

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF – M'SILA

FACULTE : TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT : HYDRAULIQUE

N° : .....



DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES  
FILIERE : HYDRAULIQUE  
OPTION : RESSOURCES HYDRAULIQUES

**Mémoire présenté pour l'obtention  
du diplôme de Master Académique**

Par : **HEDJOULI Hamza**

**THEME**

**ETUDE DE L'INFLUENCE SALINE DE CHOTT EL-HODNA  
SUR LES EAUX SOUTERRAINES DE LA ZONE NORD-EST  
DE BOUSSAADA –W. DE M'SILA**

**Soutenu devant le jury composé de :**

Mr. Sahli Youcef	Université de M'sila	Président
Mr. Ghodbane Messaoud	Université de M'sila	Rapporteur
Mr. Nebbar Med Lakhdar	Université de M'sila	Examineur

**Année universitaire : 2022 / 2023**

# *Remerciements*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et ma sincère reconnaissance envers mon professeur superviseur, Monsieur **Ghodbane Messaoud**, qui m'a guidé et conseillé, et m'a prodigué des conseils précieux qui m'ont aidé à développer ma compréhension et mes compétences dans ce domaine. Je souhaite également remercier ma famille et mes amis pour leur soutien continu et leur motivation tout au long de ce parcours scientifique. Je tiens à adresser mes remerciements particuliers à toutes les personnes que je n'ai pas mentionnées explicitement et qui m'ont apporté leur soutien et leurs conseils. Il est difficile de décrire à quel point je suis reconnaissant envers tous ceux qui ont contribué à ce travail.*

# *Dédicace*

*À ma famille, mes amis, mes professeurs et mes camarades, je dédie ce mémoire de fin d'études avec fierté et gratitude. Je remercie tous ceux qui m'ont soutenu et encouragé durant mon parcours universitaire. J'ai surmonté les obstacles et relevé les défis, et je suis fier(ère) de ce que j'ai accompli. J'espère que ce mémoire contribuera dans le domaine que j'ai choisi et inspirera les autres. Merci à tous pour votre soutien et votre confiance.*

## ملخص

عرفت منطقة بوسعادة بولاية المسيلة خلال السنوات الأخيرة نقص حاد في الأمطار وجفاف كبير، مما أدى إلى ارتفاع الطلب على استغلال المياه الجوفية لإنتاج المحاصيل الزراعية. وبالمقابل تتأثر هذه المياه بملوحة الأراضي المجاورة للبحيرة المالحة (شط الحضنة). لهذا الغرض، أجرينا دراسة في منطقة شمال شرق بوسعادة بولاية مسيلة لتحديد العمليات الهيدروجيوكيميائية التي تتحكم في جودة المياه والتأثير الملحي الناتج عن شط الحضنة، استنادًا إلى نتائج التحاليل المائية للمياه المأخوذة من 19 بئرًا تستخدم لاستخراج مياه الحوض المائي المختلط خلال شهر مارس 2021. كشفت النتائج عن كشف النتائج أن المياه تتميز بثلاث سمات كيميائية: -كلوريدات الكالسيوم والمغنيسيوم، -كبريتات الصوديوم، -بيكربونات الصوديوم.

كما تبين النتائج أن معظم هذه المياه ثقيلة وصلبة، مما يجعلها غير مناسبة للاستهلاك والشرب. ويوضح تصنيف المياه المخصصة للسقي أن غالبية نقاط المياه في المنطقة الشمالية الشرقية لبوسعادة بنسبة 52.63% ذات مستوى متوسط إلى رديء، وهذا يتعلق بنقاط المياه الواقعة في الشمال الشرقي من شط الحضنة وتلك الواقعة في الجنوب الشرقي والتي تتميز بناقلية كهربائية عالية جدا ومتأثرة بشدة ملوحة شط الحضنة. واستغلالها للسقي يجب أن يخضع لشروط وطرق معينة للتقليل من ملوحتها وخطرها على المزروعات ويمكن أن يؤدي الري بهذه المياه إلى انخفاض غلة بعض المحاصيل المزروعة. كما سجلنا حوالي 47.37% من مجموع نقاط المياه المدروسة ذات نوعية جيدة إلى مقبولة وتتعلق بتلك المتواجدة في الجزء الممتد من الوسط إلى شمال شرق منطقة الدراسة، والواقعة في اتجاه تدفق المياه. مما يكسبها إمدادًا إضافيًا بالعناصر المعدنية.

# Résumé

La sécheresse et la pénurie des pluies connues ces dernières années au niveau de la région de Boussaâda (W. de M'Sila), rendent l'irrigation par les eaux souterraines de plus en plus sollicitées par la plupart des cultures. Ces eaux sont influencées par la salinité des terrains voisinant le lac salé (Chott El-Hodna). A cet effet une étude est menée sur la Zone Nord-est de Boussaâda (W. de M'Sila) pour identifier les processus hydrogéochimiques contrôlant la qualité des eaux et l'influence saline provenant du Chott, basée sur les résultats des analyses hydrochimiques des eaux prélevés de 19 forages captant les eaux de l'aquifère mixte durant la période de Mars 2021. Les résultats révèlent que les eaux sont caractérisées par trois Faciès chimiques le premier chloruré calcique et magnésien, le deuxième sulfaté sodique et le dernier bicarbonaté sodique. Ainsi montrent que la majorité des eaux sont dures à très dure (D.H.T supérieur à 54 °F), impropre à la consommation.

La classification des eaux pour l'irrigation montre que la majorité des points d'eau de la zone Nord-est de Boussaada avec 52,63% sont de classes médiocre à mauvais, cela concerne les points d'eau situés au Nord-est du Chott et ceux localisés à la partie Sud-est caractérisés d'une conductivité très élevée et fortement influencée par la salinité du lac salé (Chott El Hodna). Ces eaux représentent des restrictions vis-à-vis à la salinité et l'irrigation avec ces eaux peut entraîner des chutes de rendements de certaines cultures pratiquées. En revanche, environ 47,37% des points d'eau sont de classe bonne à admissible et concerne la partie du centrale jusqu'au Nord-est de la zone d'étude, qui se trouve dans le sens de l'écoulement fournissant un apport supplémentaire des éléments minéraux.

