiques des sous-bassins versant du moyen Cheliff occidental (Source ANRH)

Sous Bassin		Symbol	Oued Ouahrane /Ras	Oued Sly	Oued Cheliff Ouarizane
Code du sous Bassin			0122	0123	0124
Superficie (Km <sup>2</sup> )		S	1438,452	1404,071	574,763
Périmètre (Km)		P	225,523	221,18	119,965
Indice de Compacité (Gravilus)		K <sub>G</sub>	1,66	1,65	1,4
Altitude max. (m)		H <sub>max</sub>	1150	1700	1000
Altitude moy. (m)		H <sub>moy</sub>	313	610	275
Altitude min. (m)		H <sub>min</sub>	100	100	75
Altitude médiane (m)		H <sub>méd</sub>	500	850	420
Longueur des cours d'eau (Km)	Permanents		225	285	136
	Temporaires		670	387	264
	Total		895	672	400
Densité de drainage (Km/Km <sup>2</sup> )	Permanente	D <sub>dp</sub>	0,156	0,202	0,236
	Temporaire	D <sub>dt</sub>	0,465	0,275	0,459
	Total	D <sub>d</sub>	0,621	0,477	0,695
Dénivelée Spécifique		D <sub>s</sub>	429	649	478
Longueur rect. Equiv (Km)		L <sub>r</sub>	97,7	95,74	47,95
Classement du relief		R	Assez Fort	Fort	Assez Fort

### II.3.2. Hydrométrie

Le réseau hydrométrique du Moyen Cheliff Occidental (MCO) installé par l'ANRH compte quatre (04) stations hydrométriques implantées sur le réseau hydrographique (Tableau 04).

**Tableau 04** : Caractéristiques des stations hydrométriques du MCO (Source ANRH 2004)

Oued	Dénomination	Code	Cordonnées (UTM)		Mise en Service	Q <sub>max</sub> (m <sup>3</sup> /s) (1987 à 2004)
			X (m)	Y (m)		
Cheliff	Ponteba	012203	362904	4011705	1958	67,76 (Mai 98)
Ouahrane	Ouled Fares	012201	340996	4010675	1972	26,60 (Avril 97)
Ras	Sobha	012204	330509	4000454	1972	3,47 (Avril 97)
Sly	Ouled Ben Aek	012311	345369	3985705	1965	//////////

Les données des débits pour les trois stations durant la période 1987/2004, recueillies par l'ANRH de Chlef montrent que les fluctuations des débits les plus grandes ainsi que les plus importants apports ont lieu entre le mois de Janvier au mois de Mars, alors que pour le reste de l'année, les apports sont moins importants, due à la brusque diminution des précipitations.

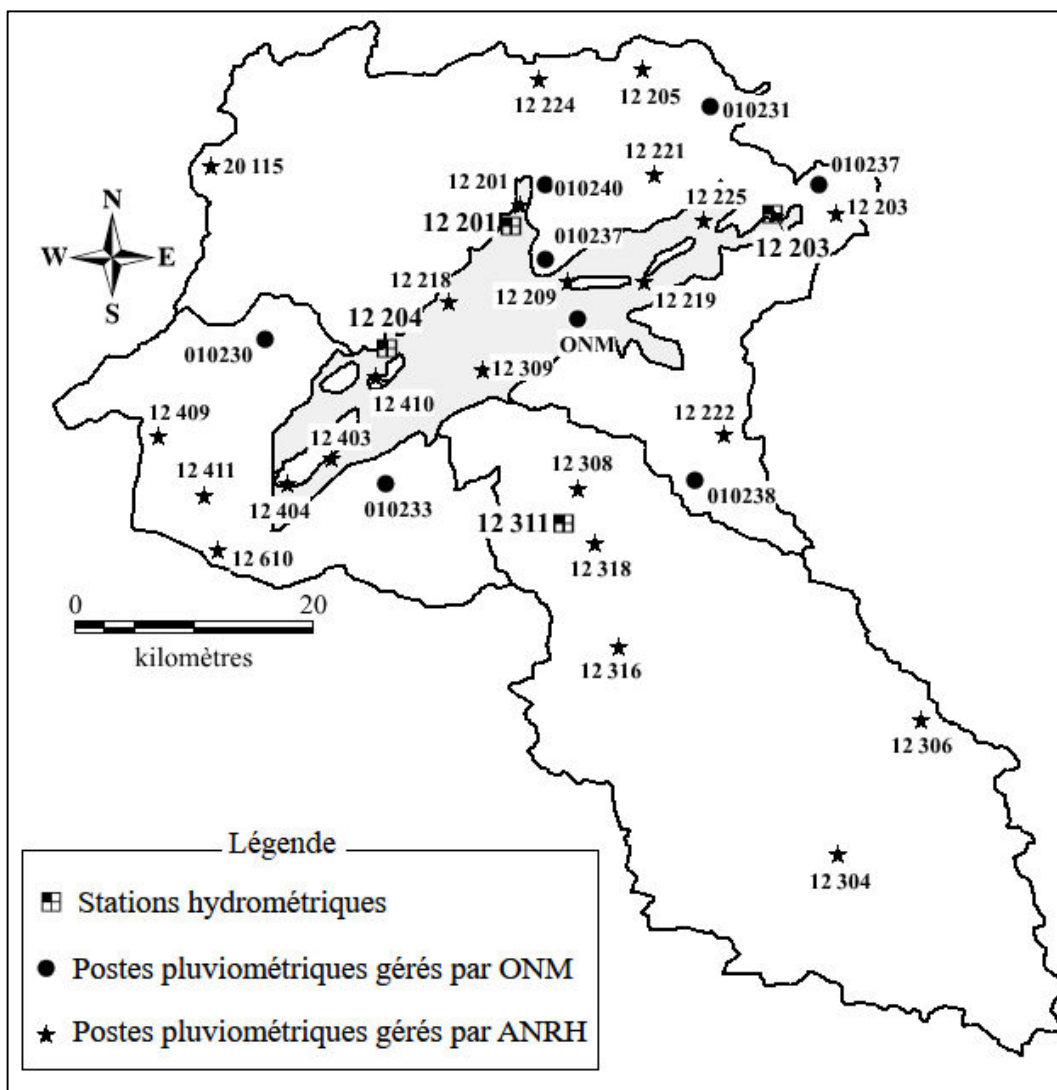
Les débits maximaux ont été enregistrés au mois d'Avril de l'année 1997 pour les deux oueds (26,60 m<sup>3</sup>/s à la station de Ouled Fares et 3,47 m<sup>3</sup>/s à la station de Sobha) qui coïncidé avec l'enregistrement d'une précipitation maximale à l'échelle de la zone d'étude (158,2 mm au niveau de la station ONM Chlef). A la station Pontéba, le débit maximum pour l'oued Cheliff est enregistré au mois de Mai de l'année 1998 (67,76 m<sup>3</sup>/s) lorsque la même station pluviométrique (ONM Chlef) a enregistré la précipitation maximale (81,8 mm) en cette période.

En période non arrosée, les oueds enregistrent des débits faibles à nuls et ne sont pratiquement alimentés que par les eaux souterraines et par les rejets urbains et industriels. La composition chimique des eaux des oueds sera donc liée à l'importance des débits des rejets des agglomérations par rapport aux débits des oueds. Pendant la période des averses ou des fortes pluies, la chimie des eaux des oueds est diluée par l'effet des eaux des pluies.

## **II. 4. Climatologie**

### **II. 4. 1. Précipitations**

Le bassin du moyen Cheliff occidental est couvert par un réseau de trente (30) postes pluviométriques dont vingt-deux (22) gérés par l'ANRH et huit (08) par l'ONM (Tableau 05 et Figure 10).



**Figure 10 :** Situation des postes pluviométriques et hydrométriques dans le bassin versant du MCO

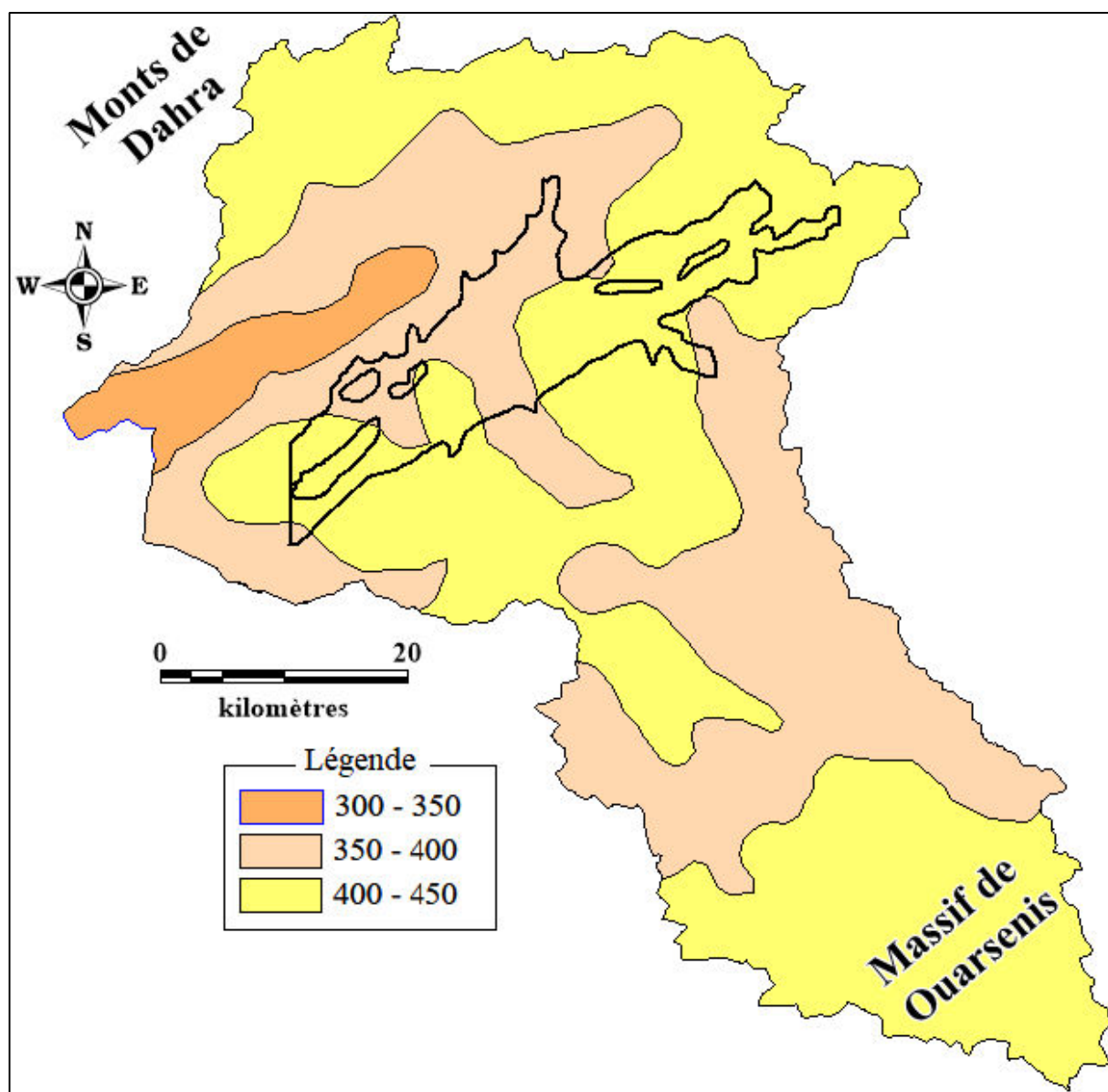
En général, le bassin du moyen Cheliff occidental subit l'influence méditerranéenne au Nord et continentale au Sud d'où un climat semi-aride avec des hivers froids et des étés chauds. La plaine du Cheliff est reconnue en Algérie par sa chaleur en été, notablement élevée ; en effet, elle a été citée comme " Curiosité" météorologique.

**Tableau 05 :** Les postes pluviométriques du moyen Cheliff occidental

Code du sous bassin	Dénomination	Nombre des postes pluviométriques gérés par :	
		L'ANRH	L'ONM
0122	Oued Ras + Ouahrane	11	6
0123	Oued Sly	06	/
0124	O. Cheliff Ouarizane	05	2
	<b>TOTAL</b>	<b>22</b>	<b>8</b>

La carte pluviométrique établie par l'ANRH en 2004 (Figure 11) pour la période d'observation entre 1968 – 2001, illustre clairement l'influence du relief sur la répartition spatiale de la pluviométrie. Aussi, les précipitations sont très irrégulières dans le temps et dans l'espace, où on distingue deux zones bien distinctes :

- Une zone avec une précipitation moyenne annuelle entre 400 à 450 mm situé sur les versants de Dahra (côtier) et l'Ouarsenis (Cheliff) ;
- Une autre zone située au niveau de la plaine incluse entre les monts de Dahra et le massif de l'Ouarsenis, avec une moyenne annuelle oscillant entre 300 à 350 mm.



(Extrait de la carte pluviométrique ANRH 2004)

**Figure 11** : Distribution des pluies moyennes annuelles dans le MCO (1968-2001)



### Les Précipitations mensuelles

Dix stations pluviométriques localisées dans la vallée du moyen Cheliff occidental :

Oum Drou (code : 12225), ONM-Chlef, DDA-Chlef (code : 12219) , Chettia (code : 12209), Ouled Fares (code : 12201), Es Souala Exp. (code : 12218) , Oued Sly (code : 12309), Boukadir BRG (code : 12410), Merdja (code : 14403) et Ferme Denat (code : 12404)), avec des périodes de fonctionnement variant d'une station à une autre. La station de Chlef qui appartient à l'ONM servira de référence, compte tenu de la fiabilité de sa donnée. Ces données se répartissent sur une échelle mensuelle de 1980 à 2019. Un résumé sur la statistique descriptive des données des précipitations est présenté dans le tableau 06. Elles montrent que les précipitations moyennes varient entre 200 et 550 mm/an. La saison hivernale avec une moyenne de 46 mm/mois et un pic au mois de novembre ce qui produit une recharge de la nappe et une dilution des éléments chimiques. Par contre, l'été est sec avec une précipitation faible d'environ 4 mm/mois, avec une évaporation rapide de cette dernière à cause des fortes températures de l'été.

**Tableau 06** : Variations mensuelles des précipitations (mm) au niveau de la station de l'ONM Chlef (1980-2019).

Station ONM Chlef (2000 -2019)													
Mois	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Févr.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Annuelle
Moyenne	18,5	34,3	52,1	50,8	43,1	43,2	39,2	35,26	26,2	5,1	2,2	3,4	356,2
Max	68,4	114,5	172,3	128,6	83,6	131,8	73,5	158,2	88,8	28,6	10,2	26,3	542,10
Min	0	1,3	0	2	0	0	0,4	0,7	0	0	0	0	220,60
Ecart type	17	27,5	40,1	32,9	25,6	34,5	25,1	33,4	22,1	8,1	3,6	6,8	
Saisons	Automne			Hiver			Printemps			Eté			
Moyenne	36,2			46,1			33,5			4,2			

L'écart type entre les valeurs des précipitations mensuelles est plus important pendant le mois de Novembre (40,1 mm).

### II. 4. 2. Température

Les températures mensuelles relevées à la station de l'ONM Chlef (Tableau 07) donne les valeurs suivantes :

**Tableau 07** : Températures mensuelles relevées à la station de l'ONM Chlef (Année 2019)

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
T°C	27	23,4	17	11,2	12,3	12,9	13,4	19,1	21,3	25,3	28,9	29,4

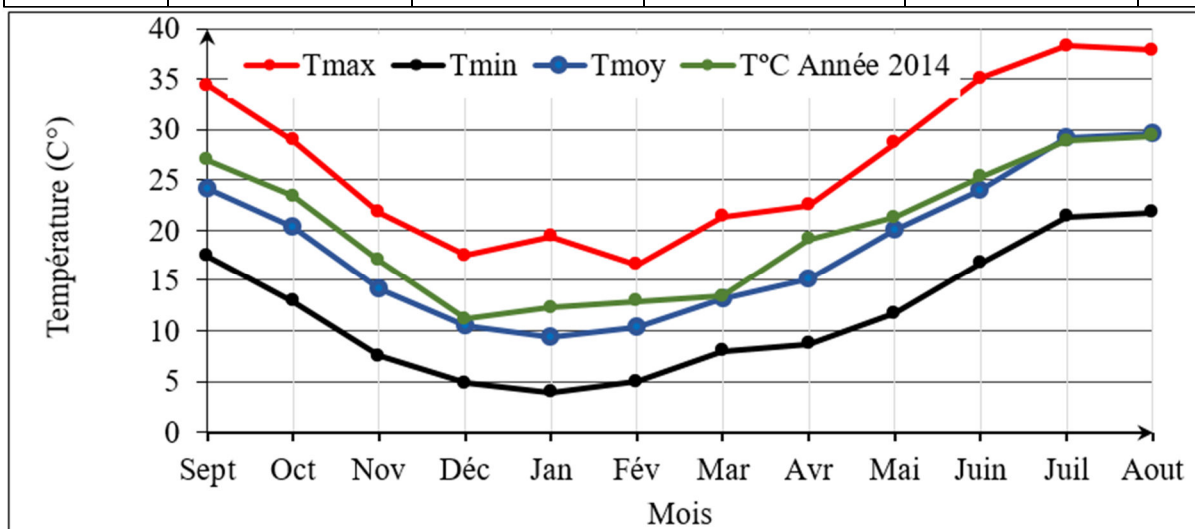
Les caractéristiques de la température indiquent d'un point de vue hydrochimique, que les valeurs élevées de la température pendant la période d'été, produisent une évaporation de l'eau

et en même temps une augmentation de la concentration de certains éléments chimiques dans la nappe.

Généralement, le régime thermique de la région d'étude est caractérisé par des températures basses en hiver et relativement élevées en été. Pour montrer la variation temporelle (mensuelles et interannuelles) et spatiale de ce facteur climatique, on utilisera les données enregistrées au niveau de la station d'ANRH Chlef pour la période 2000 - 2019.

**Tableau 08 :** Données des moyennes mensuelles et interannuelles des températures de la station de Chlef (2000 - 2019)

T(°C)	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Anl
T <sub>max</sub>	34,4	29	21,8	17,5	19,4	16,6	21,4	22,5	28,7	35,1	38,3	37,9	27
T <sub>min</sub>	17,4	12,9	7,5	4,8	3,9	5,0	8,0	8,7	11,7	16,7	21,4	21,8	12
T <sub>moy</sub>	24,1	20,4	14,1	10,5	9,4	10,4	13,2	15,2	20,10	24,	29,2	29,6	18
T <sub>moy</sub> saisonnière	Automne 19,5			Hiver 10,2			Printemps 16,20			Été 31			



**Figure 12 :** Représentation graphique des moyennes mensuelles de température

Les relevés des températures pour une période allant de 2000 à 2019 a donné une moyenne annuelle de 18°C. On peut aisément d'après la Figure 12 et le Tableau 08 distinguer les températures moyennes des quatre saisons de l'année pour la région d'étude :

- ✓ Un Automne s'étalant du mois de Septembre au mois de Novembre avec une température moyenne saisonnière de 19,5 C° ;
- ✓ Un Hiver qui s'échelonne du mois de Décembre au mois de Février avec une température moyenne mensuelle de 10,2 C° ;
- ✓ Un Printemps qui se développe du mois de Mars au mois de Mai avec une température moyenne mensuelle de 16,20 C° ;

- ✓ Et enfin un Été chaud réparti du mois de juin au mois d'Août avec une température moyenne mensuelle qui atteint 31 C° ;

Nous pouvons conclure que le secteur d'étude correspond à une zone semi-aride où la température moyenne annuelle est de 27.88°C.

#### II. 4. 3. Bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite

Cette méthode est utilisée pour les climats subhumide et semi-aride, et vu les caractéristiques intermédiaires du climat méditerranéen, cette formule est applicable. Elle est basée sur la notion de réserve d'eau facilement utilisable (RFU). On admet que la hauteur d'eau stockée dans le sol qui est reprise par l'évapotranspiration est de 100 mm au maximum (Gaude, 1976 in Debieche, 2002).

La méthode de Thornthwaite nous permet à partir des données de base (précipitation, et température), le coefficient thermique mensuel (K) et l'indice thermique mensuel (i) de calculer l'évapotranspiration potentielle selon la relation suivante :

$$ETP \text{ (mm)} = 16 \left( \frac{10 T}{I} \right)^a K \quad \text{où} \quad I = \sum i = \sum \left( \frac{T}{5} \right)^{1,514} \quad \text{et} \quad a = 0,016 I + 0,5$$

Le principe de calcul du bilan hydrologique de Thornthwaite est le suivant :

- si pour un mois  $P \geq ETP$  on pose que l'ETP = ETR, la quantité d'eau qui reste (P-ETR) va alimenter la RFU jusqu'à son maximum (100 m) et si elle dépasse cette valeur il y aura un excès ( $W_s$ ) qui va partir soit sous forme d'infiltration efficace vers la nappe, soit sous la forme de ruissellement

- si pour un mois  $P = ETP$  on pose que l'ETP = ETR, la quantité d'eau qui reste (P-ETR) va alimenter la RFU jusqu'à son maximum (100 m) et si elle dépasse cette valeur il y aura un excès ( $W_s$ ) qui va partir soit sous forme d'infiltration efficace vers la nappe, soit sous la forme de ruissellement.

- si  $P < ETP$ , la valeur de ETR = P + RFU, jusqu'à égalisation avec ETP. Si la RFU est nulle, il va se produire un déficit agricole  $Da = ETP - ETR$ , ce dernier paramètre représente alors le besoin des cultures à l'irrigation.

La lame d'eau ruisselée est calculée par la méthode de Tixeront –Berkaloff

$$R = \frac{p^3}{3 (ETP)^2} \quad \text{Si } P < 600 \text{ mm}$$

Le calcul de ces paramètres pour la période 2000 - 2019 est présenté dans le tableau 08 :

Tableau 09 : Bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite (période 2000 – 2019)

Mois	Janv.	Fév.	Mar	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Annuel
T °C	12,3	12,9	13,4	19,1	21,3	25,30	28,90	29,40	27,00	23,4	17,0	11,2	
i	3,91	4,20	4,45	7,61	8,97	11,64	14,24	14,62	12,85	10,35	6,38	3,39	<b>102,60</b>
K	0,7	0,8	1	1,2	1,3	1,3	1,3	1,2	1,1	0,9	0,8	0,7	
P (mm/mois)	57,6	43,4	47,8	11,4	9,9	24,1	0,6	2,7	35,1	38,1	29,8	88,5	<b>389</b>
ETP (mm)	16,52	20,90	28,34	72,66	99,42	143,72	191,10	183,00	139,78	84,18	37,75	13,51	<b>1030,87</b>
ETR (mm)	16,52	20,76	28,34	72,66	48,64	24,1	0,6	2,7	35,1	38,1	37,75	13,51	<b>338,78</b>
RFU (100 mm)	100	100	100	38,74	0	0	0	0	0	0	0	74,99	
P - ETP	41,08	22,50	19,46	- 61,26	- 89,52	- 119,62	- 190,50	- 180,30	- 104,68	- 46,08	- 7,95	74,99	
Da (mm)	0	0	0	0	- 89,52	83,36	207,9	199,4	140,9	41,98	0	0	<b>584,2</b>
Ws (mm)	41,08	22,64	19,46	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	<b>83,18</b>

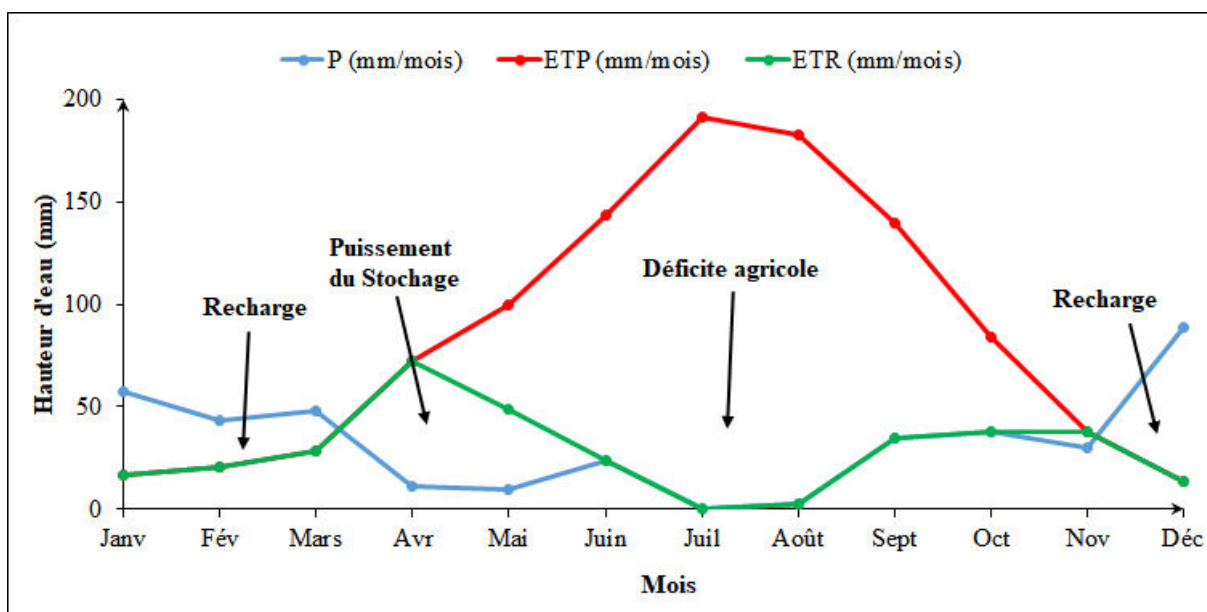


Figure 13 : Représentation graphique du bilan de Thornthwaite pour la période 2000 - 2019

Ce tableau montre que l'évapotranspiration maximum a été observée pendant les mois de juillet et d'août avec des valeurs de 191 et 183 mm, ce qui produit un déficit agricole et nécessite une irrigation des cultures. Par contre, pendant les mois de janvier et février, on observe un excès d'eau qui dépasse la RFU, le surplus d'eau va partir soit sous forme d'infiltration vers la nappe (une recharge), soit sous forme de ruissellement.

$$R = \frac{(389)^3}{3.(1030,87)^2} = 18,46 \text{ mm / an}$$

Cette formule a donné donc une valeur de 18,46 mm/an ce qui représente 4 % environ de la précipitation. On peut déduire l'infiltration selon la formule du bilan hydrologique :

$$P = ETR + R + I \pm \Delta S$$

L'application de cette formule nous a permis d'obtenir une infiltration estimée à 31,72 mm. Ces résultats (Tableau 10) nous montrent qu'une faible infiltration efficace dans la zone d'étude, est probablement en raison de la faible conductivité hydraulique des sols affleurants et des conditions climatiques défavorables, et aussi que les pluies n'assurent pas le stockage permanent de l'eau dans la zone racinaire, ce qui produit un besoin en eau pour les cultures (une irrigation) surtout pendant la période d'été. Ces besoins sont généralement assurés par les eaux des lâchers du barrage dans l'oued, comme le barrage de Sidi Yacoub (implanté dans la gorge d'Oued Lardjam sur l'oued Sly au Sud-Ouest de la ville de Chlef dans la commune de l'Ouled Ben Abdelkader), ou par des pompages des eaux de la nappe alluviale.

**Tableau 10** : Résultats du bilan Hydrologique

P (mm)	ETP (mm)	ETR		R		I	
		(mm)	%	(mm)	%	(mm)	%
389	1030,87	338,78	87,10	18,5	4,75	31,72	8,15

## II. 5. Cadre géologique

### II. 5. 1. Cadre géologique régional

Le moyen Cheliff occidental appartient au bassin sédimentaire Sublittoral du Nord Algérien. Ce bassin qui s'allonge d'Est en Ouest a été mis en place après la dernière phase tectonique (ANRH, 2004).

- Au Nord, cette dépression est séparée de la mer par le Tell septentrional, représentée par une suite de relief parallèle formé essentiellement des terrains jurassiques et créacés que l'on retrouve aussi dans la plaine (Dahra et massifs épi métamorphiques à schistosités du Doui, Rouina et Témoulga).
- Au Sud, le bassin est limité par le tell méridional représentant un ensemble de massif montagneux, le substratum est principalement marno-calcaire et correspond à l'autochtone tellien avec les différentes nappes.

Ces deux ensembles Telliens ont été structurés au cours du mésozoïque suite à plusieurs phases tectoniques :

- Une phase infra-crétacée compressive donnant des plis d'orientation NE-SW
- Une phase datée Aquitano-Burdigalienne compressive et profonde génératrice d'un nouvel épi-métamorphisme.

Pendant que les nappes Telliennes achèvent de se mettre en place, un nouveau cycle sédimentaire s'amorce, marqué par la transgression qui envahit le bassin et finit par déposer une épaisse sédimentation mio-plio-quaternaire.

Parallèlement le bassin est soumis pendant tout le Néogène à une importante tectonique qui continue jusqu'à l'actuel comme en témoigne l'intense activité sismique de la région.

### II. 5. 2. Cadre géologique local

Les ensembles lithologiques rencontrés dans la plaine sont : les terrains néogènes et quaternaires dans la zone centrale du bassin ; le substratum, essentiellement secondaire sur les bordures du bassin représenté par (Figure 14):

- Les monts de l'Ouarsenis au Sud, du Dahra au Nord et par les massifs épimétamorphiques à schistosités du Doui, Rouina et Temoulga à l'Est ([Kireche, 1977](#) in [Achour, 1997](#)).
- Les terrains allochtones mis en place lors des différentes phases tectoniques alpines (Eocène moyen, Miocène inférieur).

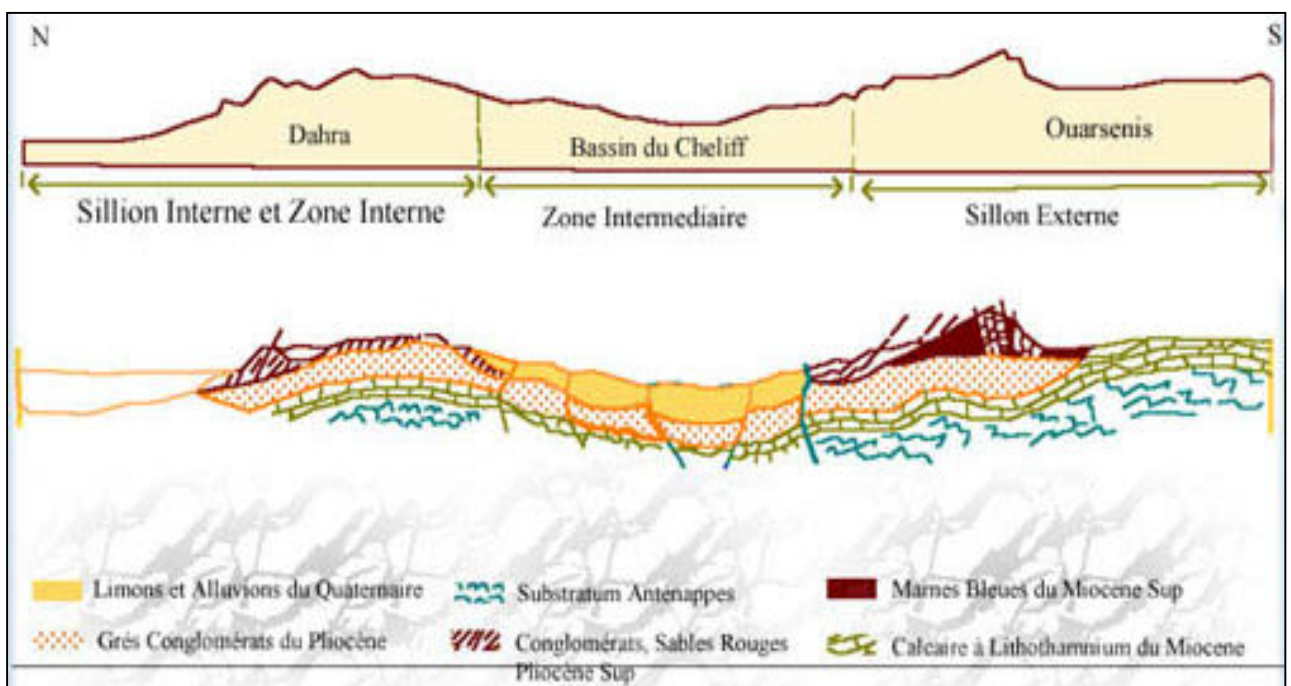


Figure 14 : Coupe géologique

## Lithostratigraphie

Le log stratigraphique synthétique du moyen Cheliff occidental est montré dans la figure 15. La région d'étude comprend deux ensembles lithologiques :

- Les formations anténéogènes.
- Les formations néogènes et quaternaires.

