

République Tunisienne  
Ministère de l'Enseignement Supérieur, de  
la Recherche Scientifique

Université de Sfax  
École Nationale d'Ingénieurs de Sfax



*Ecole Doctorale  
Sciences et Technologies*

Thèse de *DOCTORAT*  
*Génie de l'environnement et de  
l'aménagement*

---

# THESE

*Présentée à*

L'École Nationale d'Ingénieurs de Sfax

*En vue de l'obtention du*

## DOCTORAT

**Dans la discipline de *Géologie***  
***Génie de l'environnement et de l'aménagement***

*Par*

*Asma GHARBI*

---

Etude et modélisation de l'impact des rejets des  
eaux usées sur la nappe phréatique de Sidi Bouzid

---

## INTRODUCTION GENERALE

L'exploitation des ressources en eaux souterraines a rapidement augmenté pour répondre aux besoins agricoles, industriels et domestiques de la population croissante. Cette exploitation intensive a conduit à une diminution continue des niveaux piézométriques et à une dégradation progressive de la qualité et de la quantité de l'eau.

Le climat méditerranéen a accentué ces effets dans plusieurs régions d'Afrique du Nord, notamment en Tunisie. Malheureusement, depuis la révolution tunisienne en 2011, les volumes d'eau exploités ont augmenté en raison de l'augmentation rapide du nombre de puits privés que ce soit pour l'utilisation domestique ou bien pour l'irrigation.

Malgré les efforts du gouvernement pour réduire l'exploitation, les agriculteurs doivent encore exploiter ressources en eaux souterraines. Dans de telles circonstances, étudier l'impact de conditions extrêmes telles que sécheresse ou bien inondations et la surexploitation du système aquifère sont essentielles pour une meilleure gestion des ressources en eaux souterraines pour le développement futur de la région.

Pour atteindre ces objectifs, il est nécessaire de comprendre les caractéristiques hydrochimiques des eaux souterraines et d'élaborer un modèle capable de quantifier la réponse des eaux souterraines face aux plusieurs changements afin que des mesures appropriées puissent être adoptées gestion durable des eaux souterraines. Ce modèle de flux numérique est de plus en plus reconnu comme un puissant outil quantitatif à la disposition des hydrogéologues et les responsables de la gestion des ressources en eau souterraines pour évaluer le système aquifère. La région de Sidi Bouzid est considérée comme le plus grand et l'un des plus importants bassins hydrogéologiques du centre de la Tunisie. Il s'étend sur une superficie d'environ 560 km<sup>2</sup> et est situé dans la partie occidentale du centre de la Tunisie.

La zone d'étude est caractérisée par un climat aride, marqué par des irrégularités dans le temps et dans l'espace.

Elle est l'un des principaux centres de production agricole en Tunisie, en particulier pour les cultures légumières (18% de la production nationale), l'arboriculture (13% de la production

d'amandes et 10% de l'huile d'olive), la production de lait (125 millions de litres en 2002). 12% de la production nationale en 2012).

Les objectifs de cette étude sont la caractérisation quantitative, également qualitative des eaux souterraines de la région de Sidi Bouzid ainsi que l'élaboration du modèle numérique du système aquifère en question.

Ce travail a été basé sur la synthèse et l'analyse des travaux antérieurs et appuyé par des mesures de terrains et de laboratoires. Ces données ont été exploitées à l'aide de l'outil de Système d'Information Géographique couplé au modélisation numérique.

La thèse se compose en trois chapitres :

- Le premier chapitre a été réservé à la description détaillée de la zone d'étude : cadre géographique, hydrologique, géologique et hydrogéologique. Ce chapitre parle aussi de la gestion de l'eau dans notre zone d'étude ;
- Le deuxième chapitre présentera une synthèse et analyse des études antérieures sur la région en premier lieu. En second lieu, on présentera les outils utilisés dans cette étude. Ces derniers sont répartis en deux catégories : les outils de la caractérisation hydrochimique et la qualité des eaux souterraines de la nappe de Sidi Bouzid et ceux appliqués pour l'élaboration du modèle conceptuel et la modélisation numérique ;
- Dans le troisième chapitre, on présentera et discutera tous les résultats des méthodes appliquées et présentées durant le deuxième chapitre.

Enfin, cette étude sera clôturée par une conclusion générale, où on présentera une synthèse des résultats aboutis ainsi que les recommandations à suivre.

---

---

**Chapitre I :**

**CADRE DE L'ÉTUDE**

---

---

## **CHAPITRE I:**

### **CADRE DE L'ETUDE**

#### **I.1 INTRODUCTION**

Les aspects hydrologique, climatique, stratigraphique, géologique, pédologique seront traités dans le présent chapitre. On présentera également le système de la gestion de l'eau dans la région de Sidi Bouzid.

#### **I.2 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE**

Située en Tunisie centrale, la zone d'étude fait partie de la plaine de Sidi Bouzid. Elle est comprise entre les latitudes 34° 45' Nord et 35° 15' Nord et les longitudes 9° 00' Est et 9° 45' Est. La zone d'étude couvre un assemblage de six cartes topographiques de Dj. Bou Dinar, Dj. Kebar, Bir El Hfay, Faiedh, Sidi Bouzid et Sbeitla à l'échelle 1 :50000 (Fig. I.1).

La zone d'étude est bordée au Nord par les Djebels (Dj.) de Hamra et Lassouda et la région de Kasserine, à l'Est par l'axe « Nord-Sud » (NOSA) Dj. Bouzer, Faiedh, Gouttrana et Sidi Khalif, au Sud par Dj. Kebar et Gssaira, et à l'Ouest par Dj. Rakhmat, Zitoun et Lahfay.

#### **I.2 CADRE CLIMATIQUE**

Le climat de la région d'étude est aride caractérisé par des étés chauds et secs et des hivers doux et humides.

Pour l'étude des précipitations, on a eu recours aux séries de chroniques disponibles des stations pluviométriques qui se trouvent dans la région d'étude.

Concernant l'étude de l'évaporation, l'humidité relative et la température de la zone, nous nous sommes basés sur les données recueillies auprès de l'Institut National de Météorologie de Sidi Bouzid.

##### **I.2.1 Pluviométrie**

L'analyse spatiale des précipitations est basée sur les données de 5 stations Oued El Fekka, Om Laadham, Faied, Sidi Bouzid -CRDA et Ferme 20.

La carte des isohyètes, a été réalisée en se basant sur des moyennes annuelles pour la période 1987-2015 (Fig.I.2). Le Krigeage ordinaire a été utilisé pour l'interpolation des données.

La figure I.2 montre une variabilité spatiale des hauteurs avec une augmentation du Nord-Ouest vers le Sud Est.

La pluviométrie annuelle de la période 1987-2015 est marquée par son irrégularité. La moyenne interannuelle de la région d'étude est de l'ordre de 227 mm/an (Fig.I.3). Les valeurs maximales, correspondent aux années pluvieuses (1989/1990 ; 1995/1996), et sont de l'ordre de 529.5 mm et 528.3 mm respectivement enregistrées au niveau de la station Ferme 20.

Les valeurs minimales sont enregistrées aux années 1987/1988 et 2000/2001 avec des précipitations interannuelles respectives de l'ordre 73.8 et 95 mm enregistrées au niveau de la station de Faied.

La figure I.4 montre l'irrégularité de la précipitation, durant les 12 mois de la période allant de 1987 à 2015. Le mois de Décembre est le moins pluvieux durant la saison hivernale. Le mois du Mars est le plus pluvieux au printemps. Les mois relativement secs sont, Juin, Juillet et Août.

Figure I.4 : Variation des précipitations moyennes mensuelles au niveau des stations Oued El Fekka, Om Laadham, Faied, Sidi Bouzid -CRDA et Ferme 20 de la période (1987-2015).

### **I.2.2 Température de l'air**

La température est l'un des facteurs déterminant du climat. Elle conditionne l'évaporation physique et physiologique (évaporation et évapotranspiration).

L'analyse des températures mensuelles moyennes données par la station de Sidi Bouzid montrent de fortes variabilités thermiques saisonnières et mensuelles (Fig. 1.5). Les données disponibles sur la période de 1987 – 2015, montrent une température moyenne mensuelle de 20 °C. Les mois de Juillet et d'Août sont les plus chauds avec une valeur moyenne mensuelle de l'ordre de 35 °C. Les mois de Janvier et de Février sont les plus froids avec des températures mensuelles moyennes de l'ordre 5 °C, les amplitudes thermiques s'élèvent à 30 °C. La région d'étude est marquée par des hivers tempérés et des étés chauds et secs avec une fréquence assez élevée des vents sahariens chauds.

### **I.2.3 Humidité relative de l'air**

L'humidité relative est souvent exprimée en pourcentage. Elle définit une mesure du rapport entre la quantité d'eau présente dans l'air et la quantité nécessaire pour saturer cet air à une température et une pression donnée. Ainsi, un air saturé en vapeur d'eau a une humidité relative de 100%. En se basant sur des moyennes mensuelles de la station météorologique de Sidi Bouzid pour la période 1987-2015, on constate que l'humidité relative varie dans l'ensemble entre 49 % et 66 % (Fig. I.6). En effet, la période la plus humide est entre les mois d'Octobre et Janvier (66%), alors que le mois de juillet est le plus sec avec un taux d'humidité de 49 %.

### **I.2.4 Evaporation**

L'évaporation Piche (exprimé en mm) est mesurée par l'évaporomètre de Piche, qui permet d'évaluer la vitesse d'évaporation d'un volume d'eau donné. L'évaporation est un paramètre qui varie en fonction de la température, de la durée d'insolation et du vent. En effet les moyennes mensuelles (Fig. I.7) montrent que le maximum d'évaporation (310 mm) caractérise les mois de Juillet et Août et le minimum (90 mm) est enregistré durant les mois de Janvier et Décembre.

### **I.2.5 Indice d'aridité**

Plusieurs formules et indices ont été développés pour évaluer le degré d'aridité dans une région donnée tel que l'indice de De Martonne (1926), le Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (1957), le Climagramme d'Emberger (1932), etc.

Dans cette étude l'indice d'aridité de Martonne (I) a été utilisé. Il est calculé en fonction des moyennes annuelles de la précipitation **P** (mm) et de la température **T** (°C) :

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

De Martonne a décrit les intervalles suivant afin d'évaluer l'aridité

Régions hyperarides :  $I < 5$

Régions arides :  $5 < I < 10$

Régions semi-arides :  $10 < I < 20$

La figure I.8 montre que la période sèche commence à partir du mois du Mai jusqu'au Novembre.

### **I.3 RESSOURCES EN SOL**

La carte pédologique est obtenue à partir de la carte agricole du gouvernorat de Sidi Bouzid (Fig. I.9). La composition texturale dominante du sol est de type argile, limon et calcaire .

#### **I.3.1 Sols minéraux bruts**

Les sols minéraux bruts d'érosion correspondent à des sols squelettiques très peu profonds, situés sur des affleurements rocheux ou de formations géologiques sub-superficielles.

La faiblesse ou l'absence d'horizon d'altération s'explique essentiellement par l'agressivité du climat et l'intensité des processus érosif. Sur roches dures (calcaires, dolomies et grès), dominant des sols squelettiques, des lithosols. Sur roches tendres (formations marneuses, calcaires marneux et argiles), l'altération mécanique fragmente la roche en petits éléments sur quelques centimètres d'épaisseur, aboutissant à la formation d'un régosol. Dans les lits des oueds ou sur les zones d'accumulation ou de dépôts, le rajeunissement du sol est assuré par l'apport et/ou le remaniement des matériaux, aboutissant à la formation des sols minéraux bruts d'apport alluvial ou colluvial ou encore éolien. Ce sont des sols qui n'ont aucun intérêt agricole, pastoral ou sylvicole.

#### **I.3.2 Sols peu évolués**

C'est la classe la plus répandue dans la zone d'étude. On distingue les sols peu évolués d'érosion et les sols peu évolués d'apport. Les sols peu évolués d'érosion se développent sur roches dures. Il s'agit de sols lithiques à horizon de surface constitué par un amas assez dense de cailloux et de graviers noyés dans une matrice plus fine. Sur roches tendres, l'évolution est plus marquée. On peut les classer dans les terres de qualité moyenne à médiocre.

Ces sols se localisent généralement à proximité des cours d'eau et aux piedmonts des montagnes. Leur origine provient des transports solides des oueds. La texture de ces sols est souvent fine surtout dans la partie est de la zone d'étude où les dépôts proviennent des argiles et des limons. Les sols peu évolués sont classés habituellement suivant l'origine des dépôts en sols alluviaux d'apport fluvial, sols colluviaux, sols éoliens et sols d'origine marine.

#### **I.3.3 Sols Isohumiques**

Ces sols sont caractérisés par une teneur en matière organique bien humifiée dans les horizons de surface qui décroît progressivement en profondeur. Ils ont en général une couleur ocre-brunâtre en surface qui s'estompe graduellement en profondeur.



Ces sols se développent sur des colluvions et dépôts éoliens de texture grossière, sableuse ou sablo- limoneuse, qui constituent le milieu le plus favorable au développement de ces sols. Ils peuvent également être présents sur des alluvions ou de colluvions à texture moyenne, limono-sableuse à sablo-argileuse.

#### **I.3.4 Sols halomorphes**

Ce sont des sols marqués par la présence d'une forte teneur de sels. Ces sols très salés correspondent à des sols des sebkhas. Ils sont caractérisés par une variation saisonnière de la teneur en sels solubles et une migration de ces derniers vers la surface du sol, se traduisant soit par une pellicule soit par une croûte salée, compacte où se distinguent les trémies de chlorure de sodium. Si le matériau originel est sableux, on ne peut observer aucune structure nette. Sur matériau argileux, les phénomènes d'hydromorphie se développent, souvent accompagnés d'accumulation de gypse. En juxtaposition à ces processus, une nappe d'eau très salée stagne près de la surface et affleure lors de la saison hivernale. Sa salure diminue par apports d'eau douce dus au ruissellement. En été, l'influence de l'évaporation accroît la salure et provoque une précipitation des sels sous forme d'une croûte saline.

Cette classe des sols est observée essentiellement vers l'aval de la zone d'étude.

#### **I.3.5 Sols complexes**

Ces unités représentent les terrains épais de haute altitude où s'associent les différents types de sols de la région. On les observe essentiellement au Nord de la région, au niveau de la région du Om Laadham et au Sud au niveau de la zone Touila.

#### **I.3.6 Sols calco-gypseux**

On distingue essentiellement : les sols calcim-agnésiques carbonatés : Ce sont essentiellement les Rendzines et les sols bruns calcaires caractérisés par leur richesse relative en carbonates qui évoluent souvent en croûtes dures. Ces sols occupent les piedmonts des montagnes (Dj. Bir Lahfay et vers l'axe Nord-Sud. Ces encroûtements constituent un obstacle à l'infiltration surtout au niveau de la zone est où ils atteignent localement des épaisseurs importantes.