## **Abstract**

Drought and rainfall shortage experienced in recent years in the Boussaâda region (M'sila Province) have led to an increased reliance on groundwater irrigation for most crops. These waters are influenced by the salinity of the areas surrounding the salt lake (Chott El-Hodna). In this regard, a study is being conducted in the northeast zone of Boussaâda (M'sila Province) to identify the hydrogeochemical processes controlling water quality and the saline influence from Chott El-Hodna. The study is based on the results of hydrochemical analyses of water samples collected from 19 wells tapping into the mixed aquifer during the period of March 2021.

The results reveal that the waters are characterized by three chemical Facies: the first calcium and magnesium chloride, the second sodium sulphate and the last sodium bicarbonate. This shows that the majority of waters are hard to very hard (D.H.T greater than 54°F), unsuitable for consumption. The classification of water for irrigation shows that the majority of water points in the North-East zone of Boussaada with 52.63% are of mediocre to bad class, this concerns water points located in the North-East of the Chott and those located in the southeastern part characterized by a very high conductivity and strongly influenced by the salinity of the salt lake (Chott El Hodna). These waters represent restrictions with respect to salinity and irrigation with these waters can lead to drops in the yields of certain crops grown. On the other hand, approximately 47.37% of the water points are of good to acceptable class and concern the part of the power station up to the North-East of the study area, which is in the direction of the flow providing an additional contribution of mineral elements.

# Table des matières

<u>Remerciements</u> .....	1
<u>ملخص</u> .....	4
<u>Résumé</u> .....	5
<u>Abstract</u> .....	6
<u>Liste des figures</u> .....	10
<u>Liste des tableaux</u> .....	12
<u>Liste des Abréviations</u> .....	13

## Introduction générale

<u>Introduction générale</u> .....	1
------------------------------------	---

## Chapitre I : Présentation géographique et conditions naturelles

<u>I.1. Introduction</u> .....	2
<u>I.2. Aperçu géographique</u> .....	2
<u>I.2.1. Localisation géographique</u> .....	2
<u>I.2.2. Habitats et activités</u> .....	3
<u>I.2.3. Végétation</u> .....	4
<u>I.2.4. Types de Sol de la région d'étude</u> .....	5
<u>I.2.5. Relief</u> .....	6
<u>I.2.6. Ressources en eau</u> .....	7
<u>I.3. Hydrologie de la région</u> .....	8
<u>I.3.1. Réseau hydrographique de la zone d'étude</u> .....	8
<u>I.3.2. Climat</u> .....	9
<u>I.3.3. Les précipitations</u> .....	9
<u>I.3.4. Température</u> .....	10
<u>I.3.5. Evapotranspiration potentielle (ETP)</u> .....	11
<u>I.3.6. Les vents dominants</u> .....	12
<u>I.4. Caractéristiques morphométriques et physiques du Sous B.V de Boussaâda</u> .....	13
<u>I.4.1. Délimitation de la zone étudiée Dans le Sous B.V de Boussaâda</u> .....	13
<u>I.4.2. Surface</u> .....	14
<u>I.4.3. Périmètre</u> .....	14
<u>I.4.4. Indice de compacité de Gravelius</u> .....	15
<u>I.4.5. Courbe hypsométrique</u> .....	15
<u>I.4.6. Rectangle équivalent</u> .....	19
<u>I.4.7. Les indices de pente</u> .....	19
<u>I.4.8. Pente moyenne</u> .....	20
<u>I.4.9. Longueur du cours d'eau principal</u> .....	21
<u>I.5. Les caractéristiques du réseau hydrographique</u> .....	21
<u>I.5.1. Densité de drainage</u> .....	21
<u>I.5.2. Dénivelée spécifique (DS)</u> .....	22
<u>I.5.3. Temps de concentration (Tc)</u> .....	23
<u>I.5.4. Vitesse d'écoulement de l'eau (Vc)</u> .....	23
<u>I.5.5. Réseau hydrographique</u> .....	23
<u>I.5.6. Récapitulatif des caractéristiques principales du sous B.V de la zone d'étude</u> .....	24

<u>I.6. Conclusion.....</u>	<b>24</b>
-----------------------------	-----------

## Chapitre II : Aperçu géologique et hydrogéologique

<u>II.1 . Aperçu géologique.....</u>	<b>27</b>
<u>II.1.1. Cadre géologique générale.....</u>	27
<u>II.1.2. Géologie de la région d'étude.....</u>	29
<u>II.1.3. Géomorphologie du bassin .....</u>	30
<u>I.1.4. Stratigraphie .....</u>	31
<u>I.1.4.1. Le Secondaire.....</u>	31
<u>I.1.4.2. Tertiaire .....</u>	32
<u>I.4.4.3. Quaternaire.....</u>	33
<u>I.5.1. Identification des formations aquifères .....</u>	33
<u>II.2. Aperçu hydrogéologique.....</u>	<b>33</b>
<u>II.2.1. Les cartes structurales .....</u>	34
<u>II.2.2. Etude de la piézométrie.....</u>	34
<u>II.2.2.1 Inventaire des points d'eau .....</u>	34
<u>II.2.2.2. Interprétation des cartes piézométriques.....</u>	36
<u>II.3. Conclusion .....</u>	<b>37</b>

## Chapitre III : Etude hydrochimique et évaluation de la salinité des eaux souterraines de la zone Nord-est de Boussaâda