### II-5-2-1-Formations Anténéogènes

Elles sont d'âges crétacés inférieurs – oligocènes, le substratum affleure en îlots dans le bassin du moyen Cheliff occidental (Mattauer, 1958).

### II-5-2-2-Formations néogènes et quaternaires

Les terrains néogènes correspondent à une épaisse accumulation de dépôts mio-plioquaternaire post nappes reposant en discordance sur les formations plus anciennes.

**A/ Le Miocène :** il est formé du :

#### A.1/ Miocène Inférieur (Burdigalien)

Il affleure largement sur la bordure nord du bassin et également sur la bordure sud sur plus de 100Km, le long du massif de l'Ouarsenis dans la vallée d'Oued Sly.

Cette série miocène débute par des conglomérats et des poudings qui passent vers le haut à des grès argileux noirâtre de 100 m d'épaisseur. Ces grès deviennent plus argileux en montant dans la série et passent à une épaisse série monotone d'argile et de marnes bleues à noirâtres qui présentent 700 m d'épaisseur au niveau des bordures du bassin.

#### A. 2/ Miocène Supérieur (Vindobonien)

Il comprend dans sa série classique les termes principaux suivants :

- Les formations de base constituées par les marnes bleues avec des niveaux généralement détritiques.
- Les séries terminales représentées par les marnes à tripolis et des formations gypseuses.

Ce miocène supérieur affleure largement au Sud de Boukadir avec une base de calcaire à lithothamniées, puis des grès grossiers, des conglomérats et des marnes. A l'Ouest de Boukadir, il est représenté par une faible épaisseur de calcaires à algues.

A Oued Sly, Sud de la ville de Chlef, il est formé par les calcaires à lithothamniées qui reposent sur un substratum crétacé.

**B/Pliocène:** Dans le bassin du moyen Cheliff, le pliocène représente un cycle sédimentaire complet débutant par une transgression sur les séries gypseuses de la fin du miocène pour se terminer par la régression astienne. Il est formé par la succession des dépôts suivants :

- niveau détritique de base.
- marnes bleues et calcaires construites (plaisancien).
- grès marins (astiens).
- grès continentaux (pliocène terminal).

On distingue un pliocène marin et un pliocène continental :

**B.1/Pliocène marin :** formé par :

- **le Plaisancien:** Ce niveau est représenté par une série de marnes bleues très comparables aux marnes bleues du miocène. Elles sont souvent plus claires, grisâtres et même blanchâtres parce que plus carbonatées et parfois sableuses.

Le plaisancien passe progressivement dans sa partie supérieure à des marnes sableuses et à des sables argileux formant tous les termes de passage aux grès astiens. L'épaisseur de cet ensemble varie de 0 à plus de 700 m des bordures aux zones axiales du bassin.

- **l'Astien :** Représenté par une série marine finement sableuse ou gréseuse, de couleur jaune fauve, les grès sont souvent pulvérulents à ciment calcaire et peuvent localement passer à des calcaires gréseux. L'astien affleure assez largement sur les plateaux de Medjadja (S.E du Dahra). Il plonge régulièrement sous la plaine du Cheliff, passant d'un pendage de trente degrés à l'horizontal au centre de la plaine.

**B.2/Pliocène continental :** Il est formé par des sables et des grès à Hélix souvent d'origine dunaires. Ces derniers succédant avec une certaine continuité de sédimentation aux grès marins Astiens, débutant après quelques alternances de niveaux marins et continentaux, par des dépôts fluviatiles et lacustres renfermant des lentilles irrégulières de sables grossiers et graviers. Le pliocène continental affleure largement sur toute la bordure S.E. du Dahra. Au Sud du Cheliff, sur la bordure de l'Ouarsenis, le pliocène disparaît complètement. A ce niveau, le quaternaire vient recouvrir directement les calcaires gréseux du miocène.

Les sédiments miocènes et pliocènes sont très salifères ; il est très probable que cette salure provienne en partie des produits de remaniement des formations triasiques (Scet- Agri, 1984).



### **C/Les terrains quaternaires**

Ils sont d'origine continentale, on distingue un quaternaire ancien et un quaternaire récent :

**C.1/Le quaternaire ancien:** Les dépôts du quaternaire ancien affleurent dans les monts de Medjadja, les montagnes rouges et la bordure Sud de la dépression Cheliff-Oum Drou.

Ils sont représentés essentiellement par des conglomérats mais dans le détail, on distingue quatre ensembles plus ou moins différenciés :

- Un premier ensemble à la base, épais et franchement conglomératique, vient ensuite un ensemble conglomératique aussi, mais dont la limite entre les bancs est soulignée par des niveaux à ciment calcaire. Il s'ensuit un troisième ensemble sablo-conglomératique. Des dépôts du quaternaire ancien se terminent par des conglomérats à ciment rouge.

L'épaisseur de ces dépôts est en moyenne de 100 à 120 m mais ils peuvent atteindre localement des épaisseurs beaucoup plus grandes au synclinal de Boukadir et d'Ouled Farès (200 m d'épaisseur).

**C.2/Le quaternaire récent :** Il correspond à des alluvions dont le caractère essentiel est la prédominance des éléments fins (limons). Ces derniers correspondent à d'anciennes vases asséchées qui recouvrent le centre de la plaine. Quant aux alluvions actuelles, elles forment surtout le lit majeur de l'Oued Cheliff et de ses affluents. Elles sont formées de galets et cailloux bien arrondis.

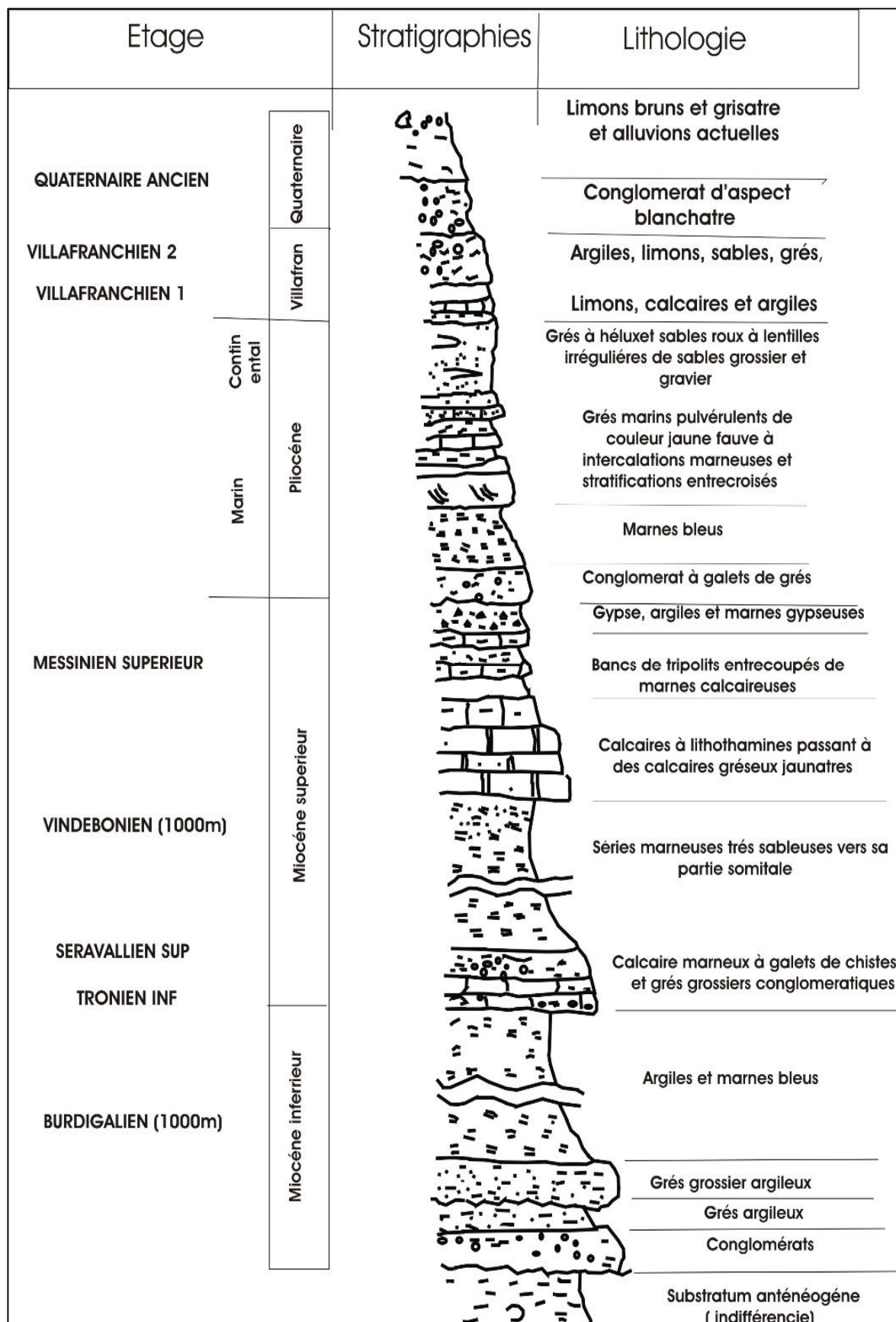


Figure 15 : Stratigraphie synthétique du moyen-Chélif occidental d'après Mattauer (1958)

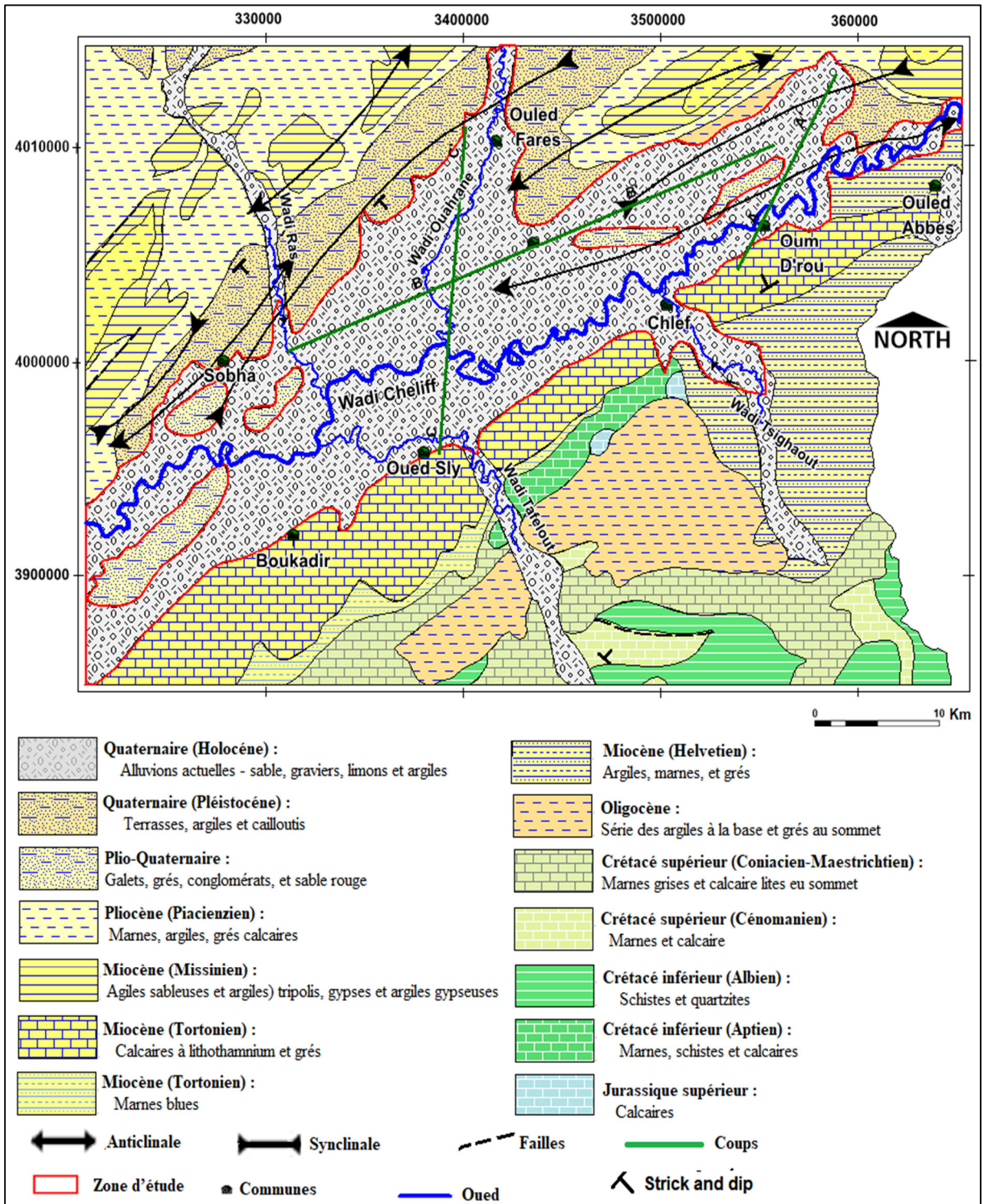


Figure 16 : Carte géologique de zone d'étude (Source ANRH 2012)

## II. 6. Cadre Hydrogéologique

### II. 6.1. Identification des principaux aquifères

L'étude géologique, l'analyse lithostratigraphique et structurale du bassin MCO nous ont permis de distinguer les formations susceptibles de constituer des aquifères :

- Les calcaires grumeleux à lithothamnium du Miocène supérieur (nappe à calcaires lithothamnium) ;
- Les formations des grès et sables de base du Pliocène (nappe des grès et sables astiens) ;
- Les formations des graviers, grès, sables et conglomérats du Quaternaire

#### A) Aquifère des calcaires à lithothamnium du Miocène supérieur

Les calcaires du miocène affleurent le long de la limite Sud de la vallée du moyen Cheliff occidental avec un pendage peu accusé N – NO. L'observation des affleurements et des données des forages suggère la présence d'espaces vides et des fissures internes ouvertes provoquées par la dissolution des carbonates sous l'influence de l'infiltration de l'eau de pluie particulièrement le long de contact. L'aquifère s'est développé dans ces espaces vides ([ANRH, 2004](#)).

#### B) Aquifère des grès du Pliocène (Astien)

Le pliocène marin est une suite d'argiles et de marnes, avec des couches minces des grès. Il affleure au Nord de la vallée du Cheliff.

#### C) Aquifère alluvionnaire (Quaternaire)

Des sédiments détritiques d'âge sub-pliocène quaternaire forment le remblai de la vallée. Ces sédiments incluent des argiles et des marnes épaisses avec des lits de sables de graviers et de conglomérats.

Les roches du pliocène et celles du quaternaire plus anciennes sont plus consolidées. Elles contiennent des grès et des conglomérats avec une cimentation argileuse ou calcaire.

Les descriptions lithologiques des forages ([ANRH, 2004](#)) indiquent que plus de 20 % des matériaux traversés sont décrits comme étant des sables, des graviers et des grès. Elles montrent également des profondeurs allant de 12 à 300 m avec une profondeur moyenne de 66 m.

L'examen des coupes lithologiques montre également :

- Qu'au-dessous de la zone des sols, on trouve une importante épaisseur de matériaux argileux (souvent décrits comme argile plus plastique ou compacte, argile limoneuse ou sableuse).

Les épaisseurs moyenne et maximale enregistrées sont de 23 m et 50 m. Ce profil argileux épais se trouve dans une grande partie de la zone centrale dans la vallée du Cheliff ;

- Une couche mince de sable fin de 1 à 3 m d'épaisseur se trouve parfois à l'intérieur de la partie supérieure de ces sédiments argileux généralement entre 9 et 15 m de profondeur. Elle est invariablement rapportée comme contenant des eaux salées, la répartition de cette couche est irrégulière et semble être horizontalement discontinue ;

La répartition des sables perméables et des graviers à l'intérieur des profils des forages qui traversent les sédiments plio-quaternaire a été examinée. L'épaisseur et le pourcentage des matériaux productifs, donc crépinables représentent au moyenne 21 % de la coupe et peuvent atteindre localement 80 % ;

L'intervalle allant de la surface du sol à 50 m de profondeur contient peu de matériaux perméables (seul 12 % de l'épaisseur peut être productif). En revanche l'intervalle allant de 50 à 100 m contient au moyenne 60 % de sable et de graviers crépinables.

La potentialité en eau de cette nappe est estimée à 11 Hm<sup>3</sup>/an (Source ABH-CZ 2004)

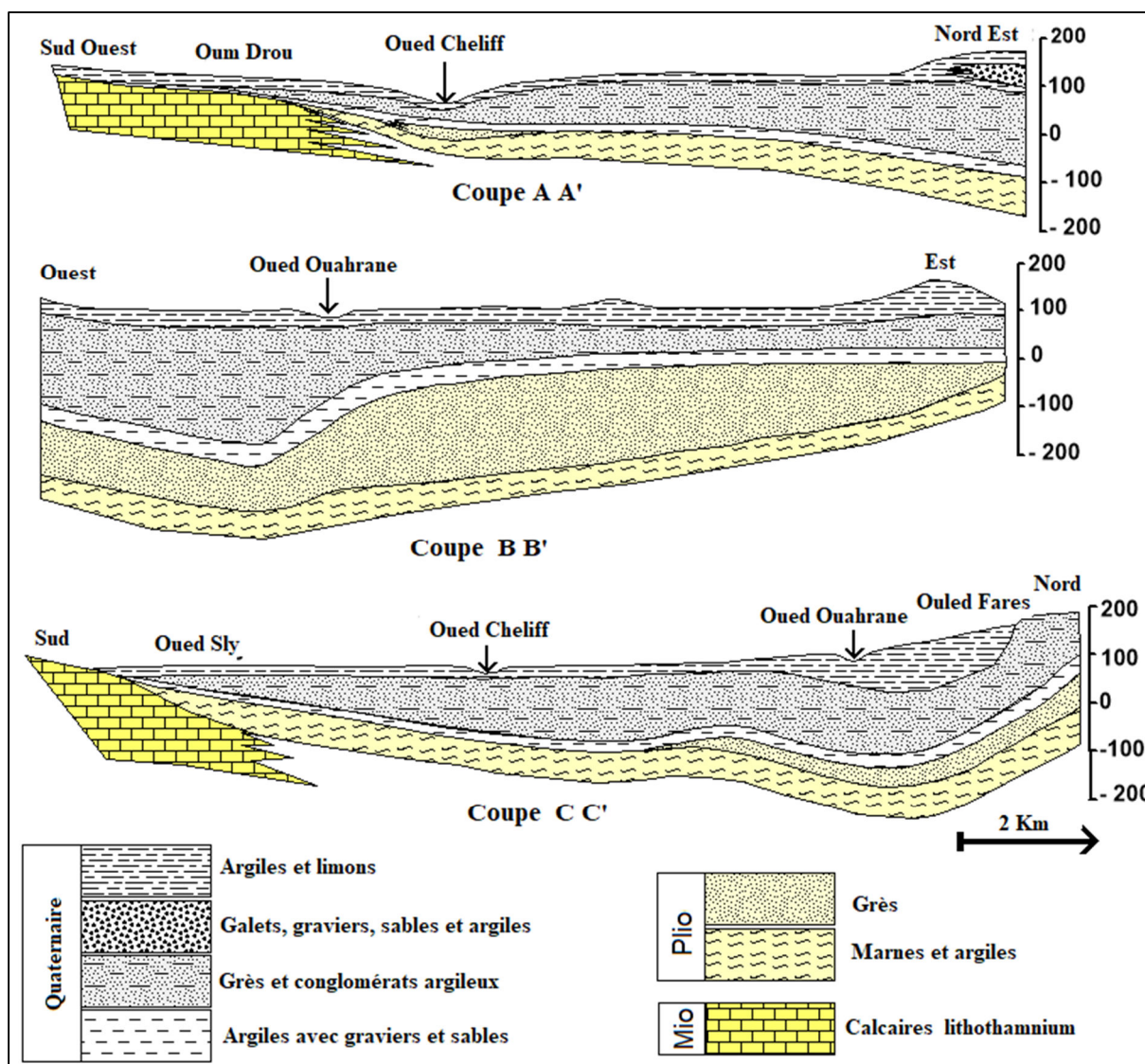


Figure 17 : Coupe Hydrogéologique dans la zone d'étude

### II.6.2. Choix de l'aquifère étudié

Parmi les trois principaux aquifères (Alluvions grossières du Quaternaire, Grès et sables du Pliocène, et calcaires à lithothamnium du Miocène) cités précédemment, nous avons choisi la nappe alluviale du quaternaire pour les raisons suivantes :

- Cette nappe représente une ressource d'eau souterraine importante, et forme plus de 48 % des ressources en eaux souterraines dans cette région, soit environ 11 Hm<sup>3</sup>/an (selon ABH- CZ ,2004).

- Elle est face aux nombreuses sources de pollution de surface (domestique, industrielle et agricole) ;

- Le réseau de suivi et surveillance installé par l'ANRH est très dense et bien réparti. Nous comptons quatorze (14) forages et soixante et un (61) puits (Figure 18) qui font objet à un suivi piézométrique et hydrochimique annuel par l'ANRH.

### II. 6.3. Identification de la nappe étudiée

La nappe alluviale du moyen Cheliff occidental (Figure 28) est séparée de celle de l'orientale, en amont, par le seuil d'Oum Drou, et à l'aval par le seuil de Boukadir. Elle est limitée au Nord par les monts de Dahra et au Sud par le massif de l'Ouarsenis. Cette nappe couvre une superficie de 321 Km<sup>2</sup> environ et un périmètre de 199 Km.

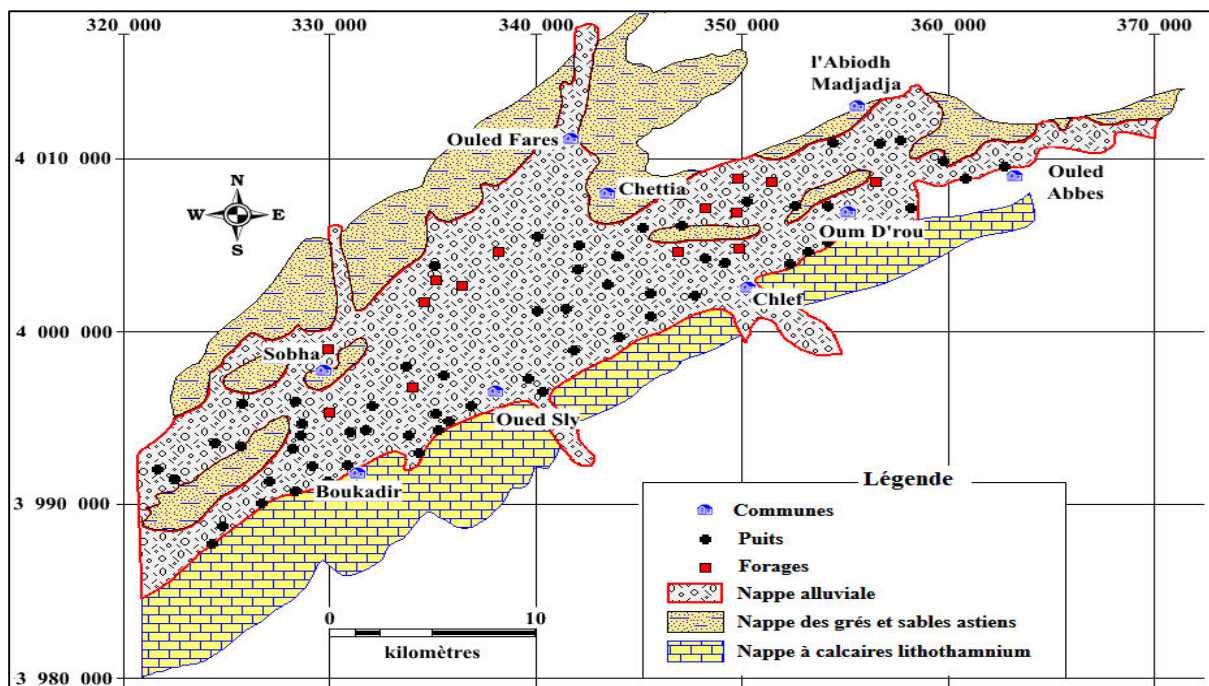


Figure 18 : Localisation du réseau de surveillance dans la zone d'étude

Cette nappe alluviale assure les besoins en eau potable des principales agglomérations de la zone centrale de la wilaya de Chlef, ainsi que l'irrigation des terres agricoles de la plaine du MCO. Le volume exploité en 2000 est de l'ordre de 15 Hm<sup>3</sup> pour l'A.E.P, l'irrigation et l'industrie, et 13 Hm<sup>3</sup> en 2021.

Dans le cadre de la préservation des ressources en eaux souterraines la wilaya a bénéficié d'une station de dessalement des eaux de mer de Ténès en 2010 d'une capacité de 250000 m<sup>3</sup>/j qui assure tout le besoin domestique, ce qui a diminué un peu l'exploitation des eaux souterraines.

## II. 6.4. Hydrodynamique de la nappe étudiée

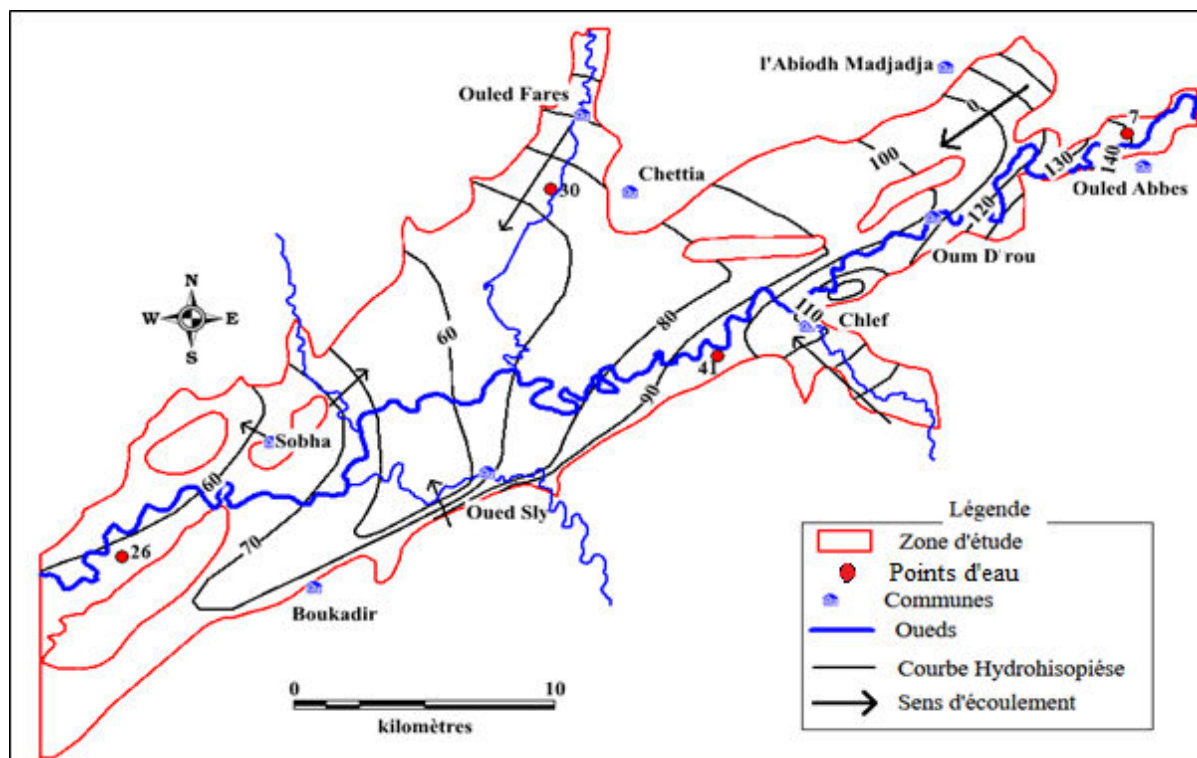
### II. 6.4.1. Piézométrie

La carte piézométrique établie pour la période des basses eaux 2014 (Figure 19) montre que les niveaux piézométriques de la nappe les plus élevés sont observés dans la partie est, cela est dû à l'effet de l'alimentation naturelle de la nappe, avec des niveaux piézométriques variant de 130 à 160 m, et un gradient hydraulique moyen de 0,8 %, alors que le niveau plus bas de l'ordre de 40 m est localisé au centre de la plaine, cela est causé par la surexploitation de cette nappe se forme d'une dépression. Nous signalons également qu'une alimentation de cette nappe est observée au niveau de la bordure Sud de cette plaine provenons du phénomène de drainance à partir des calcaires à lithothamniées du miocène, où le gradient hydraulique est d'environ 1,45 %. Les écoulements de la nappe se font des bordures vers l'axe central de la vallée avant de prendre une direction Est - Ouest parallèlement au cours d'eau de l'Oued Cheliff.

Ces écoulements dans cette nappe sont conditionnés par la structure géologique du bassin, les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère quaternaire, ainsi que les conditions d'alimentation et d'exploitation de cette nappe.

Nous signalons aussi que la relation oued-nappe n'est pas vraiment claire à cause de la densité du réseau de surveillance près de ce cours d'eau (oued Cheliff) qui est mal positionné.

La profondeur de la nappe, varie entre 6 à 17 m dans la partie Est (Chettia et Ouled Fares), alors qu'elle est entre 19 à 37 m dans les bordures de la plaine. Cela indique que la partie Est de la nappe est plus vulnérable à la pollution anthropique, et peut avoir une dégradation de la qualité des eaux souterraines, surtout que la zone non-saturée est constituée par des terrains moyennement perméable.



**Figure 19 :** Carte piézométrique de la nappe alluviale du MCO (basses Eaux 2014)

**Tableau 11 :** Évolution du niveau piézométrique de la période 1990-2019  
(Source ANRH et ABH CH)

Point d'eau	1990	1993	1999	2000	2002	2004	2010	2013	2019
P30 (Nord)	90	95	100	85	80	70	60	70	75
P41 (Sud)	100	105	95	90	90	90	85	88	95
P7 (Est)	115	120	125	125	130	120	110	133	140
P26 (Ouest)	60	65	68	65	60	60	60	62	62

Les évolutions du niveau piézométrique des quatre puits du quatre coins pour la période de 1990 à 2019 basées sur des cartes piézométriques établies dans le cadre de suivi de la nappe Alluvial MCO par ABH CZ, et aussi d'autres cartes de l'ANRH (Tableau 11) a donnée :

Une légère augmentation du niveau de la nappe de quelque mètre de la période 1990 à 1999 probablement due à la recharge de la nappe, et aussi à l'exploitation rationnelle.

De 2000 à 2010, on a constaté une baisse du niveau de la nappe due à l'intense exploitation de la nappe pour les besoins agricoles surtout avec le lancement des programmes de développement agricole, et aussi l'augmentation des besoins de la population en eaux potable, et aussi l'augmentation fatale de la population qui est concentrée dans les villes comme Chettia, Chlef, Oued Sly, Boukadir, tandis que les zones rurales sont quasi-exondées.



Cependant pour la période 2010 à 2019 une augmentation du niveau de la nappe a été observée, c'est due à la diminution de l'exploitation de la nappe suite à la diminution des besoins de la population en eau potable après avoir inauguré la station de dessalement des eaux mer en 2010, et qui a assuré l'alimentation en potable de la quasi-totalité de la wilaya.

Les écoulements de la nappe se font des bordures vers l'axe central de la vallée avant de prendre une direction Est - Ouest parallèlement au cours d'eau de l'Oued Cheliff.

Ces écoulements sont conditionnés par la structure géologique du bassin organisé en double synclinal, et par les variations des faciès. Il existe également une alimentation de la nappe par la bordure Sud (à partir des calcaires à lithothamnées) qui est nettement plus importante que celle provenant de la bordure Nord à partir des aquifères du pliocène.