#### **I.4 RESEAU HYDROGRAPHIQUE**

Le réseau hydrographique de la zone d'étude prend naissance à Kasserine. Il est marqué par un écoulement intermittent. Le réseau est essentiellement constitué d'Oued Sereg Dhiba et Oued El Fekka qui est né à la confluence des Oued El Hachim et Oued El Htab (Fig.I.10).

**Oued El Fekka :** En amont de la zone d'étude Oued Htab rejoint Oued El Hachim pour former Oued El Fekka. Ce dernier traverse la zone d'étude de l'Ouest à l'Est pour s'ouvrir ensuite sur une vaste zone d'épandage naturelle de faible altitude au Nord-Est appelée Naggada avec un apport annuel estimé à 14.7 Mm<sup>3</sup>.

A l'aval de la zone et au niveau de la route nationale RN13 de Sfax à Sbeitla, Oued El Fekka prend le nom d'Oued Naggada pour se prolonger en Oued Hjal au Nord vers Jelma.

Oued El Fekka contribue à l'irrigation tout en favorisant une rétention appréciable des eaux par infiltration dans la nappe de Sidi Bouzid.

**Oued Sereg Dhiba :** L'Oued Sereg Dhiba débouche au Nord-Est de la ville de Sidi Bouzid.

C'est un Oued secondaire par rapport à l'Oued El Fekka du point de vue ruissellement et volume ruisselé. Il ne sert pas à l'épandage vu la faible fréquence des crues (1/4 an), la morphologie et la topographie de l'Oued.

Il draine les flancs Est des Dj. El Hfay et Dj. Sidi Ali Ben Oun et le flanc Nord de Dj. Kebar.

**Oued El Hachim :** Situé dans la branche Sud -Ouest de la zone d'étude, le bassin versant d'Oued El Hachim couvre une superficie de 356 km<sup>2</sup>. Il sert à l'épandage des crues dans la zone d'étude.

**Oued Htab :** L'Oued Htab représente l'Oued principal du réseau hydrographique du bassin versant de Khanguet Zazia. Les Oueds secondaires drainent les hautes montagnes de la région de Kasserine. Ces Oueds sont alimentés par des affluents au niveau des montagnes qui augmentent la densité du réseau hydrographique. Il couvre une superficie de 2321 km<sup>2</sup>.

L'Oued Htab avec ses affluents présente le réseau hydrographique principal qui alimente les périmètres d'épandage d'eau de crue dans la plaine de Sidi Bouzid.

Le tableau suivant résume les caractéristiques des bassins d'épandages de la zone d'étude :

Tableau I.1 : Caractéristiques des bassins d'épandages de la plaine de Sidi Bouzid

Oued	Sereg Dhiba	El Hachim	Htab
Superficie du bassin versant (km <sup>2</sup> )	395	356	2321
Indice de compacité	1.42	1.49	1.45
Dénivellation (m)	80.75	153.9	269.8
Apport annuel (Mm <sup>3</sup> )	3	5.3	36.3

(Source CRDA-2014)

## I.5 CADRE GEOLOGIQUE ET STRATIGRAPHIQUE

Le bassin de Sidi Bouzid réside dans la partie orientale de l'Atlas central tunisien .

La géologie locale est marquée par des dépôts sédimentaires de l'âge Mio-Plio-Quaternaire (M-P-Q) (Fig.I.11). L'épaisseur de ces formations augmente des zones périphériques vers le centre où elle dépasse 800 m.

Ces dépôts vont du Trias au Quaternaire. Les dépôts du Trias sur Dj Hamra (Fig.I.12) sont constitués d'anhydrite, de gypse, de dolomite ou d'argile.

Les dépôts du Crétacé supérieur sont principalement des détritits. Les formations du Crétacé inférieur affleurant à Dj Kebar sont composées de carbonates, d'argile et de gypse .

L'aquifère est drainé par des dépressions salées appelées sebka (Naggada et Garaat Akrich) de l'âge holocène. Les principaux gisements de ces sebkhas sont le gypse, l'argile et le limon. La partie restante de la région est formée de dépôts alluviaux (limons, sables et argiles) du pléistocène.

## **I.5.1 Cadre stratigraphique**

La couverture géologique de la région de Sidi Bouzid correspond à l'assemblage des cartes géologiques 1/ 50.000 de Sbeitla ; Jebel Essouda, Bir El Hfay et Djebel Goubar.

Les affleurements géologiques rencontrés dans la zone d'étude sont du plus ancien au plus récent :

### *I.5.1.1 Trias*

Les affleurements triasiques sont observés au niveau des Dj Hamra et Dj Rheouis à la terminaison méridionale de l'axe « Nord – Sud » NOSA. Cet ensemble renferme du gypse avec des passages d'argiles rouges et vertes et de calcaires dolomitiques. La présence des faciès salifère et calcaire dans les séries triasiques contribue à la minéralisation et la modération de la qualité des eaux souterraines.

### *I.5.1.2 Jurassiques*

Faisant partie de la Tunisie centrale, les séries jurassiques n'affleurent pas dans la zone d'étude. En fait, ces séries consistent en dépôts calcaire-dolomitiques et sont décrites par la formation « Nara- Sidi Khelif » au niveau du NOSA.

### *I.5.1.3 Crétacé inférieur*

Les séries de cet âge se trouvent au cœur des anticlinaux aux alentours de la zone d'étude. Elles sont représentées par les formations, qui sont classées de bas en haut, suivantes :

- La formation de Sidi Khelif : elle consiste à des argiles à intercalations calcaires ou gréseuses et qui contient une riche faune d'ammonites. Elle est observée au niveau du Dj Kebar avec une épaisseur de 120 m;
- La formation du Meloussi : ces affleurements sont observés au niveau des Dj kebar et Faied avec des épaisseurs de 430 et 280m, respectivement. Elle est formée par une alternance de sables, de dolomies, de calcaires et d'argiles rouges ou vertes ;
- La formation de Boudinar : elle est observée au niveau des Dj Kebar et Dj Faied. Elle est marquée par la présence des sables à grains moyens à grossiers généralement mal classées et à stratifications obliques très fréquentes ;
- Le groupe Gafsa : il est observé au niveau du Dj Kebar avec une épaisseur de 285 m. Il forme une épaisse série d'alternances de sables blancs ou jaunes, de silts gris rouges ou violets, d'argiles et de marnes grises ou vertes et enfin de calcaires ou de dolomies ;

- La Formation Kebar : elle est formée par de dépôts continentaux de sédiments argileux et carbonatés d'origine lacustre et de sédiments détritiques grossiers qui forment une brèche argilo-gréseuse rougeâtre.

#### *1.5.1.4 Crétacé supérieur*

Le passage Crétacé inférieur-Crétacé supérieur est marqué par des discordances au niveau de la Tunisie centrale. Il est représenté par trois différentes formations : formation Zebbeg, formation Aleg et formation Abiod.

- La formation Zebbeg : elle comporte trois niveaux. Le Zebbeg inférieur est formé par des calcaires dolomitiques, des calcaires et des marnes. Le Zebbeg moyen est formé par une alternance de calcaire, marnes calcaires et dolomies. Le Zebbeg supérieur est constitué par des calcaires blancs avec fossiles, dolomies et calcaire massifs Elle est observée au niveau des Dj kebar, Dj Lessouda mais la formation est incomplète et au niveau de Dj El Hfay ;
- La formation Aleg : elle est observée au niveau des Dj Hamra, Dj Lessouda et Dj Kebar. Elle est formée d'argiles vertes gypseuses et de marnes avec des intercalations de petits bancs carbonatés;
- La formation Abiod qui est constituée de calcaires dolomitiques. Elle affleure au niveau de Dj Kebar avec une épaisseur de 136m.

#### *1.5.1.5 Paléogène*

La série Paléogène est constituée, de bas en haut, par la formation El Haria d'âge Paléocène, le groupe Metlaoui et la formation Souar avec ses équivalents Chérahil et Djebbs d'âge Eocène et se termine par les dépôts Oligocènes.

- Formation El Haria : formée par le dépôt d'argiles noires et affleurant au niveau des Dj El Hfay, Dj Hamra et Dj Kebar ;
- Groupe Metlaoui : formé d'alternances de calcaires coquilliers, de gypses, d'argiles et de phosphates ;
- Formation Chérahil : affleurant au niveau de Dj Lessouda, formée d'alternances de gypses, d'argiles et de dolomies lumachelliques.

#### *1.5.1.6 Mio-Pliocène continental*

On y distingue trois formations :

- Formation Beglia : ces dépôts débutent par une épaisse série de grès et de sables azoïque avec stratifications obliques et elle affleure au niveau du NOSA ;
- Formation Saouaf : formée par des alternances de sables et d'argiles avec de rares niveaux de gypses et elle affleure au niveau des Dj Lessouda et Dj Kebar ;
- Formation Segui : ces dépôts sont formés à la base par un niveau développé de conglomérats, surmontés par des argiles sableuses qui s'alternent avec des niveaux sableux et de silts rouges.

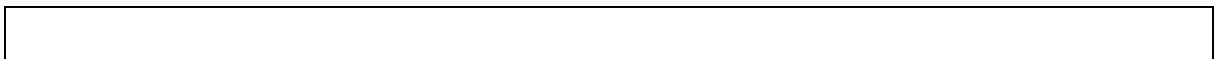
#### *1.5.1.7 Quaternaire*

Les dépôts du Quaternaire sont d'origine détritique et se caractérisent par leur diversité. On note les éléments suivants :

- Eblouis grossiers qui apparaissent aux piedmonts des massifs bordant la plaine de Sidi Bouzid, Dj. Kebar, Dj. El Hfay, Dj. Hamra et Dj. Lessouda ;
- Limons comportant des croûtes gypseuses plus au moins consolidées et qui constituent la couverture des sols salins impropres à la culture de Garet Akarish et Om Laadham ;
- Sables fins d'origine éolienne associés à des alluvions fluviales formés de graviers, de sables et de limons et qui constituent les dépôts actuels dans les lits des oueds.

### **I.5.2 Cadre structural**

La zone d'étude se trouve à la terminaison orientale de l'Atlas central. Ce dernier est limité vers l'Est par le NOSA qui le sépare de la plate-forme pélagienne, vers le Sud par la chaîne de Gafsa de direction E-W qui la sépare de la région des Chotts et délimitant l'Atlas méridional et enfin vers le Nord par la Dorsale Tunisienne (Fig.I.16). L'Atlas Central est marqué par des structures plissées d'entraînement à cœur Crétacé inférieur et de direction NE-SW. Ces plis ont généralement une seule terminaison périclinale et ils sont marqués par leur dissymétrie vers le Sud-Est expliquée par la dominance de plis de propagation de rampe. Les structures anticlinales incluent des structures synclinales de direction NW-SE et E-W. Ces structures sont des grabens et des simples cuvettes d'affaissement comblés par des dépôts d'âge Miocène à Mio-Plio-Quaternaire.



## **I.6 CADRE HYDROGEOLOGIQUE**

Le système aquifère de la région de Sidi Bouzid est considéré comme le plus grand et l'un des plus importants systèmes hydrogéologiques de la Tunisie centrale.

La figure I.17 montre que ce système est le résultat d'un remplissage des dépôts détritiques d'origine continentale et d'âge M-P-Q formés d'alternance de sables, d'argiles sableuses, de sables argileux, d'argiles avec des passées de graviers, de conglomérats et de gypses.

Figure I.17 : Log synthétique des dépôts Miocènes et Mio-Pliocènes en Tunisie centrale

### **I.6.1 Géométrie du réservoir**

Afin de déterminer la géométrie du système aquifère de Sidi Bouzid des coupes litho-stratigraphiques ont été étudiés. L'emplacement des coupes est présenté sur la figure I.18 :

Figure I.18 : Carte de localisation des coupes litho-stratigraphiques dans la zone d'étude

#### **- Coupe 1 de direction NW-SE :**

La coupe 1 (Figure I.19) s'étend du Nord-Ouest du Dj Hamra au Sud-Est vers Dj Kebar. Elle passe par les forages 19022/5, 19449/5, 19174/5, 18863/5 et 19743/5. La coupe montre une variation lithologique ainsi qu'une variation des épaisseurs du réservoir capté.

#### **- Coupe 2 de direction NE-SW :**

La coupe 2 (Figure I.20) traverse Oued El Fekka depuis la dépression salifère Naggada jusqu'aux piémonts du Dj Hamra. La coupe passe du Nord-Est au Sud-Ouest, par les forages 19174/5, 19172/5, 19459/5, 19667/5 et 19847/5. Pareil à la coupe 1, cette coupe présentait une variation lithologique ce qui a engendré une variation au niveau des profondeurs de captages. Elle montre la présence des couches d'argiles au niveau du centre de la zone d'étude.

Figure I.19 : Coupe 1 de direction NW-SE

Figure I.20 : Coupe 2 de direction NE-SW

#### **- Coupe 3 de direction NW-SE :**



La coupe 3 (Figure I.21) passe par les forages 19847/5 et 19938/5 du Nord-Ouest au Sud-Est. Conformément aux deux coupes précédentes, celle-ci montre une variation au niveau des profondeurs de captages.

Figure I.21 : Coupe 3 de direction NW-SE

En examinant les figures I.19, I.20 et I.21, on remarque que les niveaux de ce remplissage détritique sont formés essentiellement par des passées de sables, de sables argileux et de graviers.

Tout en se basant sur la corrélation litho-stratigraphique des forages présentés ci-dessus, on déduit que le système aquifère de Sidi Bouzid est un seul complexe aquifère multicouche en équilibre hydrodynamique avec un aspect lenticulaire. Ainsi, la séparation entre nappe phréatique et nappe profonde devient difficile. La figure I.22 présente la limite de la nappe de Sidi Bouzid qui sera utilisée dans l'élaboration du modèle conceptuel dans le chapitre 2.

Figure I.22 : Limite de la nappe de Sidi Bouzid

### **I.6.2 Paramètres hydrodynamique**

La conductivité hydraulique (K), la transmissivité (T) et le coefficient d'emmagasinement (S) sont des paramètres hydrodynamiques très importants dans la détermination des caractéristiques d'un aquifère.

Les valeurs de la perméabilité dans la nappe de Sidi Bouzid varient entre  $0,85 \times 10^{-4}$  et  $2 \times 10^{-4}$  m.s<sup>-1</sup>. Quant aux valeurs de transmissivité, elles étaient acquises à partir des résultats des essais de pompage et elles varient entre  $5,58 \times 10^{-3}$  et  $1,03 \times 10^{-2}$  m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>. La valeur du coefficient d'emmagasinement est de l'ordre  $5 \times 10^{-4}$ , qui est considéré faible, dans un système phréatique.

### **I.6.3 Alimentation**

La recharge est l'un des facteurs les plus importants dans l'évaluation des systèmes aquifères régionaux en zones arides et semi-arides.