<u>III.1. Introduction.....</u>	<b>40</b>
<u>III.2. Fiabilité des résultats des échantillons mesurés au laboratoire.....</u>	<b>41</b>
<u>III.3. Analyses statistiques des données de qualité .....</u>	<b>41</b>
<u>III.3.1 Le Potentiel d'hydrogène (pH).....</u>	42
<u>III.3.2 La conductivité électrique (CE).....</u>	44
<u>III.3.3. La température .....</u>	45
<u>III.3.4. Le Calcium (Ca++).....</u>	45
<u>III.3.5. Le magnésium Mg++ .....</u>	46
<u>III.3.6. Les chlorures Cl- .....</u>	48
<u>III.3.7. Les Bicarbonates HCO3-.....</u>	49
<u>III.3.8. Les sulfates SO42-.....</u>	50
<u>III.3.9. Le sodium Na+ .....</u>	52
<u>III.3.10. Le potassium K+.....</u>	53
<u>III.3.11. Les nitrate NO3-.....</u>	55
<u>III.4. Détermination et répartition des faciès chimiques des eaux souterraines .....</u>	<b>56</b>
<u>III.4.1. Le diagramme de Piper.....</u>	56
<u>III.4.2. Le diagramme de Schoeller - Berkloff .....</u>	57
<u>III.5. Analyses de la qualité des eaux par les méthodes statistiques multivariées .....</u>	<b>58</b>
<u>III.5.1. Analyse en composantes principales (ACP).....</u>	58
<u>III.5.1.1.Application de l'ACP sur des données chimiques de la zone d'étude .....</u>	59
<u>III.5.2. Analyse par la méthode de classification ascendante hiérarchique (CAH).....</u>	64
<u>III.5.2.1.Application de CAH sur les données de la zone d'étude .....</u>	65
<u>III.6. Indice d'échange de base (i.e.b).....</u>	<b>66</b>
<u>III.7. Appréciation de la qualité des eaux pour la potabilité .....</u>	<b>67</b>
<u>III.7.1. Classification selon les normes l'O.M.S .....</u>	67

<u>III.7.2. Classification selon degré hydrotimétrique total (D.H.T)</u> .....	68
<u>III.8. L'influence saline et aptitude des eaux souterraines à l'irrigation</u> .....	<b>69</b>
<u>III.8.1. La classification de la salinité en fonction de la CE (<math>\mu\text{S}/\text{cm}</math>)</u> .....	69
<u>III.8.1.1. Les eaux peu salées</u> .....	70
<u>III.8.1.2. Les eaux à forte teneur en sodium (La sodicité)</u> .....	70
<u>III.8.2. Classification de Richard</u> .....	71
<u>III.8.3. Classification de Wilcox</u> .....	71
<u>III.8.4. Classification de certaines cultures maraichères par tolérance à la salinité</u> .....	73
<u>III.9. Conclusion</u> .....	<b>74</b>

#### Conclusion générale et recommandations

<u>Conclusion générale</u> .....	<b>79</b>
<u>Recommandations</u> .....	<b>81</b>

#### Références bibliographiques

<u>Références bibliographiques</u> .....	<b>83</b>
--	-----------

## Liste des figures

<u>Figure.I.1: Présentation géographique de la zone d'étude</u> .....	3
<u>Figure.I.2: Photos de plusieurs terres traitées par les Déchets animaux.</u> .....	4
<u>Figure.I.3: Carte pédologique du Hodna (Boyadgfv 1975).</u> .....	6
<u>Figure.I.4: Carte 3D indiquant les principaux reliefs de la région d'étude.</u> .....	7
<u>Figure.I.5: Précipitation moyenne mensuelle de la région de Boussaâda, période (2009-2018).</u> .....	10
<u>Figure.I.6: Température moyenne mensuelle de la région de Boussaâda, période (2009-2018).</u> .....	11
<u>Figure.I.7: Evapotranspiration de la région de Boussaâda, période (2009-2018).</u> .....	12
<u>Figure.I.8: Vitesse du vent moyenne mensuelle dans la station de Boussaâda, période (2009-2018).</u> .....	13
<u>Figure.I.9: Zone d'étude par satellite</u> .....	13
<u>Figure.I.10: Carte du sous bassin versant étudié.</u> .....	14
<u>Figure.I.11: Carte des tranches d'altitudes du sous bassin versant</u> .....	17
<u>Figure.I.12: Courbe hypsométrique</u> .....	18
<u>Figure.II.1: Localisation de Boussaâda dans l'ensemble géomorphologique du Nord de l'Algérie.</u> .....	27
<u>Figure.II.2: Carte géologique du bassin El Hodna (Grine 2009).</u> .....	28
<u>Figure.II.3: Coupe géologique de la région de Boussaâda.</u> .....	29
<u>Figure.II.4: Carte géologique de la région d'étude</u> .....	30
<u>Figure.II.5: Carte de positions des forages étudiés (Mars2021).</u> .....	36
<u>Figure.II.6: La Carte piézométrique du sous B.V de la zone étudié (Mars2021)</u> .....	37
<u>Figure.III.1: Localisation géographique des forages étudiés-Campagne Mars 2021.</u> .....	41
<u>Figure.III.2: Répartition de pH des eaux souterraines - Période de Mars 2021</u> .....	43
<u>Figure.III.3: Variation spatiale des valeurs de pH- Mars 2021</u> .....	43
<u>Figure.III.4 : Répartition de CE des eaux souterraines -Mars 2021</u> .....	44
<u>Figure.III.5: Variation spatiale des teneurs de CE -Mars 2021</u> .....	44
<u>Figure.III.6: Répartition de la température des eaux souterraines -Mars 2021</u> .....	45
<u>Figure.III.7: Répartition des valeurs des teneurs de calcium (Ca<sup>2+</sup>) -Mars 2021</u> .....	46
<u>Figure.III.8: Variation spatiale des teneurs de calcium (Ca<sup>2+</sup>) - Mars 2021</u> .....	46