## **II. 7. Cadre pédologique**

D'après l'inventaire des ressources en sols d'Algérie réalisé par l'ANRH de 1963 jusqu'à 2001, quatorze (14) études pédologiques ont été réalisées dans le territoire de la wilaya de Chlef. Cependant, il est intéressant de remarquer qu'on y retrouve très nettement les grands ensembles de sols déjà décrits par Boulaïne en 1957.

Ces études rapportent des précisions considérables sur les limites et présentent de nombreux résultats analytiques qui caractérisent chaque unité et dont la synthèse a permis d'établir une carte des sols présentée dans la figure 20 (Scet Agri, 1984b).

### **II. 7.1. Principaux types de sols de la zone d'étude**

#### **II. 7.1.1. Les sols peu évolués**

Ils ont des caractéristiques physico-chimiques très variées selon les différentes conditions de leur dépôt et de leur migration ; leur granulométrie peut être argileuse, limoneuse ou sableuse s'ils sont d'apport alluvial. On les rencontre sur la majorité de la plaine (80 %) et en particulier dans la partie centrale de la vallée.

#### **II. 7.1.2. Les sols calci-magnésiques**

Ce sont des sols d'apport alluvial, et colluvial. Ils sont plus au moins différenciés, et parfois des accumulations, calcaires continues sous forme d'encroûtement, et de croûte. Le  $\text{Ca}^{+2}$  et  $\text{Mg}^{+2}$  dominent la genèse du sol. On les retrouve surtout dans les limites de la nappe alluviale du moyen Cheliff occidental.

### II. 7.1.3. Les sols halomorphes

Les sols halomorphes regroupent un ensemble de sols dont les caractères essentiels d'évolution sont :

- soit la richesse en sels solubles ;
- soit la richesse en sodium échangeable

On les retrouve dans la partie Ouest de la vallée avec petite cadence.

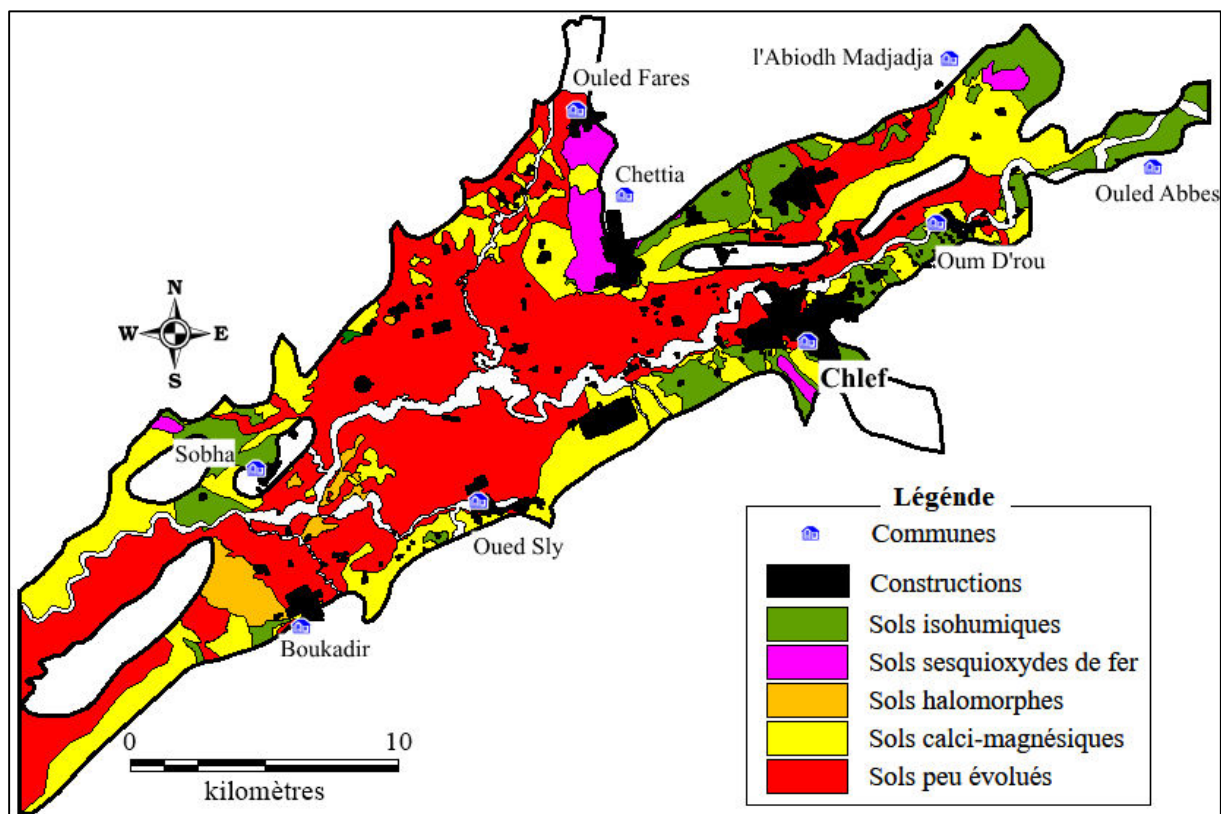


Figure 20 : Carte pédologique de la zone d'étude

### II. 7.1.4. Les sols sesquioxydes de fer

Les sols sesquioxydes de fer sont riches en sesquioxydes, caractérisés par :

- Un complexe argileux constitué par des argiles de néoformation kaolonitique en mélange avec des argiles héritées principalement des illites. Même héritée, la montmorillonite s'y maintient rarement ou seulement en faible quantité ;
- l'individualisation des sesquioxydes de fer (ou de manganèse) qui leur confère une couleur très accusée (rouge) ;
- la teneur en matière organique est faible et le taux de saturation est supérieur à 50 % ;
- la richesse en sesquioxydes résulte de l'hydrolyse des minéraux très poussée mais moins complète que pour les sols fersiallitiques. On trouve ce type de sol, avec petite quantité, dans la partie Nord de la vallée du moyen Cheliff occidental dans la commune d'Ouled Fares.

### II. 7.1.5. Les sols isohumiques

Les sols isohumiques (Steppique ou pseudo – Steppique) sont caractérisés par une teneur progressivement décroissante de la matière organique. On les retrouve dans les parties Nord et Sud de la vallée avec petite quantité.

### II. 7.2. Perméabilité des sols de la zone d'étude

Au sein du périmètre du moyen Cheliff occidental, 07 zones homogènes ont été retenues et cartographiées au 1/50 000. Elles sont définies à partir des 4 critères fondamentaux de texture, tirsification, salinité et teneur en calcaire actif (Scet Agri 1984 b).

Il faut retenir que les sols sont épais sur la presque totalité de la zone d'étude ; en effet, la profondeur est de l'ordre de 120 cm pour les zones retenues de 1 à 6, quant à la zone 7, 80% de ses sols ont une profondeur de 120 cm et 20 % entre 30 et 50 cm.

Par ailleurs, les résultats des essais d'infiltration par grands secteurs homogènes sont :

- Dans les alluvions récentes profondes et non salées (zone 1), la perméabilité est de l'ordre de 3 cm/h

- Dans les alluvions récentes un peu salées et un peu tirsifiées (zone 2), la perméabilité est plutôt faible et varie de 1 à 2 cm/h. En profondeur, elle est inférieure à 1 cm/h.

- Dans les alluvions fortement tirsifiées mal structurées (zone 3), la perméabilité est inférieure à 1 cm/h.

- Dans les alluvions fortement salées (zone 4), la perméabilité est de l'ordre de 1 cm/

- Dans les alluvions anciennes et les sols de piémont (zone 6), la perméabilité est globalement bonne (de l'ordre de 10 cm/h). On note toutefois des variations importantes sur un même site : la perméabilité peut passer de 11 cm/h à 2 cm/h ou de 17 cm/h à 3 cm/h ; ces valeurs traduisent les hétérogénéités des sols. Globalement ces sols ont une bonne structure et une bonne porosité, induisant une bonne infiltration.

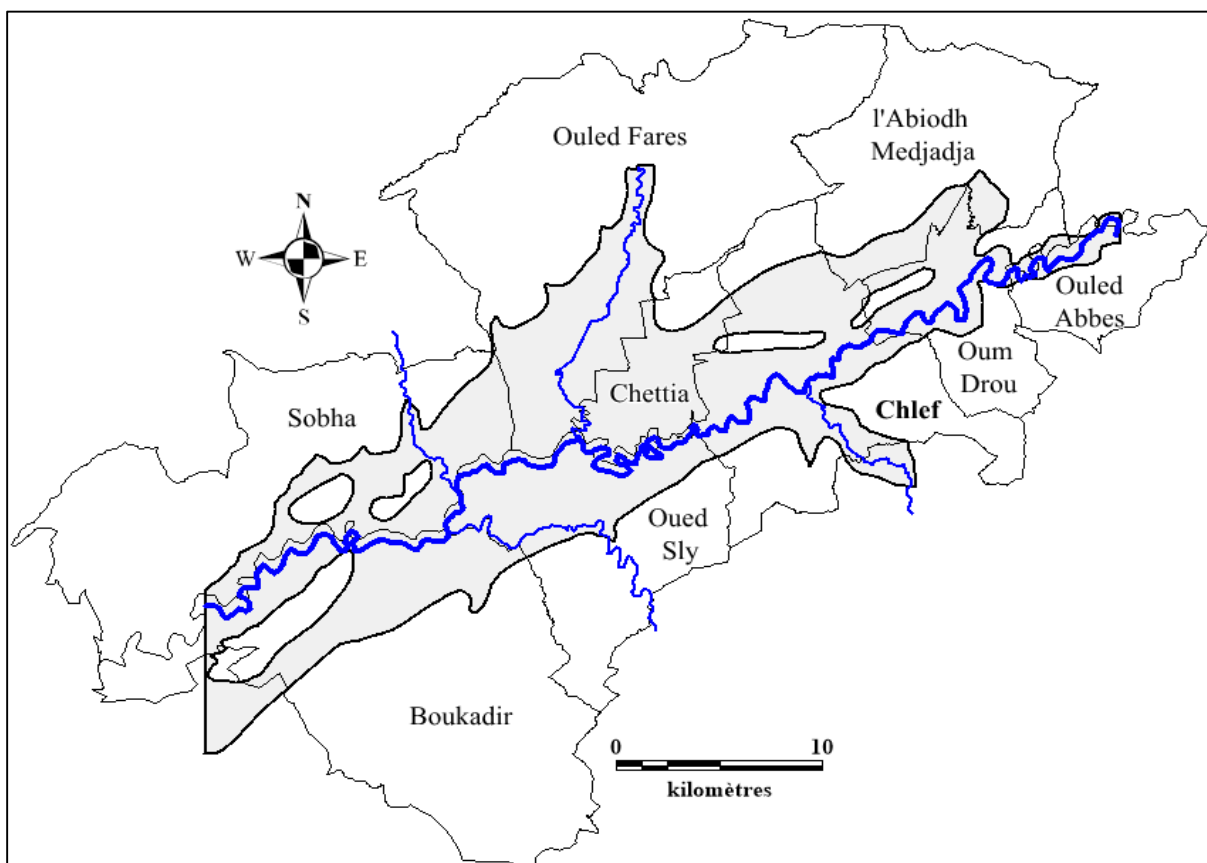
- Les sols sur croûtes et encroûtement (zone 7), présentent une perméabilité médiocre, de l'ordre de 3 cm/h ; ceci est semble-t-il lié à une structure fine et une porosité plutôt faible.

## II. 8. Contexte socio – économique

### II. 8. 1. Population

Le bassin versant du moyen Cheliff occidental est partagé entre trente (30) communes appartenant aux trois wilayas (Chlef (20 sur 35), Tissemsilt (8 sur 22) et Relizane (2 sur 38)), mais la vallée étudiée est partagée entre neuf (09) communes sur trente-cinq (35) de la wilaya de Chlef (Figure 21): Chlef, Oued Sly, Boukadir, Sobha, Chettia, Ouled Fares, l'Abiodh Medjadja, Oum Drou et Ouled Abbas).

La population est évaluée pour les neuf communes à 753225 habitants en 2004 (DFP ex DPAT). Cependant, la distribution de cette population ne se fait pas d'une manière rationnelle, elle est concentrée dans les villes comme Chettia, Chlef, Oued Sly, Boukadir, tandis que les zones rurales sont quasi-exodes.



**Figure 21** : Communes situées dans la vallée du moyen Cheliff occidental

### II.8.2. Occupation du sol

L'occupation du sol sur la zone d'étude est principalement agricole, et il n'est pas rare de trouver des zones où seule l'agriculture est présente sur d'importantes surfaces. Les zones non agricoles sont constituées de bâtiments, routes, chemins de fer et des zones boisées.

L'agriculture caractérise en particulier la plaine du moyen Cheliff occidental, avec une dominance de l'arboriculture fruitière notamment les agrumes, concentrée sur la rive droite de l'Oued Cheliff. Le maraîchage vient en seconde position et se pratique dans les parties Nord et Ouest (Sobha, Chettia, Ouled Fares, L'Abiodh Medjadja et Boukadir). Quant aux céréales et fourrages, leur production est limitée dans la partie Est surtout, dans les communes L'Abiodh Medjadja, Oum Drou, et Ouled Abbes.

La région a connu un développement important dans le domaine agricole (Agriculture & élevage) avec le programme de FNDRA lancé depuis 2000, ce qui explique l'augmentation de l'élevage pratiqué dans la plaine du moyen Cheliff occidental à partir de l'année 2001 surtout l'aviculture vu la demande accrue sur la viande blanche à cause de la cherté de la viande rouge.

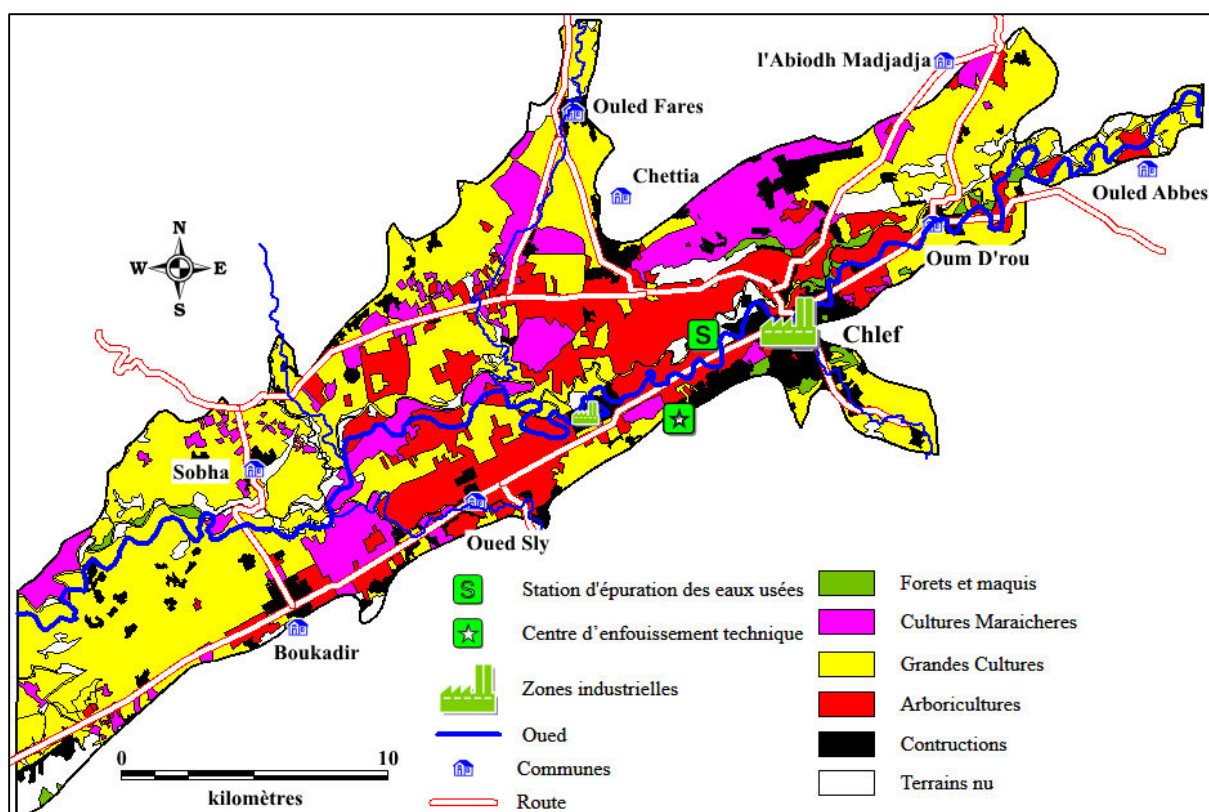


Figure 22: Carte d'occupation du sol de la région d'étude

### II.8.3. Industrie

Les unités industrielles se concentrent dans trois communes à savoir dans les zones industrielles d'Oued Sly, Chlef et Chettia avec des natures et des productions différentes. La commune d'Ouled Fares dénombre quelques unités industrielles connues surtout pour la production des boissons gazeuses. Les effluents correspondants sont rejetés directement dans l'oued Cheliff et ses affluents sans aucune épuration préalable.

### II.9. Conclusion

La plaine alluviale de moyen Cheliff occidental a une superficie de 320.71 km<sup>2</sup>, elle est localisée entre la chaîne du Dahra au Nord, massif d'Ouersenis au Sud, seuil d'Oum Drou à l'Est et le seuil de Boukadir à l'Ouest. Elle est traversée d'Est en Ouest par Oued Cheliff. La géomorphologie de la plaine montre que le bassin du moyen Cheliff occidental présente une forme allongée avec un climat de type semi-aride, avec une précipitation moyenne de 390 mm/an, dont 6 % s'infiltrer vers les nappes des eaux souterraines.

La description géologique a fait apparaître que le secteur d'étude comprend deux ensembles lithologiques : les formations antéogènes, et les formations néogènes et quaternaires.

Les formations géologiques du moyen Cheliff occidental qui peuvent constituer un intérêt hydrogéologique et former des réservoirs aquifères sont du bas en haut :

- Les calcaires à lithothamnium du Miocène supérieur (nappe à calcaires lithothamnium) ;
- Les formations des grès de base du Pliocène (nappe des grès et sables astiens) ;
- Les formations des grès, sables et conglomérats du Plio-Quaternaire.

L'analyse de la carte piézométrique de la période hautes eaux 2014 de la nappe alluviale a permis de mettre en évidence un axe de drainage principal de direction E-W qui coïncide avec la direction de l'écoulement principal de l'Oued Cheliff. L'alimentation de cette se fait par les précipitations efficaces, à travers les différents cours d'eau, par l'excès de l'eau d'irrigation, et par une alimentation latérale des aquifères en contact (drianance d'un flux d'eau passant latéralement de l'aquifère des calcaires à lithothamnium du Miocène supérieur situé au Sud de la plaine vers la nappe alluviale).

# Chapitre III

## Caractérisation Hydrochimique et évaluation de la qualité des eaux souterraines

### III.1. Introduction

La composition chimique d'une eau joue un rôle important dans la détermination de sa qualité, donc la possibilité de son utilisation pour l'alimentation en eau potable ou d'autres usages (irrigation, industrie...etc.). L'Étude hydrochimique va aborder les caractéristiques chimiques et physico-chimiques générales des eaux, puis l'origine des éléments en solution. Notons que l'eau, lors de son transit dans l'aquifère, subit plusieurs évolutions en fonction de la nature des terrains traversés, des minéraux rencontrés et du temps et des conditions de transit dans les formations. L'évolution dans le temps a permis de préciser les mécanismes essentiels de minéralisation et de modification de la composition des eaux dans le milieu poreux. L'évolution dans l'espace a permis d'identifier des zones à différents degrés de potabilité. En raison de l'utilisation multiple des eaux de la nappe étudiée (AEP, irrigation et industrie), et de son exposition aux différents paramètres de pollution, il serait important de définir une stratégie pour une bonne gestion qualitative de ces eaux.

### III.2. Données

Quarante Cinq échantillons d'eau souterraine (1 à 45) provenant des puits et forages de la nappe alluviale du mayen Cheliff Occidental ont été collectés durant le mois d'Octobre de l'année 2019 (Figure 23).

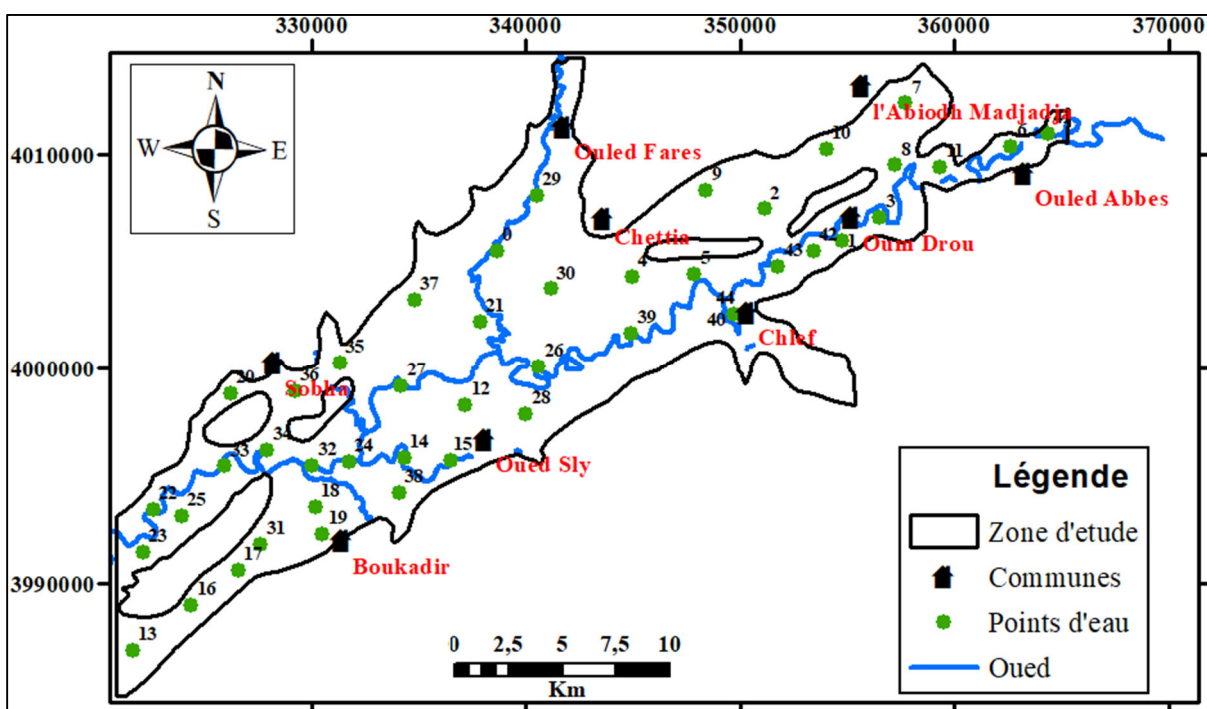


Figure 23 : Localisation des points d'échantillonnage



### III.2.1. Échantillonnage

Les prélèvements des échantillons d'eau ont été effectués par des récipients propres, lavés plusieurs fois avec l'eau à analyser, puis sont remplis dans des bouteilles en polyéthylène de 1 litres, où elles sont bien fermées hermétiquement pour pas laisser la formation des bulles d'air, et elles sont par la suite conservées dans une glacière à 4°C et transportées au laboratoire pour les analysées dans les 24 heures qui suit.

Les coordonnées de chaque échantillon ont été déterminées à l'aide d'un instrument GPS (Global Positioning System) (Type-GPS GARMIN 72).

### III.2.2. Analyse des éléments chimiques

#### III.2.2.1. In situ

Sur le terrain, des mesures in-situ ont été effectuées à l'aide d'un multi-paramètre, il s'agit des paramètres température, pH et la conductivité électrique (CE). Ces paramètres permettent de définir les caractéristiques fondamentales de l'eau

#### III.2.2.2. Au Laboratoire

L'analyse chimique des ions majeurs ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{NO}_3^-$ ) est effectuée dans le Laboratoire en utilisant les méthodes analytiques définies dans le Tableau 12

**Tableau 12** : Paramètres mesurés et méthodes analytiques utilisées

Paramètres	Unités	Matériel et Méthodes analytiques	Normes
Température (T)	°C	<b>Multi-paramètre</b> WTW LF 330	NF T90-008
pH			NF T90-008
Conductivité (CE)	μS/cm		NF T90-031
Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ )	mg/l	Titration avec la Solution d'E.D.T.A ( $\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{N}_2\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) : (0,02N ou 0,01M)	ISO N° 6058
Magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ )	mg/l		NF T90-003
Sodium ( $\text{Na}^+$ )	mg/l	Photométrie de la flamme (Dr LANGE (JENWAY))	ISO 9964/3
Potassium ( $\text{K}^+$ )	mg/l		
Chlorures ( $\text{Cl}^-$ )	mg/l	Solution de nitrate d'argent à 0,01 N	NF T90-014
Bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ )	mg/l	Solution d'acide Chlorhydrique à 1 N, et HCl à 0,1 N	NF T90-036
Nitrates ( $\text{NO}_3^-$ )	mg/l	Spectrophotomètre JASCO	NF T90-042
Sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ )	mg/l		

Le contrôle de la validité des résultats d'analyse chimique a été fait à l'aide de la balance ionique.

$BI = ((\Sigma C_{\text{anions}} - \Sigma A_{\text{anions}}) / (\Sigma C_{\text{anions}} + \Sigma A_{\text{anions}})) \times 100$  en %, où nous signalons que les analyses réalisées au niveau du laboratoire ont été déclarées acceptables, avec des valeurs de BI situées dans la fourchette  $-10 \leq BI \leq +10$  %.

### III.3. Caractérisation géochimique

#### III.3.1. Méthode Statistique

Il existe plusieurs méthodes statistiques qui permettent de résumer l'information contenue dans des données. Parmi celles-ci, l'Analyse descriptive, l'Analyse en Composantes Principales (ACP), et la Classification d'arbre hiérarchique (CAH /Dendrogramme).

##### III.3.1.1. Analyse descriptive

Les éléments de statistique descriptive ont été déterminés de nos données physicochimiques par le logiciel Excel 2019 pour décrire les tendances à l'évolution et à la distribution des données. Il s'agit de coefficient de corrélation, des valeurs max, min, moy, ainsi que l'écart type et le coefficient de variation. Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau ci-dessous (Tableau 13).

**Tableau 13** : Valeurs statistiques de divers paramètres

Statistique	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CE	pH	
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	μS/cm		
Max	305,11	109,20	451,25	9,00	733,50	553,13	391,81	68,80	3560	8,10	
Min	28,20	18,90	70,00	0,00	105,35	83,00	102,48	16,00	790	6,90	
Moy	126,35	63,07	162,94	2,02	289,35	245,02	244,18	36,12	1680	7,55	
Écart Type	64,84	25,59	96,86	2,08	168,65	126,95	88,67	14,13	0,65	0,38	
CV	0,51	0,41	0,59	1,03	0,58	0,52	0,36	0,39	0,38	0,05	
Normes	OMS (2017)	75	50	200	12	250	250	-	50	1500	6,8
	Algériennes (2011)	200	150	200	12	500	400	-	50	2800	6,8-9
% dépassant	OMS	82	67	13	0	31	53	-	16	40	0
	Algériennes	11	0	13	0	13	11	-	16	13	0

Pour que la moyenne d'une série de données "m" soit réellement représentative de l'ensemble de la série, il faut que les données ne s'écartent pas trop de sa valeur. La dispersion autour de la moyenne est mesurée par le coefficient de variation (CV) qui représente le rapport de l'écart-type à la moyenne :  $CV = \sigma/m$ . Par convention, on estime que la série est homogène lorsque  $CV < 50 \%$ .

Pour les éléments Ca<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup> et SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> le coefficient de variation reste supérieur à 50 % caractérisant ainsi l'hétérogénéité des séries de données, et pour le reste des éléments Mg<sup>2+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CE, et pH le coefficient de variation est inférieur à 50 % ce qui montre une homogénéité des données pour ces éléments.

### III.3.1.1.1. Potentiel d'Hydrogène (pH)

Le pH mesurant l'acidité d'une solution, est défini par l'expression  $\text{pH} = -\text{Log } \text{H}^+$  où  $(\text{H}^+)$  est l'activité de l'ion hydrogène  $\text{H}^+$  dans la solution (Ramade, 1998). Les équilibres physicochimiques sont conditionnés par le pH. Il intervient avec d'autres paramètres comme la dureté, l'alcalinité et la température. Habituellement, il varie entre 7,2 et 7,6 (Bremond et al, 1973). Cependant, dans certains cas, il peut varier de 4 à 10 en fonction de la nature acide ou basique des terrains traversés. Des pH faibles augmentent le risque de présence de métaux sous une forme ionique plus toxique. Des pH élevés augmentent les concentrations d'ammoniac, toxique pour les poissons (Rodier j 2009).

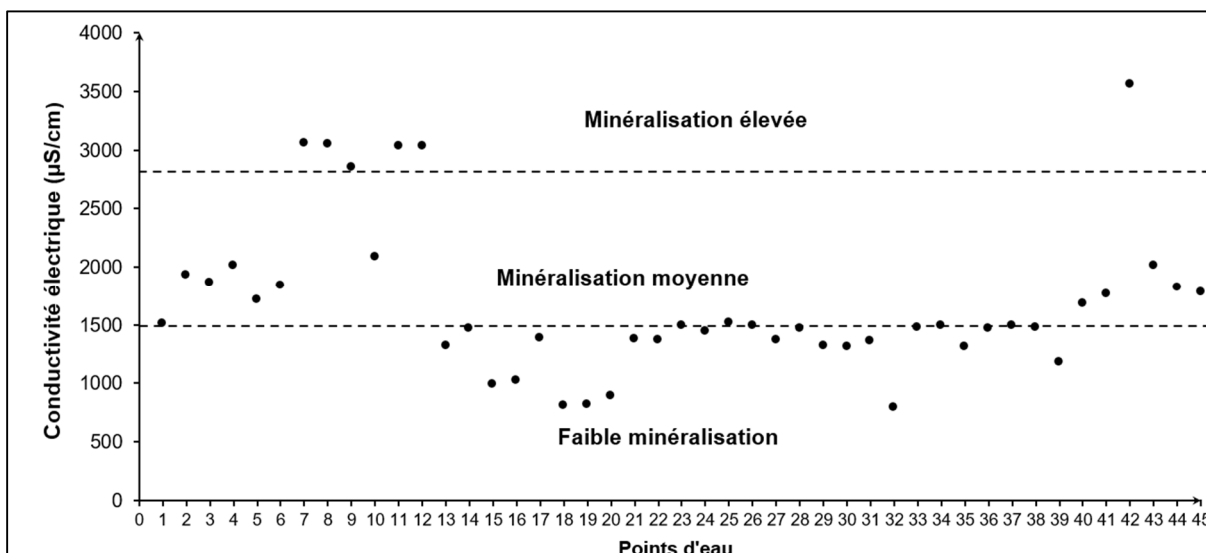
Les valeurs du pH (Tableau 13) montrent que tous les points d'eau se trouvent dans l'intervalle de la norme (OMS et Algérienne) de la potabilité, mais avec des valeurs variables. Les valeurs du pH de la nappe alluviale du MCO varient de 6,9 à 8,10.

### III.3.1.1.2. Conductivité électrique (CE)

La minéralisation globale de l'eau peut être déterminée soit par la conductivité électrique (méthode rapide), soit par la teneur en ions dissous obtenue par sommation des concentrations des anions et des cations car celles-ci sont fortement corrélées dans toutes les formations aquifères (Dakoure, 2003).

La conductivité électrique de l'eau est la capacité d'un  $1\text{cm}^3$  à conduire un courant électrique à une température standard de  $25\text{ }^\circ\text{C}$ . Il est mesuré en Microsiemens par Centimètre ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Il est fonction de la température, du type et de concentration d'ions présents (Todd, 2007). La présence d'espèces ioniques chargées dans une solution rend cette dernière conductrice. Lorsque les concentrations d'ions augmentent, la conductivité de la solution augmente ; ainsi, la mesure de conductivité fournit une indication de la concentration d'ions.