La recharge peut être diffuse par l'infiltration direct des eaux de pluies au niveau des affleurements de bordure, ou concentrée par l'infiltration des eaux des crues le long des lits des oueds.

Figure I.23 : Modèle schématique de la recharge diffuse(a) et la recharge concentrée (b)

L'alimentation de la nappe de Sidi Bouzid est assurée essentiellement par l'infiltration des eaux d'Oued El Fekka grâce à sa texture grossière (sableuse et sableuse argileuse), l'infiltration des eaux pluviales et également la ré-infiltration des eaux d'irrigation. Les estimations de la recharge naturelle de la nappe seront détaillées dans le chapitre 2.

#### I.6.4 Exploitation

La nappe de Sidi Bouzid est exploitée essentiellement par des puits surfaces ainsi que des forages dès 1960. Le nombre de ces puits n'a cessé d'augmenter d'une manière rapide pour passer de 350 puits en 1965 à plus que 3300 puits en 2015 avec une exploitation de l'ordre de 33,3 Mm<sup>3</sup>/an. Cet accroissement a engendré une surexploitation de la nappe dès la fin des années quatre-vingt. Le nombre des forages était 4 forages en 1986 pour devenir 43 en 2015 avec une exploitation de l'ordre de 5.95 Mm<sup>3</sup>/an.

Le tableau I.2 montre l'évolution de l'exploitation de la nappe ainsi que l'évolution du nombre de forages et de puits créés pour la période allant de 1965 jusqu'à 2015.

Tableau I.2 : : Evolution de l'exploitation de la nappe de Sidi Bouzid (1965-2015)

Année	1965	1986	1992	2003	2010	2015
Nombre de puits	350	2000	2590	2910	3000	3300
Exploitation en Mm <sup>3</sup>	2,5	20	24	28	32,1	33,3
Nombre des forages	-	4	18	24	28	43

Exploitation en Mm <sup>3</sup>	-	2.0 8	2,6 3	5.4 6	4,3 4	5,9 5
---------------------------------	---	----------	----------	----------	----------	----------

(Source : CRDA Sidi Bouzid)

## I.7 LA GESTION DE L'EAU DANS LA ZONE D'ETUDE

Le gouvernorat de Sidi Bouzid est l'un des principaux centres de production agricole en Tunisie, en particulier pour les cultures légumières (18% de la production nationale), l'arboriculture (13% de la production d'amandes et 10% de l'huile d'olive), la production de lait (125 millions de litres en 2002). 12% de la production nationale en 2012). Les périmètres irrigués dans la région se divisent en trois catégories : des périmètres irrigués publics, périmètres irrigués de L'Office des Terres Domaniales (OTD) et les périmètres irrigués privés. De ce fait, une bonne gestion des ressources en eau dans la zone est indispensable.

### I.7.1 Irrigation

Périmètres irrigués publics : couvrent une superficie de 2450 ha. Ils sont gérés par des Groupements d'Intérêts Collectifs (GIC). Malheureusement, ces GIC connaissent une mauvaise gestion avec des taux d'exploitation qui ne dépasse pas 40%.

Périmètres irrigués OTD : s'étalent sur une superficie de 750 ha et sont répartis sur les deux délégations de Sidi Bouzid Ouest et Sidi Bouzid Est. Ils sont cultivés en intensif avec des céréalicultures et des fourrages pour subvenir les besoins du cheptel en bovin et ovin.

Périmètres irrigués privés : couvrent sur une superficie de 15000 ha, soit 82,6% de superficies irriguées par des eaux souterraines.

Ces périmètres connaissent un taux d'exploitation de 90% et d'intensification de 120%. Les céréales occupent plus de 8000 ha dont la majorité se trouve dans la partie aval qui tolère la salinité des eaux et des sols.

### I.7.2 Eau potable

L'approvisionnement en eau potable dans la zone d'étude que ce soit au niveau des zones urbaines ou bien des zones rurales, se fait à travers des forages et ces eaux sont distribuées par la Société Nationale d'Exploitation et de Distribution des Eaux (S.O.N.E.D.E).

## **I.8 CONCLUSION**

La région de Sidi Bouzid se caractérise par un climat aride, avec une précipitation moyenne de l'ordre de 220 mm/an. Les mois de Juin, Juillet et Août présentent la période la plus sèche de l'année où la température est maximale et l'humidité relative est minimale.

La zone d'étude est constituée essentiellement par un remplissage détritique d'âge Mio-Pio-Quaternaire. Ces remplissages sont formés d'alternance de sables, d'argiles sableuses, de sables argileux, d'argiles avec des passées de graviers, de conglomérats et de gypses.

Le système aquifère est un système lenticulaire dont Oued El Fekka est le cours d'eau principal de la zone d'étude.

---

---

**Chapitre II :**

**MATERIELS ET METHODES**

---

---

## **CHAPITRE II :**

### **MATERIELS ET METHODES**

#### **II.1 INTRODUCTION**

L'objectif de ce chapitre est de présenter les matériels et les méthodes déployés dans cette étude. Dans un premier temps, on présentera une actualisation des connaissances, investigations, recueil et synthèse des données. Dans un second temps, on décrira les matériels et les méthodes utilisés dans la caractérisation géochimique des eaux souterraines de la nappe de Sidi Bouzid ainsi que ceux utilisés dans l'élaboration du modèle numérique de ce système aquifère.

#### **II.2 ANALYSE ET COLLECTE DES DONNEES**

##### **II.2.1 Collecte des données**

Les données recueillies intéressent tous les niveaux du cycle de l'eau et des réservoirs : données climatologiques, hydrologiques, les caractéristiques des points d'eau (forages, puits, sources), les formations géologiques, les paramètres hydrodynamiques, les données géochimiques et l'historique des prélèvements. La collecte de données a impliqué également l'inventaire des travaux effectués en lien avec le sujet de l'étude : thèses, rapports nationaux, l'accès aux banques des données des organismes nationaux et régionaux (DGRE, INS, CRDA, SONEDE).

Le traitement de ces données, à partir de la base de données régionale (CRDA) ainsi créée et associée au SIG, a permis de produire diverses cartes telles que : carte du réseau hydrographique, carte de la géologie locale, carte des corrélations litho-stratigraphiques, carte de localisation des points d'eau et éventuellement celles de la piézométrie des systèmes aquifères, et celles des prélèvements en nappe, carte de distribution spatiale des éléments majeurs présents dans les eaux souterraines.

Les travaux de collecte de données ont été entrepris dès la première année d'étude et a duré cinq ans. Néanmoins, plusieurs difficultés ont été rencontrés durant la collecte de ces données. La principale difficulté est liée à l'obtention des données auprès des administrations concernées. Le format des données pose également un gros problème. Beaucoup trop de données sont transmises sous forme papier – notamment les historiques d'exploitation – ce qui rend ces documents difficilement utilisables pour cette étude.

## **II.2.2 Synthèse des données**

Cette synthèse fait le point sur cinq années d'étude poussées sur la nappe de Sidi Bouzid (reconnaisances par forages, modélisation, etc...). Il est précisé que toutes ces approches ont été motivées par la nécessité de déterminer l'hydrogéologie du système aquifère étudié afin de déterminer la qualité de ses ressources en eau souterraines ainsi que son comportement hydrodynamique.

On y trouve les informations d'ordre hydrogéologique suivantes :

- La région de Sidi Bouzid est marquée par un climat aride avec une moyenne de pluviométrie égale à 220mm/an ;
- Le réseau hydrographique est formé essentiellement par Oued El Fakka prenant naissance à la confluence d'Oued El Hechim et Oued Al Htab ;
- La zone d'étude est un remplissage de dépôts détritiques d'âge M-P-Q qui est formé d'alternance de sables, d'argiles sableuses, de sables argileux, d'argiles avec des passées de graviers, de conglomérats et de gypses ;
- Le système aquifère est un système lenticulaire ;
- Les auteurs rappellent que l'exutoire de la nappe est la dépression saline de Naggada ;
- Les valeurs de la perméabilité dans la nappe de Sidi Bouzid varient entre  $0,85 \times 10^{-4}$  et  $2 \times 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$  ;
- Le coefficient d'emmagasinement est de l'ordre  $5 \times 10^{-4}$  ;
- L'exploitation de la nappe est évaluée à  $33,3 \text{ Mm}^3/\text{an}$  en 2015.

## **II.3 MATERIELS ET METHODES**

Dans cette partie on présentera les matériels et méthodes utilisés dans l'évaluation de la qualité des eaux souterraines de la nappe de Sidi Bouzid ainsi que ceux utilisés dans la modélisation numérique de son comportement.

### **II.3.1 Qualité des eaux**

Pour évaluer la chimie des eaux souterraines et les principaux processus de minéralisation rencontrés dans l'aquifère de Sidi Bouzid, des méthodes hydrochimiques ont été utilisées, ainsi qu'une analyse statistique multivariée.

### II.3.1 Echantillonnage et procédure d'analyse

Un total de 30 échantillons a été recueilli, à partir des puits de surface de la nappe de Sidi Bouzid, pour mesurer les ions majeurs, le pH, la conductivité électrique (CE), le total des solides dissous (TDS) et les mesures de température (°T) (Fig.II.1). L'échantillonnage a été réalisé en Janvier et Mai 2017.

Figure II.1 : Carte de localisation des points d'eau d'échantillonnage

L'échantillonnage était fondé sur la procédure standard de collecte des échantillons d'eaux souterraines (USGS) (USGS, 2006). Pour s'assurer que l'échantillon d'eau était directement prélevé de l'aquifère, une purge préalable du puits était nécessaire. L'échantillon a été recueilli dans une bouteille en polyéthylène préalablement rincée à l'eau désionisée. Ensuite, il a été rincé deux fois plus bien que l'équipement de terrain avec l'eau retirée.

La température, le pH et la conductivité électrique ont été mesurés sur le terrain en utilisant respectivement un pH-mètre (WTW) et un conductimètre électrique (WTW).

Les échantillons ont été filtrés (0.45 µm) et conservés dans le réfrigérateur du laboratoire à une température contrôlée (4 ° C).

Les éléments majeurs et en éléments traces (Cd, Cu, Pb, Mn, Fe, Zn, Ni, Co et Cr) ont été analysés au laboratoire LARSEN de l'École Nationale des Ingénieurs de Sfax. Le total des solides dissous (TDS) a été déterminé par gravimétrie par évaporation (105 ° C) pendant 24 heures.

La concentration de Ca et de HCO<sub>3</sub> a été déterminée par titrage, tandis que les concentrations de SO<sub>4</sub>, Cl et NO<sub>3</sub> ont été obtenues par chromatographie ionique HIC. Les teneurs en Mg, Na et K ont été mesurées par absorption atomique.

Le niveau d'erreur dans les données n'a pas dépassé ± 5% et a été calculé à l'aide de la formule suivante:

$$\text{Erreur de la balance ionique} = \frac{\sum \text{cations} - \sum \text{anions}}{\sum \text{cations} + \sum \text{anions}} \times 100$$

### II.3.2 Hydrochimie

Les principaux faciès géochimiques sont basés sur les concentrations relatives des principaux cations et anions. Par conséquent, les graphiques en dispersion montrent la corrélation entre ces



éléments. Ils ont été présentés dans le but de distinguer les différents types d'eau rencontrés dans cette étude.

Le diagramme trilinéaire de Piper est l'un des diagrammes les plus largement utilisés pour présenter les principales composantes géochimiques des eaux. Le code de calcul géochimique Diagrammes 6.51 a été utilisé pour calculer les indices de saturation en minéraux. Ces indices ont été calculés afin de déterminer la tendance d'une eau à se dissoudre ( $IS < 0$ ) ou à se précipiter ( $IS > 0$ ).

$$SI = \log \frac{(PAI)}{K}$$

Avec

*SI* : Indice de saturation

*IAP* : Produit d'activité ionique

*K* : Constante de solubilité à l'équilibre

### *II.3.3 Analyse statistique*

Différentes techniques statistiques multivariées, telles que l'analyse hiérarchique cluster (AHC) et l'analyse en composantes principales (ACP), ont été utilisées pour mieux comprendre la relation entre les différentes composantes.

La ACP est une méthode d'analyse de données multivariée bien connue, dont l'objectif principal est de réduire la dimensionnalité des ensembles de données constitués d'un grand nombre de variables interdépendantes.

L'objectif de AHC est de former des groupes dans les données de telle sorte que les observations soient aussi semblables que possible au sein des groupes, mais aussi différentes que possible entre groupes.

Les résultats de la AHC sont affichés sous forme de dendrogramme, à partir duquel des groupes chimiques apparentés peuvent être identifiés.

Les analyses multivariées, comprenant ACP et AHC, ont été réalisées à l'aide de XLSTAT 2017.

### II.3.4 Aptitude des eaux souterraines pour l'irrigation

Pour les régions de production agricole comme Sidi Bouzid, la qualité de l'eau souterraine est aussi importante que sa quantité. Par conséquent, l'aptitude des eaux souterraines à être utilisées à des fins agricoles a été évaluée selon les critères suivants : CE, TDS, dureté totale (TH), teneur en sodium (% Na), rapport d'adsorption de sodium (SAR), indice de perméabilité (PI) et rapport de Kelly (KR).

Les eaux contenant des quantités élevées des sels dissous de calcium ou de magnésium, ou les deux, sont décrites comme étant « dures ». D'autres cations tels que le fer, le manganèse, l'aluminium et le zinc peuvent également contribuer à la dureté.

La dureté de l'eau est définie en termes de calcium carbonate  $\text{CaCO}_3$ . En fait, la dureté n'affecte pas directement les plantes, mais la dureté causée par les bicarbonates peut affecter les sols, ayant ainsi un impact indirect sur la croissance des plantes.

La dureté est donnée par la formule suivante:

$$\text{TH (mg/l)} = 2.479 \text{ Ca}^{2+} + 4.115\text{Mg}^{2+}$$

Une eau d'irrigation riche en sodium peut entraîner une détérioration de la structure du sol en modifiant ses propriétés et sa perméabilité. Le pourcentage de Na a été déterminé par la relation suivante :

$$\%Na = \frac{(Na^+ + K^+)}{(Ca^+ + Mg^{2+} + Na^+ + K^+)} \times 100$$

Le SAR est la mesure de la proportion de Na en Ca et de Mg dans l'eau. De même, il s'agit de l'indice du risque de perméabilité au sodium lorsque l'eau se déplace dans le sol. Le problème majeur d'une concentration élevée en sodium est son effet sur les propriétés physiques du sol. Cette décomposition disperse l'argile du sol et rend le sol dur et compact lorsqu'il sèche et réduit le taux de pénétration de l'eau lorsqu'il est mouillé. Plus le Na est élevé par rapport au Ca et au Mg, plus le SAR est élevé et plus l'infiltration d'eau est faible. D'après Hem (1991), SAR est défini comme suit :

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

L'indice de perméabilité, suggéré par Doneen (1966), est basé sur les concentrations de tous les principaux cations et de  $\text{HCO}_3^-$ . Il est défini comme suit :

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

Kelly (1951) a envisagé de mesurer le Na par rapport aux Mg et Ca en tant que ratio utilisé pour la classification des eaux souterraines destinées à l'irrigation. Le KR est donné par la formule suivante :

$$KR = \frac{Na^+}{Ca^{2+} + Mg^{2+}}$$

Où toutes les concentrations des formules présentées précédemment sont exprimées en millièmes d'équivalent par litre.