<u>Figure.III.9: Répartition des valeurs des teneurs de magnésium (<math>Mg^{2+}</math>) -Mars 2021</u> .....	47
<u>Figure.III.10: Variation spatiale des teneurs de magnésium (<math>Mg^{2+}</math>) -Mars 2021</u> .....	47
<u>Figure.III.11: Répartition des valeurs des teneurs des chlorures (<math>Cl^{-}</math>) -Mars 2021</u> .....	48
<u>Figure.III.12: Variation spatiale des teneurs des chlorures (<math>Cl^{-}</math>) -Mars 2021</u> .....	49
<u>Figure.III.13: Répartition des valeurs des teneurs des bicarbonates (<math>HCO_3^{-}</math>) -Mars 2021</u> .....	50
<u>Figure.III.14: Variation spatiale des teneurs des bicarbonates (<math>HCO_3^{-}</math>) -Mars 2021</u> .....	50
<u>Figure.III.15: Répartition des valeurs des teneurs des sulfates (<math>SO_4^{2-}</math>) -Mars 2021</u> .....	51
<u>Figure.III.16: Variation spatiale des teneurs des sulfates (<math>SO_4^{2-}</math>) -Mars 2021</u> .....	52
<u>Figure.III.17: Répartition des valeurs des teneurs de sodium (<math>Na^{+}</math>) -Mars 2021</u> .....	53
<u>Figure.III.18: Variation spatiale des teneurs de sodium (<math>Na^{+}</math>) -Mars 2021</u> .....	53
<u>Figure.III.19: Répartition des valeurs des teneurs de potassium (<math>K^{+}</math>) -Mars 2021</u> .....	54
<u>Figure.III.20: Variation spatiale teneurs de potassium (<math>K^{+}</math>) -Mars 2021</u> .....	54
<u>Figure.III.21: Répartition des valeurs des teneurs en Nitrate <math>NO_3^{-}</math> -Mars 2021</u> .....	55
<u>Figure.III.22: Variation spatiale teneurs des teneurs en Nitrate <math>NO_3^{-}</math> -Mars 2021</u> .....	56
<u>Figure.III.23: Diagramme de piper</u> .....	57
<u>Figure.III.24: Diagramme de Schoeller – Berkaloff</u> .....	58
<u>Figure.III.25: Projection des variables sur le plan factoriel – F1-F2-</u> .....	63
<u>Figure.III.26: Représentation graphique des Observations (Forages)</u> .....	64
<u>Figure.III.27: Dendrogramme de faisceaux des variables (R-mode)</u> .....	65
<u>Figure.III.28: Dendrogramme de faisceaux des observations (Q-mode)</u> .....	65
<u>Figure.III.29: Diagramme de Riverside</u> .....	73
<u>Figure.III.30: Diagramme de Wilcox</u> .....	73

## Liste des tableaux

<u>Tableau.I.1: Précipitation moyenne mensuelle de la région de Boussaâda, période 2009-2018...</u>	9
<u>Tableau.I.2: Température moyenne mensuelle de la région de Boussaâda, période 2009-2018...</u>	10
<u>Tableau.I.3: Evapotranspiration dans la région de Boussaâda, période (2009-2018).....</u>	11
<u>Tableau.I.4: Vitesses moyennes mensuelles de la région de Boussaâda, période (2009-2018)....</u>	13
<u>Tableau.I.5: Calcul des surfaces partielles et cumulées .....</u>	16
<u>Tableau I.6: classification des Reliefs.....</u>	23
<u>Tableau I.7: Principales caractéristiques morphométriques du sous B.V de la zone d'étude.....</u>	24
<u>Tableau II.1: Inventaire et caractéristiques piézométriques des points d'eau.....</u>	35
<u>Tableau III.1: Données statistiques des paramètres physico-chimiques, campagne Mars 2021 ..</u>	42
<u>Tableau III.2: Faciès chimiques des eaux selon la méthode de Schoeller – Berkaloff .....</u>	58
<u>Tableau III.3: Coefficient de corrélation linéaire selon Bravais- Pearson .....</u>	60
<u>Tableau III.4: Matrice de corrélation des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines de la zone Nord-est de Bousaada- campagne Mars 2021- .....</u>	60
<u>Tableau III.5: Ensembles des couples dépendants et indépendants .....</u>	61
<u>Tableau III.6 Corrélations entre les variables et les facteurs.....</u>	62
<u>Tableau III.7: Pourcentage de variance .....</u>	62
<u>Tableau III.8: Indices d'échanges de base de Mars 2021.....</u>	67
<u>Tableau III.9 : Normes de potabilité de l'O.M.S.....</u>	68
<u>Tableau III.10: Dureté des eaux en °F (W. Theobald et A. Gama, 1969).....</u>	69
<u>Tableau III.11: Directives pour l'interprétation la salinité d'une eau d'irrigation .....</u>	70
<u>Tableau III.12 : Résultats obtenus après l'interprétation de diagramme de Richards.....</u>	71
<u>Tableau III.13: Résultats obtenus après interprétation de diagramme de Wilcox.....</u>	72
<u>Tableau III.14: Classification de certaines cultures maraîchères en fonction de leur tolérance à la salinité.....</u>	73

## Liste des Abréviations

**OMS** : Organisation mondiale de la santé

**ADE** : Algérienne des eaux

**T** : Température

**pH** : potentiel hydrogène

**CE** : conductivité électrique

**Ca<sup>2+</sup>** : calcium

**Mg<sup>2+</sup>** : Magnésium

**HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>** : Bicarbonate

**Cl<sup>-</sup>** : Chlorures

**SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>**: Sulfate

**TH**: dureté totale

**NO<sub>3</sub><sup>-</sup>**: Nitrate

**Na<sup>+</sup>**: Sodium

**K<sup>+</sup>**: Potassium

**TDS** : Solides totaux dissous

**FAO** : Organisation d'alimentation et l'agriculture

**ANRH** : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques

**ACP** : Analyse en composante principale

**CAH** : classification ascendante hiérarchique

**SAR** : pourcentage d'absorption du Sodium

*Introduction*  
*générale*

## **Introduction générale.**

Les eaux souterraines sont la principale source d'approvisionnement en eau pour la plupart des régions du monde, surtout là où les précipitations sont faibles comme en Algérie. Ces sont sujets à diverses pollutions d'activités humaines et naturelles.