Les résultats trouvés (Tableau 13, et Figure 24) montrent que les eaux souterraines de cette nappe ont des CE varient de 790 à 3560  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , ce qui explique que la plupart des points d'eau ont une minéralisation moyenne à faible (87 % des échantillons) à forte (13 % des échantillons) selon la norme Algérienne (2800  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), alors que 18 points d'eau (40 %) dépassent la norme de l'OMS (1500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).



**Figure 24 :** Variation des conductivités électriques des eaux de la nappe alluviale pour l'année 2019

### III.3.1.1.3. Les ions majeurs

Les eaux naturelles contiennent toujours des quantités variables de sels dissous. Ceux-ci proviennent de l'interaction entre l'eau et divers solides, liquides et gaz lorsque les eaux souterraines se déplacent de leur zone de recharge à leur zone de décharge. Plus de 90% des solides dissous dans les eaux souterraines peuvent être attribués à huit ions :  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{NO}_3^-$ . Les concentrations des solutés dans différents échantillons d'eau souterraine peuvent varier de manière significative en fonction de la composition minéralogique des aquifères à travers lesquels l'eau souterraine s'écoule, par conséquent la composition géochimique de l'eau souterraine peut être analysée pour déterminer le chemin que l'eau a parcouru.

#### a) Principaux cations

##### Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ )

Calcium est le plus abondant des métaux alcalino-terreux, il est un constituant majeur de nombreux minéraux rocheux, sa présence dans l'eau est liée principalement à deux origines naturelles : soit de la dissolution des formations carbonatées ( $\text{CaCO}_3$ ), soit de la dissolution des formations gypseuses ( $\text{CaSO}_4$ ). Les teneurs trouvées montrent que les valeurs de calcium de la nappe varient entre 28,20 et 305,11 mg/l, de même, plus de 80 %, et 11 % des échantillons présentent des concentrations supérieures à la norme de potabilité des eaux fixée par l'OMS (75 mg/l), et la norme Algérienne (200 mg/l) respectivement.

L'écart type est de l'ordre de 64,84 mg/l, et un CV de 51 % ce qui explique une légère variation et hétérogénéité des concentrations. Les ions calcium dans la nappe proviennent de la dissolution des calcaires du miocène supérieur et des dolomies de l'Ouarsenis et Dahra (Achour, 1997).

#### **Magnésium (Mg<sup>2+</sup>)**

La présence des ions Mg<sup>2+</sup> dans l'eau proviennent de la dissolution des roches magnésiennes du gypse et des minéraux ferromagnésiens et surtout de la mise en solution des dolomies et des calcaires dolomitiques. Ses origines sont comparables à celle du calcium, et ils proviennent de la dissolution des formations carbonatées. En effet, les teneurs de Magnésium de la nappe varient entre 18,90 et 109,20 mg/l, et plus de 60 % des échantillons présentent des concentrations dépassant la norme fixée par l'OMS, alors qu'aucune teneur ne dépasse la norme Algérienne. La valeur du CV et de 59 %, et l'écart de type de 96,86 mg/l ce qui témoigne d'une petite variation des teneurs de cet élément.

#### **Sodium (Na<sup>+</sup>)**

L'origine de cet élément est liée principalement à la dissolution des formations salifères et à l'effet de la salinité marine. La dissolution des minéraux salifères se fait selon la relation suivante :  $\text{NaCl} \leftrightarrow \text{Na}^+ + \text{Cl}^-$ .

Les teneurs de sodium dans la nappe varient entre 70 et 451,25 mg/l, avec 13 % des points de prélèvement dépassent la norme de potabilité fixée par l'OMS et dans les normes Algérienne. Les concentrations élevées sont probablement dues à l'effet de la dissolution des formations évaporitiques riche en halite, et à l'effet des eaux usées non traitées et les décharges sauvages. Le CV oscille autour de 60 % environ attestant de l'importance de la variabilité des teneurs de cet élément.

#### **Potassium (K<sup>+</sup>)**

Potassium (K<sup>+</sup>) est assez abondant sur la terre, mais peu fréquent dans les eaux. La source principale de potassium sont les roches cristallines, mais dans des minéraux moins altérables que ceux qui contiennent du sodium, les évaporites (sylvinite), les argiles potassiques (illite) et de la dissolution des engrais chimiques.

Les valeurs observées dans le tableau montrent que la totalité des points d'eau ont des teneurs inférieures à la norme de potabilité de l'OMS et de l'Algérie, avec un CV généralement élevés prouvant expliquer l'origine anthropique de cet élément liée probablement à l'utilisation des engrais NPK.

**b) Principaux anions****Chlorure (Cl<sup>-</sup>)**

Le chlore est le plus abondant des halogènes. Selon Hem (1985), les sources d'ions chlorure sont les suivantes :

1. Roches ignées, feldspathoïdes, sodalite et le minéral phosphate apatite.
2. Chlorure de l'eau de mer ancienne piégé dans les sédiments.
3. Solution d'halite et de sylvite

Les concentrations de Chlorure dans les échantillons varient entre 105,35 à 733,50 mg/l, et de 30 %, 13 % pour les échantillons ayant des concentrations dépassant la norme de potabilité fixée par l'OMS, et Algérienne respectivement, et un écart type de 168,65 mg/l, et un CV de 13 %, ce qui témoigne la variabilité spatiale des teneurs de cet élément.

Dans la zone d'étude, les chlorures proviennent, géologiquement de la dissolution des formations évaporitiques et peuvent avoir une origine anthropique provenant des eaux usées non traitées.

**Sulfates (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)**

Les sources de l'ion sulfate dans les eaux naturelles sont :

1. Oxydation de la pyrite et des minéraux sulfurés dans les roches ignées et sédimentaires en présence de CaCO<sub>3</sub> (Rankama et Sahama, 1950) ;
2. Dissolution de roches évaporées telles que le gypse et l'anhydrite ;
3. Les activités humaines, comme les activités agricoles (engrais et pesticides)

Les concentrations en sulfate des eaux de la nappe varient entre 83,00 et 553,33 mg/l. Plus de la moitié des points de prélèvement ont une teneur en sulfate dépassant la norme de potabilité fixée par OMS, et 11 % dépassant la norme Algérienne, avec un CV de 52 %, et un écart type de 126,35 mg/l ce qui atteste la grande variabilité des teneurs de cet élément. Sa présence dans la nappe est liée principalement à la dissolution des formations évaporitiques du Dahra et Trias anté-nappes de l'Ouarsenis ainsi que des formations gypsifères du Miocène dans les bordures de la plaine, il peut provenir des engrais chimiques (sulfate d'ammonium 21%).

**Nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)**

L'azote est présent dans l'eau sous forme d'anions nitrites ou nitrates (Hem, 1985). Les engrais constituent le principal apport d'azote dans la plupart des systèmes agricoles (Hallberg et Keeney, 1993). Les processus répétitifs de fertilisation (chimique ou organique), contribuent efficacement à l'augmentation des concentrations de nitrates dans les eaux souterraines peu profondes.

Les concentrations de nitrates des eaux de la nappe alluviale de MCO sont dans l'ensemble supérieures à la norme 50 mg/l, avec un CV égale à 0,39, ce qui atteste de son origine anthropique liée principalement à l'application des engrais azotés. L'élevage, les rejets d'eaux usées et les décharges publiques peuvent constituer une autre origine des nitrates dans la zone d'étude.

### **Bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ )**

Il est considéré comme une source d'alcalinité (alcalinité carbonatée), tandis que l'alcalinité totale est une mesure des carbonates, bicarbonates et hydroxyle dissous dans les rivières et les eaux souterraines, et responsable du pH (Hassan, 2007). Le processus d'épuisement du  $\text{HCO}_3^-$  en  $\text{CO}_3^{2-}$  en solution devient élevé lorsque le (pH) est supérieur à (8,2), mais lorsque le (pH) est inférieur à (8,2), les ions hydrogène sont ajoutés au carbonate et deviennent du bicarbonate dissous (Davis et Dewiest, 1966).

Les concentrations en  $\text{HCO}_3^-$  des eaux souterraines varient entre 102,48 et 391 mg/l, avec un écart type de 86,67 mg/l, et un CV de 36 %.

#### **III.1.2. Analyse en Composantes Principales**

L'Analyse en Composantes Principales est une technique de description statistique conduisant à des représentations graphiques approchées (mais en un certain sens optimales) du contenu d'un tableau de données : description simultanée des liaisons entre variables et des similitudes entre individus. C'est aussi un outil de réduction de la dimensionnalité d'un ensemble de variables continues, utilisable comme intermédiaire de calcul en vue d'analyses ultérieures. L'ACP est un outil exploratoire qui permet de visualiser et de découvrir les phénomènes tels qu'ils sont décrits par les données

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) consiste à exprimer un ensemble de variables en un ensemble de combinaisons linéaires de facteurs non corrélés entre eux, ces facteurs rendent compte d'une fraction de plus en plus faible de la variabilité des données. Cette méthode permet de représenter les données originelles (individus et variables) dans un espace de dimension inférieure à l'espace originel, tout en limitant au maximum la perte d'information. La représentation des données dans des espaces de faible dimension (ici 2 dimensions) en facilite considérablement l'analyse. Le premier axe factoriel est celui qui explique le plus grand pourcentage de la variance totale, le second explique ensuite le plus grand pourcentage de variance résiduelle (Hennia 2007).

Le but de l'ACP est de trouver une visualisation des données multidimensionnelles et l'étude de la structure des variables. Il s'agit de proposer une représentation simple des paramètres analysés sur un graphique en deux dimensions (Hennia 2007 ; Soro et al. 2019).

Dans ce travail, nous avons réalisé une analyse en composante principale sur les données hydrochimiques (45 individus) et 10 variables (pH, CE,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ) de la période des basses eaux 2019, pour le but de déterminer les origines et les principaux mécanismes de minéralisation à travers les corrélations entre les éléments et les individus. Cette analyse a été réalisée par le logiciel Spad Version 5.5

La méthode ACP a permis de déterminer les principaux mécanismes de minéralisation qui se manifeste, ainsi que les corrélations entre éléments et individus dans cette nappe. Le traitement des données par l'ACP de la campagne basses eaux 2019 a donné les résultats suivants :

Les facteurs 1, 2, et 3 prennent en compte 80,49 % de l'inertie globale avec une valeur propre de 8,86 soit 54,32 % de l'information sont expliqués par la première composante principale, et une valeur de 5,97 soit 13,59 % sont expliqués par l'axe principale 2 et une valeur propre de 1,50 soit 12,58 % d'informations sont expliqués par l'axe 3 et une valeur propre de 1,39 et 12,58 % (Tableau 14)

**Tableau 14** Valeur propre

Numéro	Valeur propre	Cumulé	Pourcentage	Pourcentage cumulé
1	5,97	5,97	54,32	54,32
2	1,50	7,47	13,59	67,91
3	1,39	8,86	12,58	80,49

Le tableau des matrices de corrélations (Tableau 15) montre que les variables  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , sont corrélées positivement entre elles et avec la conductivité électrique (CE).

**Tableau 15** : Matrice de corrélation entre les éléments chimiques

	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{NO}_3^-$	pH	CE
$\text{Mg}^{2+}$	<b>0,61</b>									
$\text{Na}^+$	<b>0,66</b>	<b>0,66</b>								
$\text{K}^+$	0,10	0,04	0,19							
$\text{Cl}^-$	<b>0,67</b>	<b>0,67</b>	<b>0,75</b>	0,21						
$\text{SO}_4^{2-}$	<b>0,59</b>	<b>0,67</b>	<b>0,82</b>	0,12	<b>0,58</b>					
$\text{HCO}_3^-$	<b>0,49</b>	<b>0,68</b>	0,28	0,00	<b>0,41</b>	0,21				
$\text{NO}_3^-$	0,29	-0,16	0,06	-0,01	0,38	-0,18	-0,16			
pH	-0,19	-0,18	-0,11	<b>0,45</b>	-0,15	-0,01	-0,11	-0,06		
CE	<b>0,82</b>	<b>0,88</b>	<b>0,83</b>	0,13	<b>0,83</b>	<b>0,79</b>	<b>0,68</b>	0,04	-0,13	



Les variables représentées sur le facteur 1 comme le montre la figure 25, montrent que les fortes corrélations sont entre les variables  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , et CE ce qui constitue un pôle de minéralisation géologique. La variable  $\text{K}^+$  est faiblement corrélée avec les autres variables, mais elle est généralement bien représentée sur le facteur 2.

La variable  $\text{NO}_3^-$  n'est corrélée avec aucune variable, ce qui explique l'origine anthropique de cet élément.

Quant aux axes 2 et 3 des variances indiquent un pôle de pollution urbaine (rejet des eaux usées non-traitées) et/ou agricole (utilisation des engrais de type azoté, des produits d'élevage et fertilisants), cela est représenté par les ions  $\text{K}^+$  et  $\text{NO}_3^-$ .

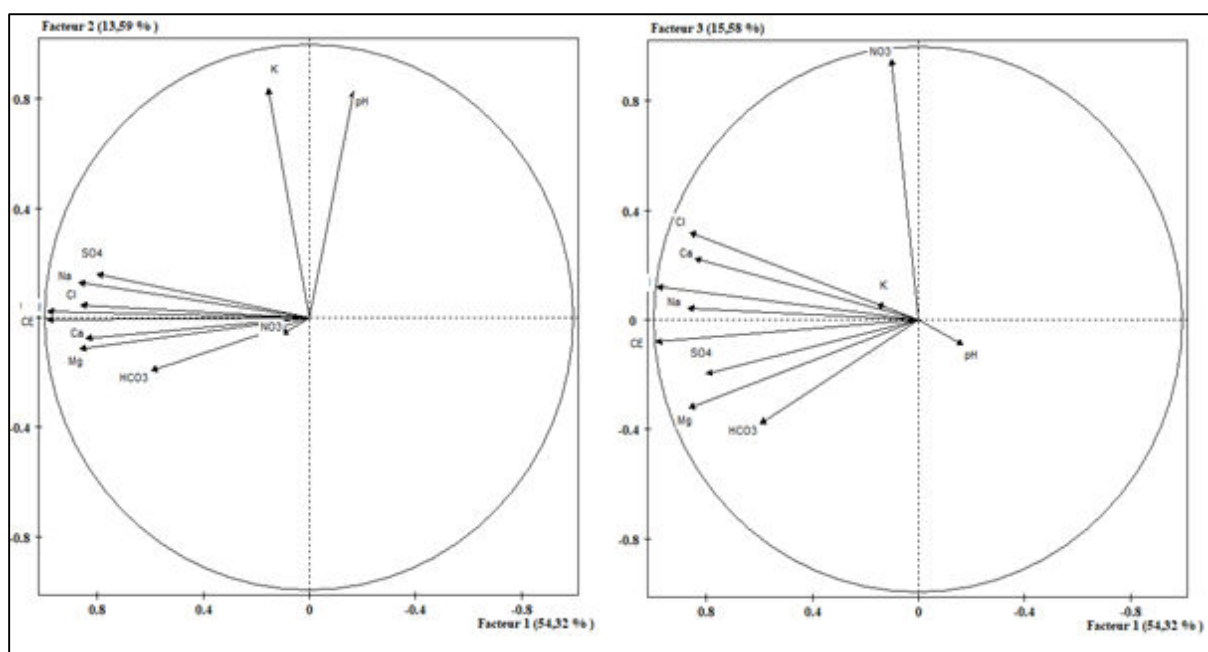


Figure 25 : Cercle de corrélation des variables (plan  $F_1$ - $F_2$  et  $F_1$ - $F_3$ )

### III.3.1.3. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH /Dendrogramme)

C'est une méthode de classification qui permet de mettre en évidence un regroupement d'individus de mêmes caractéristiques. Initialement, chaque individu correspond à une classe, et pour  $n$  individus on considère initialement une répartition triviale de la base en  $n$  classes. Ensuite les deux individus "les plus proches" sont regroupés en une seule classe, pour obtenir une partition de la base en  $n-1$  classes. Au final, cette classification propose une série de partitions représentées sous forme d'arbres appelés dendrogrammes ou arbres de classification hiérarchique (Karim 2005).

L'analyse hiérarchique ascendante (Hierarchical Cluster Analysis, HCA) est une méthode de classification non supervisée des données. Les objets sont regroupés de façon séquentielle en classes ou clusters selon un critère de ressemblance. Ce critère est défini par la distance inter élément. Les résultats obtenus sont présentés sous la forme d'un arbre hiérarchique appelé dendrogramme. De manière générale, on utilise l'algorithme de Ward pour effectuer le regroupement. L'algorithme est le suivant (Lasch et al. 2004) :

- la matrice de distance entre objet est calculée. C'est une matrice symétrique qui contient les distances entre les individus deux à deux.

- les deux individus les plus proches sont regroupés en un cluster. Ce cluster sera représenté par son centroïde. Une nouvelle matrice de distance est calculée entre tous les individus restants et le cluster nouvellement formé. Les deux objets les plus proches (individu/cluster ou individu/individu) sont regroupés en un même cluster.

- le processus s'arrête lorsqu'une seule classe regroupant tous les individus est formée.

Les méthodes hiérarchiques diffèrent entre elles par le choix du critère de ressemblance et par la façon de mesurer les ressemblances entre un nouveau groupe fusionné et les autres inchangés.

Puisque les méthodes hiérarchiques fusionnent les groupes à des degrés décroissants de ressemblance, il est naturel de représenter les résultats de la classification au moyen d'une structure arborescente que l'on appelle dendrogramme. Il peut être intéressant de fournir l'algorithme pour la construction d'un dendrogramme qui consiste à ordonner les observations de telle sorte qu'il n'y ait aucun croisement entre les diverses branches du dendrogramme.

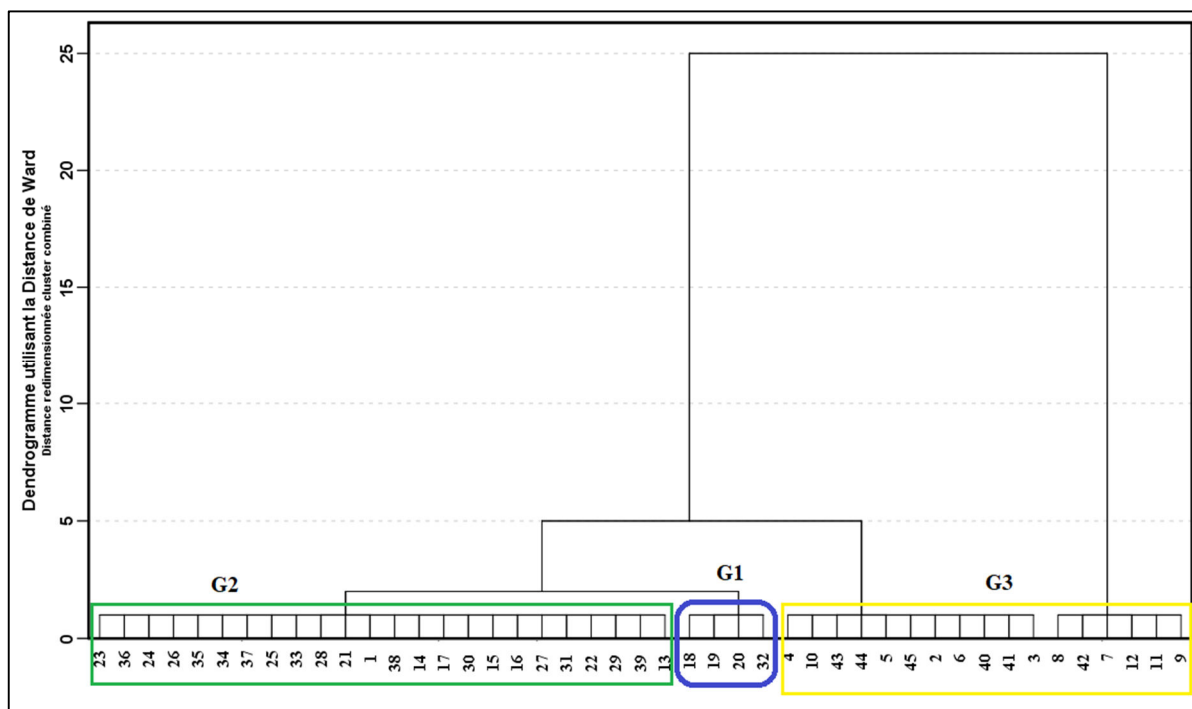
i. placer les observations selon un ordre quelconque de gauche à droite

ii. s'il ne reste qu'un seul groupe, on termine.

iii. prendre les groupes compris entre les groupes qui fusionnent et les déplacer rigidement à la droite de la dernière observation du groupe fusionné situé le plus à droite.

iv. retourner à ii

Une classification hiérarchique (HCA) a été réalisée sur 45 individus (donnée d'analyses physico-chimiques) et dix variables (pH, CE,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ , et  $\text{HCO}_3^-$ ) à l'aide du logiciel SPSS V 28 ; les résultats montrent :



**Figure 26 :** Dendrogramme des points d'eau

Trois groupes d'individus sont observés (Figure 26 et Tableau 16) :

Le groupe (I) regroupe les points d'eau de qualité d'eau très excellente (8 %), avec une minéralisation faible ( $TDS < 700$  mg/l).

**Tableau 16.** Caractéristiques des groupes selon la CAH

	Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	Na <sup>+</sup> (mg/l)	K <sup>+</sup> (mg/l)	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	pH	TDS	CE s/cm
<b>Groupe I :</b> 18, 19, 20, 32	28,20 39,20	18,90 25,20	70,00 88,00	0,42 0,70	105,35 119,70	101,10 110,20	102,48 155,99	19,05 26,00	7,30 8,10	456,78 537,01	0,79 0,89
<b>Groupe II :</b> 1, 13, 14, 15, 16, 17, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39	66,50 149,00	30,00 83,00	92,00 162,50	0,00 4,00	174,00 271,50	83,00 299,75	131,15 328,00	26,00 64,50	6,90 8,10	692,07 1083,27	0,99 1,52
<b>Groupe III :</b> 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 40, 41, 42, 43, 44, 45	131,03 305,11	46,59 109,20	133,40 451,25	0,00 9,00	215,60 733,50	244,70 553,13	285,49 391,81	16,00 68,80	7,03 8,10	1227,36 2411,83	1,68 3,56

Le groupe (II) regroupe les individus d'une qualité bonne (54 %), il caractérise les points d'eau d'une minéralisation moyenne ( $700 \text{ mg/l} \leq TDS \leq 1500 \text{ mg/l}$ ).

Le groupe (III) regroupe les individus de qualité mauvaise (38 %), il caractérise les eaux d'une minéralisation très élevée ( $1500 \text{ mg/l} \leq TDS \leq 2500 \text{ mg/l}$ ).

### III.3.2. Méthode des diagrammes

La détermination des faciès hydrochimique des eaux souterraines constitue une information vitale sur l'évolution hydrogéochimique des eaux souterraines, ainsi que sur l'origine des ions constituant la minéralisation de l'eau (Bouderbala 2020). Les diagrammes binaires, de Piper, de Chadha, de Durov, ....etc sont souvent utilisés pour la détermination des faciès chimiques.

#### III.3.2.1. Diagrammes binaires

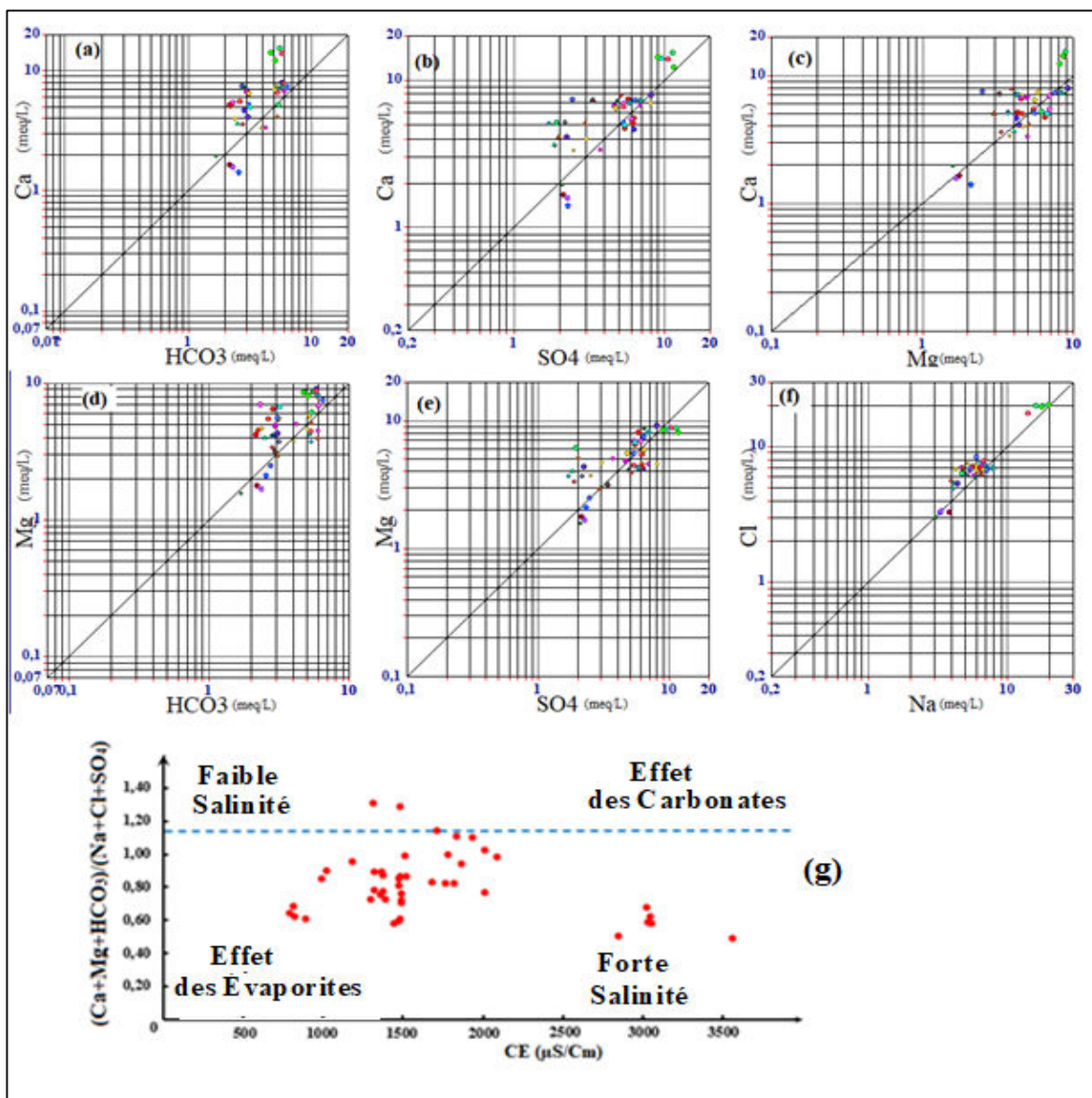
Les diagrammes binaires permettent de retrouver la provenance des sels dissous dans les eaux. L'étude des corrélations établies par les diagrammes binaires (diagrammes logarithmiques) entre les concentrations des principaux éléments ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ) on utilisant le logiciel Diagramme V 6.77 a permis d'identifier les différents mécanismes et processus qui contribuent à la minéralisation des eaux échantillonnées. Les ions  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{HCO}_3^-$  se forment dans l'eau lors de processus comme la dissolution, la précipitation et la dolomitisation des roches carbonatées.

Le diagramme  $\text{Ca}^{2+}$  Vs  $\text{HCO}_3^-$  montre que la plupart des points échantillonnés se trouvent au-dessus de la droite, ce qui suggère un excès en bicarbonate (Figure 27.a) probablement provient de l'altération des formations carbonatées (Hennia 2007 ; Bettahar, al. 2009). Le diagramme  $\text{Ca}^{2+}$  Vs  $\text{SO}_4^{2-}$  montre que la majorité des points présentent une bonne corrélation avec la droite de dissolution du gypse (Figure 27.b) ce qui confirme que la dissolution du gypse explique bien la nature des faciès rencontrés dans certains secteurs au niveau de cette plaine. Ceci indique aussi l'origine évaporitique des sulfates par la dissolution gypsifère du calcium. Le diagramme  $\text{Ca}^{2+}$  Vs  $\text{Mg}^{2+}$  (Figure 27.c) montre une bonne corrélation entre les deux éléments, et les réactions dominantes sont dues à la dissolution de la calcite, la dolomite et le gypse (Hennia 2007 ; Bettahar, et al. 2009).

Il est probablement résulte aussi de l'infiltration des eaux de surface à travers les formations rocheuses calcaires et dolomitique.

Pour les diagrammes  $\text{Mg}^{2+}$  en fonction de  $\text{HCO}_3^-$  (Figure 27.d) montre de bonne corrélation entre ces deux éléments, ceci confirme la dissolution des formations dolomitiques, alors que l'examen de la relation  $\text{Mg}^{2+}$  en fonction  $\text{SO}_4^{2-}$  (Figure 27.e) montre une évolution proportionnelle des sulfates et du magnésium, cela traduit la dissolution d'un sulfate de magnésium d'origine salifère (Hennia et al 2022).

Le diagramme binaire  $\text{Cl}^-$  Vs  $\text{Na}^+$  (Figure 27.f) montre également une bonne corrélation entre les points et la droite de dissolution du sel ( $\text{NaCl}$ ), cela explique que l'halite joue un rôle dans la nature des faciès hydrochimique des eaux souterraines de cette nappe (Hennia et al 2022).



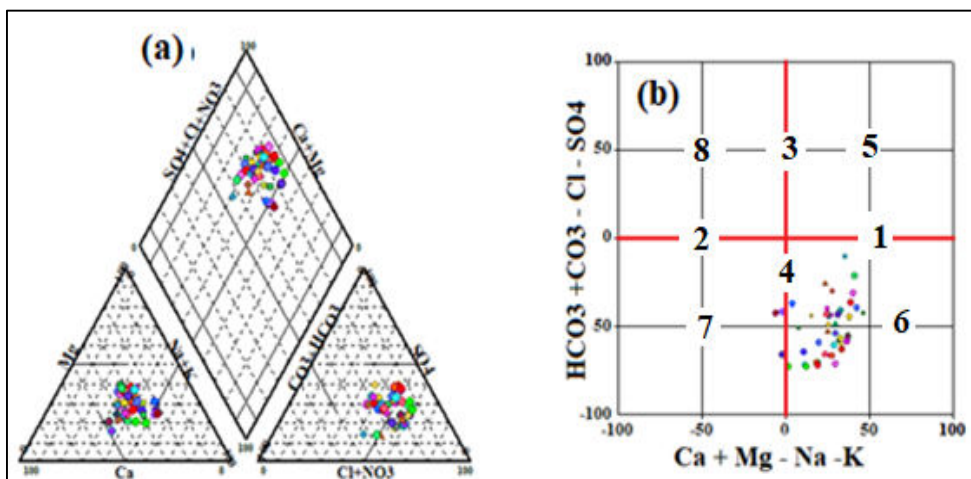
**Figure 27 :** Diagramme binaire pour les éléments (a) : Ca Vs HCO<sub>3</sub> , (b) : Ca Vs SO<sub>4</sub> , (c) : Ca Vs Mg , (d) : Mg Vs HCO<sub>3</sub> , (e) : Mg Vs SO<sub>4</sub> , (f) : Cl Vs Na  
 Diagramme (g) :  $(Ca+Mg+HCO_3)/(Na+Cl+SO_4)$  vs CE

La représentation graphique  $(Ca+Mg+HCO_3)/(Na+Cl+SO_4)$  vs CE (Figure 27.g) montre que la salinité des eaux dans la zone d'étude est en liaison directe avec l'effet des évaporites pour la plus part des échantillons prélevés, et seulement trois point d'eau ayant une minéralisation faible et Sept point d'eau ayant une minéralisation forte.

### III.3.2.2. Diagramme de Piper

Le diagramme a la particularité de représenter plusieurs échantillons sur le même plan. Il est composé de deux triangles, permettant de déterminer les faciès cationique et anionique. Le faciès global est obtenu par intersection sur un losange synthétisant le faciès chimique de l'échantillon considéré.