### *II.3.5 Indice de qualité de l'eau d'irrigation*

L'indice de qualité de l'eau d'irrigation (IWQI) a été utilisé pour déterminer la pertinence des objectifs d'irrigation des eaux souterraines. L'IWQI a été calculé sur la base du modèle développé par Meireles et al. (2010) en fonction des cinq paramètres suivants : EC,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , Cl- et SAR, la carte de répartition spatiale de l'IWQI a été élaborée en deux étapes. La première étape consiste à calculer l'échelle d'évaluation de la qualité (qi) à partir de chaque paramètre, calculée à partir de l'équation suivante :

$$q_i = q_{i\max} - [(x_{ij} - x_{\text{inf}}) * q_{i\text{amp}}] / x_{\text{amp}}$$

Où  $q_{i\max}$  est la valeur maximale de qi pour la classe ;  $x_{ij}$  est la valeur observée pour le paramètre ;  $x_{\text{inf}}$  est la valeur correspondant à la limite inférieure de la classe à laquelle appartient le paramètre ;  $q_{i\text{amp}}$  est l'amplitude de classe ;  $x_{\text{amp}}$  est l'amplitude de classe à laquelle appartient le paramètre. Afin d'évaluer  $x_{\text{amp}}$ , de la dernière classe de chaque paramètre, la limite supérieure a été considérée comme la valeur la plus élevée déterminée lors de l'analyse physico-chimique et chimique des échantillons d'eau. La deuxième étape consiste à superposer les cartes élaborées durant la première phase.

Tableau II.1 : Valeurs limites des paramètres pour le calcul de la mesure de la qualité (qi)

Qi	CE ( $\mu\text{s/cm}$ )	SAR ( $\text{meq/l}$ ) <sup>1/2</sup>	Na <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
			(meq/l)		
85-100	200 $\leq$ EC<750	SAR<3	2 $\leq$ Na<3	Cl<4	1 $\leq$ HCO <sub>3</sub> <1.5
60-85	750 $\leq$ EC<1500	3 $\leq$ SAR<6	3 $\leq$ Na<6	4 $\leq$ Cl<7	1.5 $\leq$ HCO <sub>3</sub> <4.5
35-60	1500 $\leq$ EC<3000	6 $\leq$ SAR<12	6 $\leq$ Na<9	7 $\leq$ Cl<10	4.5 $\leq$ HCO <sub>3</sub> <8.5
0-35	EC<200 or EC $\geq$ 3000	SAR $\geq$ 12	Na<2 or Na $\geq$ 9	Cl $\geq$ 10	HCO <sub>3</sub> <1 or HCO <sub>3</sub> $\geq$ 8.5

### II.3.2 Modélisation

Durant les dernières années et surtout après la révolution en 2011, l'augmentation rapide du nombre de puits privés a engendré une surexploitation des ressources en eau souterraines non pas seulement en Tunisie centrale mais également dans tout le pays.

Le pompage excessif des eaux souterraines à partir de ces puits provoque une diminution progressive du niveau hydrostatique ainsi qu'une dégradation de la qualité de ces eaux. Par conséquent, le problème le plus grave en matière d'eaux souterraines auquel le pays est actuellement confronté n'est pas seulement le développement des eaux souterraines mais c'est aussi la gestion durable.

Dans ce but, le développement d'un modèle hydrogéologique de la nappe paraît indispensable. En fait, la modélisation hydrogéologique est utilisée pour mieux comprendre le fonctionnement de notre système aquifère et de simuler différents scénarios afin d'en évaluer les effets. Elle sert notamment d'outil d'aide à la décision dans le cadre de la gestion, l'exploitation ou la préservation de ce système.

L'objectif de cette partie est de présenter le fonctionnement hydrogéologique de la nappe de Sidi Bouzid. Dans un premier temps, la nappe a été délimitée afin de définir le domaine de cette étude. Dans un second temps, le fonctionnement hydrogéologique de la nappe a été analysé en déterminant ses principales caractéristiques (sources, exutoires, recharge, évaporation, paramètres hydrodynamiques...).

À partir de cette conceptualisation, un modèle numérique d'écoulement a été construit pour établir, entre autres, un bilan hydrique dans les différents régimes de fonctionnement de notre système et pour étendre nos connaissances sur les niveaux piézométriques.

La réalisation de notre modèle hydrogéologique comprend 4 étapes successives.

#### *II.3.2.1 Conceptualisation*

L'élaboration du modèle conceptuel consiste à synthétiser l'ensemble des informations nécessaires à la modélisation. La première étape dans la construction du modèle conceptuel est de définir le domaine concerné de l'étude pour identifier les limites du modèle. Compte tenu du type d'équation à résoudre pour calculer la charge, les conditions aux limites devraient être fixées le long des limites du système.

Il existe trois étapes dans la construction du modèle conceptuel :

##### *Définition des unités hydro-stratigraphiques*

Ce terme unité hydro-stratigraphique est introduit par Maxey (1964) et Seaber (1988) et il exprime les unités géologiques ayant les propriétés hydrogéologiques similaires.

##### *Préparation du bilan d'eau*

Le modèle conceptuel doit mentionner les sources en eau du système, les directions d'écoulement d'eau et les exutoires du système. Il contient aussi des estimations des flux entrants au système (recharge) et celles des flux sortants (pompage, sources, évapotranspiration, exutoire ...).

##### *Définition du système de flux*

L'information hydrologique est utilisée pour conceptualiser le mouvement des eaux souterraines dans le système aquifère. Les informations hydrologiques sur la précipitation, l'évaporation, et le ruissellement aussi bien que les données sur la charge hydraulique et les informations géochimiques sont utilisées dans cette analyse. Les mesures de piézométrie sont utilisées pour estimer la direction générale du flux souterrain, la position de la zone de recharge et de décharge ainsi que la connexion entre les aquifères et les systèmes d'eau de surface.

La définition du système de flux est basée sur les données hydrologiques, physiques, mais aussi géochimiques. Les analyses chimiques incluent les concentrations de cations majeurs : (Ca,

Mg, Na) et anions (SO, HCO<sub>3</sub>, Cl), température et pH. Les données géochimiques peuvent être utilisées pour déterminer les directions de flux ; identifier les sources et les quantités de recharge ; estimer le flux souterrain ; ainsi que déterminer les systèmes de flux local, intermédiaire et régional.

#### *II.3.2.1 Isatis*

Lors de la construction d'un modèle d'écoulement régional, l'absence de données piézométriques satisfaisantes et accessibles peut limiter la précision du travail. Lors de la construction du modèle d'écoulement de la nappe de Sidi Bouzid, la création d'une carte piézométrique de référence est indispensable. Le choix de l'état de référence est principalement imposé par la disponibilité des données piézométriques, l'absence des perturbations et l'exploitation minimale des eaux souterraines.

Dans cette étude, il est fait référence à la carte piézométrique de 1989 de la figure (II.4), élaborée à l'aide logiciel Isatis (version 10) développé par la société de Géovariance. Ce logiciel est un outil d'interpolation à 2 et 3 dimensions, strictement basé sur les techniques de la géostatistique. Ses multiples fonctionnalités ainsi que ses capacités cartographiques en font un outil idéal et rigoureux pour de tels travaux d'interpolation (Géovariance, 2010).

La carte piézométrique a été élaboré en utilisant le krigeage en dérive externe. Le modèle numérique de terrain a été pris comme une variable auxiliaire, étant donné qu'il est bien corrélé à la piézométrie et connu en plusieurs points.

On a utilisé la méthode de validation croisée pour déterminer de manière objective la fiabilité des résultats de la méthode utilisée.

#### *II.3.2.2 Processing Modflow et construction du modèle numérique*

Le logiciel de modélisation est sélectionné en fonction de la problématique étudiée et des processus à modéliser. À l'aide de ce logiciel, le modèle numérique est construit sur base du modèle conceptuel en se rapprochant le plus possible de la réalité. Dans cette étude, le modèle Processing Modflow a été développé afin de simuler les écoulements souterrains, les transports de soluté ainsi que le transfert de chaleur.

Le modèle « Modflow » est un modèle bi et tri- dimensionnel de simulation des écoulements souterrains, qui porte en partie sur le développement de différences finies. Il a été développé en 1984 par Mc Donald et Harbough ; United States Geological survey (USGS), et depuis il est largement utilisé dans le USGS et ailleurs pour la simulation des écoulements souterrains.

Cette version a subi des améliorations pour avoir le Modflow- 88, puis Modflow- 96, Modflow- 2000 pour arriver à MF Modflow -2005 et *Processing Modflow*, développé par Wen-Hsing Chiang et Wolfgang Kinzelbach en 1998.

Ce modèle permet la modélisation de l'écoulement souterrain dans un aquifère. Il est largement utilisé dans le monde, on cite à titre d'exemple, des études récentes MODFLOW utilise l'équation suivante pour la simulation de flux d'eau souterraine. L'équation gouvernante est le modèle de différence finie basé sur l'approche bloc centré, donnée par :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} + R(x, y, z)$$

Avec

$K_x, K_y$  et  $K_z$  : conductivité hydraulique dans l'espace dans les directions X, Y et Z en [L.T<sup>-1</sup>]

$h$  : charge hydraulique en [L]

$S_s$  : coefficient d'emmagasinement [L<sup>-1</sup>]

$R$  : flux spécifique [T<sup>-1</sup>]

$t$  : temps [T]

### *II.3.2.3 Calibration et validation*

Cette étape consiste à adapter les différents paramètres du modèle simulé dans le régime permanent (1989 est l'année de référence en piézométrie) pour que les résultats calculés par le modèle reproduisent au mieux les mesures de terrain.

### *II.3.2.4 Simulation de différents scénarios et interprétation des résultats*

Après validation, le modèle est utilisé pour la simulation de différents scénarios dans le régime transitoire. L'interprétation des résultats des simulations permet d'apporter une réponse à l'évolution de la piézométrie au cours du temps.

### *II.3.2.5 Procédures de simulation avec Modflow*

Dans les sections suivantes, les différentes étapes de la construction du modèle, commençant par la géométrie du modèle et la définition des conditions aux limites sont décrites, tout en introduisant les composantes déjà définies dans le modèle conceptuel pour construire le modèle numérique.

#### *II.3.2.5.1 Discrétisation du domaine*

Pour appliquer la méthode des différences finies, il faut délimiter la zone du modèle tout d'abord puis discrétiser le domaine d'étude à des mailles carrées. La géométrie du réservoir a été discuté dans la section I.6.1 du chapitre précédent.

Le domaine de modélisation s'inscrit dans une matrice de 108 colonnes et de 60 lignes, soit 6480 mailles carrées et régulières de 0.5 kilomètre de côté. Le modèle est composé d'une seule couche aquifère de type libre.

#### *II.3.2.5.2 Conditions aux limites*

L'imposition des conditions limites sur le domaine considéré ne fut pas une chose aisée bien que primordiale pour réaliser une modélisation pertinente.

Après avoir créée le maillage du domaine du modèle, toutes les conditions aux limites doivent être définies avant à toutes les simulations. Les conditions aux limites du modèle numérique peuvent être décrites comme toutes composantes, où l'eau entre ou sort de notre domaine du modèle.

Dans la section suivante, toutes les conditions aux limites seront discutées, pour la simulation en régime permanent ainsi que pour la simulation en régime transitoire.

Les conditions aux limites dans le régime permanent sont indépendantes du temps et sont normalement basées sur des valeurs moyennes à long terme alors que les conditions aux limites de l'état transitoire sont dépendant du temps, telles que les variations saisonnières des précipitations.

Pour le régime transitoire, les conditions aux limites étaient basées sur les valeurs moyennes annuelles de précipitations, taux d'extraction et fluctuations de la nappe phréatique.

Les conditions aux limites d'un domaine seront saisies au modèle par le tableau d'IBOUND contenant un code pour chacun des cellules du modèle.

Le code indique la valeur (1) si la charge hydraulique sera calculée avec le modèle (cellule active), la valeur (-1) pour une charge constante (flux imposé) et la valeur (0) pour les cellules inactives.



#### II.3.2.5.3 limites supérieures et inférieures de la nappe

Les limites se présentent en carte des toits, qui prend l'élévation supérieure de l'aquifère comme donnée d'entrée, et en carte des murs qui consiste à représenter le substratum imperméable pour les nappes phréatiques et la limite inférieure pour les nappes profondes.

La figure II.5 présente la carte des profondeurs élaborée en se basant sur les données de forages d'exploration et celle importée au modèle.

Figure II.5 : Carte des profondeurs de la nappe de Sidi Bouzid

#### II.3.2.5.4 Les paramètres du temps

Dans le logiciel Processing Modflow, le domaine temporel devrait être divisé pour des pas et des périodes de stress. Une solution sera calculée pour chaque pas. Pour les simulations en régime permanent, on a déjà cité que l'année de référence était l'année 1989. Pour les simulations en régime transitoire la période s'étale de 1989 au 2015.

#### II.3.2.5.5 Conditions initiales

Processing Modflow exige des charges hydrauliques initiales. L'utilisation des valeurs produites par le modèle assure que les données initiales et les charges calculées par le modèle soient cohérentes.

#### II.3.2.5.6 Transmissivité

Pour des cas de simulations impliquant plus qu'une couche, Processing Modflow exige les valeurs de la transmissivité. Le logiciel prend les valeurs de la transmissivité et l'épaisseur des couches afin de calculer la valeur des fuites entre les couches.

Figure II.7 : Carte de répartition spatiale des transmissivités dans la nappe de Sidi Bouzid

#### II.3.2.5.7 Conductivité hydraulique

Pour les modèles numériques où le système aquifère est une seule couche, Processing Modflow exige les valeurs de la conductivité hydraulique. Concernant notre modèle deux hypothèses de répartition spatiale des conductivités hydrauliques de la nappe de Sidi Bouzid seront discutés lors du troisième chapitre.

#### II.3.2.5.8 Rendement spécifique

Pour des simulations au régime transitoire, Processing Modflow exige des valeurs de stockage adimensionnelles pour chaque couche. Le coefficient d'emmagasinement a été pris de l'ordre  $5 \times 10^{-4}$ .

#### II.3.2.5.9 Recharge

La recharge est l'un des facteurs les plus importants dans l'évaluation des systèmes aquifères régionaux en zones arides et semi-arides (Hassen, 2017). La recharge des nappes d'eau souterraines est définie comme étant la part de la précipitation qui s'infiltré efficacement vers la nappe (Guermazi, 2017).