Dans ce contexte une approche a été menée en Mars 2021 dans la région Nord-est de Boussaâda (W. de M'Sila), caractérisée par un climat semi-aride. La sécheresse et la pénurie des pluies connues ces dernières années au niveau de cette région rendent l'irrigation par les eaux souterraines de plus en plus sollicitées par la plupart des cultures. Ces eaux sont influencées par la salinité des terrains voisinant le lac salé (Chott El-Hodna). Pour cet effet, on a proposé la présente approche hydrochimique pour identifier les processus hydrogéochimiques contrôlant la qualité des eaux et l'influence saline provenant du Chott. Ce qui nous a amené à aborder cette approche hydrochimique pour identifier les processus hydrogéochimiques contrôlant la qualité des eaux et l'influence saline provenant du Chott, Les études suivies dans ce sujet sont les suivantes :

- L'étude morphométrique du sous bassin versant de Boussaâda qui a pour but de définir les conditions d'écoulement.
- Aperçu géologique qui définit les formations aquifères et hydrogéologique pour déterminer le comportement et l'écoulement souterrain.
- L'étude hydrochimique qui a pour but de définir la composition et le faciès chimiques des eaux souterraines.
- Appréciation de la qualité des eaux souterraines pour l'alimentation en eau potable et l'irrigation.
- L'évaluation du risque et de l'influence saline de chott El-Hodna sur les eaux souterraines de la zone Nord-est de Boussaâda.

Cette approche a été réalisée par les méthodes statistiques et cartographiques à l'aide des logiciels suivants : ArcGis, Surfer 10, Diagrammes de Piper, Schoeler, Wilcox, Richards et XLstat 23.

Finalement on a achevé notre travail par une conclusion synthétique des résultats obtenus et des recommandations et moyens pour protéger les eaux souterraines du risque salin.

***Chapitre I :***  
***Présentation géographique***  
***et conditions naturelles***  
***de la zone d'étude***

## **Chapitre I : Présentation géographique et conditions naturelles de la zone d'étude**

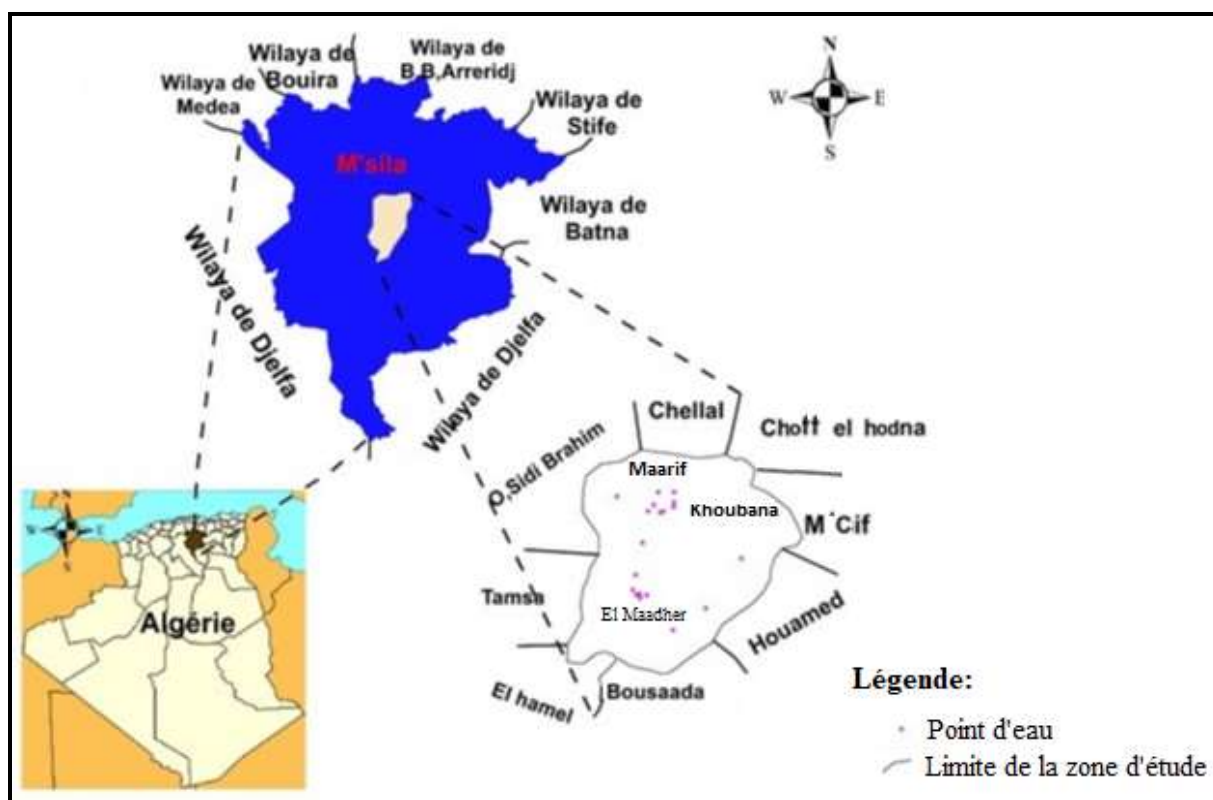
### **I.1. Introduction**

La zone d'étude appartient au bassin versant du Hodna, de nature steppique, située à 130 km de la mer Méditerranée, dans une région caractérisée par un climat aride à semi-aride très sévère et entourée de montagnes de tous les côtés. La sebkha, située au milieu, entièrement dépourvue de végétation et saturée de sel, a un niveau d'eau fluctuant tout au long de l'année. Dans certaines régions, il monte en hiver et baisse en été. Cette zone a connue depuis plus de deux décennies une forte évapotranspiration, et une salinisation des sols éminente aggravée par la sécheresse et par le pompage intense des eaux souterraines dont l'absence d'autres sources d'irrigation.