La représentation graphique des échantillons sur le diagramme triangulaire de Piper à l'aide du logiciel Diagramme version 6.77 en utilisant les données hydrochimiques de 45 échantillons montre (Figure 28.a) que l'ensemble des points d'eau ont une dominance des ions : chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne (99 % des échantillons), cela confirme la dissolution des formations carbonatées et gypseuses du Miocène, ainsi que l'impact des facteurs anthropiques tel que les rejets des eaux usées non épurées et l'utilisation des fertilisants et engrais chimiques en agriculture.



**Figure 28 :** Diagrammes de Piper, et Chadha des eaux de la nappe de zone d'étude

### III.3.2.3. Diagramme de Chadha

Il s'agit d'une version modifiée du diagramme de Piper. Dans ce diagramme, la différence en pourcentage milliéquivalent entre les alcalino-terreux (calcium plus magnésium), exprimée en pourcentage de valeurs de réaction, est portée sur les axes X, et la différence en pourcentage milliéquivalent entre les anions acides faibles (carbonate plus bicarbonate) et les anions acides forts (chlorure plus sulfate) est portée sur l'axe Y. Le champ résultant est le carré ou le rectangle, selon la taille des échelles choisies pour les coordonnées X et Y.

Les différences de pourcentage en milliéquivalents entre les alcalino-terreux et les métaux alcalins, ainsi qu'entre les anions faiblement acides et les anions fortement acides, sont représentées dans l'un des quatre sous-champs possibles du diagramme. Le champ carré ou rectangulaire décrit le caractère global de l'eau.

Afin de définir le caractère primaire de l'eau, le champ rectangulaire est divisé en huit sous-champs, chacun d'eux représentant un type d'eau comme suit :

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.

5. Les alcalino-terreux et les anions acides faibles dépassent respectivement les métaux alcalins et les anions acides forts, respectivement. Une telle eau a une dureté temporaire. La position des points de données dans le diagramme représente le type  $\text{Ca}^{2+}$ - $\text{Mg}^{2+}$ - $\text{HCO}_3^-$  le type  $\text{Ca}^{2+}$ - $\text{Mg}^{2+}$  dominant  $\text{HCO}_3^-$  type, ou  $\text{HCO}_3^-$  - dominant  $\text{Ca}^{2+}$ - $\text{Mg}^{2+}$ .

6. Les alcalino-terreux dépassent les métaux alcalins et les anions acides forts dépassent les anions acides faibles. Une telle eau a une dureté permanente et ne dépose pas de carbonate de sodium résiduel lors de l'utilisation en irrigation. Les positions des points de données dans le diagramme représentent les eaux de type  $\text{Ca}^{2+}$ - $\text{Mg}^{2+}$ - $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ - $\text{Mg}^{2+}$ -dominant  $\text{Cl}^-$ , ou  $\text{Cl}^-$ -dominant  $\text{Ca}^{2+}$ - $\text{Mg}^{2+}$ .

7. Les métaux alcalins dépassent les alcalino-terreux et les anions acides forts dépassent les anions acides faibles. Ce type d'eau crée généralement des problèmes de salinité, tant pour l'irrigation que pour l'eau potable. Les positions des points de données dans le diagramme représentent des eaux de type  $\text{Na}^+$ - $\text{Cl}^-$ , de type  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , de type  $\text{Cl}^-$  à dominance  $\text{Na}^+$  ou de type  $\text{Na}^+$  à dominance  $\text{Cl}^-$ .

8. Les métaux alcalins dépassent les alcalino-terreux et les anions acides faibles dépassent les anions acides forts, de telles eaux déposent du carbonate de sodium résiduel lors de l'utilisation en irrigation et provoquent des problèmes de moussage. Les positions des points de données dans le diagramme représentent des eaux de type  $\text{Na}^+$ - $\text{HCO}_3^-$ , à de type  $\text{Na}^+$  - dominance  $\text{HCO}_3^-$ , ou de type  $\text{HCO}_3^-$  - dominance  $\text{Na}^+$  (Chadha, 1999).

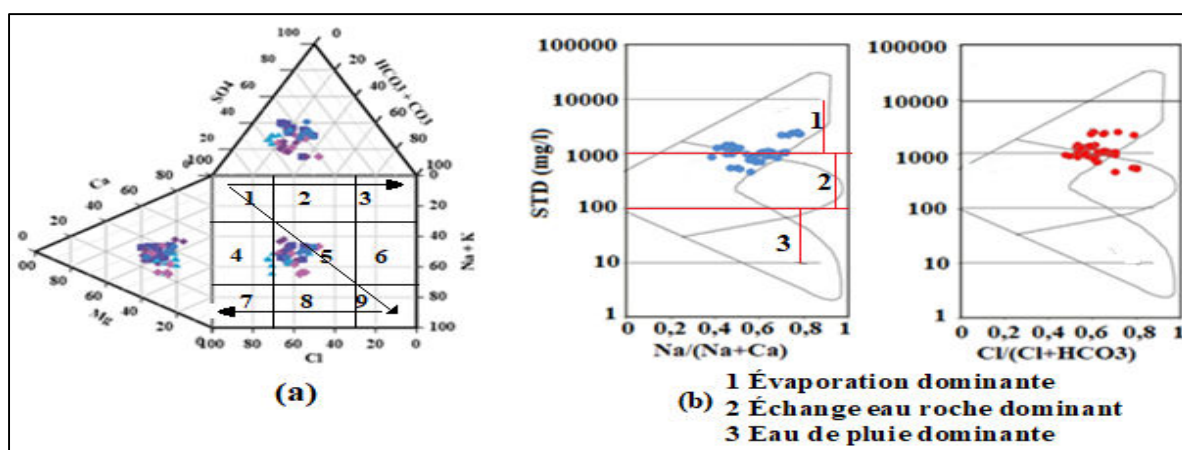
La projection des échantillons sur le diagramme de Chadha (Figure 28.b) montre que la plupart des échantillons (42 points) d'eau souterraine sont localisés dans le champ 6 montrant un faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien ( $\text{Cl}^-$  -  $\text{SO}_4^{2-}$  -  $\text{Ca}^{2+}$  -  $\text{Mg}^{2+}$ ), alors que seulement trois points d'eau se localisent dans le champ 7 indiquant un faciès chloruré et sulfaté sodique et potassique

#### III.3.2.4. Diagramme de Durov

Il est très similaire au diagramme de Piper avec l'ajout d'un carré et/ou de deux diagrammes rectangulaires de 9 casiers à l'échelle situés à côté de la base de deux triangles similaires à ceux utilisés dans le diagramme de Piper. L'objectif des diagrammes carrés et/ou rectangulaires supplémentaires est de présenter également les concentrations totales ou absolues de deux paramètres sélectionnés tels que la concentration totale en cations ou en ions, le TDS ou le pH. La concentration des deux paramètres sélectionnés est représentée sur le diagramme de Durov en prolongeant une ligne droite à partir du point tracé sur le triangle représentant le pourcentage relatif de trois ions, avec une ligne sur le diagramme représentant une concentration du paramètre sélectionné.

De cette manière, le diagramme de Durov peut être utilisé pour présenter le pourcentage relatif de cations et d'anions, présenter les valeurs de pH, et présenter la concentration de TDS en mg/l de plusieurs échantillons sur un graphique (Deborah et al., 2012). Le principal objectif du diagramme de Durov est de montrer le regroupement des points de données pour indiquer les échantillons qui ont des compositions similaires (Hem, 1989).

La projection des données hydrochimiques pour les 45 points d'eau sur le diagramme de Durov (Figure 29.a) en utilisant le logiciel Golden Software Grapher 20.1 a montré que la totalité des échantillons d'eau souterraine sont regroupés dans les deux casiers 5 et 4 avec une répartition diagonale suivant la ligne de mixage conservative, leur composition résulte ainsi des réactions de mélange des eaux de différentes origines (évaporation, et interaction eau-roche), et confirme que les eaux souterraines de cette nappe est de type Ca-Mg-Cl-SO<sub>4</sub> (Hennia et al 2022).



**Figure 29 :** Diagrammes Durov, et Gibbs des eaux de la nappe alluvial du MCO

### III.3.2.5. Diagramme Gibbs

Le diagramme de Gibbs (Gibbs 1970) a longtemps et largement utilisé en hydrogéochimie, avec succès, pour identifier et caractériser les naturels impliqués dans le processus de la minéralisation d'une eau souterraine. Il est composé de deux diagrammes :

un diagramme montrant les relations entre TDS vs à  $\text{Na}^+ (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$  et l'autre TDS vs  $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$  à la base de la minéralisation d'une eau souterraine, son application a pu identifier des processus et des réactions chimiques qui gouvernent dans la nappe, et qui sont le phénomène d'évaporation, et d'interaction eau-roche .

La projection des données hydrochimiques de 45 points d'eau sur le diagramme de Gibbs par l'emploi de l'Excel 2021 a donné (Figure 29.b) ; tous les points d'eau se trouvent dans les zones 1 et 2 qui caractérisent le processus de la minéralisation des eaux de la nappe, qui résulte du phénomène d'évaporation, et de l'interaction eau-roche, cela confirme les résultats obtenus précédemment.



### III.4. Évaluation de la qualité de l'eau

La qualité de l'eau est affectée par un large éventail d'influences naturelles et humaines. Parmi les influences naturelles, les plus importantes sont géologiques, hydrologiques et climatiques, car elles affectent la quantité et la qualité de l'eau disponible. Leur influence est généralement plus importante lorsque les quantités d'eau disponibles sont faibles et qu'il faut utiliser au maximum cette ressource limitée.

Il y a un certain nombre d'ions dans l'eau à différentes concentrations et il y a des déterminants de ces concentrations pour une utilisation à des fins diverses, telle que la consommation humaine ou animale, l'irrigation et la construction. Il existe plusieurs classifications de l'eau pour différents usages en fonction des concentrations d'ions et des relations entre ces ions. Un certain nombre d'organisations scientifiques ont créé les déterminants des concentrations d'ions pour différents usages, notamment l'Organisation mondiale de la santé et les normes de l'Algérie établie par le ministre des ressources en eau.

La qualité de l'eau est un terme utilisé pour exprimer l'aptitude de l'eau à soutenir divers usages ou processus. Toute utilisation particulière aura certaines exigences quant aux caractéristiques physiques, chimiques ou biologiques de l'eau. La qualité de l'eau est affectée par un large éventail d'influences naturelles et humaines. Les influences naturelles les plus importantes sont géologiques, hydrologiques et climatiques, car elles affectent la quantité et la qualité de l'eau disponible.

#### III.4.1. Aptitude de l'eau à la consommation humaine

L'aptitude de l'eau à la consommation est d'une grande importance pour la vie humaine. L'impact de l'eau sur la santé provient principalement de la consommation d'eau contenant des organismes pathogènes ou des produits chimiques toxiques et de l'utilisation de volumes d'eau inadéquats qui conduisent à une mauvaise hygiène personnelle et domestique (OMS, 2017). Dans le but d'évaluer l'aptitude des eaux souterraines à la consommation humaine, la norme Algérienne (2011) et la norme de l'Organisation mondiale de la santé pour l'année 2017 (OMS 2017) sont utilisées pour déterminer leur aptitude à l'alimentation en eau potable.

##### III.4.1. 1. Calcul de l'Indice de qualité de l'eau

L'indice de la qualité de l'eau (IQE) est une méthode simple utilisée comme partie de l'analyse de la qualité générale de l'eau à l'aide d'un groupe de paramètres réduisant les grandes quantités d'informations à un seul nombre, généralement sans dimension, d'une manière simple et reproductible (Abbasi *et al.*, 2012).

L'indice de qualité de l'eau ( water quality index WQI) a été recommandé par de nombreux chercheurs (Bouderbala 2017 ;Leizou, Nduka et al. 2017 ; Udom, Nwankwoala et al. 2016 ;Kumar, Rammohan et al. 2009) pour l'évaluation de la qualité des eaux, dix paramètres ont été utilisés pour l'estimation de cet indice selon les quatre étapes suivantes :

### Étape I

Chaque paramètre physico-chimique de dix paramètres utilisés (CE , pH, Ca<sup>2+</sup> , Mg<sup>2+</sup> , Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup> , SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> ,et NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ) « i » doit y avoir une pondération qui variée de 1 à 5 comme indiqué dans le tableau ci-dessous (Tableau 17), suivant leur signification dans la qualité globale de l'eau potable. Ce qui permet la détermination de la pondération relative « Wi » pour chaque paramètre selon la formule suivante :

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

où, Wi = Pondération (Poids) relative

wi = Pondération (Poids) de chaque paramètre physico-chimique i ;

n = nombre des paramètres physico-chimique

**Tableau 17** : Poids relatifs de paramètres physico-chimiques

Paramètres (i)	Poids (wi)	Poids relatifs (Wi)	Normes	
			OMS (2017)	Algérienne (2011)
Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	4	0,1053	<b>75</b>	<b>200</b>
Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	4	0,1053	<b>50</b>	<b>150</b>
Na <sup>+</sup> (mg/l)	4	0,1053	<b>200</b>	<b>200</b>
K <sup>+</sup> (mg/l)	1	0,0263	<b>12</b>	<b>12</b>
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	5	0,1316	<b>250</b>	<b>500</b>
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	5	0,1316	<b>250</b>	<b>400</b>
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	1	0,0263	<b>500</b>	<b>500</b>
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	5	0,1316	<b>50</b>	<b>50</b>
CE (mS/cm)	5	0,1316	<b>1,5</b>	<b>2,8</b>
pH	4	0,1053	<b>6,8</b>	<b>6,5 à 9</b>
<b>Somme</b>	<b>38</b>	<b>1</b>		

Le poids maximal 5 a été attribué au NO<sub>3</sub><sup>-</sup> , CE, Cl<sup>-</sup> , et SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> en raison de leurs importances majeures dans la qualité de l'eau, alors qu'un poids minimal de 1 a été attribué au K<sup>+</sup> et HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> en raison de son impact insignifiant dans la qualité. Pour les autres paramètres tels que pH, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, et Na<sup>+</sup> un poids 4 a été attribué en raison de leur relative importance dans la qualité de l'eau.

**Étape II**

Le degré de qualité est obtenu par la formule suivante :

$$Q_i = \left( \frac{C_i}{S_i} \right) \times 100$$

Où,  $Q_i$  = degré de qualité ;

$C_i$  = Concentration de chaque paramètre physico-chimique « i » de l'échantillon d'eau ;

$S_i$  = Valeur admissible de chaque paramètre selon les normes OMS pour l'année 2017, et aussi les normes Algériennes.

**Étape III**

Le sous-indice «  $S_{li}$  » est calculé par la formule suivante :

$$S_{li} = W_i \times Q_i$$

Où,  $S_{li}$  = Sous-indice du  $i^{\text{ème}}$  paramètre

$Q_i$  = degré de qualité du paramètre  $i^{\text{ème}}$

**Étape IV**

L'indice de la qualité de l'eau sera déterminé au moyen de la formule :

$$WQI = \sum_{i=1}^n S_{li}$$

En suite détermination de type de qualité suivants l'indice WQI et les classes de qualité (Tableau 18)

**Tableau 18 :** Classes de qualité de l'eau

Classes	Type de qualité d'eau
< 50	Eau de qualité Excellente
50 - 100	Eau de qualité Bonne
100,1 - 200	Eau de qualité mauvaise
200,1 - 300	Eau de qualité très mauvaise
> 300	Eau impropre à la consommation humaine

Le calcul de l'indice de qualité des eaux de la nappe alluviale pour les 45 données hydrochimiques pour les deux normes, OMS 2017, et Algérienne 2011 a donné les résultats représentés dans le Tableau 19.

**Tableau 19** : l'indice de qualité des eaux de la nappe selon la norme de OMS 2017

Point d'eau	WQI	Type de Qualité	Point d'eau	WQI	Type de Qualité	
32	45,95	Excellente	33	96,77	Bonne	
20	48,8		37	96,95		
18	49,05		36	97,42		
19	49,8		28	97,79		
15	65,56	Bonne	35	99,79	Mauvaise	
30	71,41		5	102,39		
16	71,9		45	102,84		
39	75,39		44	107,72		
17	80,62		3	108,29		
29	83,32		40	110,68		
14	83,87		41	111,14		
1	84,02		6	112,2		
38	85,65		43	112,21		
31	86,65		2	115,04		
13	86,88		4	116,05		
27	89,82		10	119,52		
21	92,49		9	167,24		
22	92,95		11	179,83		
23	93,78		12	186,88		
24	93,9		7	188,41		
25	94,65		8	194,29		
26	95,13		42	194,78		
34	95,6					

Après le calcul de l'indice de qualité des eaux de la nappe alluviale du MCO en utilisant les résultats d'analyses physico-chimiques et les normes de OMS 2017 de la qualité des eaux de consommation humaine, les classes de qualité des eaux ont été déterminées pour les 45 échantillons. Ainsi, trois classes de qualité identifiées et qui sont (Tableau 19) :

**Groupe I** : représente les points d'eau d'une excellente qualité qui regroupe 4 points d'eau (18, 19, 20, et 32), avec un indice de qualité variant entre 45,95 et 49,80 ( $WQI < 50$ ).

**Groupe II** : représente les points d'eau d'une bonne qualité qui regroupe 24 points d'eau (1, 13, 14, 15, 16, 17, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39), avec un indice de qualité qui varie entre 65,56 et 99,79 ( $50 < WQI < 100$ ).

**Groupe III** : représente les points d'eau d'une mauvaise qualité qui regroupe 17 points d'eau (2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 40, 41, 42, 43, 44, 45), avec un indice de qualité qui varie entre 102,39 et 194,78 ( $100 < WQI < 200$ ).

Selon les normes Algériennes, le calcul de l'indice de qualité des eaux de la nappe alluviale a donné aussi la présence de trois groupes de qualité comme suite (Tableau 20) :

**Tableau 20** : l'indice de qualité des eaux de la nappe selon les normes Algériennes

Point d'eau	WQI	Type de qualité	Point d'eau	WQI	Type de qualité	
32	31,88	Excellente	34	59,91	Bonne	
20	34,2		24	60,52		
18	34,49		35	60,75		
19	35,54		5	60,88		
15	42,75		28	62,08		
30	44,82		36	62,98		
16	47,84		45	64,93		
39	48,95		3	65,37		
38	52,48	Bonne	6	66,44		
17	53,31		2	67,41		
14	53,52		44	67,73		
1	53,73		4	68,57		
29	55,09		43	70,4		
21	56,07		10	71,29		
13	57,56		40	71,95		
25	57,82		41	72,59		
31	58,02		Bonne	9	100,17	Mauvaise
26	58,09			11	102,41	
27	58,31			12	108,15	
37	58,56			7	109,03	
23	59,09			8	110,76	
33	59,41			42	114,95	
22	59,86					

**Groupe I** : représente les points d'eau d'une excellente qualité qui regroupe 8 points d'eau (15, 16, 18, 19, 20, 30, 32 et 39), avec un indice de qualité qui varie entre 31,88 et 48,95 ( $WQI < 50$ ).

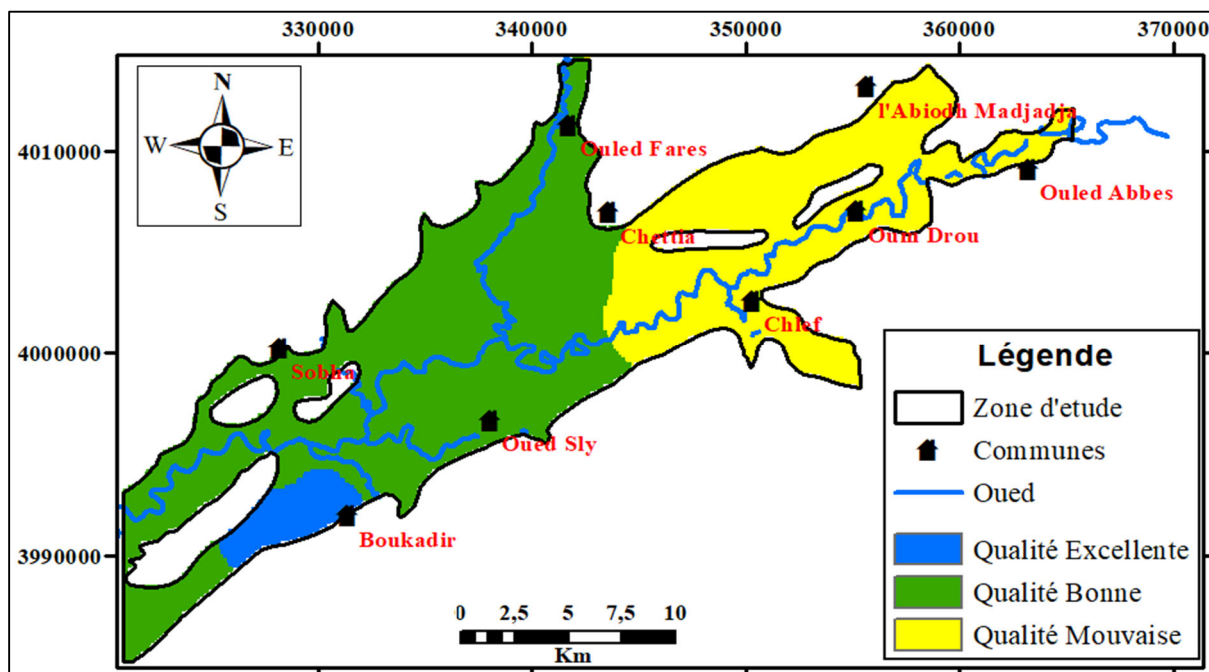
**Groupe II** : représente les points d'eau d'une bonne qualité qui regroupe 31 points d'eau (1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 13, 14, 17, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 31, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 40, 41, 43, 44, et 45), avec un indice de qualité qui varie entre 52,48 et 72,59 ( $50 < WQI < 100$ ).

**Groupe III** : représente les points d'eau d'une mauvaise qualité qui regroupe 6 points d'eau (7, 8, 9, 11, 12, et 42), avec un indice de qualité qui varie entre 100,17 et 114,95 ( $100 < WQI < 200$ ).

### III.4.1.2. Cartographie de la qualité des eaux

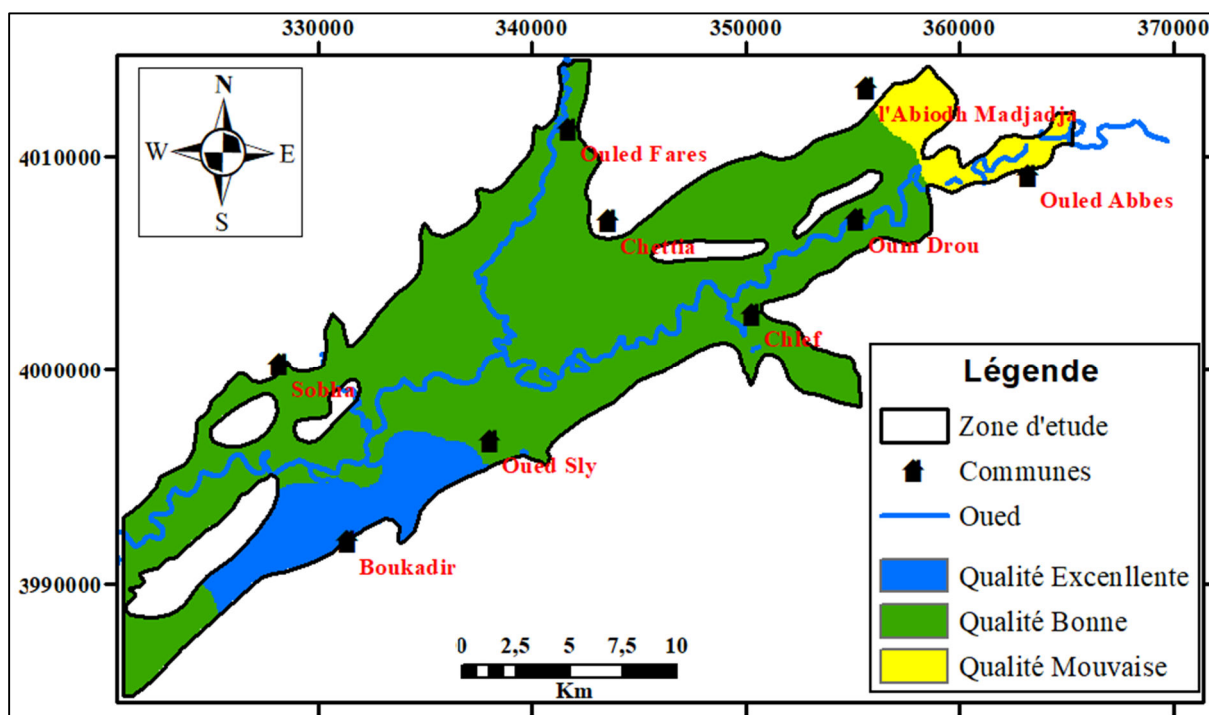
Après l'estimation de l'indice de qualité des eaux souterraines pour les différents puits et forages de la plaine selon les normes de l'OMS 2017, et les normes Algériennes 2011, l'outil cartographique à l'aide du logiciel ArcGis et l'extension Spatial Analyst a été utilisé pour visualiser la distribution spatiale de cet indice dans la zone d'étude pour l'année 2019, avec une interpolation à l'aide de la technique de distance inverse (IDW). L'outil cartographique reste un outil très appréciable pour l'obtention des différentes classes de la qualité des eaux souterraines de cette région.

Le logiciel ArcGis permet l'intégration et la répartition spatiale des résultats calculés précédemment de l'indice de qualité des eaux de la nappe de la zone d'étude selon les normes OMS 2017 et Algérienne 2011, avec une représentation des cartes sous le format Raster.



**Figure 30 :** Répartition spatiale de l'indice de qualité des eaux de la nappe alluviale du MCO selon les normes OMS 2017

La répartition spatiale de l'indice de qualité (Figure 30) selon les normes de l'OMS 2017 des eaux montre une qualité excellente pour environ 9 % des échantillons qui sont localisés au Sud-Ouest de la plaine, dans les environs de la ville de Boukadir, la qualité bonne de plus de 53 % des échantillons se localise entre le centre et l'extrême Ouest de la plaine, soit entre Chettia, Ouled Fares, Oud Sly, Sobha, et Boukadir, alors que la qualité mauvaise occupe la partie amont de la plaine, au niveau de Ouled Abbès, Oum Drou, et Chlef, cela est dû probablement aux effets d'échange eau-roche dans le réservoir aquifère, évaporation, et aux activités anthropiques.



**Figure 31 :** Répartition spatiale de l'indice de qualité des eaux de la nappe alluvial du MCO selon les normes Algérienne

La répartition spatiale de l'indice de qualité calculée selon les normes Algérienne présentée par cette carte (Figure 31) est la même que celle de la Figure 30, Le groupe III de la mauvaise qualité s'est trouvée rétrécie (13 %) au profit du groupe II (69 %) d'une bonne qualité, et aussi le groupe I d'une qualité excellente c'est élargi (18 %) au profil du groupe II.

#### III.4.2. Aptitude de l'eau de la nappe alluviale à l'irrigation

L'aptitude de l'eau à l'irrigation est déterminée par ses constituants minéraux et le type de plante et de sol à irriguer (Qannam, 2003). Il existe de nombreuses classifications pour connaître l'aptitude de l'eau à l'irrigation. Elles dépendent de plusieurs variables dont les cations, les anions, la CE, le TDS, le pH, le taux d'adsorption du sodium (SAR), le pourcentage de sodium soluble (Na %).

La classification des eaux en fonction du pourcentage du sodium absorbé par l'eau (méthode de Richards) permet de bien classée les eaux en fonction de la conductivité électrique à 25 °C et le SAR (Sodium Adsorption Ratio) dans l'eau, défini par la formule ci-dessous :

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{(Ca^{2+} + Mg^{2+})}{2}}}$$

(Concentrations de  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ , et  $Mg^{2+}$  en meq/l, d'après APPELO).

### Diagramme de Wilcox

Les concentrations élevées de sodium contenu dans une eau d'irrigation limitent souvent son utilisation en irrigation. Il est absorbé dans des sites d'échange de cations dans le sol et cause la dispersion des agrégats. Ainsi, les pores se trouvent scellés et, en conséquence, la perméabilité du sol est réduite, en particulier pour les sols argileux qui deviennent anaérobique, sodique ou compactés. La classification de Wilcox, (1948), est fondée sur la conductivité électrique (CE en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) en abscisse et la teneur en sodium dans l'eau qui est exprimée en pourcentage en ordonnées :

$$\text{Na (\%)} = \left[ \frac{(\text{Na}^+ + \text{K}^+)}{(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{K}^+)} \right] * 100$$

À l'issue de la classification de Wilcox, cinq classes pourront être attribuées à une eau d'irrigation : Excellente, bonne, admissible, médiocre et mauvaise.

L'évaluation de l'aptitude physico-chimique des eaux souterraines de nappe alluviale du moyen Cheliff à l'irrigation a été effectuée par les diagrammes Wilcox (1948) et Richards (1954) en utilisant les mêmes données hydrochimiques de 45 points d'eau à l'aide du logiciel Diagramme, ce qui a permis la représentation des données sur les diagrammes de Richards et Wilcox (Figure 31) :

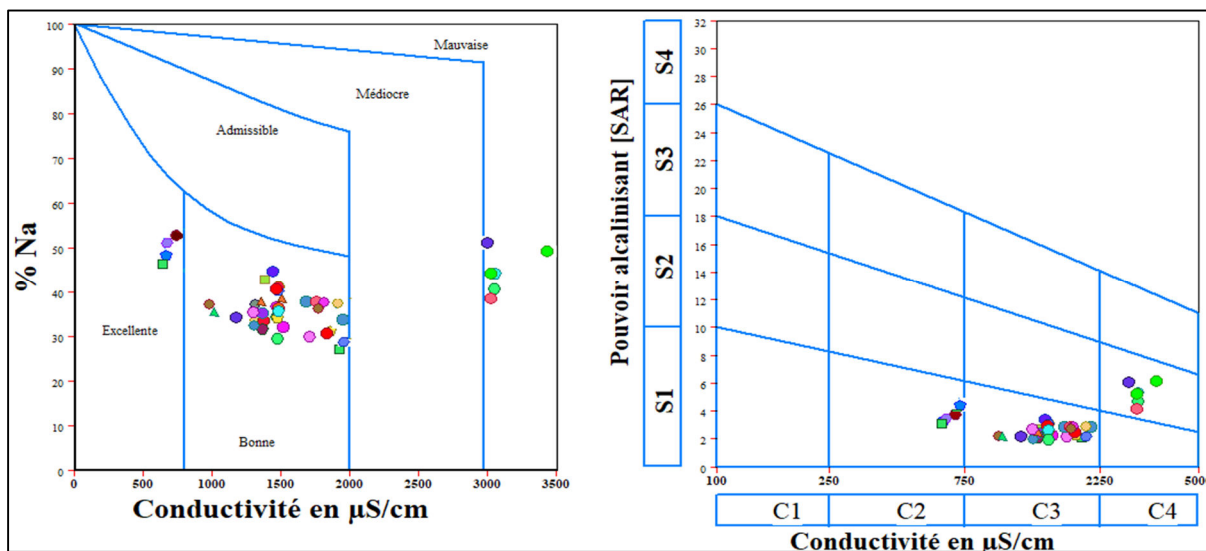


Figure 32 : Diagrammes de Wilcox et Richards



Le récapitulatif des résultats est indiqués dans le tableau ci-dessous (Tableau 21)

**Tableau 21** : Classes de la qualité des eaux d'après les diagrammes Wilcox et Richards

Points d'eau	Classes		(%)
	Wilcox	Richards	
18, 19, 20, 32	Excellente	C2S1	9
1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 13, 14, 15, 16, 17, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 43, 44,45	Bonne	C3S1	78
7, 8, 9, 11, 12,42	Mauvaise	C4S2	13

9 % des échantillons d'eau ont une excellente qualité d'après Wilcox, soit une catégorie C2S1 selon Richards diagramme, ils concernent les points d'eau situés dans l'extrême partie ouest de la plaine, près de la ville de Boukadir. 78 % des échantillons ont une bonne qualité d'après Wilcox, et une catégorie C3S1 d'après Richards classification. Ces eaux peuvent être utilisées pour l'irrigation des plantes qui présentent une bonne tolérance aux sels et aux sols bien aménagés par drainage, mais un contrôle périodique de l'évolution de la salinité est souhaitable. Et 13 % des échantillons ont une qualité mauvaise selon Wilcox classification et une catégorie C4S2 selon Richards, ce qui indique que ces eaux ne conviennent pas à l'irrigation dans les conditions normales, mais elles peuvent être utilisées si les espèces ont une très bonne tolérance à la salinité et le sol est particulièrement bien drainé. Cette classe de mauvaise qualité touche la partie amont de la plaine.