L'estimation de la recharge des aquifères est considérée comme l'un des paramètres les plus difficiles à estimer. Diverses approches ont été envisagées (Sophocleous, 1995,2004). On y distingue :

##### II.3.2.5.9.1 Méthodes physiques

###### **A- Méthode du bilan hydrique**

###### Recharge diffuse

La méthode du bilan hydrique, qui a été développé par Thornthwaite et Mather, 1955 pour estimer la recharge dans les régions tempérées, est utilisée pour tenter de mesurer tous composantes du bilan hydrique.

La recharge est déterminée par la différence entre les précipitations et la somme de toutes les autres variables :

$$\text{Recharge} = P - (R + ET + \Delta S)$$

Avec

P : précipitations en [L]

R : ruissellement en [L]

ET : évapotranspiration en [L]

$\Delta S$  : variation du stock en [L]

Cette approche sert à quantifier la recharge dans les régions arides et semi-arides. En revanche, elle peut présenter certaines limites. Dans cette approche, l'estimation de ET est basée sur des équations de type Penman des erreurs importantes peuvent se produire.

###### Recharge concentrée

Afin d'estimer la recharge concentrée en zones arides et semi-arides régions on aura besoin de faire certaines analogies :

- les précipitations sont remplacées par le ruissellement de l'oued
- l'évapotranspiration réelle ETR est limitée à la surface inondée de l'oued
- R représente le ruissellement de l'oued en dehors de la zone de recharge des nappes phréatiques

Cette méthode n'est applicable que si et seulement si le stock d'eau dans le sol est inférieur aux réserves facilement utilisables et l'ETR doit être inférieure à l'évapotranspiration potentielle.

### **B- Mesure directe**

Les lysimètres peuvent aider à estimer les données du bilan hydrique en donnant des données directes in situ, mesures de l'évapotranspiration, de l'infiltration et les variations de stockage de l'eau et drainage.

Les lysimètres fournissent également la seule mesure directe du flux d'eau d'une surface végétative.

### **C- Méthode de Water-table fluctuation (WTF)**

La méthode (WTF) a été utilisée dès l'année 1920 et elle est considérée comme la technique la plus utilisée pour estimer la recharge de nappe.

Cette méthode fournit une estimation de la recharge des nappes en analysant les fluctuations des niveaux d'eau dans les puits d'observation.

La recharge est calculée par l'équation suivante :

$$R = S_y \frac{dh}{dt} = \frac{\Delta h}{\Delta t}$$

Avec

$S_y$  : coefficient d'emmagasinement ;

$h$  : le niveau piézométrique ;

$t$  : temps.

La méthode est appliquée dans des conditions climatiques variables et des échelles de temps différentes. Néanmoins, la méthode présente quelques difficultés qui sont liées à la détermination d'une valeur représentative du coefficient d'emménagement, surveillance des variations des niveaux d'eau dues à la recharge, la présence de l'air emprisonné, ou à d'autres phénomènes, tels que le pompage.

#### II.3.2.5.9.2 Méthodes géochimiques et isotopiques

##### **A- Méthode du Chloride Mass Balance (CMB)**

Plusieurs études se sont basées sur la méthode du bilan massique des chlorures (CMB) dans l'estimation des taux de recharge dans les régions arides et semi-arides. L'utilisation de cette méthode exige des paramètres (ex :la pluie) qui sont généralement difficiles à mesurer, très variables (effets saisonniers), sujettes à la pollution et mal compris. Tandis que les processus de zone non saturées et saturées peuvent être facilement mesurables et compréhensibles sur sites.

La méthode des chlorures a été utilisé afin de déterminer les flux d'humidité ainsi que les taux de recharge. Elle a également été utilisé avec succès dans différents régimes de recharges.

Cette méthode repose sur le principe d'équilibrer la masse des chlorures originaires des précipitations avec ceux des eaux de recharge en eau potentielle utilisant le fait que les chlorures dans la zone non saturée sont inertes. Par conséquent, la recharge directe moyenne ( $R_d$ ) à travers la profondeur échantillonnée du La zone non saturée est donnée par l'équation suivante :

$$R_d = \frac{P(C_p + C_d)}{C_s}$$

Avec

P : précipitation moyenne annuelle de la région ;

$C_p$  : concentration moyenne des chlorures dans les pluies ;

$C_d$  : concentration moyenne des chlorures des dépôts secs ;

$C_s$  : concentration moyenne de chlorure dans les eaux interstitielles de la zone non saturée.

##### **B- Méthodes de traçages isotopiques**

Les chlorures, les isotopes stables  $^2\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}$  et les traceurs radioactifs des isotopes  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$  et  $^{36}\text{Cl}$  ont été utilisés pour déterminer les flux d'humidité et pour expliquer les mécanismes de recharge. Chaque traceur fournit des informations sur certains aspects des processus de transport opérant dans la zone non saturée et la zone saturée.

Allison et al. (1983) ont présenté une méthode semi-empirique d'estimation de la recharge en utilisant les isotopes stables  $^2\text{H}$  et  $^{18}\text{O}$ .

Elle sert à l'estimation de l'évaporation et à la détermination de l'origine des eaux souterraines. Elle peut être également utilisée dans l'estimation des flux l'humidité et les taux de recharge. Cette méthode est une méthode qualitative et non pas quantitative puisque  $^2\text{H}$  et  $^{18}\text{O}$  sont des traceurs conservateurs.

Le  $^{14}\text{C}$ , un isotope radioactif, est souvent utilisé pour la datation des âges des eaux souterraines qui peuvent aller jusqu'à 60000 ans.

L'utilisation du tritium est l'une des techniques de traçage les plus intéressantes est. Un isotope de l'hydrogène permet de marquer directement la molécule d'eau où le tritium peut être injecté délibérément dans la zone non saturée. Pour cette raison, le tritium a été appelé le traceur idéal. La présence d'activité élevée de  $^3\text{H}$  dans l'humidité et dans les eaux souterraines peut indiquer l'infiltration des eaux et peut également déterminer les mécanismes de recharge en termes d'écoulement multi-modèle.

Au cours de la construction de notre modèle numérique a été estimée en se basant sur la méthode du facteur de précipitation d'infiltration (méthode RIF).

Cette méthode peut être exprimée par la relation suivante :

$$R=I \times P \times A$$

Avec

R : la recharge par les eaux de pluie ;

P : précipitations dans la région ;

A : la superficie de la zone de recharge ;

I : le coefficient d'infiltration.

Le tableau II.2 présentera les différentes valeurs des coefficients d'infiltration utilisées a dans les études réalisées par la DGRE :

Tableau II.2 : Coefficients d'infiltrations des réservoirs hydrogéologique

Classe	Réservoir	Coefficient d'infiltration (%)
1	- Gravier - Alluvion des oueds	6

<b>2</b>	- Grès - Sable - Sable limoneux - Limon - Limon argileux - Sable argileux - Marne - Argile Sableuse	4
<b>3</b>	- Calcaire - Encroutement - Dolomie	2
<b>4</b>	- Gypse - Argile - Silt - Sols de sebkha	1

La recharge a été appliquée sur tout le domaine de la nappe sauf au niveau de Naggada (recharge nulle) avec des coefficients de 6% au niveau des Oueds El Fekka et Sereg Dhiba et 4% sur tout le reste de la zone d'étude (Figure II.8).

#### II.3.2.5.10 Exploitation

Les eaux souterraines du bassin hydrogéologique du Sidi Bouzid sont utilisées à la fois à l'irrigation et à l'approvisionnement en eau potable. Des conditions aux limites de type de « Wells » ont été utilisées pour les puits de surface ainsi que les forages. Les puits ont été réparties sur toute la profondeur de l'aquifère du Moi-Plio-quatenaire. L'exploitation a été évaluée de l'ordre de 26.08 Mm<sup>3</sup>/an avec environ 23 Mm<sup>3</sup>/an pour 2300 puits de surface et 3.08 Mm<sup>3</sup>/an sur 18 forages durant l'année 1989 (Figure II.9). Néanmoins pour notre modèle on a une condition aux limites de type « Wells » :

- Un débit d'écoulement de la nappe Horchane-Braga de 1.1 Mm<sup>3</sup>/an ;

Pour les simulations en régime transitoire du modèle numérique, les taux d'extraction variant dans le temps ont été attribué à chaque puits, en utilisant les données annuelles de 1989-2015.

La figure II.9 montre un déséquilibre dans la répartition des puits de surface. La zone de la rive droite de Oued El Fekka de direction Sud-Est est exploitée par OTD et c'est pourquoi on ne trouve que des forages dans cette zone.

#### II.3.2.5.11 Drainage

La nappe de Sidi Bouzid est marquée par un débit d'écoulement souterrain vers la dépression salifère Naggada de l'ordre de 3.8 Mm<sup>3</sup>/an.

#### *II.3.2.6 Calage du modèle en régime permanent*

Le calage du modèle est la prochaine étape après la construction et la définition des conditions aux limites du modèle avec Processing Modflow.

Le défi lors de cette étape est de reproduire le comportement de l'aquifère avec les contraintes imposées par le modèle hydrogéologique conceptuel.

Toute modification doit être cohérente par rapport aux principales observations hydrogéologiques et géologiques qui ont été faites lors de l'étude hydrogéologique de notre système.

## **II.4 CONCLUSION**

Dans ce chapitre on a présenté en premier lieu les méthodes hydrochimiques ainsi que les méthodes statistiques des eaux échantillonnées du système aquifère de Sidi Bouzid afin d'évaluer la qualité chimique des eaux de la région et préciser les différents processus de minéralisation des eaux.

En second lieu, une étude régionale de modélisation des écoulements souterrains a été réalisée dans le système aquifère de Sidi Bouzid. La nappe a été étudiée à l'aide de Processing Modflow pour simuler les écoulements souterrains dans des conditions stables et transitoires.

---

---

**Chapitre III :**

**RESULTATS ET INTERPRETATIONS**

---

---



## **CHAPITRE III :**

### **RESULTATS ET INTERPRETATIONS**

#### **III.1 INTRODUCTION**

Dans le chapitre précédent on a présenté les différentes méthodes utilisées dans la caractérisation hydrochimique des eaux souterraines de la nappe de Sidi Bouzid ainsi que les méthodes impliquées dans l'élaboration du modèle conceptuel et la modélisation numérique de la nappe.

Ce chapitre sera dédié à la présentation et la discussion des résultats des analyses chimiques et la modélisation numérique.

#### **III.2 QUALITE DES EAUX**

L'eau souterraine est une ressource naturelle vitale et joue un rôle important dans l'économie. Mis à part une étude quantitative, une étude qualitative serait nécessaire de ces eaux souterraines afin d'évaluer leurs aptitudes à l'utilisation domestique et à l'irrigation. La qualité chimique des eaux souterraines ne dépend pas que de la composition lithologique des couches traversées mais également e de leur temps de séjour dans l'aquifère.

##### **III.2.1 Hydrochimie**

Les paramètres physico-chimiques et les éléments traces des échantillons d'eau souterraine ainsi que leurs valeurs minimales, maximales, l'écart type et la moyenne sont indiqués dans le tableau III.1. Les corrélations entre les différentes composantes étudiées sont présentées dans le tableau III.2.

Les oligo-éléments analysés (Cd, Cu, Pb, Mn, Fe, Zn, Ni, Co et Cr) ont présenté de faibles concentrations. Les teneurs en Pb et Cr étaient inférieures à 50 µg / l alors que celles de Ni et Co étaient inférieures à 10 µg / l. Pendant ce temps, ceux de Cd, Mn, Zn et Fe étaient respectivement inférieurs à 5, 22, 40, 8 et 6 µg / l.

Tableau III.1 : Résultats analytiques pour les paramètres physico-chimiques, les ions majeurs et les éléments traces

Echantillons	pH	CE	TDS	Ca	Mg	Na	K	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Cl	NO <sub>3</sub>	Cd	Cu	Pb	Mn	Ni	Zn	Fe	Cr	Co
		(µs/cm)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(µg/l)	(µg/l)	(µg/l)	(µg/l)	(µg/l)	(µg/l)	(µg/l)	(µg/l)
1	7.6	1900	1600	118	66	207	6.3	192	743	87	4.5	<5	<22	<50	<40	<10	<8	<6	<50	<10
2	7.59	2200	2000	106	103	132	6.6	137	1090	98	7.5	<5	<22	<50	<40	<10	<8	<6	<50	<10
3	7.62	2100	1800	128	58	248	6.8	205	880	75	6	<5	<22	<50	<40	<10	<8	<6	<50	<10
4	7.65	1970	1700	118	63	225	6.8	188	807	78	5	<5	<22	<50	<40	<10	<8	<6	<50	<10
5	7.6	1800	1600	136	72	163	7	164	732	65	5.5	<5	<22	<50	<40	<10	<8	<6	<50	<10
6	7.67	1970	1600	134	65	193	7.4	180	802	104	6	<5	<22	<50	<40	<10	<8	<6	<50	<10
7	7.54	2600	2000	126	71	364	7.9	255	920	195	6.6	<5	<22	<50	<40	<10	<8	<6	<50	<10
8	7.57	2400	1900	116	72	330	6.9	248	880	165	6	<5	<22	<50	<40	<10	<8	0.22	<50	<10
9	7.55	3500	2600	144	74	521	9	251	1090	465	5.9	<5	<22	<50	<40	<10	<8	0.22	<50	<10
10	7.49	4800	3500	168	76	770	30	256	1320	880	10	<5	<22	<50	<40	<10	<8	0.22	<50	<10
11	7.47	3100	2300	128	77	490	10	274	1055	330	13.5	<5	<22	<50	<40	<10	<8	0.22	<50	<10
12	7.46	4100	3100	212	103	586	11	246	1350	560	15	<5	<22	<50	<40	<10	<8	0.22	<50	<10
13	7.53	2400	2000	251	112	148	5.6	157	1175	135	12	<5	<22	<50	<40	<10	<8	0.22	<50	<10
14	7.33	5100	4000	265	156	720	12.6	253	1620	860	5	<5	<22	<50	<40	<10	<8	0.22	<50	<10
15	7.43	5300	4100	285	160	705	13	234	1800	902	7	<5	<22	<50	<40	<10	<8	0.28	<50	<10
16	7.58	4300	3400	245	165	515	11	275	1245	646	85	<5	<22	<50	<40	<10	<8	0.18	<50	<10
17	7.53	8300	6500	455	326	1041	14.6	236	2500	1540	24	<5	<22	<50	<40	<10	<8	<6	<50	<10
18	7.4	4000	3200	229	143	508	9.8	270	1360	595	70	<5	<22	<50	<40	<10	<8	0.18	<50	<10
19	7.5	3600	2900	253	164	315	8	214	1370	435	22.5	<5	<22	<50	<40	<10	<8	0.18	<50	<10
20	7.52	2580	2200	144	99.6	411	8	215	1100	340	5	<5	<22	<50	<40	<10	<8	<6	<50	<10
21	7.5	2350	1600	152	119	252	8.4	171	1050	270	10	<5	<22	<50	<40	<10	<8	<6	<50	<10
22	7.58	2250	1800	160	108	199	10.9	173	1100	230	5	<5	<22	<50	<40	<10	<8	<6	<50	<10
23	7.87	2250	1800	192	117	176	10.9	114	1150	250	5	<5	<22	<50	<40	<10	<8	<6	<50	<10
24	7.55	2930	2000	288	130	243	11	131	1080	380	7.5	<5	<22	<50	<40	<10	<8	<6	<50	<10
25	7.41	2890	2200	312	103	243	10.5	127	1100	360	7.5	<5	<22	<50	<40	<10	<8	<6	<50	<10