### **I.2. Aperçu géographique**

#### **I.2.1. Localisation géographique**

Le site d'étude est situé 8 kilomètres au nord-est de commune de Boussaâda sur la route nationale N°4 aux coordonnées géographiques 35°18 Nord et 04°16 Est et voisine Chott El Hodna du nord-ouest au sud, composé de la plaine d'El-Maadher, et des communes de Chellal, Maarif, Khoubana et M'Cif (Figure III 1). C'est une zone agricole à faible densité de population, limitée à l'est par les commune de M'Cif, au sud par les communes d'El-Hamel, Boussaâda et El-Houamed, à l'ouest par les communes d'Ouled Sidi Brahim et Tamsa, tandis que la commune de Chellal et Chott El Hodna la bordent respectivement au nord et au nord-est. C'est une zone plate et s'élevant au-dessus du niveau de la mer à environ 400 m. Elle est constituée de dunes de sable, de dépôts alluviaux récents et de collines rocheuses isolées (Djebel Meharga, Djebel Kerdada ...). Cette région est constamment vulnérable à l'érosion éolienne en raison de la texture sableuse rendue possible par l'absence de couvert végétal naturel.



*Figure I 1. Présentation géographique de la zone d'étude*

### I.2.2. Habitats et activités

La majorité de la population réside dans les chefs-lieux des communes. Seulement 4 % de la population (159555 habitants -RGPH ; 2008) réside dans les zones rurales. La plupart des agriculteurs sont concentrés au village Agricole El-Maadher., L'agriculture est l'activité capitale dans la région et la source de la vie quotidienne des habitants.

La région bénéficie d'une vaste plaine irriguée située au nord-est de la ville de Boussaâda. Il y a, selon la direction des services agricoles (DSA), environ 42000 ares de terres arables, dont 50 % sont irriguées (Lasad 2022). El-Maadher est la zone avec la plus grande activité agricole, selon la division des services agricoles de Boussaâda. Les terres de cette ville sont estimées bonnes pour l'agriculture sur plus de 2595 hectares, dont 2 299 sont irrigués, soit 88.59 % de la superficie totale cultivée (Annuaire statistique 2015). Cette plaine est devenue une zone agricole majeure irriguée par pompage des eaux souterraines depuis les années 1970. Ces cultures peuvent être cultivées sur ses sols argilosableux bruns et brun rougeâtre. Les engrais synthétiques et les déchets animaux sont fréquemment utilisés (une fois tous les 2 ans) pour avoir des récoltes de quantités et qualité supérieure. Ce qui rend la région célèbre pour la culture la culture de légumes tels que les carottes,

les betteraves, les oignons et l'ail ainsi que les salades, les céréales, l'arboriculture et le fourrage, (Figure III 2). Par ailleurs, la région dispose d'une importante richesse animale estimée à 28 420 têtes, qui soutient l'économie de la ville (Annuaire statistique 2015).



*Figure I 2. Photos de plusieurs terres traitées par les Déchets animaux.*

### **I.2.3. Végétation**

La zone de sud de Chott El Hodna formés d'une série de massifs isolés est caractérisée par une faible végétation, d'une diversité des plantes liée à deux facteurs principaux, le facteur climatique (de semi-aride à aride) et le facteur d'ordre édaphique (sol salin et sableux) (Kaabeche 1995). Se compose par des taches forestières sur les massifs montagneux (pin d'Alep, chênes verts et de genévrier de Phoenicie) (Kaabeche 1990 ; Bord 1981), et la zone de Sebkhha caractérisée par une absence totale de végétation (Ladgham et Zerguine 2001). La zone de Chott El Hodna abrite la majorité des espèces typiquement présentes dans les plaines algériennes, dont *Tenacissuma* (Halfa) et *Artémisia helba-Alba* (Armoise). Les trois principales espèces d'arbustes que l'on peut trouver

dans l'Atriplex Halimus (Atripex) sont les palmiers, le Ziziphitztus (Jujube) et le Tamarix Gallica (tamaris) (Bord 1981). Dans la région de R'mel, il existe des plantes psammophiles dont Alfa (Stipa tenacissima), Armoise Ousara (Salsola vermiculata), Arta (Calligonum comosum) et Rtem (Retema Raetam), entre autres (Mimoune 1995 ; Amel 2021).

#### **I.2.4. Types de Sol de la région d'étude**

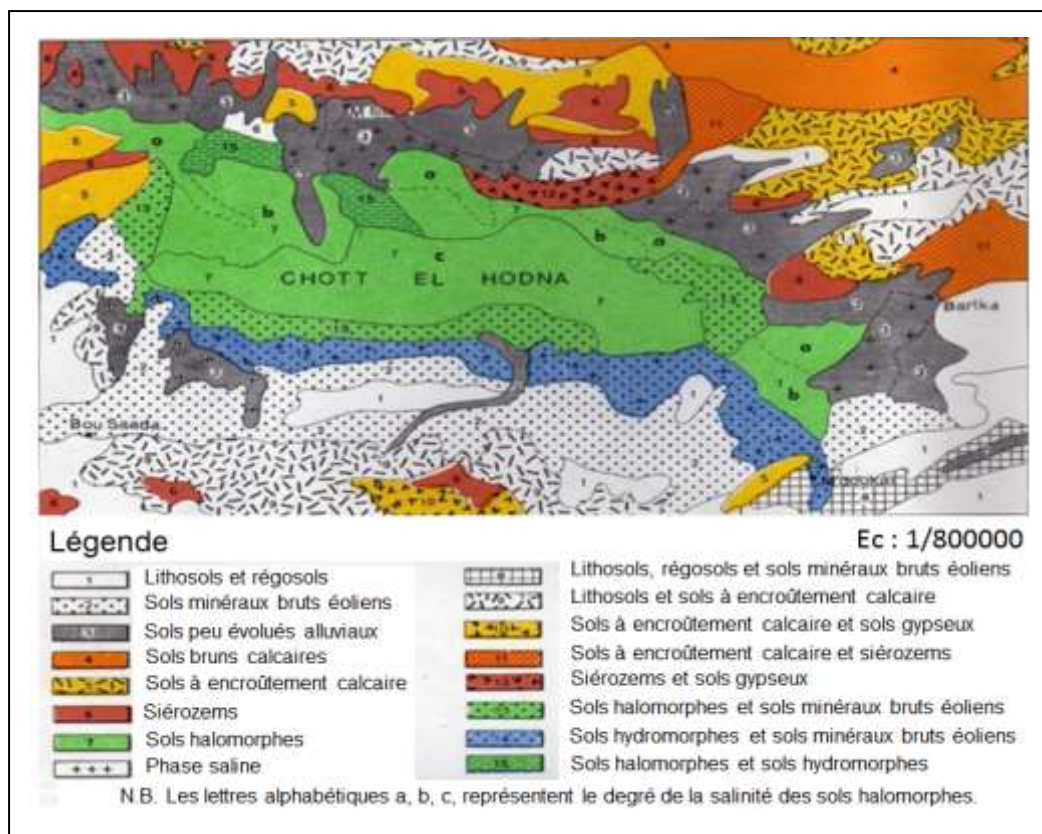
La composition d'un sol correspond toujours aux caractéristiques des roches sous-jacentes (Benchetrit 1956). La prédominance des lithoréliques calcitiques dans les sols recalcarifiés du Hodna nous fait également considérer le mouvement du calcaire sous forme de particules solides (grains de calcite, fragments de roche), ce qui se traduirait par la production d'un type de « calcaire colluvial » par les eaux de ruissellement (Belouam 1976).