### III.5. Conclusion

Dans ce Chapitre d'étude de caractérisation hydrochimique des 45 analyses physico-chimiques des eaux souterraines pour l'année 2017 à l'aide des méthodes Statistique, et diagrammes a permis de détermine les facies prédominants, aussi que le mécanisme de minéralisation des eaux souterraines.

Le calcul, et cartographie de l'indice de qualité des eaux souterraines suivants les normes OMS 2017, et Algérienne 2011, a permis de détermine et localisé les zones de qualité (Excellente, Bonne, et mauvaise).

Classification des eaux de notre nappe en fonction du pourcentage du sodium, et le diagramme de Wilcox a permis de détermine l'aptitude des eaux à l'irrigation.

On générale, l'étude et la cartographie des eaux souterraines de la nappe du Moyen Cheliff Occidental va permis de mieux gérer, protéger, et préserver cette ressource précieuse.

# Chapitre IV

## Étude de vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution

## IV.1. Introduction

L'étude de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraines permet une meilleure gestion des eaux souterraines et des interventions convenables pour éviter les contaminations. Elle permet aussi de préciser les zones sollicitées à être contaminées suite à des activités anthropiques. Une fois identifiées, ces régions peuvent être visées avec prudence par les planificateurs et les utilisateurs de la terre. Les cartes de vulnérabilité des aquifères sont des outils standards pour protéger les eaux souterraines contre toute éventuelle source de pollution. Elles sont précieuses pour toute décision future.

## IV.2. Pollution des eaux souterraines

### IV.2.1. Définition de la pollution des eaux

Une eau est polluée lorsqu'elle est influencée par une activité humaine, elle perd au moins une de ses fonctions (ou un de ses usages). Elle devient alors impropre à l'utilisation et peut présenter un danger pour l'environnement. Les eaux souterraines se caractérisent par leur teneur en substances minérales dissoutes d'origine naturelle (géologique) (Rakotovahoaka, 2007).

### IV.2.2. Origines des pollutions

#### ❖ Pollution d'origine urbaine :

Les rejets provenant des eaux résiduaires urbaines.

#### ❖ Pollution d'origine industrielle :

Polluants et micro-polluants organiques (hydrocarbure, solvant, phénol) ou inorganique (métaux lourds, ammoniacale ....)

#### ❖ Pollution d'origine agricole :

Engrais, pesticides ou herbicides entraînés par les eaux de pluie et le ruissellement, et les rejets organiques dues à la présence d'élevage importants (Akziz, 2008).

### IV.2.3. Migration des polluants vers les eaux souterraines

Les polluants peuvent pénétrer dans les aquifères comme suite :

- les polluants déversés en grande quantité à la surface du sol peuvent pénétrer dans un aquifère par infiltration verticale directe. Les composantes solubles des déchets ont tendance à se dissoudre dans l'eau de pluie ou l'eau de d'irrigation et à s'infiltrer jusqu'à l'aquifère.

- d'autres polluants peuvent pénétrer vers les eaux souterraines à partir de surface lorsque les niveaux des rivières ou des lacs sont plus élevés que la surface libre de la nappe. Le pompage d'eaux souterraines peut faire baisser la surface libre et favoriser ainsi l'infiltration de l'eau de surface polluée dans les aquifères. Une situation similaire peut se produire le long des côtes où le captage excessif peut provoquer l'invasion d'eau salée dans les aquifères d'eau douce.

- Enfin, la contamination peut augmenter en profondeur en raison de l'interaction entre les matériaux étrangers et les eaux de surface ou les eaux souterraines. À titre d'exemple, les carrières de sable, d'argile et de gravier imbibées d'eau et les mines abandonnées peuvent se remplir de déchets. L'élimination de quantités importantes de décombres, comme ce fut le cas après la seconde guerre mondiale, peut faire augmenter la teneur en sulfate des eaux souterraines de par la décomposition du plâtre (Jackson, 1986).

### IV.3. Concept de vulnérabilité des eaux souterraine à la pollution

#### IV.3.1. Notion de vulnérabilité

Le terme « vulnérabilité » de l'eau souterraine à la contamination aurait été pour la première fois utilisé par Margat (1968). Le concept de vulnérabilité de l'eau souterraine est généralement défini comme «la capacité d'un système hydrogéologique à transmettre un contaminant potentiel depuis la surface du sol jusqu'à atteindre la zone saturée ». Véhiculé l'eau des précipitations qui s'infiltré depuis la surface du sol, donc le contaminant percole ainsi à travers la zone vadose jusqu'à atteindre la zone saturée (Guillaume, 2012).

Certains auteurs l'ont défini comme une propriété intrinsèque des aquifères ; d'autres estiment que la vulnérabilité est liée aux propriétés spécifiques du contaminant. Cependant, d'autres auteurs l'associent aux activités humaines et à la qualité agro-pédologique des terrains de surface (Amharref & Bernoussi., 2007). La vulnérabilité d'une nappe traduit la facilité avec laquelle elle peut être atteinte par une pollution provenant de la surface du sol (Sinan & Bouibrine, 2007). Selon une approche déterministe « Source-Transfert-Récepteur », la vulnérabilité correspondrait au module « Transfert » en représentant le transport d'un contaminant depuis la source jusqu'au milieu récepteur. Le module « Source » représente la répartition spatiale de la charge de contaminant à la surface du sol et le module « Récepteur » est l'eau souterraine (Guillaume, 2012).

### IV.3.2. Types de vulnérabilité

On distingue deux types de vulnérabilité : intrinsèque et spécifique.

#### IV.3.2.1. Vulnérabilité intrinsèque

C'est le terme utilisé pour représenter les caractéristiques du milieu naturel qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la pollution par les activités humaines (Rakotovahoaka, 2007).

L'US-EPA (1993) définit la « sensibilité intrinsèque » d'un aquifère en fonction des caractéristiques intrinsèques géologiques et hydrogéologiques du milieu et la « vulnérabilité spécifique » ou simplement la « vulnérabilité » d'un aquifère en incluant l'occupation du sol et les caractéristiques d'un contaminant. En Europe, la « vulnérabilité intrinsèque » d'un aquifère est définie comme uniquement fonction des paramètres hydrogéologiques (Guillaume, 2012).

#### IV.3.2.2. Vulnérabilité spécifique (zone à risque)

C'est le terme utilisé pour définir la vulnérabilité d'une eau souterraine à un polluant particulier ou à un groupe de polluants. Elle prend en compte les propriétés des polluants et leurs relations.

L'US-EPA (1993) définit la « vulnérabilité spécifique » comme décrivant les impacts potentiels dus à l'utilisation du sol et des contaminants présents. Parfois la charge de contaminant au sol est considérée comme un paramètre dans l'évaluation de la vulnérabilité. Elle peut en être également distincte quand l'approche de type « étude de risque » est utilisée (Guillaume, 2012).

### IV.3.3. Critères de la vulnérabilité

#### IV.3.3.1. Critères de vulnérabilité intrinsèque

La vulnérabilité d'une nappe dépend de multiples facteurs intervenant soit sur la nature et/ou la concentration de la contamination, soit sur son temps de transfert. L'ensemble des critères de vulnérabilité rencontrés dans la littérature sont exposés ci-dessous.

##### IV.3.3.1.1. Critères relatifs au sol

###### ❖ Ruissellement – infiltration :

Le ruissellement et l'infiltration efficace (quantité d'eau s'infiltrant jusqu'à la nappe) sont représentatifs de la recharge de la nappe. Ils sont étroitement liés à la topographie et à la nature des formations superficielles.

###### ❖ Couverture Pédologique :

La nature, la texture, la teneur en argiles et en matière organique, ainsi que la puissance (ou épaisseur).

#### IV.3.3.1.2. Critères relatifs à la zone non saturée

##### ❖ Profondeur de la nappe libre :

L'épaisseur de la Zone Non Saturée conditionne le temps de transfert d'un polluant jusqu'à la nappe (rétention, stockage, interactions physico-chimiques avec l'encaissant).

##### ❖ Amplitude de battement de nappe :

Elle peut devenir un critère de vulnérabilité dans la mesure où elle est significative (l'amplitude de battement de la nappe, conditionne l'épaisseur du recouvrement de la nappe).

##### ❖ Perméabilité verticale de la zone non saturée :

Elle dicte le temps de transfert vertical d'un polluant vers la nappe.

#### IV.3.3.2. Critères de vulnérabilité spécifique

Le comportement du polluant potentiel (milieu fixe) dépend des caractéristiques du milieu, mais également des propriétés physico-chimiques et biologiques du composé lui-même (réactions acides bases, d'oxydoréduction, de désorption, biodégradation, synthèse cellulaire, diffusion, évaporation, filtration, transport de germes,...).

##### IV.3.3.2.1. Capacités dispersives et épuratoires des sols

Concerne les propriétés auto épuratoires des sols.

##### IV.3.3.2.2. Qualité du réseau hydrographique

Le réseau hydrographique peut être un vecteur de contaminations vers les eaux souterraines.

##### IV.3.3.2.3. Typologie de l'occupation du sol

L'occupation du sol conditionne les volumes et la nature des polluants potentiels (forêt, cultures, élevage, habitat, tissu industriel, etc....).

##### IV.3.3.2.4. Points sensibles

Sur certains sites, de par l'activité à risque qui y est pratiquée, la vulnérabilité de la nappe est augmentée significativement (les surfaces agricoles et les décharges) (Baali, 2007).

#### IV.3.4. Méthodes d'estimation de la vulnérabilité

L'étude de vulnérabilité de l'eau souterraine à la pollution est un outil qui permet d'identifier les régions les plus susceptibles à la contamination dans un aquifère donné. Il existe plusieurs méthodes pour évaluer la vulnérabilité des aquifères :

##### **DRACTIC :**

Est basée sur l'estimation de sept paramètres relatifs à la recharge au sol, à la zone non saturée et à la zone saturée de l'aquifère.

**DRASTIC modifiée :**

Proposée par Sinan et al., (2003) de l'École Hassania des Travaux Publics, se base des paramètres DRASTIC, relatifs uniquement à la zone non saturée de la nappe. En effet, seuls ces paramètres interviennent dans le transfert vertical de la pollution à partir de la surface du sol. Les autres paramètres de la méthode DRASTIC (perméabilité et nature lithologique) n'interviennent pas dans le transfert (Koriche & Hababela, 2012).

**GOD :**

Ce système a été développé par Foster en 1987. Il présente la vulnérabilité de l'aquifère face à la percolation verticale de polluants à travers la zone non saturée et ne traite pas la migration latérale des polluants dans la zone saturée. Cette méthode est basée sur l'identification du type de nappe, type d'aquifère en termes de facteurs lithologiques et la profondeur de la nappe. Cette méthode donne une estimation rapide de la vulnérabilité d'un aquifère (Baali, 2007).

**PI :**

(Allemagne) Protective cover, Infiltrations conditions. Récemment appliquée dans la zone du Sud-Ouest de l'Allemagne (Pranville et al., 2007).

**AVI, Aquifer Vulnerability Index (Canada) :**

Cette méthode cherche à évaluer le temps de transport d'éventuels contaminants en fonction de l'épaisseur de la Z.N.S. Elle a été appliquée en 2005 en étant comparée à l'application de la méthode GOD.

**SINTACS (Civita, 1994) :**

Version italienne de la méthode DRASTIC, prend en compte les mêmes sept paramètres que DRASTIC mais considère cinq scénarios de vulnérabilité (impact normal, impact sévère, drainage important, karst, terrains fissurés) dans lesquels les poids des paramètres associés ont différentes côtes respectives (Guillaume, 2012).

**EPIK :**

Est une méthode indicée appliquée à la vulnérabilité des milieux karstiques prenant en compte les facteurs suivants (Dörfligerr et al., 1999) : le type de karst, la couche de sol au-dessus du karst, les conditions d'infiltration et de recharge et le réseau karstique (Guillaume, 2012).

**GALDIT :**

Michaud et al. 2003, est une approche de cartographie à index simple d'utilisation, elle nécessite peu de données. La détermination de l'indice de vulnérabilité des eaux souterraines par rapport à l'intrusion saline est fondée sur la combinaison de six paramètres pouvant influencer l'intrusion marine potentielle (Al Karkouri et al, 2014).

**Tableau 22 :** Les paramètres des différentes méthodes d'évaluation de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines (Mardhel, 2010).

Méthodes	Auteurs	Paramètres
DRASTIC	Aller et al., 1987	D : Distance à la nappe. R : Recharge A : Nature de la zone saturée S : Nature du Sol T: Topographie, pente en % I : Nature de la zone non saturée C: Perméabilité de l'aquifère
SINTACS	Civita., 1991	S : Profondeur de la nappe I : Infiltration (Recharge) N : Fonction de la zone non saturée T : Type de sol A : Type de l'Aquifère C : Conductivité hydraulique S : Topographie
EPIK	Doerfliger et al., 1996	E : Epikarst P : Couverture protectrice I : Conditions d'infiltration K : Développement du réseau karstique
RISKE	Petelet G et al., 2000	R : Roche aquifère I : Infiltration S : Sol K: Karstification, E : Epikarst
GOD	Foster., 1987	G : Type de nappe O : Type d'aquifère en termes de facteurs lithologiques D : Profondeur de la nappe
PI	Goldsheider et al., 2002	P : Couverture protectrice I : Condition d'infiltration
DISCO	Pochon et Zwahlen, 2003	DIS : Discontinuité CO : Couverture protectrice
GALDIT	Michaud et al. 2003	G : Type d'aquifère. A : Conductivité hydraulique de la couche aquifère L : Profondeur de la nappe en dessous du niveau de la mer D : Distance du rivage I : Impact de l'intrusion d'eau de mer T : Epaisseur de la couche aquifère.



#### IV.4. Aspect théorique de la méthode SINTACS

SINTACS est l'une des méthodes les plus utilisées pour les systèmes d'évaluation de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines. Il a été développé par le Groupe national de recherche pour la protection contre les catastrophes hydrogéologiques du Conseil national de recherche italien au début des années 1990. Il s'agit d'un développement de la méthode américaine DRASTIC qui est adapté aux conditions méditerranéennes. Les deux méthodes DRASTIC et SINTACS utilisent les mêmes paramètres, qui sont comme suite :

- **S** : Soggiacenza (profondeur de la nappe)
- **I** : Infiltrazione (infiltration)
- **N** : Azionedel Non Saturo (zone non saturée)
- **T** : TipologiadellaCopertura (texture de sol)
- **A** : CarratteriIdrogeologici dell' Acquifero (type d'aquifère)
- **C** : ConducibilitaIdraulica (conductivité)
- **S** : Acclivitàdella Superficie Topographica (topographie du sol)

##### IV.4.1. Historique de la méthode

Développé par Civita en 1994, à Italie, elle prend en compte les mêmes sept paramètres que DRASTIC.

##### IV.4.2. Etablissement des paramètres de SINTECS

###### IV.4.2.1. Profondeur da la nappe (S)

La profondeur de la nappe (S) est la distance entre la surface du sol et le toit la nappe, il indique la profondeur à laquelle un contaminant doit passer pour atteindre les eaux souterraines (Eftekhari, M.; Akbari, M., 2020). Ce paramètre permet de représenter de façon indirecte le temps nécessaire pour que le contaminant rejoint les eaux souterraines de la nappe (Jesudhas, et al 2021). Une faible profondeur d'eau souterraine entraîne une cote de vulnérabilité plus élevée.

###### IV.4.2.2 Infiltration (I)

C'est la quantité d'eau infiltrée depuis la surface du sol jusqu'à atteindre l'aquifère, et peut transporter des contaminants vers la nappe phréatique à travers la zone non saturée. Les résultats de l'infiltration efficace sont directement liés à la contamination des eaux souterraines, si l'infiltration efficace augmente, le potentiel de contamination des eaux souterraines augmentera également (Canora F., et al., 2020).

#### IV.4.2.3. Zone non saturée (N)

Les caractéristique et l'épaisseur de la zone non saturée influencent sur la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines. La zone non saturée au la zone vadose obtenue par la différence entre le fond de l'horizon du sol (la surface) et la côte piézométrique maximum de la nappe, ce paramètre contrôle la dilution et le taux de contaminants qui atteignent la zone saturée (Canora F., et al 2022).

Les cotes attribuées aux classes de la zone non saturée sont données dans le tableau 22.

#### IV.4.2.4. Sol (T)

La nature du sol affecte les mécanismes de transport du contaminant de la surface du sol à la nappe. La vulnérabilité potentielle de l'aquifère dépend des caractéristiques du sol telles que le pourcentage de matières organiques, la texture et la perméabilité du sol. Le milieu pédologique joue un rôle clé dans l'évaluation de l'indice de vulnérabilité des eaux souterraines car il limite le flux vertical de la contamination dans la subsurface. En outre, il a un impact significatif sur la quantité de recharge qui traverse le sol (Canora et al ,2022).

#### IV.4.2.5. Type aquifère (A)

Fait référence aux caractéristiques de la zone saturée, telles que le taux de porosité, les types et la taille des particules (Canora et al ,2022). La circulation et la propagation d'un contaminant dans la zone saturée dépendent de la texture et de la lithologie des couches de l'aquifère. Cela est toujours contrôlé par la granulométrie, la porosité, la perméabilité et la lithologie des formations géologiques.

#### IV.4.2.6. Conductivité hydraulique (C)

Mesure la capacité de l'aquifère à transmettre l'eau et contrôle la vitesse à laquelle l'eau souterraine se déplace lorsqu'elle est soumise à un gradient hydraulique donné. Ce paramètre contrôle le transport et la distribution des contaminants depuis le point d'injection à l'intérieur de la zone saturée (Canora et al ,2022). Une perméabilité élevée permet des taux d'infiltration plus importants et des concentrations plus élevées de contaminants d'atteindre la zone saturée. La perméabilité élevée du système aquifère fournit un indice de vulnérabilité élevé.

#### IV.4.2.7. Topographie (S)

Le paramètre topographie est représenté dans la méthode SINTACS par les valeurs de la pente la pente de la surface topographique en pourcentage. Ce paramètre indique la relation entre la pente et l'évolution de la vulnérabilité du fait que l'eau et le polluant peuvent s'écouler ou rester à la surface pendant un temps suffisamment long pour s'infiltrer. Pour une faible pente topographique, le taux d'infiltration est plus élevé et, par conséquent, les contaminants ont une plus grande probabilité de s'infiltrer dans l'aquifère. Avec des pentes plus importantes, la

capacité d'infiltration diminue et la surface est moins vulnérable à la contamination des eaux souterraines. Ainsi, en diminuant la pente, la vulnérabilité de l'aquifère augmente.

**Tableau 23** : Cotes attribuées à chaque paramètre de la méthode SINTACS (Zair et Bensalem, 2014)

Profondeur des nappes « S » (m)		Infiltration « I » (mm/an)	
Intervalles	Côtes	Intervalles	Côtes
41,47 – 100	01	0 – 30	01
24,3 – 41,47	02	31 – 50	02
16,5 – 24,3	03	50 – 80	03
10,8 – 16,5	04	81 – 100	04
8,2 – 10,8	05	101 – 120	05
5,6 – 8,2	06	121 – 150	06
3,9 – 5,6	07	151 – 180	07
2,6 – 3,9	08	181 – 210	08
1,3 – 2,6	09	211 – 250	09
0 – 1,3	10	251 – 300	10
Zone non saturée « N »		Type du sol « T »	
Nature de la zone	Côtes	Nature de sol	Côtes
Dépôt alluviale grossier	8 – 9	Sol à faible épaisseur /absent	9,8 – 10
Calcaire karstique	9 – 10	Gravier pur	9,7 – 10
Dolomie fracturée (fissurée)	4 – 7	Sable pur	8,9 – 9,5
Moyen à fin alluvion	6 – 8	Sol sableux	8 – 8,5
Calcaire fracturé	9 – 6	Schiste sableux	6,2 – 7
Complexe sableux	7 – 8	Sableux terreux	5,5 – 6
Grès – conglomérats	4 – 9	Limon–schiste–sable	4,5 – 5,2
Roches plutonique fissuré	2 – 4	Sol limoneux	3,5 – 4,2
Séquence turbiditique fissurée (Flysch)	5 – 8	Limono–terreux	3 – 4
Roche volcanique fissurée	8 – 10	Limoneux argileux	6 – 8
Type d'aquifère « A »		Conductivité « C »	
Nature d'aquifère	Côtes	Rang	Côtes
Alluvion grossier	8 – 9	Gravier	10
Karstique	9 – 10	Conglomérat	6 – 9
Dolomie fracture	4 – 7	Grès	7 – 4
Alluvion d'un amont	6 – 8	Sol marneux	4 – 2
Sable complexe	7 – 9	Sol terreux	3 – 2
Grès, conglomérat	4 – 9		
Flysch (séquence turbiditique)	5 – 8		
Marne, argile	1 – 3		
Topographie « S » %			
Intervalles	Côte		
0 – 5	10		
6 – 10	8		
11 – 20	5		
21 – 30	3		
> 30	1		

#### IV.4.3. Détermination de l'indice SINTACS

On peut utiliser de la méthode SINTACS pour calculer et déterminer l'indice (degré) de vulnérabilité et le potentiel polluant des eaux souterraines des nappes, l'indice de vulnérabilité de la méthode SINTACS est calculer comme les sommes pondérées des produits (Indice x Poids) pour chaque paramètre des sept paramètres utilisés par la méthode selon l'équation suivante :

$$\text{SINTACS} = (S_r \times S_w) + (I_r \times I_w) + (N_r \times N_w) + (T_r \times T_w) + (A_r \times A_w) + (C_r \times C_w) + (S_r \times S_w)$$

**W** (Wating) Poids du paramètre ;

**r** (Rating) Indice ou Côte du paramètre (varie de 1 à 10).

##### IV.4.3.1. Indices (Côtes) des paramètres

La méthode SINTACS utilise sept paramètres, des indices (côtes) qui varie selon les caractéristiques de chaque paramètre de 1 à 10 (Tableau 23), et attribué à chaque paramètre. Les indices attribués aux différents paramètres pour les différentes caractéristiques sont présentés dans le Tableau

##### IV.4.3.2. Poids des paramètres

Aussi des poids varie de 1 à 5, sont attribuées à chaque paramètre. Notamment, en raison du fait que les poids dans la méthode SINTACS sont donnés de manière plus inclusive avec plusieurs scénarios pour la prise en compte de toutes les conditions environnementales possibles, cette méthode peut être appliquée dans différentes zones hydrogéologiques (Kumar et al. 2013). Les poids attribués aux différents paramètres dans les différents scénarios sont présentés dans le Tableau 24.

**Tableau 24** : Les valeurs des poids des paramètres de la méthode SINTACS

Scénario Paramètres	Impacte Normal	Impacte Sévère	Drainage Important	Terrain très Karstifié	Terrain Fissuré
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

**Scénario « Impact Normal » :**

Scénario relatif aux aquifères constitués par des sédiments non consolidés avec une profondeur de la nappe qui n'est pas très élevée, localisés dans des aires à sols épais, Les zones relatives à ce scénario correspondent aux régions stables, de point de vue occupation des sols, avec existence ou non de terres cultivées, une utilisation faible de pesticides, de fertilisants et d'irrigation, et des périmètres urbains très dispersés ;

**Scénario « Impact Sévère » :**

Correspond aux mêmes types d'aquifères soumis à une occupation des sols intensive, avec des terres cultivées à forte utilisation de pesticides, de fertilisants et d'irrigation, des implantations industrielles et urbaines denses, et des dépôts liquides et solides de déchets.

**Scénario « Drainage important à partir d'un réseau superficiel » :**

Scénario relatif aux aires où il y a une forte infiltration vers l'aquifère à partir d'un réseau superficiel d'eau ;

**Scénario « Terrain très karstifié » :**

Utiliser dans le milieu Karstique.

**Scénario « Terrain fissuré » :**

Utiliser dans des terrains fissurés.

**IV.4.4. Classes de vulnérabilité**

L'indice de vulnérabilité SINTACS calculer est varié de 26 à 260 (Tableau 25), avec quatre classes de degré de vulnérabilité qui peuvent être identifiées selon les valeurs des indices de vulnérabilité, commence par la classe faible vulnérabilité, d'un indice inférieur à 106 et se termine par une classe de vulnérabilité très élevé d'un indice supérieur à 210. Les Quatre classes de vulnérabilité on fonction des valeurs de l'indice SINTACS sont présenté dans le Tableau

**Tableau 25 :** Classes de vulnérabilité dans la méthode SINTACS (Hamza et *al*, 2008)

Classes	Indice de vulnérabilité
<b>Faible</b>	26 - 106
<b>Moyen</b>	106 – 186
<b>Elevé</b>	187 – 210
<b>Très élevé</b>	210 - 260

L'indice SINTECS calculé représente une mesure du niveau de risque de contamination de l'unité hydrogéologique à laquelle il se rattache, Ce risque augmente avec la valeur de l'indice, Il peut prendre une valeur maximale de 260 (100 %) et une valeur minimale de 26 (0 %).

## IV.5. Cartographie de vulnérabilité

### IV.5.1. Objet de cartographie

La sensibilité d'une nappe à la pollution est une notion non mesurable dépendant des paramètres propres de la nappe, car elle est définie par rapport à une pollution qui a déjà atteint la nappe, à partir de la zone non saturée ou d'un ouvrage d'eau souterraine (puits, forage, etc) (Sinan et al., 2003).

L'objectif d'une carte de la vulnérabilité d'un système en eau souterraine à la contamination est de fournir le potentiel et le degré de risque de contamination, mais aussi le degré des conséquences possibles d'une contamination, de même que les éléments nécessaires, tant pour la prévention que pour les mesures mises en place à la suite d'une contamination (Doris, 1998). La cartographie de la vulnérabilité de l'aquifère permet une meilleure gestion de la nappe et des interventions rapides et appropriées en cas de pollution (Baali, 2007).

### IV.5.2. Cartographie de la vulnérabilité

Les logiciels SIG ont des fonctionnalités cartographiques, permettant la cartographie thématique selon des représentations standardisées. La méthodologie, utilisée dans ce travail, consiste à appliquer le Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) lié à une base de données pour la nappe. Les informations sémantiques et spatiales, formant les sept paramètres de la méthode SINTACS, sont traitées par digitalisation (numérisation) des cartes et élaboration d'une base de données cartographique sous ArcGis (Smida & Al., 2010).

La cartographie de chaque paramètre a été réalisée en mode Raster et la taille des mailles est choisie pour approcher au plus près la répartition spatiale des données. La construction des cartes de vulnérabilité comprend différentes étapes :

#### **Acquisition des données relatives de chaque paramètre :**

Il comprend le recueil de données bibliographiques ou déjà existantes dans des bases de données et l'acquisition de données complémentaires par mesures ou observations sur le terrain.

#### **Rassemblement des données en classes et indexation des classes :**

La variabilité dans l'espace des critères de vulnérabilité est caractérisée par le découpage des critères en classes. Chaque classe étant ensuite affectée d'un index représentatif de son degré de vulnérabilité (note faible pour la moins vulnérable, note élevée pour la plus vulnérable) (Awawdeh et al 2020).

La classification et l'indexation ne pourront être définies qu'après le recueil des données. Sept cartes rendant compte de la vulnérabilité des nappes vis à vis de chaque critère seront réalisées ; le découpage des critères en classes y sera représenté et l'indexation des classes sera restituée en utilisant la symbolique de couleur habituelle : couleurs chaudes (rouge) pour indiquer le danger donc la forte vulnérabilité et couleurs froides (vert dans le cas contraire (Rakotovahoaka, 2007).