26	7.47	3230	2600	184	134	331	8	184	1050	440	7	<5	<22	<50	<40	<10	<8	<6	<50	<10
27	7.69	1700	1400	116	70.9	184	5.7	171	750	112	5	<5	<22	<50	<40	<10	<8	<6	<50	<10
28	7.6	2270	1800	136	88	263	6.6	188	900	250	13	<5	<22	<50	<40	<10	<8	<6	<50	<10
29	7.52	2720	2000	176	113	291	7	177	1100	320	12	<5	<22	<50	<40	<10	<8	<6	<50	<10
30	7.58	2160	1800	96	77	277	6.8	234	850	170	6	<5	<22	<50	<40	<10	<8	<6	<50	<10

Tableau III.2 : Matrice de corrélation des différentes composantes des eaux souterraines de l'aquifère de Sidi Bouzid

	pH	CE	TDS	Ca	Mg	Na	K	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Cl	NO <sub>3</sub>
pH	1										
CE	-0.50	1									
TDS	-0.477	0.992	1								
Ca	-0.404	0.792	0.783	1							
Mg	-0.299	0.832	0.846	0.869	1						
Na	-0.524	0.940	0.923	0.581	0.628	1					
K	-0.278	0.601	0.553	0.352	0.260	0.664	1				
HCO <sub>3</sub>	-0.460	0.504	0.499	0.027	0.139	0.696	0.313	1			
SO <sub>4</sub>	-0.440	0.947	0.950	0.846	0.902	0.827	0.495	0.316	1		
Cl	-0.490	0.987	0.972	0.781	0.819	0.938	0.660	0.467	0.932	1	
NO <sub>3</sub>	-0.191	0.352	0.365	0.318	0.397	0.288	0.107	0.436	0.281	0.335	1

### *III.2.1.1 pH*

Les valeurs de pH des échantillons varient de 7,33 à 7,87, avec une moyenne de 7.54. Ces valeurs indiquent la présence d'eau légèrement basique.

### *III.2.1.2 Conductivité électrique*

La conductivité électrique est considérée comme une mesure représentative des risques de salinité. Des valeurs élevées de CE dans les eaux souterraines pourraient limiter l'activité osmotique des plantes et donc entraver l'absorption de l'eau et des nutriments du sol en raison de la salinité excessive.

Les valeurs de la CE indiquent une énorme variabilité de 1700 à 8300  $\mu\text{S} / \text{cm}$ . La figure III.1 montre la distribution spatiale de la CE en ( $\mu\text{S} / \text{cm}$ ) dans l'aquifère de Sidi Bouzid. La carte de distribution a été obtenue en co-krigeant la CE et le total des solides dissouts qui ont montré une grande corrélation ( $r = 0,99$ ). Les valeurs les plus faibles sont rencontrées au niveau des lits de l'Oued El Fekka alors que celles les plus fortes sont rencontrées au niveau de la dépression salifère Naggada. De même manière, la CE est fortement corrélée dans l'ordre avec les ions Cl, SO<sub>4</sub>, Na, Mg et Ca (tableau III.2).

Figure III.1 : Carte de répartition spatiale des conductivités électriques

### *III.2.1.3 Total des solides dissouts*

Les valeurs de TDS varient de 1400 à 6500 mg / l dans l'aquifère peu profond de Sidi Bouzid. Les valeurs les plus élevées ont été observées en aval de l'aquifère, en direction de la zone de décharge de l'aquifère M-P-Q (points d'échantillonnage N° 12, 14, 15 et 17 sur la figure III.2). Les valeurs les plus faibles (TDS <2 g / l) ont été trouvées autour de l'Oued El Fekka.

Figure III.2 : Carte de répartition spatiale des TDS

Les fortes concentrations de TDS (de 3,0 à 6,5 g / l) pourraient être dues à une contamination de l'aquifère étudié par les eaux de surface évaporées dans la dépression de Naggada, où la nappe est très proche de la surface.

Quant aux valeurs basses, elles auraient pu être influencées par une recharge en eau indiquant le rôle de la recharge naturelle en amont de l'Oued El Fekka.

#### *III.2.1.4 Le Calcium*

Les valeurs de calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) varient de 96 à 455 mg / l avec une moyenne de 185,7 mg / l. Les valeurs les plus élevées sont localisées au centre de la zone d'étude.

La majorité des échantillons au voisinage de l'Oued El Fekka ont présenté des concentrations en  $\text{Ca}^{2+}$  les plus faibles alors les valeurs les plus importantes sont localisées vers les zones de dépressions Naggada. La carte de répartition spatiale du Calcium (Figure III.3) est obtenue en utilisant la méthode d'interpolation le Co-krigeage. La variable du calcium a été co-krigée avec le magnésium et les sulfates vu les coefficients de corrélations forts.

#### *III.2.1.5 Le Magnésium*

Les concentrations en magnésium de eaux de la nappe de Sidi Bouzid varient entre 58 et 326 mg/l avec une moyenne de 192 mg/l. La figure III.4 montre que les faibles teneurs en magnésium (<100 mg/l) sont observées dans la zone Nord-Est de la zone d'étude alors que les fortes teneurs sont observées aux alentours des zones de dépressions (Naggada), la zone de Sandouk avec des valeurs atteignant 326 mg/l. Ces dernières indiquent un enrichissement accompagnant de fortes salinités. La carte de répartition spatiale du magnésium a été obtenue en utilisant la méthode de co-krigeage pour les interpolations vu que ce cation a présenté une forte corrélation avec les éléments  $\text{SO}_4$  et Cl (tableau II.2).

#### *III.2.1.6 Le Sodium*

Les concentrations en Sodium dans la nappe de Sidi Bouzid varient entre un minimum de 132 mg/l et un maximum de 1041 mg/l.

Dans la zone d'étude, la majeure partie (figure III.5) présente des teneurs inférieures à 500 mg/l. les concentrations supérieures à 700 mg/l sont observées vers la zone du Nord-Ouest, vers l'exutoire de la nappe.

La carte de distribution spatiale a été obtenue en co-krigeant le sodium avec les chlorures ( $r = 0.938$ ).

### *III.2.1.7 Les Chlorures*

Les concentrations en Chlorures dans la nappe de Sidi Bouzid varient entre un minimum de 65mg/l et un maximum de 1540 mg/l.

Dans la zone d'étude, la majeure partie (figure III.6) présente des teneurs inférieures à 600 mg/l. Les concentrations supérieures à 600 mg/l sont observées vers la zone du Nord-Ouest, vers l'exutoire de la nappe.

La carte de distribution spatiale a été obtenue en co-krigeant le sodium avec le sodiù ( $r = 0.938$ ).

### *III.2.1.8 Les Sulfates*

Les concentrations des sulfates dans la zone d'études varient entre 732 et 2500 mg/l avec une moyenne de 1616 mg/l. La carte de répartition spatiale des teneurs en sulfates dans la nappe de Sidi Bouzid (figure III.7) montre que la majorité de la zone d'étude présente des teneurs en sulfates inférieures à 1500 mg/l. Comme d'habitude les fortes concentrations des eaux en sulfates sont rencontrées dans la zone de Sandouk aux alentours de l'exutoire de la nappe (Naggada) pour atteindre les 2500 mg/l.

### *III.2.1.9 Les Bicarbonates*

Les teneurs en Bicarbonates dans la zone d'étude varient entre 114 et 275 mg/l avec une moyenne de 204 mg/l. La figure III.8 montre que les concentrations en Bicarbonates augmentent de l'amont vers l'aval en atteignant les valeurs maximales aux alentours de la zone Naggada. La carte de répartition spatiale des Bicarbonates a été obtenue à l'aide de la méthode d'interpolation le co-krigeage. La variable auxiliaire est le Sodium avec un coefficient de corrélation de  $r = 0.6$ .

## **III.2.2 Processus de minéralisation des eaux souterraines**

### *III.2.2.1 Faciès chimiques des eaux de la nappe*

Le diagramme de Piper (Fig.III.9) indique que les ions  $SO_4$ , Mg et Ca sont les principaux éléments abondants dans les échantillons analysés. Ces derniers montrent des augmentations significatives des ions Cl et Na et que les cations dominants sont Na + K. L'analyse du diagramme de Piper révèle que les eaux souterraines sont caractérisées par un faciès sulfaté mixte.

### *III.2.2.2 Mécanismes et origines de la minéralisation des eaux souterraines*

#### *III.2.2.2.1 Relation du Total des Solides Dissouts (TDS) et les ions*

Les diagrammes présentés dans les figurés III.10 et III.11 mettent en évidence que :

- La minéralisation des eaux souterraines de la nappe de Sidi Bouzid a une relation avec les chlorures et les sulfates avec des coefficients de corrélations égales à 0.945 et 0.902 respectivement. La corrélation est beaucoup plus faible avec le reste des anions ;
- Pour les cations, la minéralisation des eaux est en relation dans un ordre décroissant avec le sodium, le calcium et le magnésium alors que la relation entre le total des solides dissouts (TDS) avec le potassium est relativement faible.

Figure III.11 : Relation entre TDS et les cations

La figure III.12 montre que le rapport  $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$  en milliéquivalents par litre (meq/l) est supérieur à 1 et qu'il varie de 1 à 5.1 dans tous les échantillons tout confirmant la forte relation entre le TDS et ces ions.

#### *III.2.2.2.2 Relation du Sodium par rapport aux chlorures*

La figure III.13 montre que les eaux souterraines de la nappe de Sidi Bouzid se caractérisent par un enrichissement en  $\text{Na}^+$  mettant en hypothèse que cet enrichissement peut être du soit à la dissolution des formations évaporitiques soit aux échanges de base entre les eaux de la nappe et les minéraux argileux.

#### *III.2.2.2.3 Relation du Calcium par rapport aux Sulfates*

L'existence des eaux sulfatées peut être due à la circulation de ces dernières dans des formations gypseuses. La figure III.14 révèle que les eaux souterraines de la nappe de Sidi Bouzid présentent un enrichissement en sulfates.

Cet enrichissement peut être expliqué par la dissolution des minéraux sulfatés alors que le déficit en ions  $\text{Ca}^{2+}$  peut être expliqué par les échanges de base entre les eaux de la nappe et les minéraux argileux.

#### III.2.2.2.4 Relation du Magnésium par rapport aux Sulfates

La figure III.15 met en évidence un enrichissement des eaux souterraines de la zone d'étude en ions  $\text{SO}_4^{2-}$  par rapport aux  $\text{Mg}^{2+}$ . La relation  $\text{Mg}^{2+} = f(\text{SO}_4^{2-})$  montre un coefficient de corrélation égal à 0.902. Cet enrichissement peut être expliqué par la dissolution des sulfates de magnésium qui est un composé minéral anhydre.

#### III.2.2.2.5 Relation du Calcium par rapport aux Bicarbonates

Les ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{HCO}_3^-$  ont présenté un coefficient de corrélation très faible de l'ordre de 0.02. Cette faible corrélation débout l'hypothèse que ces ions viennent de la dissolution des minéraux carbonatés.

#### III.2.2.2.6 Echanges ioniques

Le diagramme de dispersion (Fig. III.17.a) montre l'interrelation  $[(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})]$  versus  $[(\text{Na}^+ + \text{K}^+) - \text{Cl}^-]$  mettant en évidence les échanges fondamentaux avec ces substances qui affectent les eaux souterraines pendant les pluies et l'infiltration des eaux d'irrigation. La figure III.17 révèle que la majorité des échantillons sont situés sous l'axe 1: -1, ce qui favorise le processus d'échange d'ions. Cela indique que les ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  sont enrichis relativement aux ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  par la libération des ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  (échange cationique inverse). Pour afficher cet échange d'ions entre les éléments mentionnés, l'indice CAI chloro-alkalin ( $\text{CAI} = [\text{Cl}^- - (\text{Na}^+ + \text{K}^+)] / \text{Cl}^-$  en meq / l) a été calculé. Les valeurs négatives du CAI montrent que les ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  de l'eau sont échangés avec du  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  au niveau des roches, ce qui favorise les réactions d'échange cation-anion (Fig.III.17.b). Ces conclusions sont argumentées à travers la répartition des échantillons sur le diagramme de dispersion (Fig.III.17.c)



### III.2.2.3 Indices de saturation

Le tableau III.3 montre que les eaux souterraines sont sous-saturées en anhydrite, en gypse et en halite, affirmant que leurs concentrations en composantes solubles de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  ne sont pas contrôlées par l'équilibre minéral. Les échantillons présentaient une valeur d'indice de saturation positive (SI) de la calcite et de la dolomite (minéraux carbonatés).

Ces valeurs d'indice de saturation montrent que le gypse, l'anhydrite et l'halite subissent une dissolution par les eaux souterraines car ils contribuent ainsi à la minéralisation des eaux souterraines.

Ces valeurs expliquent les fortes concentrations des éléments  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  aux alentours de la zone d'évaporation Naggada.

Ceci est dû à la forte solubilité des gypse et d'anhydrite qui s'amassent suite aux crues et aux événements pluvieux sur la croûte du sol précisément au niveau de Naggada.