Les marnes et les argiles, les grès et les puddingstones constituent la majorité des dépôts de tranchées hodnéennes. La profondeur relative du bassin affecte les types de surfaces. Un climat presque toujours aride est indiqué par le fait que de nombreuses argiles contiennent du sel et du gypse (Despois 1953). L'existence d'une couche minérale en forme de représentation de la zone centrale par une sebkha la distingue.

Les deux principaux types de sols dans les monts Hodna sont les lithosols et les rendzines, qui sont composés de roches calcaires dures (telles que le calcaire, les dolomites et le grès). Les sols, régosols et substrats meubles sont constitués de calcaire brun (marne et marno-calcaire). Une source de calcaire produite par les eaux de pluie se développe en amont sur des collines très escarpées (Kaabeche 1990 ; Belouam 1976).

Le sol sablonneux est une dune qui modifie constamment la forme de sa surface. Il est principalement composé de sables grossiers, mais il contient également un peu d'argile et de sable fin. Terrain sablonneux, le gypse, le carbonate de calcite, le quartz et le sel sont les quatre principaux composants du sol. La région est presque entièrement couverte de R'mel (sud de Chott El Hodna) (Abdesselam et al. 2012 ; Despois 1953). Les sols calciques sont toujours riches en calcaire, sont saturés en ion  $\text{Ca}^{2+}$ , ont un pH compris entre 7,0 et 8,0 et ont une capacité limitée à retenir l'eau en raison de leur manque relatif de colloïdes (1956, Benchetrit).

La carte montre les principaux types de sols que l'on peut trouver dans la zone irriguée. En raison de ces caractéristiques, le sol a une faible fertilité et une faible capacité d'échange cationique (CEC), ce qui rend les apports d'engrais et les modifications organiques nécessaires pour produire le rendement souhaité (Figure III 3).



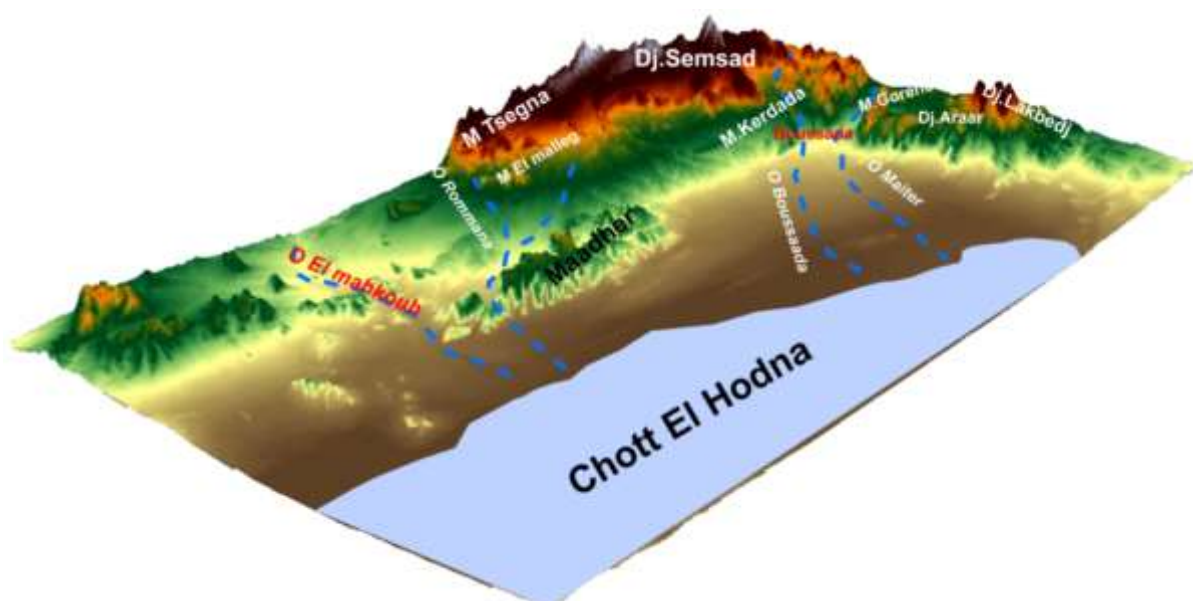
*Figure I 3. Carte pédologique du Hodna (Boyadgifu 1975).*

### I.2.5. Relief

Le relief de la région d'étude est caractérisé par la présence de chaîne de montagnes d'orientation variée surtout dans la partie sud et sud-ouest (Bord 1981).

- Djebel Gorehor côté Nord-ouest.
- Djebel Moubkhira côté Sud-ouest (772 m).
- Mont Kerdada côté sud (947 m).
- Djebel Menkeb (718 m) côté Sud-est de la zone d'étude.
- La plaine du village agricole au (El Maadher) de la zone d'étude.
- Les plaines de Chellal au nord et Maarif, Khoubana, M'Cif au centre de la zone d'étude.
- Le lac salé (Chott El-Hodna) au nord-est de la zone d'étude.
- Les vallées importantes qui traversent la zone d'étude :

- Oued Boussaâda : Cette vallée traverse la ville de Boussaâda au pied du Djebel Kerdada et se jette dans la plaine du Nord.
- Oued Maiter : localisée à l'ouest de village de Boussaâda, formant un couloir venteux animé par les vents Ouest et Nord, engendrant des champs de dunes. Il existe également des vallées de soutien comme Oued Roumana et El Mahkoub.