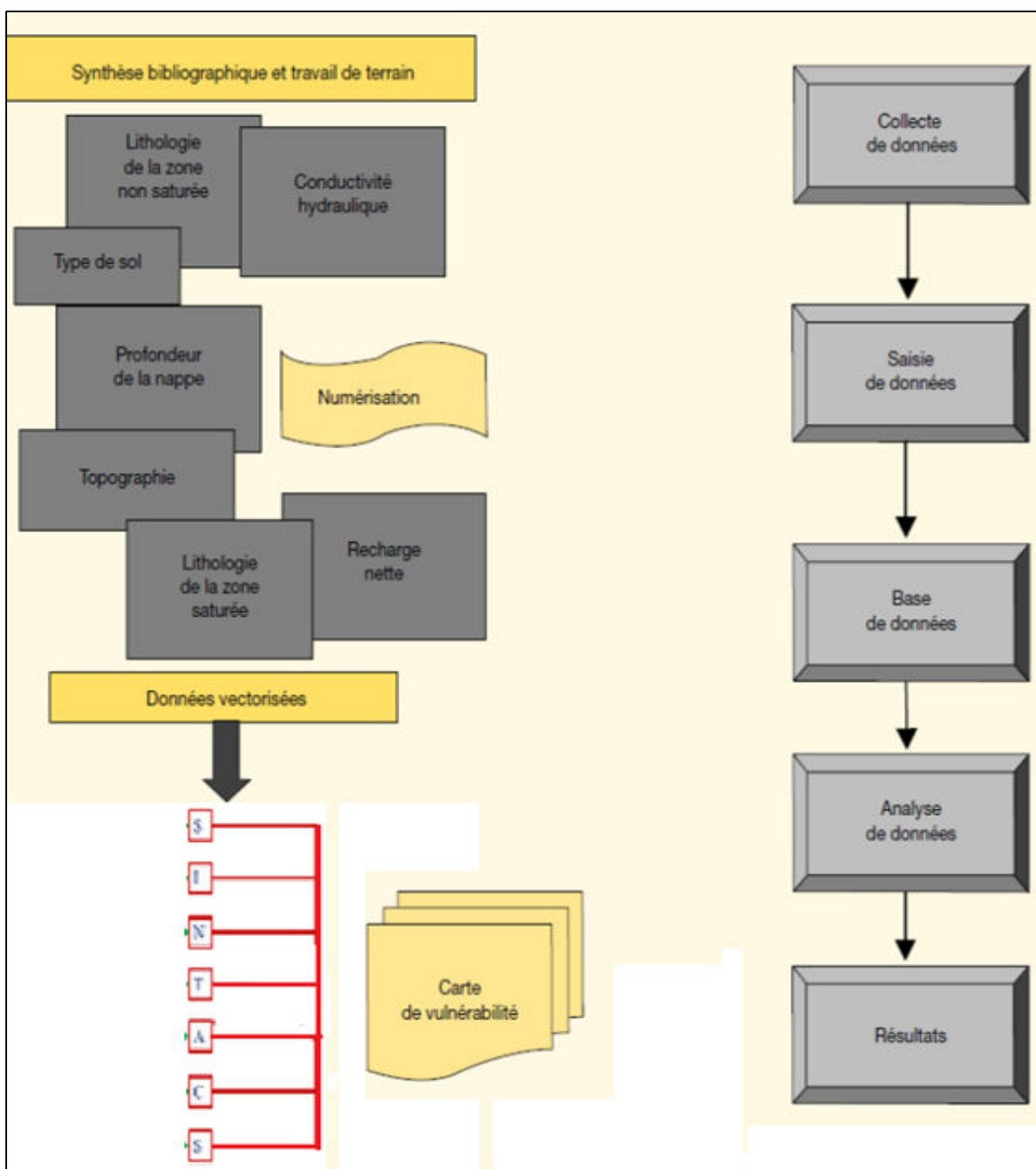


Figure 33 : Les étapes d'élaboration de la carte de vulnérabilité par SIG (Smida & Al., 2010)

### IV.5.3. Évaluation des paramètres et calcul des cotes de vulnérabilité

#### IV.5.3.1. Données de base

Les données utilisées pour le calcul et la cartographie de paramètre de la méthode SINTACS sont illustrées dans le tableau 26 :

**Tableau 26** : Données utilisées pour le calcul de la vulnérabilité

Symbole	Paramètre	Types de données	Mode d'acquisition
S	Profondeur de la nappe	Relevé du niveau statique des forages (données de l'ANRH pour l'année 2019)	Interpolation
I	Infiltration	Lame d'eau infiltrée (calculée par le bilan hydrique)	Interpolation
N	Epaisseur de la zone non saturé	Logs lithostratigraphiques de plus de 20 forages	Numérisation
T	Sol	Carte pédologique (source ANRH)	Numérisation
A	Type l'aquifère	Logs lithostratigraphiques des forages	Numérisation
C	Conductivité hydraulique	Essais de pompage des forages (Source DREW Chlef)	Interpolation
S	Topographie	MNT 10 m (Données SRTM)	Traitement

#### IV.5.3.2. Méthodologie

Le calcul et la cartographie de l'indice de la vulnérabilité à la pollution de la nappe alluviale du moyen Cheliff par la méthode SANTECS a été effectué par le logiciel ArcGis version 10.8.2 et l'extension Spatial Analyst. Le logiciel ArcGis va permettre l'intégration et la répartition spatiale des scores (cote x poids), attribués aux sept paramètres de la méthode SINTACS et leur représentation sous le format Raster, avec l'extension « Spatial Analyst ». Les shapefiles ont été convertis en Raster, et chaque Raster représente la variation spatiale des scores. Le calcul des indices de vulnérabilité selon la méthode SINTACS se fait directement par un calcul d'addition appliqué sur les sept Rasters. Le résultat de calcul permet l'élaboration d'une nouvelle couche d'information qui représente la variation de l'indice de vulnérabilité dans la zone d'étude,

Les étapes de l'élaboration de la carte de vulnérabilité sont les suivantes :

- Collecte des données ;
- Numérisation des données ;
- Calcul des scores (Cote x Poids) ;
- Attribution des scores ;
- Classification, et reclassification des sept paramètres spécifiques de la nappe ;
- Élaboration des cartes pour chaque paramètre spécifique de la nappe en mode Raster ;



- Calcul de l'indice de vulnérabilité global par la somme des sept cartes Rasters pour les paramètres spécifiques de la vulnérabilité de la nappe (Figure 34);
- Classification et élaboration de la carte de la Vulnérabilité,

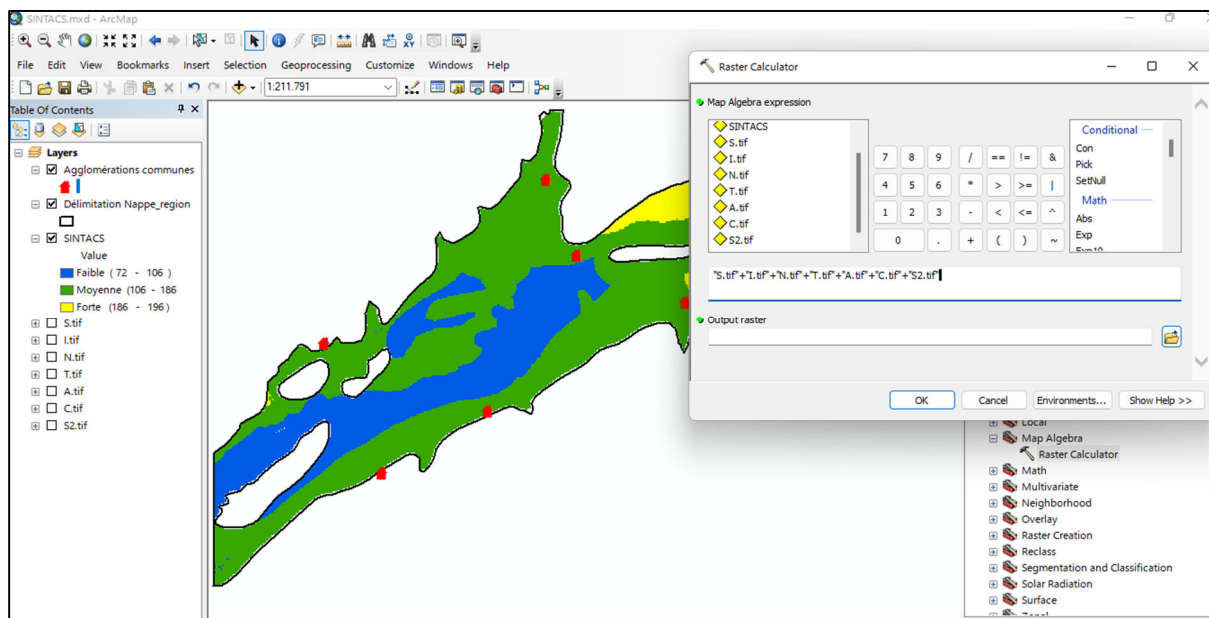


Figure 34 : Calcul de l'indice de vulnérabilité global par la somme des sept cartes Raster

### IV.5.3.3. Établissement des paramètres spécifiques

#### IV.5.3.3.1. Paramètre de profondeur des eaux souterraines (S)

Ce paramètre a été estimé par l'interpolation des données sur des mesures du niveau d'eau de plus de 12 points d'eau situés dans la zone d'étude pour l'année 2019. L'interpolation est effectuée par la méthode de Krigeage ordinaire sous la plateforme « Spatial Analyst » pour avoir la carte des profondeurs,

Les valeurs des profondeurs ont été classées selon des fourchettes établies dans les tables de système de cotation du modèle SINTACS. Dans notre cas, on a cinq classes (Tableau 27, et figure 35) :

Classe 1 : 3 à 6 m qui représente un pourcentage de 25 %, cette classe occupe la partie extrême sud, et nord. Pour cette classe on a une côte de 8, donc la multiplication de la côte 8 par le poids 5 on trouve un indice de paramètre (Score) 40.

Classe 2 : 6 à 8 m, cette classe représente 17 % de la région, avec une côte de 7 et un indice de paramètre de 35, et cette classe marque le secteur qui se localise au Sud de la plaine ;

Classe 3 : 12 à 16 m, Représente 8 % de la région d'une côte 4 et un indice 20, elle marque le secteur qui se trouve au Sud de la plaine, soit entre Boukadir et Oued Sly.

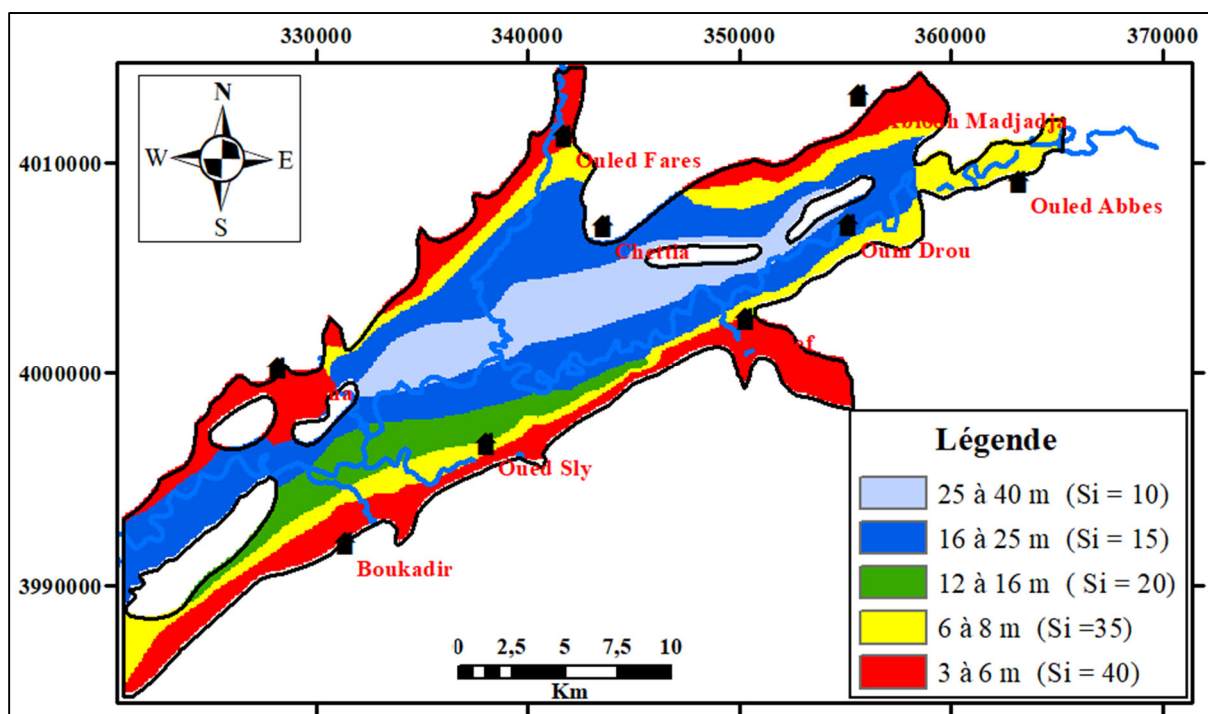
Classe 4 : 16 à 25 m, Représente la part la plus grande soit 35 % de la surface, avec une côte de 3 et un indice de 15, elle marque le secteur qui se trouve entre Boukadir et Oued Sly.

Classe 5 : 25 à 40 m, Représente 15 % de la surface de la zone d'étude, d'une côte de 2 et un indice 10. Cette classe marque la zone du centre de la plaine.

**Tableau 27** : Calcul d'Indice S selon la méthode SINTACS

Profondeur de l'eau	Superficie %	Côte : $S_R$	Poids : $S_W$	Indice : $S_R \times S_W$
3 - 6	25	8	5	40
6 - 8	17	7		35
12 - 16	8	4		20
16 - 25	35	3		15
25 - 40	15	2		10
Pourcentage du score (Indice : $S_R \times S_W$ ) (%)			10 à 40	

Plus cette profondeur est élevée, plus le degré de contamination est faible, par ce que le polluant prend beaucoup de temps pour atteindre le niveau d'eau.



**Figure 35** : Répartition de l'indice S (profondeur d'eau) selon SINTACS

**IV.5.3.3.2. Paramètre d'infiltration efficace (nette) de l'aquifère (I)**

L'infiltration efficace dans la zone d'étude a été évaluée par l'estimation des composants du bilan hydrique. L'établissement du bilan hydrique de la zone d'étude a montré des faibles valeurs du taux d'infiltration efficace, et confirmé par l'application des polygones de Thiessen en utilisant les données des précipitations efficaces. Après l'établissement d'une carte interpolée par la méthode de krigeage sur la base des pluviométries moyennes annuelles de quelques stations météorologiques dans la zone d'étude, la recharge nette ou l'infiltration efficace a été déterminée pour chaque station (Tableau 28).

**Tableau 28** : variation de la recharge nette de la période (2000-2019)

Code	Nom	X (m)	Y (m)	Recharge (mm)
012201	Larbat Ouled Fares	359000,44	4010618,57	33,80
012203	Ponteba Barrage	366804,34	4011344,00	30,23
012209	Chettia	345027,40	4004411,21	33,29
012215	Medjadja	352208,16	4013540,80	29,65
012218	Es Souala	335018,26	4002442,17	26,50
012219	Chlef DDA	351529,34	4004490,74	31,16
012225	Oum Drou	356446,89	4009676,44	30,33
012309	Oued Sly	338051,28	3996730,90	30,92
012403	Merdja	325423,29	3989067,65	27,47
012411	Merdja El Amel	314808,73	3985659,13	32,58

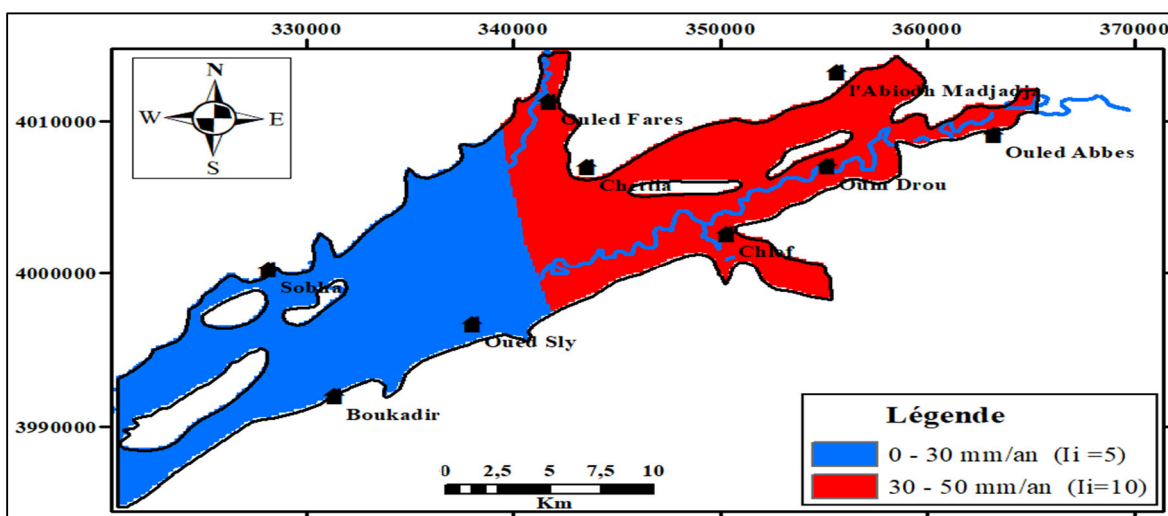
Les résultats et la variation spatiale de la recharge montre deux classes (Tableau 29 , et Figure 36) selon la cotation SINTACS :

Classe 1 : 30 à 50 mm/an, cette classe représente la majorité de la plaine par 46 % de superficie totale de la région, avec une côte de 2 et un indice de 10. Cette classe marque la partie Est du Chlef jusqu'à Ouled Abbès

Classe 2 : 0 à 30 mm/an occupe 54 % de la région par une côte de 1 avec un indice de 5. Elle occupe le reste de la plaine (Partie Ouest de Chlef jusqu'à Boukadir).

**Tableau 29** : Calcul d'Indice R « recharge nette » selon la méthode SINTACS

Recharge (mm/an)	Superficie %	Côte : $I_R$	Poids : $I_W$	Indice : $I_R \times I_W$
30 - 50	46	2	5	10
0 - 30	54	1		5
Pourcentage du score (Indice : $I_R \times I_W$ ) (%)			5 à 10	
Véhicule principal pour le transport du contaminant, Plus cette recharge est grande, plus le risque de contamination est élevé,				

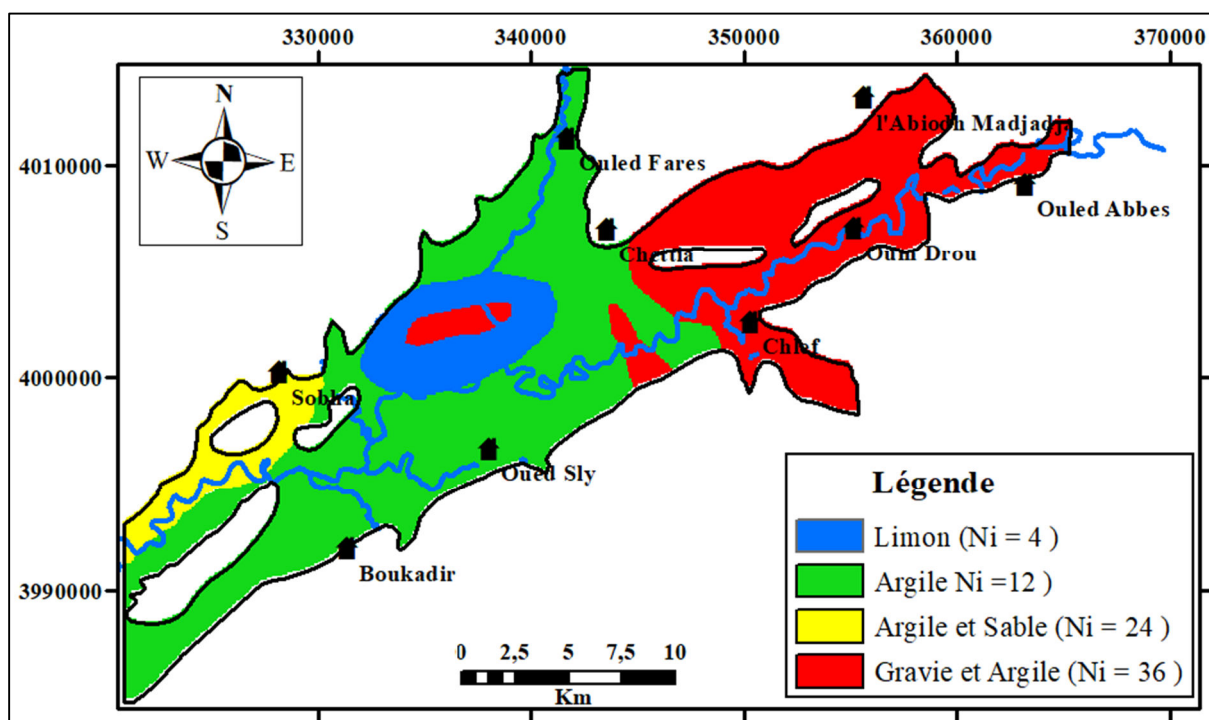
**Figure 36** répartition spatiale d'indice I (recharge d'eau de la nappe).

#### IV.5.3.3.3. Paramètre de la zone non saturée (impact de la zone vadose) (N)

Le processus d'évaluation de ce paramètre est basé sur l'interprétation des caractéristiques lithologiques des formations géologiques et des données stratigraphiques disponibles, en utilisant les coupes des forages. Dans la zone non saturée, l'argile occupe une partie très importante dans la région, soit 46 % de surface totale. Cette formation joue un rôle essentiel dans la protection de la nappe. Alors que le limon occupe seulement 5 % de la surface. Ces deux formations sont classées par des côtes de 3 et 13, avec des poids de 12 et 4 respectivement. Les formations perméables à semi-perméable comme les argiles sableuses et les graviers argileux permettent la migration des polluants vers la nappe, et ont les attribues des côtes de 6 et 9 avec un indice de 24 et 36 respectivement (Tableau 30, et Figure 37).

**Tableau 30** : Calcul d'Indice N « impact de la zone vadose – non saturée »

Type de sol	Superficie %	Côte : $N_R$	Poids : $N_W$	Indice : $N_R \times N_W$
Limon	5	1	4	4
Argile	46	3		12
Argiles Sableuses	4	6		24
Graviers argileux	45	9		36
Pourcentage du score (Indice : $N_R \times N_W$ ) (%)				
Son impact est déterminé à partir de la texture des terrains qui la constitue. La percolation du polluant jusqu'à la surface piézométrique est d'autant plus grande que cette texture est favorable.				



**Figure 37** : Répartition spatial d'indice N (zone non saturée)

#### IV.5.3.3.4. Paramètre de type de sol (T)

Les données sur ce paramètre ont été élaborées par la numérisation de la carte pédologique du moyen Chélif occidental établie par ANRH (Figure 38), et différentes classes ont été définies selon les classes de cotation de la modèle SINTACS (Tableau 31).

**Tableau 31** : Calcul de l'indice T (Type de sol) selon la méthode SINTACS

Type de sol	Superficie %	Côte : $T_R$	Poids : $T_W$	Indice : $T_R \times T_W$
Sables	31	9	5	45
Limons	28	4,2		21
Limons argileux	7	4		20
Argiles	34	3		15
Pourcentage du score (Indice : $T_R \times T_W$ ) (%)			15 à 45	
Plus le sol est riche en argile, plus l'absorption des métaux lourds est importante, et plus la contamination est faible.				

Les catégories des sols rencontrées dans cette zone d'étude sont :

Une classe pour les sables qui représente une superficie de 31 % de la totalité de la surface, avec une côte de 9 et un indice de 45, localisé au Nord de la plaine (Ouled Fares et Sobha), et au Sud Est à Oum Drou, et Ouled Abbas.

Une autre classe pour les argiles, avec une occupation de 34 % de la totalité de la zone d'étude, et une côte de 3 et un indice de 15. Cette zone marque la partie centrale de la plaine.

Limon occupe environ 28 % de la zone d'étude, et classé par la côte de 4,2 et un indice partiel de 21.

Limons argileux représente seulement 8 % de la totalité de la surface de la région, avec une côte de 3 et un indice partiel de 6. Ils sont localisés surtout au Sud-Ouest de la Plaine à Oued Sly, et Boukadir, et dans la partie Nord du Sobha

Ces dernières trois formations jouent un rôle très important pour la protection des eaux souterraines contre la pollution de surface et réduisent le temps de migration des polluants vers la nappe.

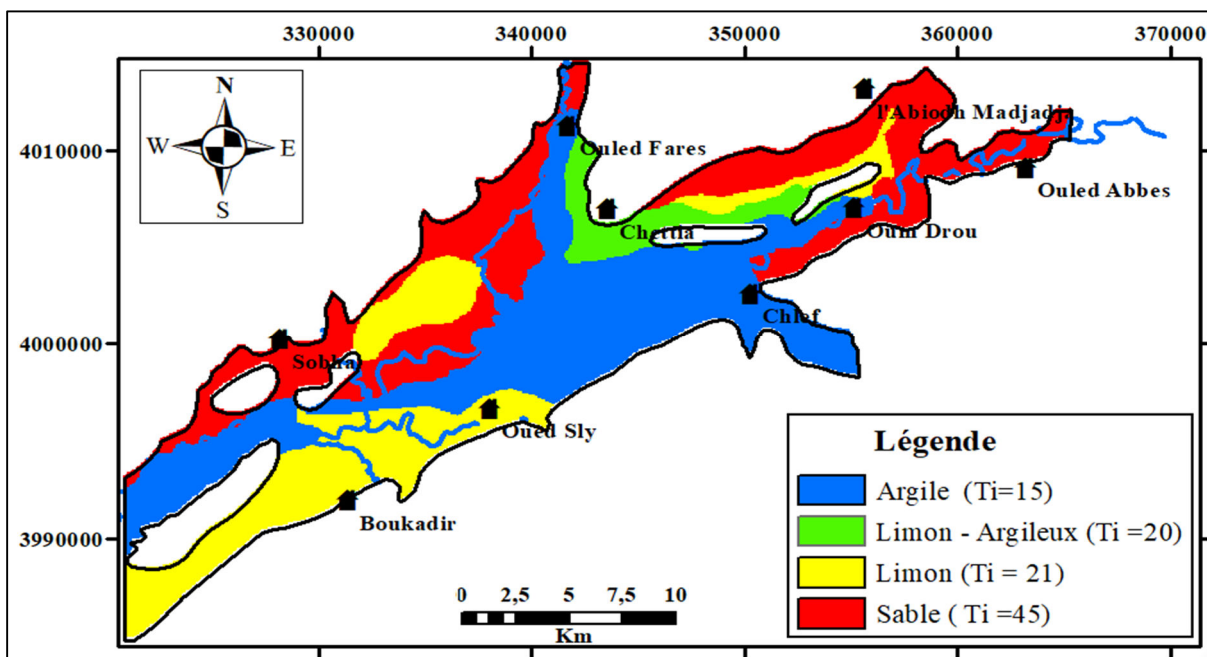


Figure 38 : Répartition spatial d'indice T (Type de sol)

IV.5.3.3.5. Paramètre Type de l'aquifère (A)

L'élaboration de la carte matricielle « type d'aquifère » a été fondée, essentiellement, sur l'interprétation des données lithologiques de 26 forages disponibles sur la zone d'étude.

Les coupes montrent que les matériaux lithologiques constituant l'aquifère alluvial sont essentiellement des argiles et des graviers (60 %), et des graviers sableux (25 %), et des argiles sableuses (15 %). Les côtes correspondantes pour chaque type lithologique ont été divisées sur les 3 classes (Figure 39) : une côte de 3 pour les argiles sableuses, côte de 7 pour les argiles graveleuses, et une côte de 8 pour graviers sableux.

Tableau 32 : Calcul de l'indice A « nature de l'aquifère » selon la méthode SINTACS

Type des matériaux d'aquifère	Superficie %	Côte : $A_R$	Poids : $A_W$	Indice : $A_R \times A_W$
Gravie et sable	68	9	3	27
Argile et gravie	18	7		21
Argile sableux	5	3		9
Pourcentage du score (Indice : $A_R \times A_W$ ) (%)			9 à 27	
Caractérisée par la granulométrie des terrains saturés. Elle intervient dans le piégeage du polluant qui peut s'échapper au pouvoir d'absorption du sol. Plus la granulométrie est fine, plus le piégeage du polluant est grand.				

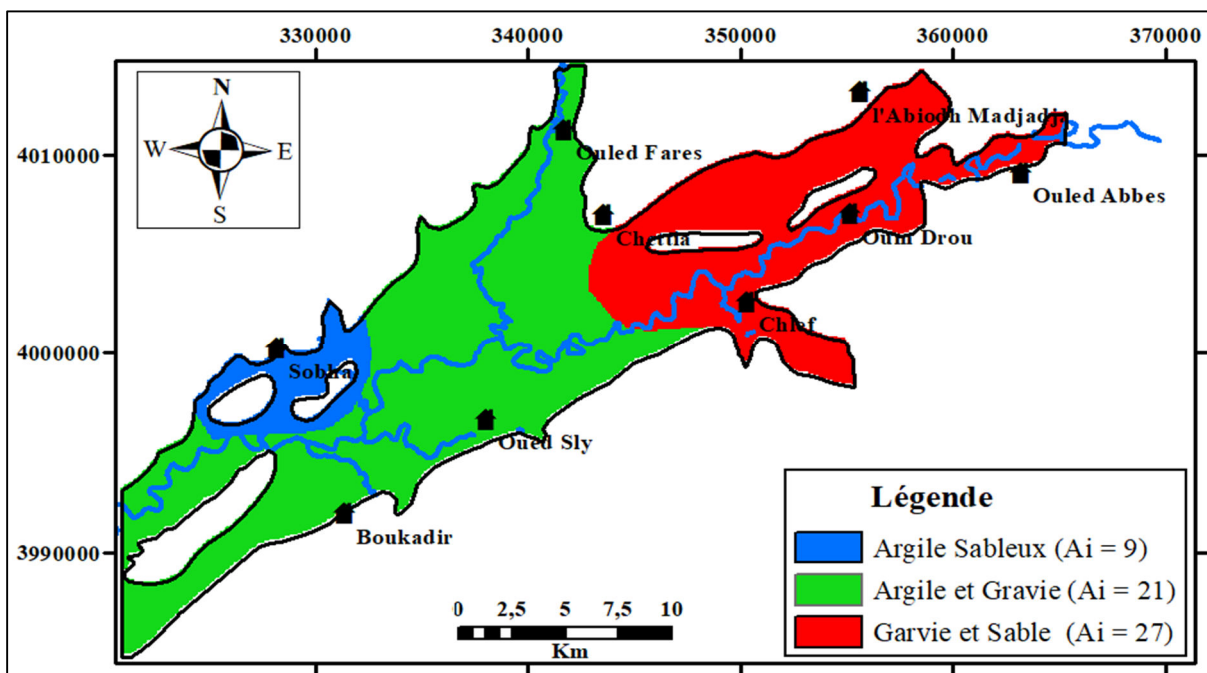


Figure 39 : Répartition spatiale de l'indice A.

**IV.5.3.3.6. Paramètre de conductivité hydraulique (perméabilité de l'aquifère) (C)**

Les valeurs des conductivités hydrauliques ont été obtenues à partir des caractéristiques des matériaux de l'Aquifère, et suivant la classification de SINTACS

Les différentes classes de la ponctuation attribuées aux paramètres des conductivités hydrauliques sont présentées dans le tableau 33, et la figure 40 :

**Tableur 33** : Calcul de l'Indice C « Conductivité hydraulique » selon la méthode SINTACS.

Rang	Superficie %	Côte : $C_R$	Poids : $C_W$	$C_R \times C_W$
Grès - Conglomérat	46	9	2	18
Dépôt Alluviaux grossières	8	7		14
Alluvions moyennes à fines	46	3		6
Pourcentage du score (indice : $C_R \times C_W$ ) (%)		6 à 18		
Plus ce paramètre est grand, plus le transfert du polluant est rapide				

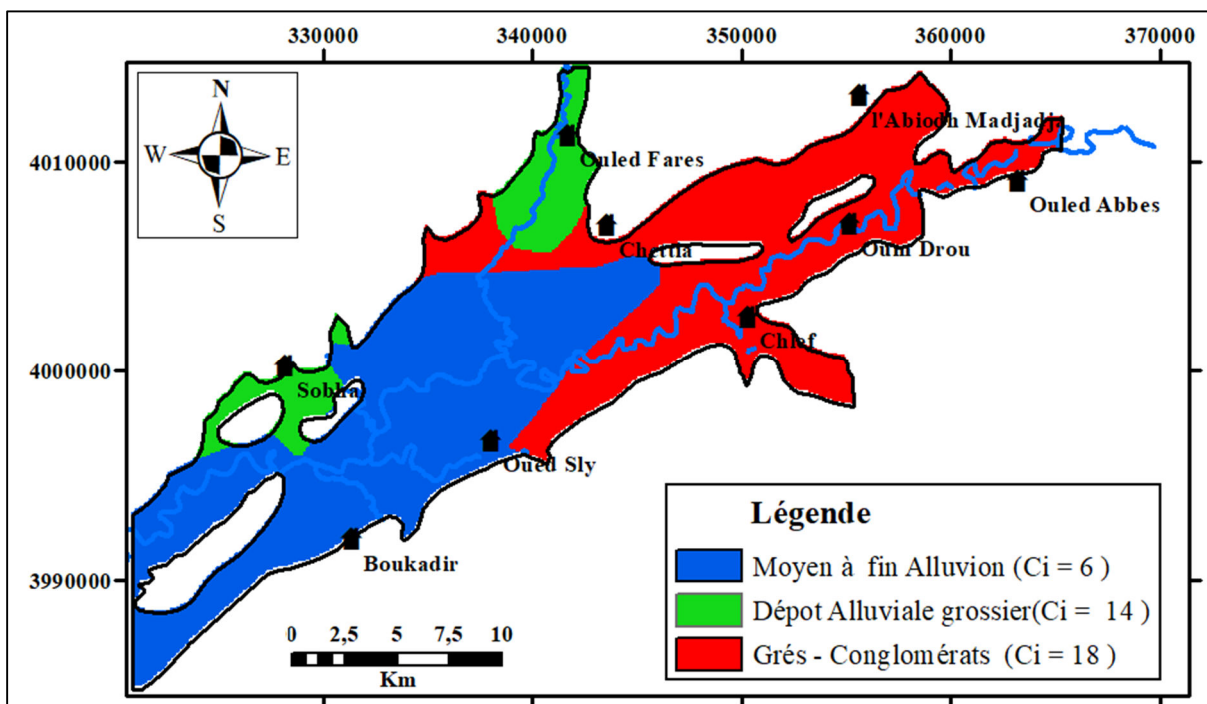


Figure 40 : Répartition spatiale de l'indice C.

La conductivité hydraulique de la couche aquifère nous renseigne sur la vitesse de migration des polluants et leur dispersion dans la nappe du point d'injection à la surface jusqu'à la zone saturée. La nappe a une perméabilité très faible, donc le polluant passe lentement dans l'aquifère.

**IV.5.3.3.7. Paramètre Topographie (pente) (S)**

La carte matricielle des pentes réalisée à partir du modèle numérique de terrain (données SRTM), avec une résolution spatiale de 18 m est exprimée en pourcentage de pentes, et elle a donnée différentes classes (Figure 41, et tableau 34).