Tableau III.3 : Indices de saturation des eaux souterraines de la nappe de Sidi Bouzid

Echantillons	Anhydrite	Aragonite	Calcite	Dolomite	Gypse	Halite
A1	-0.79	0.06	0.21	0.38	-0.54	-5.34
A2	-0.7	-0.17	-0.02	0.16	-0.45	-5.11
A3	-0.7	0.13	0.28	0.43	-0.45	-5.16
A4	-0.76	0.09	0.25	0.43	-0.51	-5.21
A5	-0.73	0.05	0.2	0.35	-0.48	-5.20
A6	-0.71	0.15	0.3	0.5	-0.46	-5.07
A7	-0.71	0.11	0.27	0.5	-0.46	-5.13
A8	-0.75	0.1	0.26	0.52	-0.51	-5.20
A9	-0.62	0.14	0.29	0.51	-0.37	-5.12
A10	-0.51	0.12	0.27	0.41	-0.26	-4.42
A11	-0.67	0.06	0.21	0.42	-0.42	-4.79
A12	-0.39	0.18	0.33	0.56	-0.14	-4.71
A13	-0.33	0.17	0.32	0.51	-0.08	-5.03
A14	-0.26	0.12	0.27	0.53	-0.01	-5.26
A15	-0.19	0.21	0.36	0.69	0.06	-5.00
A16	-0.38	0.4	0.55	1.15	-0.13	-3.84
A17	0.08	0.44	0.59	1.27	0.32	-4.32
A18	-0.37	0.18	0.33	0.69	-0.12	-4.15
A19	-0.31	0.23	0.39	0.8	-0.06	-4.64
A20	-0.61	0.05	0.2	0.46	-0.36	-5.27
A21	-0.59	-0.04	0.12	0.34	-0.34	-4.97
A22	-0.54	0.08	0.23	0.5	-0.3	-5.07
A23	-0.45	0.26	0.41	0.82	-0.21	-4.78
A24	-0.33	0.15	0.3	0.48	-0.08	-4.92
A25	-0.28	0.03	0.19	0.11	-0.03	-5.08
A26	-0.53	0.03	0.18	0.44	-0.28	-5.17

A27	-0.79	0.09	0.24	0.48	-0.54	-5.25
A28	-0.68	0.08	0.23	0.48	-0.43	-4.86
A29	-0.52	0.05	0.21	0.44	-0.27	-4.95
A30	-0.84	0.02	0.17	0.45	-0.59	-5.20

Le diagramme de Gibbs montre la variation du rapport  $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$  et  $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$  avec le TDS. La figure III.18 montre clairement que tous les échantillons se trouvent dans la zone d'altération des roches, ce qui montre que l'altération chimique des minéraux formant des roches est le principal facteur contrôlant la chimie de l'eau dans la zone d'étude. Ainsi, la dissolution du gypse et de l'anhydrite est la principale responsable de la chimie des eaux souterraines.

#### III.2.2.3.1 Corrélation des indices de saturation et le total des solides dissouts

La figure III.19 ainsi que la tableau III.3 prouvent que les eaux souterraines de la nappe de Sidi Bouzid sont saturées en minéraux carbonatés alors qu'elles ne le sont pas par rapport aux minéraux évaporitiques.

La figure III.19 montre que tous les échantillons une corrélation significative entre les minéraux évaporitiques (l'anhydrite et le gypse avec des coefficients de l'ordre de 0.8). Cette corrélation confirme l'hypothèse de la dissolution de ces deux minéraux.

#### III.2.2.3.2 Corrélation des indices de saturation et les concentrations ioniques

Le tableau III.3 a montré que les échantillons étudiés sont sous saturés en halite, anhydrite et gypse. La figure III.20 prouve que la relation entre l'anhydrite et le gypse avec la somme  $[\text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}]$  est très forte. La variation proportionnelle des indices de ces minéraux avec les sommes  $[\text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}]$  et  $[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]$  valide l'hypothèse de la dissolution de ces minéraux, déjà discutée. L'excès des ions de  $(\text{SO}_4^{2-})$  par rapport à ceux du  $(\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+})$  représenté par les figures III.14 et III.15 montre que le phénomène d'échange cationique est aussi responsable de la minéralisation des eaux souterraines de la nappe de Sidi Bouzid.

La forte relation entre l'halite et la somme  $[\text{Na}^+ + \text{Cl}^-]$  met en évidence la dissolution de l'halite et que cette dernière est bien impliquée dans la salinisation de ces eaux. Ceci est argumenté par la forte corrélation entre les éléments Na et Cl déjà montrée par la figure III.13.

Figure III.20 : Corrélation des indices de saturations avec des sommes de concentrations des

### III.2.2 Analyse statistique

#### III.2.2.1 Analyse des Composants Principaux (ACP)

Dans le but d'identifier les principales variables qui affectent la composition chimique des eaux souterraines, un ensemble de données de 30 échantillons avec 11 éléments physico-chimiques a été analysé. Trois principales composantes principales (PC) ont été extraites, représentant une variance de 87,07% de la structure de données initiale. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau III.4.

Tableau III.4 : Résumé des résultats de l'ACP des trois premières composantes

Composantes	1	2	3
Valeur propre	7.158	1.399	1.021
% Variabilité	65.070	12.719	9.280
% Cumulé	65.070	77.789	87.070

La figure III.21 présente la projection des variables étudiées dans le premier, deuxièmes et troisièmes plans factoriels. PC1 représente 65,07% de la variance totale. Il montre une forte charge positive sur  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$ , TDS,  $Cl^-$  et CE, alors qu'une charge positive modérée sur  $Na^+$ . Le facteur de charge élevé de la CE s'explique par la contribution active des ions dissous dans la qualité de l'eau souterraine. Les principales variables qui constituent PC1 ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ) sont liées aux variables hydrochimiques provenant du processus de minéralisation des eaux souterraines. La présence de  $Cl^-$  peut indiquer une pollution ponctuelle due au rejet des eaux usées en milieu rural. La PC2 a représenté 12,719% de la variance totale et est principalement représentée par ( $HCO_3^-$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ) à forte charge positive. L'association de  $K^+$  et de  $Na^+$  facilite la dissolution de la calcite et de la dolomite, affectée par l'érosion et le dépôt dans les hautes terres.

La PC3 présentait 9,28% de la variation totale de la qualité de l'eau dans les eaux souterraines, avec une forte charge positive en  $NO_3^-$  et une charge positive modérée en  $HCO_3^-$ . L'utilisation excessive d'engrais dans l'agriculture peut expliquer la forte charge positive sur  $NO_3^-$ . La minéralisation des engrais organiques est une source potentielle de  $NO_3^-$  dans les eaux souterraines.

#### III.2.2.2 Analyse Hiérarchique Cluster (AHC)

L'analyse hiérarchique cluster AHC vise à classer les objets en groupes en fonction de la

similitude entre les échantillons par rapport aux éléments physico-chimiques. L'AHC a été réalisée en utilisant les distances euclidiennes et la méthode de «Ward».

Le dendrogramme généré disposait cinq groupes (Fig.III.22). Le premier groupe est constitué de pH, le second est constitué de by CE, TDS,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , et de Cl<sup>-</sup>.

Le troisième groupe est formé par  $\text{K}^+$ , tandis que les quatrième et cinquième groupes sont formés respectivement par  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{NO}_3^-$ . Les résultats obtenus renforcent ceux déjà obtenus par le biais de l'ACP.

Figure III.21 : Projection des variables dans le premier, deuxièmes et troisièmes plans factoriels

### III.2.3 Evaluation de la qualité des eaux pour usage domestique

Le tableau III.5 présente les résultats de la comparaison des composants analysés avec les directives de l'Organisation mondiale de la santé WHO (2011 et 2017) et SO.N.E.D.E (NT.09.14) pour l'eau de boisson. Les valeurs de température et de pH, de tous les échantillons, sont comprises dans les limites admissibles des normes de WHO et de la Tunisie (NT). Cependant, par rapport aux normes de WHO, 100% des échantillons contenaient plus de 500 mg / l de TDS alors que, selon les normes NT, seul le tiers des échantillons contenait plus de 2 500 mg / l. Par conséquent, 100% des échantillons d'eau avaient plus de 1500  $\mu\text{S} / \text{cm}$ , ce qui dépasse les normes de WHO. De même, les concentrations de  $\text{SO}_4$  allaient de 732 à 2500 mg / l, ce qui dépasse les concentrations recommandées par WHO.

En ce qui concerne la concentration de Ca, 36% et 2% des échantillons étaient en dehors des normes de WHO et du NT, respectivement.

La concentration admissible de Mg montre une différence énorme entre les normes de WHO et du NT, de 30 à 150 mg / l. Par conséquent, conformément aux normes de WHO, 100% des échantillons dépassent les limites, tandis que 83,4% de l'eau analysée respecte les normes du NT.

Par rapport aux normes de WHO, 76% des échantillons avaient plus de 200 mg / l de sodium. Pour les concentrations de Cl, la moitié des échantillons sont conformes aux normes de WHO mais 16,6% respectent les normes tunisiennes. Seuls 6% des échantillons prélevés dépassent les limites de concentration de  $\text{NO}_3$  fixées par WHO, ainsi que les normes NT. Les

concentrations de composants en traces (Cd, Ni, Cr, Fe, Co, Cu, Mn, Pb et Zn) pour tous les échantillons étaient bien inférieures aux valeurs recommandées pour les normes de WHO et du NT.

### **III.2.4 Evaluation de la qualité des eaux pour l'irrigation**

#### *III.2.4.1 Dureté totale*

La limite admissible de la dureté totale TH est de 300 mg / l. Tous les échantillons d'eau présentaient des valeurs élevées allant de 553,3 à 2474,1 mg / l.

#### *III.2.4.2.1 Pourcentage de Sodium (%Na)*

La classification des échantillons d'eau souterraine est présentée dans le tableau III.6. La teneur en sodium varie de 23,11% à 69,92%. Le résultat montre que 30% des échantillons appartiennent à la bonne catégorie et 60% à la classe autorisée, tandis que 10% des échantillons sont considérés comme douteux pour l'irrigation. Le diagramme de Wilcox (1955) (Fig.III.23) basé sur % Na et CE prouve que 50% des échantillons d'eau souterraine sont jugés inappropriés.

Figure III.23 : Diagramme de Wilcox d'échantillons d'eau souterraine de la nappe de Sidi Bouzid pour l'irrigation

Tableau III.5 : Normes de l'eau potable

Paramètres		pH	T°C	CE (µS/cm)	TDS (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	HCO <sub>3</sub> (mg/l)	SO <sub>4</sub> (mg/l)	Cl (mg/l)	NO <sub>3</sub> (mg/l)	Cd (mg/l)	Cu (mg/l)	Pb (mg/l)	Mn (mg/l)	Ni (mg/l)	Zn (mg/l)	Fe (mg/l)	Cr (mg/l)	Co (mg/l)	
Normes WHO 2011, 2017	Normes	6.5-8.5	-	1500	500	200	30	200	30	380	250	250	50	-	2	-	0.4	0.7	3	-	0.05	-	
	Nombre des échantillons dépassant la norme	0	-	30	30	11	30	23	0	0	30	16	2	-	0	-	0	0	0	0	0	0	-
	Percentage %	0%	-	100%	96%	36%	100%	76%	0%	0%	100%	53%	6%	-	0%	-	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-
NT.09.14	Normes	6.5-8.5	-	-	2500	300	150	-	-	-	600	600	45	-	0.5	-	0.5	0.7	5	1	0.05	-	
	Nombre des échantillons dépassant la norme	0	-	-	10	2	5	-	-	-	30	5	2	-	-	-	0	0	0	0	0	0	-
	Percentage %	0%	-	-	33.3%	6%	16.6%	-	-	-	100%	16.6%	6%	-	-	-	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-

#### *III.2.4.2.2 Ratio d'adsorption de sodium (SAR)*

Les valeurs du SAR calculées vont de 1,99 à 12,33. Cela indique que 96,6% des échantillons d'eau souterraine sont adaptés à l'irrigation. Les effets d'un SAR élevé sur l'infiltration d'eau d'irrigation dépendent de la conductivité électrique de l'eau. Pour un SAR donné, plus la CE est basse, plus les propriétés d'infiltration deviennent pauvres, et vice versa. Les données SAR sont tracées sur le diagramme de salinité américain présenté à la figure III.24. Selon le diagramme de salinité américain, 40% des échantillons ont chuté avec une salinité élevée avec une faible teneur en sodium. Le reste des échantillons a une salinité très élevée avec une teneur en sodium moyenne à élevée.

#### *III.2.4.2.3 Indice de Perméabilité*

Les valeurs d'indice de perméabilité (Tab.III.6) des échantillons des eaux souterraines varient de 33,4 à 73,6%. Les valeurs se situent dans la deuxième classe (entre 25 et 75%), indiquant une bonne qualité pour l'eau d'irrigation.

#### *III.2.4.2.4 Ratio de Kelly*

Les valeurs calculées varient de 0,29 à 2,27. 66,66% des échantillons avaient un ratio inférieur à 1 ; par conséquent, ces échantillons d'eau souterraine conviennent à la pratique d'irrigation.

Tableau III.6 : Aptitude des eaux souterraines à l'irrigation en fonction de plusieurs paramètres

Paramètres	Gamme	Classe	Nombre des échantillons	Pourcentage (%)
<i>CE</i> (µs/cm)	<250	Excellente	-	-
	250-750	Bien	-	-
	750-2250	Admissible	10	33.33%
	2250-5000	Médiocre	16	53.33%
	>5000	Mauvaise	4	13.33%
<i>TDS</i> (mg/l)	<500	Souhaitable pour potabilité	-	-
	500-1000	Admissible pour potabilité	-	-
	1000-3000	Utile pour irrigation	23	76.7%
	>3000	Mauvaise pour potabilité et irrigation	7	23.3%
<i>TH</i> (mg/l)	<75	Douce	-	-
	75-150	Modérément élevée	-	-
	150-300	Dure	-	-
	>300	Très dure	30	100%
%Na	0-20	Excellente	-	-
	20-40	Bien	9	30%
	40-60	Admissible	18	60%
	60-80	Médiocre	3	10%
	>80	Mauvaise	-	-
<i>SAR</i>	<i>SAR</i> <10	Excellente	29	96.67%
	10< <i>SAR</i> <18	Bien	1	3.33%
	18< <i>SAR</i> <26	Médiocre	-	-
	<i>SAR</i> >26	Mauvaise	-	-
<i>Indice de Perméabilité</i> (%)	<i>PI</i> >75	Excellente	-	-
	25< <i>PI</i> <75	Bien	30	100%
	<i>PI</i> <25	Mauvaise	-	-
<i>Ratio de Kelly</i>	<i>KR</i> <1	Bien	20	66.67%
	<i>KR</i> >1	Mauvaise	10	33.33%



### III.2.5 Indice de qualité de l'eau d'irrigation IWQI

La figure III.25 présente la distribution spatiale de l'indice de qualité de l'eau d'irrigation qui a été introduit dans le paragraphe II.3.5, qui varie d'une restriction sévère (RS) à une restriction modérée (RM) (tableau III.9). Les zones de restriction sévères ont été découvertes près des sebkhas. Les valeurs d'IWQI ont augmenté d'Oued El Fekka en amont à en aval pour varier de niveaux de qualité de restriction élevée à modérés. L'eau analysée est recommandée pour les sols à haute perméabilité et les plantes avec une tolérance aux sels de modérée à élevée (tableau III.9)

Tableau III.7 : Valeurs limites des paramètres pour le calcul de la mesure de la qualité (qi)

Qi	EC ( $\mu\text{s/cm}$ )	SAR ( $\text{meq/l}$ ) <sup>1/2</sup>	Na <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
			(meq/l)		
85-100	200 $\leq$ EC<750	SAR<3	2 $\leq$ Na<3	Cl<4	1 $\leq$ HCO <sub>3</sub> <1.5
60-85	750 $\leq$ EC<1500	3 $\leq$ SAR<6	3 $\leq$ Na<6	4 $\leq$ Cl<7	1.5 $\leq$ HCO <sub>3</sub> <4.5
35-60	1500 $\leq$ EC<3000	6 $\leq$ SAR<12	6 $\leq$ Na<9	7 $\leq$ Cl<10	4.5 $\leq$ HCO <sub>3</sub> <8.5
0-35	EC<200 or EC $\geq$ 3000	SAR $\geq$ 12	Na<2 or Na $\geq$ 9	Cl $\geq$ 10	HCO <sub>3</sub> <1 or HCO <sub>3</sub> $\geq$ 8.5

Tableau III.8 : Poids des paramètres de IWQI

Parameters	Wi
Electrical conductivity (EC)	0.211
Sodium (Na <sup>+</sup> )	0.204
Chloride (Cl <sup>-</sup> )	0.194
Bicarbonate (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	0.202
Sodium Absorption ratio (SAR)	0.189
Total	1

Tableau III.9 : Caractéristiques de l'indice de qualité de l'eau d'irrigation

IWQI	Restrictions d'utilisation d'eau	Recommandation	
		Sol	Plante
85-100	Pas de restriction (PR)	Peut être utilisée pour la majorité des sols avec une faible probabilité de causer des problèmes de salinité et de sodicité, étant recommandé comme lessivage dans les pratiques d'irrigation, sauf pour des sols extrêmement peu perméables.	Pas de risque de toxicité pour toutes les plantes
70-85	Basse restriction (RB)	Recommandée pour les sols irrigués à texture légère ou à perméabilité modérée, sel recommandé lessivage. La sodicité du sol peut être présente dans les sols à texture épaisse, il est recommandé d'éviter son utilisation dans les sols très argileux.	Eviter les plantes sensibles au sel
55-70	Restriction Modérée (RM)	May be used in soils with moderate to high permeability values, being suggested moderate leaching of salts.	Plants with moderate tolerance to salts may be grown
40-55	Restriction Elevée (RE)	Peut être utilisée dans les sols avec des valeurs de perméabilité modérées à élevées, suggérant une lixiviation modérée des sels.	Devrait être utilisé pour l'irrigation des plantes avec modérée à haute tolérance aux sels avec contrôle spécial de la salinité pratiques, sauf l'eau avec faibles valeurs de Na, Cl et HCO <sub>3</sub>
0-40	Restriction Severe (SR)	Son utilisation devrait être évité pour l'irrigation dans des conditions normales. Dans des cas spéciaux, peut être utilisé occasionnellement. L'eau contenant peu de sel et le SAR élevé nécessite l'application de gypse. Dans une eau à forte teneur en sel, les sols doivent avoir une perméabilité élevée et un excès d'eau doit être appliqué pour éviter l'accumulation de sel.	Seulement les plantes avec beaucoup de tolérance de sel, sauf pour les eaux avec des valeurs extrêmement basses de Na, Cl et HCO <sub>3</sub> .

Figure III.25 : Carte de distribution spatiale A)  $q_i(\text{HCO}_3)$ , B)  $q_i(\text{Cl})$ , C)  $q_i(\text{CE})$ , D)  $q_i(\text{SAR})$  et E)  $q_i(\text{Na})$

Figure III.26 : Carte Indice de qualité de l'eau d'irrigation IWQI

### **III.3 MODELISATION**

#### **III.3.1 Modèle conceptuel**

L'objectif d'un modèle conceptuel est de synthétiser les informations récupérées à partir des analyses des données hydrogéologiques. Ce type de résumé des résultats et des observations représente une étape cruciale avant la construction d'un modèle numérique. Un modèle numérique construit selon un modèle conceptuel sera conditionné par la quantité et la nature des hypothèses qui ont été faites pour l'élaboration du modèle conceptuel.

Ce dernier identifie les entrées et les sorties de l'eau, ainsi que les limites de l'aquifère qui sont ensuite transposées en termes de conditions aux limites et la distribution des paramètres hydrauliques dans un modèle numérique.

Les principales caractéristiques géométriques, structurelles et hydrogéologiques de la nappe de Sidi Bouzid étaient déterminées sur la base des études antérieures .

Pour décrire le régime d'écoulement des eaux souterraines à l'aide des données géologiques de la zone d'étude, une hypothèse décrivant l'aquifère de de Sidi Bouzid, est présenté. Cette hypothèse est basée sur la connaissance de la topographie de surface, les failles affectant la géologie de l'aquifère et la présence de dépressions indiquant l'emplacement des débouchés des eaux souterraines de la nappe.

Cette hypothèse approuve le fait que l'écoulement des eaux souterraines converge vers Oued El Fekka et il est de direction SE-NW de la zone de Bir Lahfay vers Naggada.

Sur la base de cette hypothèse, un modèle numérique de référence sera simulé et les résultats de cette hypothèse seront examinés et discutés.

Le domaine du modèle du réservoir a été choisi essentiellement pour couvrir le remplissage détritique du Mio-Plio-Quaternaire du Sidi Bouzid en Tunisie centrale.

Sinon, des conditions aux limites adéquates seront utilisées dans limite de la zone d'étude pour mettre en évidence la connexion entre ce compartiment et les autres zones de la région d'étude.

En commençant par une étude conceptuelle à l'échelle régionale, la pile stratigraphique complète de la zone d'étude a été couplée à la modélisation numérique des écoulements sur une surface de maillage de différences finies à l'aide du logiciel Processing Modflow.

Un modèle conceptuel nécessite une simplification de la réalité. Le degré de simplification dépend de l'échelle régionale mais il dépend également du but de l'étude.

Le but de cette étude est d'évaluer la capacité de l'aquifère de Sidi Bouzid et ce parce que la puissance de calcul représente une contrainte ultime, un modèle compliqué et si vaste présente des limites malgré la précision de la géométrie.

Une telle conceptualisation capture les principales caractéristiques des conditions géologiques, hydrologiques et hydrogéologiques de la nappe de Sidi Bouzid, y compris la limite d'entrée et la limite de charge hydraulique.

La figure III.27 illustre le modèle conceptuel de la zone d'étude et qui représente la base des travaux de modélisation.

### **III.3.2 Calage du modèle numérique**

Le calage du modèle est la prochaine étape après la construction et la définition des conditions aux limites du modèle des différences finies en 2D avec Processing Modflow.

Le défi lors de cette étape est de reproduire le comportement de l'aquifère avec les contraintes imposées par le modèle hydrogéologique conceptuel.

Toute modification doit être cohérente par rapport aux observations hydrogéologiques et géologiques qui ont été faites.

#### *III.3.2.1 Calage du modèle au régime permanent et bilan hydrique*

Le calage en régime permanent a été effectué pour les années 1989, à cause de la faible exploitation et les fluctuations de la nappe phréatique pendant cette période sont généralement constantes.

Les mesures moyennes de la nappe phréatique ont été utilisées pour 5 piézomètres d'observation.

L'étude du calage du modèle au régime permanent impliquait l'ajustement de la piézométrie simulée et celle observée mesurée aux points d'observation par adaptation de la distribution spatiale de la conductivité hydraulique. Plusieurs distributions pouvant conduire au même résultat, il est important pour valider les distributions obtenues soit avec des données précises (taux de décharge, test de pompage résultats) ou avec des données variables, telles que des plages de conductivités hydrauliques pour des systèmes géologiques typiques, basée sur l'expérience et les valeurs de la littérature.

Comme discuté dans le modèle hydrogéologique conceptuel, la nappe de Sidi Bouzid est composée d'une seule couche de remplissage Mio-Plio-Quaternaire.

Deux approches ont été adoptées dans le calage du modèle numérique :

- Une approche par essais et erreurs a été réalisée jusqu'à ce que les niveaux piézométriques simulés et mesurés se sont approchés ;
- Une deuxième approche consiste en un algorithme d'optimisation (PEST, intégré au logiciel package Processing Modflow) qui a été appliqué pour optimiser automatiquement la distribution conductivité hydraulique par méthode inverse.

La figure III.28 montre la distribution optimisée de la conductivité hydraulique de la zone d'étude obtenue après le calage du modèle. On rappelle que cette distribution spatiale sera utilisée dans les simulations du modèle numérique en régime transitoire.

Le graphique III.29 présente les valeurs mesurées et simulées de la charge hydraulique avec la carte piézométrique relative. Ce modèle reproduit partiellement la tendance générale des charges hydrauliques observées.

Figure III.29 : Carte piézométrique calibrée au régime permanent de l'année 1989

Le tableau III.10 présente les résultats du bilan hydrique de notre système dans le régime permanent de l'année de référence 1989.

Tableau III.10 : Bilan hydrique de la nappe de Sidi Bouzid dans le régime permanent

		Entrées (m <sup>3</sup> /s)	Sorties (m <sup>3</sup> /s)
	Recharge diffuse	0.161	
	Recharge concentrée	0.466	
	Exploitation		0.722
	Charge hydraulique constante	0.1802	
Conditions aux limites de type « Dirichlet »	Flux vers la nappe de Sidi Bouzid	0.0348	
	Drainage		0.12

### III.4 CONCLUSION

L'objectif de ce chapitre était la présentation des différents résultats de la caractérisation géochimique du système aquifère de la nappe de Sidi Bouzid en premier lieu. En second lieu, on a essayé d'établir un modèle conceptuel régional de notre système afin de passer à la modélisation numérique. Le but de cette dernière est de reproduire un modèle numérique de la même tendance générale que le système réel.

## CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Le travail présenté dans cette thèse fournit une meilleure compréhension de la géologie, hydrogéologie et hydrogéochimie de la nappe de Sidi Bouzid.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer les processus hydrogéochimiques de la nappe de Sidi Bouzid. L'étude intègre des méthodes hydrogéologiques et hydrochimiques qui nous ont permis d'entamer les objectifs déclarés de la thèse. Ces derniers consistent essentiellement d'étudier l'impact des activités anthropogéniques sur la nappe de Sidi Bouzid de point de vue qualité des eaux.

Cette thèse résume les principaux résultats obtenus et discutés de manière que les objectifs présentés dans l'introduction ont été rencontrés. Chaque objectif est répertorié et discuté. Nous proposons enfin des domaines de recherche future.

### **Objectif 1 : Une meilleure compréhension et évaluation de la géologie régionale de la nappe de Sidi Bouzid**

La première étape a consisté en une synthèse et analyse des données géologiques régionales de notre système aquifère. Les données géologiques actuelles ont été simplifiées afin de comprendre conceptuellement la géologie et par conséquent la géométrie de l'aquifères, ainsi que les comportements d'écoulement dans la région de Sidi Bouzid.

### **Objectif 2 : Etudier la distribution des paramètres géochimiques, les écoulements souterrains et les flux d'échange d'eau dans la zone d'étude**

Les paramètres géochimiques ont fourni des informations utiles sur les origines des solutés, les mécanismes de minéralisation et la qualité des eaux souterraines de la nappe de Sidi Bouzid.

Les échantillons des eaux souterraines présentaient une abondance en concentrations en éléments majeurs avec un ordre décroissant  $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$  et  $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$ .

Les processus de dissolution ainsi que les échanges ioniques sont les majeurs processus responsables de la minéralisation des eaux souterraines de la nappe de Sidi Bouzid.

La combinaison des méthodes statistiques multivariées utilisant les analyses ACP et de AHC nous a permis une caractérisation hydrochimique complète de la zone ainsi que la compréhension de l'évolution des eaux souterraines dans la zone d'étude.

### **Objectif 3 : L'étude du modèle hydrogéologique régional conceptuel et numérique de la nappe de Sidi Bouzid**

Cette étude représente un pas significatif dans la compréhension des ressources en eaux souterraines tout en ayant recours à la modélisation régionale des eaux souterraines de la région de Sidi Bouzid. Le modèle de flux numérique bidimensionnel du domaine a été élaboré en utilisant Logiciel Processing Modflow basé sur le modèle conceptuel de la zone d'étude couplé, pour simuler un écoulement d'eau souterraine en 2D dans des conditions stables et transitoires. L'élaboration de ce modèle numérique régional a permis d'affiner les hypothèses sur la conductivité hydraulique de l'aquifère. Ce modèle a quantitativement estimé les différentes composantes de la dynamique des eaux souterraines et leurs interactions.

Cette modélisation numérique représente le premier pas vers la définition des écoulements des eaux souterraines et les stratégies adaptées dans la gestion des ressources en eaux dans la région. Plusieurs scénarios ont été proposés et leurs cartes piézométriques relatives pour la période 2015-2030 sont illustrées afin de prédire le comportement des eaux souterraines de la région de Sidi Bouzid sous plusieurs schémas d'exploitation.

Ce travail a montré que la zone d'étude est en fait une zone de stress hydrique et elle souffre des conditions de surexploitation en particulier dans la partie nordique de la zone d'étude, à partir De Nouiel jusqu'au Sandouk. Pour ceci, la région de Sidi Bouzid nécessite une meilleure stratégie de gestion des eaux.

Le modèle numérique consiste à mieux comprendre les processus des eaux souterraines. Par ailleurs, il en résulte une meilleure compréhension des composantes du bilan hydrique et les effets de l'exploitation sur la variation du stockage des eaux souterraines. Il est considéré comme un efficace outil permettant d'évaluer de meilleures options de gestion pour une utilisation durable des eaux souterraines.



### **Perspectives :**

Ce travail a été élaboré dans le but de mieux comprendre ainsi que quantifier le potentiel hydrogéologique de la région de Sidi Bouzid. Néanmoins, certaines parties de ce travail nécessitent des investigations supplémentaires afin de réduire les incertitudes. Ce travail ouvre également d'autres perspectives qui pourraient constituer une potentielle base de futures recherches.

Les futurs travaux devraient traiter les sujets suivants :

#### - Prospections géophysiques :

La prospection géophysique et sismique de la zone d'étude est importante afin de mieux caractériser la géométrie de notre réservoir de point de vue les profondeurs à atteindre. Ces travaux sont nécessaires dans l'élaboration d'un modèle géologique 3D de la zone d'étude.

#### - Analyse Minéralogique :

Pour une meilleure compréhension des processus géochimique en cours et pour mettre en valeur l'importance de l'interaction eau-roche dans le système aquifère, une analyse de la minéralogie sera utile à l'avenir.

#### - Evaluation de la recharge concentrée :

Oued el Fekka présente le moteur de recharge de la nappe de Sidi Bouzid. Dans ce cadre, plusieurs méthodes peuvent être utilisées dans le futur pour affiner les taux de la recharge concentrée utilisés dans cette étude.

Une nouvelle méthode discutée par Blandenier (2015), basée sur la combinaison de surfaces d'inondation dérivées d'images satellitaires et couplées avec la méthodologie de modélisation numérique des écoulements de surface et/ ou souterrains peut être utilisée à l'avenir pour estimer la recharge concentrée dans la région de Sidi Bouzid.