**Tableau 34** : Calcul de l'indice T « Pente (Topographie) » selon la méthode SINTACS

Pente %	Superficie %	Côte : $S_R$	Poids : $S_w$	Indice : $S_R \times S_w$
0 – 5	61	10	2	20
5 – 10	22	8		16
10 – 20	10	5		10
20 – 30	5	3		6
> 30	2	1		2
Pourcentage du score (Indice : $S_R \times S_w$ ) (%)			2 à 20	

Plus la pente des terrains est grande, plus le ruissellement des eaux est important et par conséquent la contamination des eaux souterraines est faible,

La quasi-totalité de la zone de moyen Chéiff occidental sont occupé par une pente varie entre 0 à 5 % ces valeurs sont accélérées la migration de polluant vers les eaux souterraine,



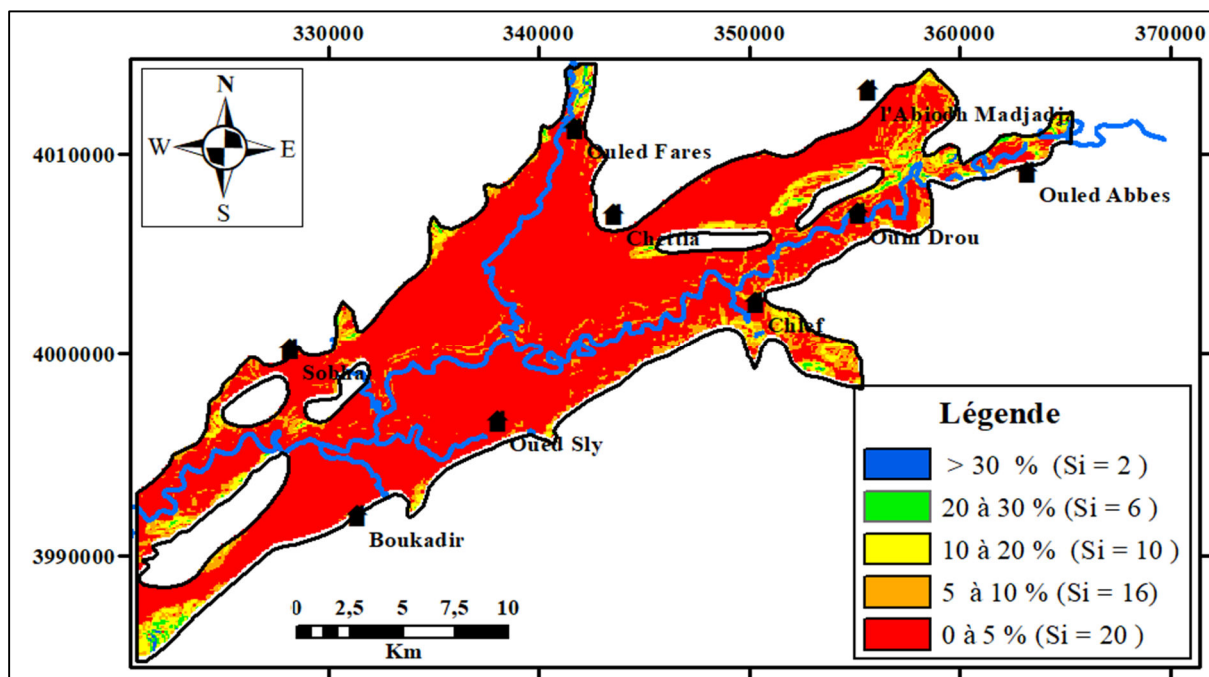


Figure 41 : Répartition spatial de l'indice S.

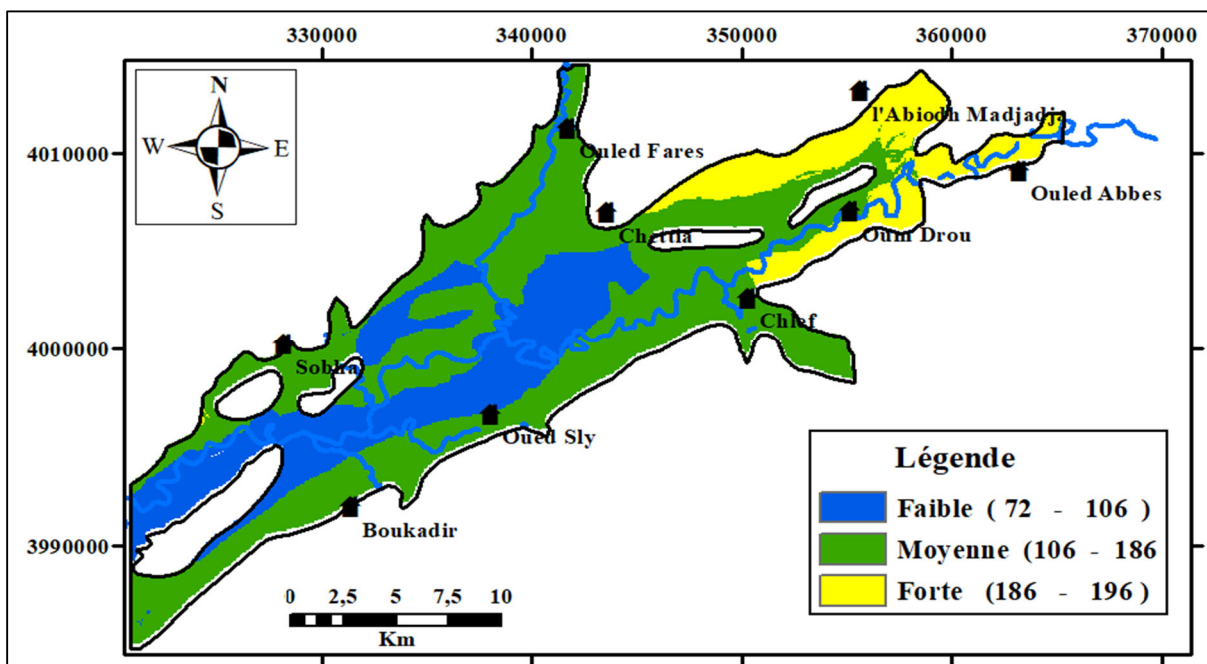
#### IV.5.3.4. Cartographie de la vulnérabilité de la nappe du moyen Cheliff occidental

L'élaboration de la carte de vulnérabilité s'est effectuée par le calcul de l'indice de vulnérabilité ( $I_{SINTACS}$ ) qui intègre les sept paramètres de la méthode.

Les indices SINTACS obtenus varient entre 72 et 196, a permis d'obtenir la classification suivante en fonction des plages de vulnérabilité adoptées pour la méthode :

$72 < I_{SINTACS} < 106$	(0 à 27%)	Classe Faible
$106 < I_{SINTACS} < 186$	(27 % à 40 %)	Classe Moyenne
$186 < I_{SINTACS} < 196$	(40 % à 41 %)	Classe Elevée

La cartographie des ces indices ( $I_{SINTACS}$ ) obtenus a permis d'élaboration de la carte de vulnérabilité des eaux de la nappe alluviale du Moyen Cheliff Occidental à la pollution qui est représentée par figure 42 ci-dessous



**Figure 42 :** Carte de la vulnérabilité de la nappe alluviale du MCO à la pollution selon la méthode SINTACS

La classification des indices de vulnérabilité selon la méthode de SINTACS (Figure 42) a permis d'obtenir la carte de vulnérabilité à la pollution de la nappe du Moyen Cheliff Occidental (Figure 41). Cette classification a mise en évidence trois classes de vulnérabilité, Il s'agit de :

**Classe Faible :**

Cette classe occupe 17 % de la nappe, avec un degré de vulnérabilité à la pollution faible dû au fait que la profondeur d'eau de la nappe est peu profonde ( $> 25$  m), très faible perméabilité du sol en surface, et une faible recharge. Cette classe se localisée dans la partie centrale de la plaine.

**Classe à vulnérabilité Moyenne :**

Elle représente 68 % de la zone d'étude. Cette classe traduit une vulnérabilité moyenne à la pollution, et cela est expliquée par le fait que le niveau d'eau est faible (comprise entre 12 à 25 m), une perméabilité du sol moyenne, une recharge au voisinage de 30 mm/an. Cette classe caractérise les zones en périphérie Nord, Sud, et Ouest du la plaine à Chlef , Chettia , Ouled Fares , Sobha , Oued Sly , et Boukadir.

**Classe à vulnérabilité élevée :**

Cette classe occupe une petite partie de la zone d'étude soit 15 % des zones cartographiées. La forte vulnérabilité est liée à la faible profondeur de la nappe alluviale (entre 3 et 8 m), et surtout aux fortes perméabilités des sols (sol sableux). Cette classe est localisée à l'Est de la plaine au niveau Oum Drou, Ouled Abbes, et L'abiodh Madjadja.

En générale, d'après la carte de vulnérabilité obtenue selon la méthode SINTACS, pour la nappe du Moyen Cheliff Occidental, on constate que cette dernière coïncide avec celle de la carte de qualité des eaux obtenue par l'indice WQI. La zone de mauvaise qualité d'eau souterraine se trouve où il y a la forte vulnérabilité à la pollution, et la qualité des eaux excellente à bonne se trouve dans la partie où la vulnérabilité est faible à moyenne.

#### **IV.6. Conclusion :**

L'estimation de la vulnérabilité l'intrinsèque de la nappe alluviale dans la plaine du Moyen Cheliff Occidental est présentée ici, en utilisant la méthode SINTACS, qui est basée sur l'évaluation de sept paramètres qui sont décrits en fonction des conditions topographique, pédologique, hydrologique, géologiques et hydrogéologiques, qui affectent directement la sensibilité de l'aquifère et l'influence de l'activité humaine qui conduit à la contamination des eaux souterraines. En outre, ce modèle peut être appliqué et développé pour chaque type d'aquifère, et ce modèle peut être adapté aux différentes conditions hydrogéologiques.

Il est donc extrêmement important d'avoir une très bonne connaissance hydrogéologique, hydrologique et géologique de la région pour mieux déterminer les différents paramètres du modèle SINTACS.

Les résultats obtenus par l'application de cette méthode coïncident avec la carte de l'indice de qualité des eaux souterraines (WQI) du Moyen Cheliff Occidental. La zone de mauvaise qualité d'eau se trouve dans la zone à forte vulnérable, et la zone de qualité bonne à excellente se localise dans les zones de moyenne à faible vulnérabilité.

# Conclusion Générale

## Conclusion générale

La nappe alluviale du Moyen Cheliff Occidental est exploitée pour divers usages, à savoir l'AEP, l'irrigation et l'industrie. Les eaux souterraines de cette nappe ont connu dans ces derniers temps une dégradation remarquable due aux rejets des eaux usées domestiques et industriel, et d'utilisation de plus en plus intensive des engrais chimiques et pesticides.

Ce travail vise la compréhension des principaux facteurs qui régissent l'hydrogéochimie, et la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines de la nappe alluviale à la pollution afin d'identifier les zones les plus sensibles à la pollution en vue d'une bonne gestion qualitative de cette ressource vitale.

Une analyse statistique des résultats des analyses physico-chimiques de 45 points d'eau répartis sur toute la plaine, et un traitement à l'aide d'un système d'information géographique de l'ensemble des données caractéristiques pour cette zone d'étude ont permis de tirer certains résultats :

L'analyse des différents paramètres physico-chimiques indique que les eaux souterraines de cette nappe ont un faciès chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne, et la dominance des ions chlorure et sulfaté est liée à une origine naturelle à savoir la dissolution des formations évaporitiques du Dahra et des formations gypsifères du miocène, et probablement dû aussi à l'influence des facteurs anthropogéniques.

L'étude des variables à travers l'ACP a confirmé le processus qui contrôle le chimisme des eaux de cette nappe. L'origine géologique reste le facteur qui génère l'augmentation de certains éléments chimiques dans les eaux souterraines et qui est bien expliqué par l'axe 1, avec une relation positive entre la CE et les variables  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  et  $\text{HCO}_3^-$ . L'application de la classification d'arbre hiérarchique (Dendrogramme) sur les données de l'année 2019 a fait ressortir trois groupes d'individus (points d'eau). Le premier groupe est celui caractérisé par des conductivités entre  $790\mu\text{S}/\text{cm}$   $<CE< 890\mu\text{S}/\text{cm}$  (points d'eau peu minéralisés), le deuxième groupe comprend les points d'eau de conductivité  $990\mu\text{S}/\text{cm}$   $<CE< 1520\mu\text{S}/\text{cm}$  (points d'eau moyennement minéralisés), et le troisième groupe est représenté par des conductivités  $1680\mu\text{S}/\text{cm}$   $<CE< 3560\mu\text{S}/\text{cm}$  (points d'eau très minéralisés).

L'évaluation de l'aptitude des eaux souterraine pour l'alimentation humaine à l'aide de l'Indice de qualité des eaux a donné trois (03) classes de qualité, soit plus de 60 % des points d'eau ont une qualité bonne à excellente, et le reste des points d'eaux ont une qualité mauvaise. La cartographie des résultats de l'indice de qualité des eaux a permis de bien localiser le secteur de mauvaise qualité qui est situé à l'amont de la plaine, il est dû aux échanges eau-roche (origine géologique), et aux effets des activités humaines (origine anthropique). Paradoxalement, en aval de la plaine, les eaux souterraines ont une qualité bonne à excellente, cela est due au phénomène de la dilution des eaux souterraines et la diminution de la minéralisation des eaux de la nappe, surtout dans la partie Sud de la plaine (Boukadir).

Les diagrammes de Richards et Wilcox ont montré que la majorité des points d'eau présente une classe de bonne à excellente qualité des eaux, et peuvent être utilisé dans l'irrigation des plantes sans risque.

L'étude de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution, basée sur la méthode SINTACS a permis de déterminer les zones les plus sensibles à la pollution. La cartographie au moyen du SIG a permis de dire que la majeure partie de la nappe est caractérisée par une faible à moyenne vulnérabilité, alors que la zone de forte vulnérabilité à la pollution se localise dans la partie Est d'Oum Drou, Ouled Abbes, et l'Abiadh Medjadja.

L'étude de cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution va permettre une meilleure protection et préservation des eaux souterraines.

A la fin de ce travail, nous proposons certaines recommandations et mesures pour la protection et la conservation des eaux souterraines de la plaine du moyen Cheliff occidental, et qui sont comme suite :

- L'installation d'un réseau de surveillance doté des équipements d'enregistrement automatique (piézomètres équipés par des sondes autonomes à acquisition de données), avec une répartition sur toute la nappe pour le suivi des fluctuations de la nappe.
- Elaboration des périmètres de protection pour le but principal de protéger les ressources en eaux d'une façon quantitative et qualitative. Cette protection des nappes elle se fait à l'aide de la délimitation des périmètres de protection (immédiat, rapproché et éloigné) ;
- Sensibilisation des agriculteurs sur l'utilisation rationnelle des engrais chimiques afin de limiter le lessivage des azotes et sulfates et d'autres éléments chimiques vers la nappe.
- Faire une étude détails sur l'impact du développement urbain, et aussi agricoles sur la qualité et la quantité des eaux souterraines de la région.
- Création d'une base des données sous le format d'un SIG qui permet la mise à jour, la consultation et la modification des données qui contient l'ensemble des données nécessaires tel que : les coupes des forages, occupation de sol, les analyses physico-chimiques des points d'eau, les rejets urbaines et industriels, zones agricoles et périmètres irrigues,
- Création d'un modèle hydrogéologique pour le système aquifère de la région, dont l'objectif est de comprendre le comportement du système hydrogéologique, la prédiction de l'impact du changement climatique sur les ressources en eau souterraines, détermination des aires d'alimentation des forages, prédiction des éventuelles pollutions, ...

**RÉFÉRENCES**  
**BIBLIOGRAPHIQUES**



**RÉFÉRENCES  
BIBLIOGRAPHIQUES**

- Abbasi T., Abbasi S A., (2012) :** Water quality indices . 1st ed . Elsevier Amsterdam The Netherlads (384p) Paperback ISBN: 9780444638366
- Abdelbaki C., (2012) :** Systèmes d'information géographique cours et travaux pratiques . Université Aboubakr Belkaïd Tlemcen.
- Achour F., (1990) :** Hydrogéologie et pollution de la plaine du bas Cheliff Oriental (Ech-chleff – Boukadir). Mémoire d'Ingénieur USTHB Algérie.
- Achour F., (1997) :** Conditions hydrologiques et disponibilité en eau en région semi-arides : Application de méthodologies nouvelles au bassin du Cheliff, Algérie. Thèse Doctorat de l'Université de Franche- Comte – France, 261 p.
- Akziz N., (2008) :** Etude de l'efficacité de la désinfection chimique sur les eaux de surface d'Imsouhal à Tizi ouzou ., Institut national spécialisé dans la formation professionnels en industries agro-alimentation-Blida ., spécialité de traitement des eaux .
- Amharref M., Bernoussi A S., (2007) :** Vulnérabilité et risque de pollution des eaux souterraines . Laboratoire Modélisation des Phénomènes Physiques et Risques Naturels (MPPRN). Faculté des Sciences et Techniques. Tanger Maroc.
- ANRH., (2004) :** Annuaire Hydrogéologique de la nappe alluviale du Haut et Moyen Cheliff
- Awawdeh M Al-Kharbsheh N Obeidat M Awawdeh M (2020) :** Groundwater vulnerability assessment using modified SINTACS model in Wadi Shueib Jordan Annals of GIS Taylor & Francis <https://doi.org/10.1080/19475683.2020.1773535>
- Baali F., (2007) :** Contribution à l'étude hydrogéologique hydrochimique et Vulnérabilité d'un système aquifère karstique en zone semi-aride .Cas du plateau de Chéria N-E Algérien. Thèse de Doctorat. Université Badji Mokhtar- Annaba.121p.
- Bathurst R., (1972) :** Carbonate sediments and their diagenesis Elsevier.
- Belmiloud N., (2017) :** Modélisation par SIG du potentiel de contamination par les nitrates dans la plaine du moyen cheliff occidental. Thèse Doctorat. Université Hassiba Ben Bouali Chlef.199 P.
- Berkenou S., (2012) :** Application du krigeage indicatrice pour la cartographie du pouvoir osmotique des eau souterraines de plaine de moyen Cheliff occidental .Mémoire de Master . Université Hassiba Ben Bouali Chlef.
- Bettahar N., (1996) :** Utilisation de la filtration directe dans le traitement des eaux du barrage Sidi Yacoub. Mémoire de Magister. Université de Chlef, 95 p.
- Bettahar N., (2010) :** Pollution d'origine azotée dans les plaines du moyen cheliff. Thèse doctorat. Université des sciences et de technologie Mohamed Boudiaf d'Oran Algérie,219P.
- Bettahar N., Ali Benamara A., Kettab A. et Douaoui A., (2009) :** Risque de pollution nitraté des zones semi-arides : cas de la vallée du moyen Cheliff occidental (Nord Algérien). Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science 22(1): 69-78.
- Bouderbala A., (2017) :** Assessment of water quality index for the groundwater in the upper Cheliff plain Algeria . Journal of the Geological Society of India 90(3): 347-356 .
- Bouderbala A., (2019) :** Human impact of septic tank effluent on groundwater quality in the rural area of Ain Soltane (Ain Defla) Algeria .Environmental & Socio-economic Studies 7(2): 1-9.
- Bouderbala A., (2020) :** Groundwater quality assessment of the coastal alluvial aquifer of Wadi Hachem Tipaza Algeria .Environmental & Socio-economic Studies 8(4): 11-23 .
- Bouderbala A., Gharbi B., (2017) :** Hydrogeochemical characterization and groundwater quality assessment in the intensive agricultural zone of the Upper Cheliff plain Algeria .," Environmental Earth Sciences 76(21) : 744 .

- Bouderbala A., Remini B., Saaed Hamoudi A., Pulido-Bosch A., (2016)** : Assessment of groundwater vulnerability and quality in coastal aquifers: a case study (Tipaza North Algeria) .Arabian Journal of Geosciences 9(3): 181.
- Boulaine J L G., (1957)** : Etude des sols des plaines du Cheliff. Thèse de Doctorat, Univ. Alger, 582 p.
- Bradai A., (2006)** : Evaluation de la qualité des eaux de la plaine du moyen Cheliff occidental application de la géostatistique . Mémoire de magister. Universitaire de Khemis Miliana.
- Bremond R., Vuichard R., 1973 .**, Paramètres de la qualité des eaux OSPEPE Paris .
- Chadha D K., (1999)** : A Proposed New Diagram for Geochemical Classification of Natural Waters and Interpretation of Chemical Data. Hydrogeology Journal, 7, 431-439. <https://doi.org/10.1007/s100400050216>
- Canora F., Sdao F 2020** Hydrogeological characterization and groundwater vulnerability to pollution assessment of the High Basento River Valley carbonate hydrostructure (Southern Italy) Ital J Eng Geol Environ 1 25–44.
- Canora F., Muzzillo R., Sdao F., (2022)** : Groundwater Vulnerability Assessment in the Metaponto Coastal Plain (Basilicata Italy) Water 14 1851 <https://doi.org/10.3390/w14121851> .
- Dakoure D ., (2003)** : Étude hydrogéologique et géochimique de la bordure sud-est du bassin sédimentaire de Taoudeni (Burkina Faso-Mali): essai de modélisation Paris 6.
- Davis and Dewiest (1966)** : Hydrogeology. John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, 463 p.
- Debieche T-H ., (2002) .**, Evolution de la qualité des eaux (Salinité Azote et Métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline agricole et industrielle (application à la basse de la plaine Seybouse –Nord Est Algérien) ., Thèse de Doctorat ., Université de Franche Comté France .
- Deborah M., Watkins., Thomas S., Cornuet.,( 2012):** Evaluation of Geology and Water Well Data Associated with the EPA Hydraulic Fracturing Retrospective Case Study Bradford County, Pennsylvania.
- Derdour A ., Benkaddour Y., Bendahou B ., (2022)** : Application of remote sensing and GIS to assess groundwater potential in the transboundary watershed of the Chott-El-Gharbi (Algerian–Moroccan border) Applied Water Science (2022) 12:136 . <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01663-x> .
- Doris .,D ., 1998 .**, Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution par l'intégration d'un SIG de la télédétection et d'un modèle mathématique ., Baccalauréat en géographie ., Université du Québec INRS-Eau ., Mémoire présenté pour l'obtention du grade de Maître science (M .,Sc .) .
- Dörfliger N ., Jeannin P-Y., Zwahlen F., (1999)** : Water vulnerability assessment in karst environments: A new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method) .Environmental Earth Sciences 39(2):165-176. DOI:10.1007/s002540050446
- Eftekhari M., Akbari M., (2020)** : Evaluation of the SINTACS–LU model capability in the analysis of aquifer vulnerability potential in semiarid regions J Appl Res Water Wastewater 7 111–119 .
- Elmeddahi Y ., (2009)** : Contribution à l'étude hydrogéologique des réservoirs aquifères du bassin du Moyen Cheliff .Mémoire de Magister. Université Hassiba Ben Bouali.
- Fijani E ., Moghaddam Asghar A., Tsai ., Frank T C., Tayfur G ., (2017)** : Analysis and assessment of hydrochemical characteristics of Maragheh-Bonab plain aquifer northwest of Iran . Water Resources Management 31(3): 765-780.
- Al Karkouri J ., Batchi M.,El Maaqili M.,Fenijiro I., (2014):** Cartographie de la vulnérabilité à l'intrusion marine de l'aquifère Côtier de Mnasra Maroc. Marine Scor Journal (Journal Web Site: <http://www.marinescor-revue.org>)

- Guillaume M., (2012)** : Estimation de la vulnérabilité de l'aquifère au roc de la zone Bécancour (centre-du-Québec) .université du Québec à Montréal .Présenté comme exigence partielle de la maîtrise en sciences de la terre .
- Hadbi T., (1998)** : Utilisation des lagunes facultatives dans l'épuration des eaux usées de l'ENAJUC. Mémoire de Magister. Université de Chlef, 108 p.
- Hallberg GR ., Keeney DR., (1993)** : Nitrate. In: Alley WM (Ed), Regional ground-water quality. New York: Van Nostrand Reinhold. pp 297–322.
- Hassan A M., (2007)** : Hydrogeochemical of groundwater for Mandli Fan aquifers and hydrochemical model Ph. D. thesis submitted to geol., college of science, Baghdad university, Iraq.(in Arabic).
- Hennia K ., (2007)** :Contribution à la gestion qualitative des eaux souterraines dans les zones semi-arides Application au moyen Cheliff occidental mémoire de Magister Université de Hassiba BenBouali Chlef .,
- Hennia K ., Saaed Hamoudi A ., Bouderbala A ., (2022)** : Hydrogeochemical characterization and groundwater quality assessment: a case study of the alluvial aquifer in the Middle Western Cheliff (Algeria) International Journal Of Environmental Analytical Chemistry 1-21 . <https://doi.org/10.1080/03067319.2022.2059361>.
- Hem J D., (1985)** : Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. 3rd Edition, US Geological Survey Water-Supply Paper 2254, University of Virginia, Charlottesville, 263 p.
- Hem J D., (1989)** : Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water U.S Geological Survey.246p.
- Jackson R E ., (1986)** :Pollution et protection des aquifères, l'organisation des nation unies pour l'éducation de la science et la culture , Paris France .Projet 8,3 du programme hydrologique international.
- Jesudhas C J., Chinnasamy A., Muniraj K., Sundaram A., (2021)** :Assessment of vulnerability in the aquifers of rapidly growing sub–urban: A case study with special reference to land use Arab J Geosci 14 60.
- Karim B M., (2005)** : Etude géochimique de la lagune de Nador (Maroc oriental) : Impacts des facteurs anthropiques. Thèse de Doctorat Université Mohamed V Maroc.
- Kirlas M C., Karpouzou D K., Georgiou P E., Katsifarakis K L., (2022)** : A comparative study of groundwater vulnerability methods in a porous aquifer in Greece Applied Water Science (2022) 12:123 <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01651-1>
- Koriche B ., Hababela I ., (2012)** : Cartographie de la vulnérabilité de la nappe alluviale du moyen cheliff occidental par la comparaison de la méthode DRASTIC modifiée et la méthode GOD . Mémoire de Master. Université Hassiba Ben Bouali Chlef .
- Kumar K S ., Rammohan V ., J Dajkumar Sahayam J ., Jeevanandam M ., (2009)** : Assessment of groundwater quality and hydrogeochemistry of Manimuktha River basin Tamil Nadu India . Environmental Monitoring and Assessment 159(1-4): 341 .DOI :[10.1007/s10661-008-0633-7](https://doi.org/10.1007/s10661-008-0633-7)
- Kumar S., Thirumalaivasan D., Radhakrishnan N., Mathew S., (2013)** : Groundwater vulnerability assessment using SINTACS model. *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 4 (4):339-354 ; DOI:[10.1080/19475705.2012.732119](https://doi.org/10.1080/19475705.2012.732119)
- Lasch F., Le Roy F., Yami S., (2004)** : New firm formation in ICT sectors in France (1993-2001), Advances in Interdisciplinary European Entrepreneurship Research, M. Dowling, J. Schmude, D. Zu Knyphausen-Aufsess (Eds.), vol. 2, 2004, p. 199-230.
- Leizou K ., et al ., (2017)** : Evaluation of Water Quality Index of the Brass River Bayelsa State South-South Nigeria .International Journal of Research Granthaalayah 5(8):277-287.

- Mattauer M., (1958)** : Etude géologique de l'Ouarsenis oriental (Algérie). Th. Doct. Es sciences, Besançon, France, 343 p.
- Mardhel V., (2010)** : Les outils SIG pour une meilleure compréhension des eaux souterraines. géosciences pour une terre durable. 124p.
- Mishra P., Patel R., (2001)** : Study of the pollution load in the drinking water of Rairangpur a small tribal dominated town of North Orissa . Indian J Environ Ecoplan 5(2): 293-298 .
- Mokadem M., (1998)** : Contribution à l'étude des filières de traitement des eaux de barrages en Algérie. Optimisation et dimensionnement par traitement numérique. Mémoire de Magister. Université de Chlef, 96 p.
- OMS., (2017)** : Directives de qualité pour l'eau de boisson : 4<sup>ème</sup> édition.
- Oroji B., (2019)** : Groundwater vulnerability assessment with using GIS in Hamadan–Bahar plain Iran. Applied Water Science (2019) 9 :196. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1082-x>
- Pranville J., Plagnes V., Rejiba F., Tremoulet J., (2007)** :Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines de la partie sud du Causse de Gramat . Mémoire de Master. Université Pierre et Marie Curie. École des Mines de Paris & École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts.
- Preetilata M., Mukesh K., Deepak L., Irjesh S., Sudhir S S., (2019)** : Singhc Delineation of groundwater potential zones using geospatial techniques and analytical hierarchy process in Dumka district Jharkhand India. Groundwater for Sustainable Development 9 (2019) 100239 . <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100239> .
- Rakotovahoaka J E., (2007)** : Cartographie de la vulnérabilité des nappes d'eaux souterraines de la plaine d'Antananarivo et de ses environs . Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme en maitrise, université d'Antananarivo Madagascar.
- Ram A., Tiwari S K., Pandey H K., Chaurasia A K., Singh S., Singh Y V., (2021)** : Groundwater quality assessment using water quality index (WQI) under GIS Framework. Applied Water Science 11(2) 1–20. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01376-7> .
- Ramade F., (1998)** :Dictionnaire encyclopédique des sciences de l'eau ., Ed inscience
- Rankama K., Sahama Th G., (1950)** : Geochemistry. University of Chicago Press, Chicago, 912 p.
- Ravalet S., Panet I., (2001)** :Vademecum du chef de projet SIG .Ecole Nationale Des Sciences Géographiques (ENSG) version 2.
- Rodier J., (2009)** : Analyse de l'eau. Eaux naturelles. Eaux résiduelles. Eau de mer.9<sup>ème</sup> Edition.
- Salhi A., (1994)** : Efficacité de la filtration lente dans le traitement des eaux superficielles. Mémoire de Magister. Université Hassiba Ben Bouali. 93 p.
- Scet Agri (1984)** : Hydrologie Hydrogéologie et bilan des ressources. Étude du réaménagement et de l'extension du périmètre du moyen Cheliff .Rap A1. 1. 2.
- Scet Agri (1984b)** : Bilan des ressources en sol. Etude du réaménagement et de l'extension du périmètre du moyen Chéiff: Rap A1.2. 1. Pub. Ministère de l'Hydraulique, Algérie, 35p.
- Sinan .,M., Maslouhi .,R., Moumtaz ., R 2003 .,** Utilisation des SIG pour la caractérisation de la vulnérabilité et de la sensibilité à la pollution des nappes d'eau souterraine ., Application à la nappe du Haouz de Marrakech Maroc ., 2nd FIG Regional Conference Marrakech Morocco
- Sinan M., Bouibrine N., (2007)** : Utilisation des SIG pour la comparaison des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des nappes à la pollution. Application à la nappe du Haouz de Marrakech (Maroc). Ecole Hassania des Travaux Publics (Casablanca) Maroc.

- Smida H., Chokri A., Zairi M., Ben Dhia H., (2010) :** Cartographie des zones vulnérables à la pollution agricole par la méthode DRASTIC couplée à un Système d'information géographique (SIG) : cas de la nappe phréatique de Chaffar (sud de Sfax Tunisie) .Article de recherche .école nationale d'ingénieurs de Sfax (Enis) .Département de Géologie Laboratoire de recherche Eau Énergie et Environnement .
- Soro G., Soro T D., Fossou N M R., ADJIRI O I., Soro N., (2019) :** Application des méthodes statistiques multivariées à l'étude hydrochimique des eaux souterraines de la région des lacs (centre de la Côte d'Ivoire). International Journal of Biological and Chemical Sciences 13(3): 1870-1889.
- Todd D K., (2007) :** Groundwater hydrology Jhon Wiley and Sons Third Reprint Inc India .535p.
- Touhari F., Meddi M., Mehaiguen M., & Razack M., (2014):** Hydrogeochemical assessment of the Upper Cheliff groundwater (North West Algeria). Environ Earth Sci ISSN 1866-6280 . [DOI 10.1007/s12665-014-3598-6](https://doi.org/10.1007/s12665-014-3598-6).
- Qannam Z., (2003) :** A hydrogeological, hydrochemical and environmental study in Wadi Al Arroub drainage basin, South West Bank, Palestine. Journal : Freiberg Online Geosciences, 2003. <https://doi.org/10.23689/fidgeo-878>
- Udom G J., Nwankwoala H O., Daniel T E., (2016) :** Determination of water quality index of shallow quaternary Aquifer systems in Ogbia Bayelsa State Nigeria . British Journal of Earth Sciences Research 4(1): 23-37.
- Zair S., Bensalem I.. (2014) :** Etude de la vulnérabilité a la pollution de la baie de Bejaia par les méthodes DRASTIC et SINTACS. Mémoire de master. Université d'A Mira de Bejaia. 107p.