*Figure III 4. Carte 3D indiquant les principaux reliefs de la région d'étude*

### **I.2.6. Ressources en eau**

Les ressources en eau les plus importantes et les mieux connues représentées par deux sortes de nappes, la nappe en charge (captive) et la nappe phréatique, les deux nappes sont exploitées pour l'irrigation, pour les besoins des groupements de mise en valeur agricole et l'usage urbain et industriel.

### **I.3. Hydrologie de la région**

Le régime hydrologique du bassin Hodna est lié au régime pluviométrique de fortes irrégularités (Ramsar 2001). Le Chott reçoit de l'eau grâce à au moins 22 grands cours d'eau (Oueds) qui contribue au maintien des équilibres hydriques. La majorité des Oueds manquent de débits pérennes, laissant le Chott asséché en été.

### **I.3.1. Réseau hydrographique de la zone d'étude**

Parmi les principales caractéristiques du bassin versant est le réseau hydrographique (Guerra 1998). La majorité des quantités annuelles s'écoulent d'abord pendant les crues, puis pendant le reste de l'hiver. Cependant, les mois restants de l'année sont secs.

Pour une année moyennement pluvieuse, la quantité d'eau s'écoulant vers le Chott est estimée à 150 hm<sup>3</sup> par an (Ladgham et Zerguine 2001).

Deux oueds principaux composent le réseau hydrographique de la zone d'étude. L'oued Maiter, présente une forte pente sud-ouest qui plonge vers le nord-est pour atteindre l'embouchure (Sebkha). L'Oued Boussaâda ne coule que périodiquement. Avant les années quatre-vingt, il a reçu son eau de sources gréseuses de l'Albien situées à sept kilomètres en amont de Boussaâda (Figure III 5) (Kebiche 1994). Au Sud de la zone d'étude, elle contient aussi des cours d'eaux secondaires, Oued Roumana et Oued El Mahkoub. Ces Oueds sont caractérisés par des écoulements momentanés particulièrement après les grandes averses.

Souvent tous ces oueds charrient d'importantes quantités de particules solides en raison de la longue période de sécheresse et de l'absence de couvert végétal (Belagoune 2012).

Les sources de Chellal à l'ouest se situent sur la bordure Sud du Synclinal de M'Sila, leur débit est inférieur à 10 l/s. La plupart d'entre-elles provient de l'aquifère Albo-Aptien, Les autres sources, possiblement d'origine Cénomaniennne, leurs eaux caractérisées de facies chimique Chlorure sodique. Ces sources, vraisemblablement des exécutoires de la nappe captive (Ramsar 2001).

### **I.3.2. Climat**

Le climat de la région Hodna appartient au climat de type méditerranéen (Despois 1953). Fait partie des niveaux bioclimatiques semi-arides à arides. Subit dans sa partie méridionale l'influence saharienne (Ladgham et Zerguine 2001). Ce climat a un impact sur le sol, la végétation et même sur l'eau en quantité et en qualité.

La plaine du Hodna est une partie des vastes plaines d'Algérie, assez pue sèche, située à 100 à 120 km de la mer. De ce fait, ils sont largement à l'abri des impacts côtiers des massifs telliens de l'Allas, notamment de nombreuses averses d'origine méditerranéenne. Cependant, l'Atlas saharien n'est pas assez élevé pour les protéger des effets desséchants du désert (Despois 1953).

La région que nous décrivons a une année climatique avec deux saisons distinctes : une saison fraîche et relativement hivernale de novembre à avril, et depuis le mois de mai à octobre sèche et chaude (Amel 2021).

Pour décrire le climat de la zone d'étude, nous avons utilisé les données de Boussaâda de 2009 à 2018.

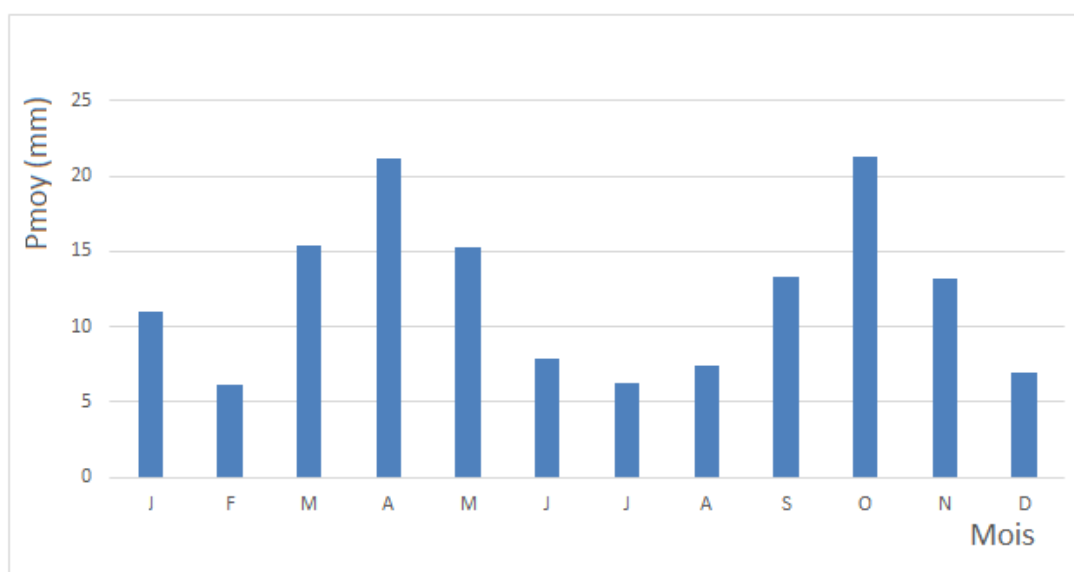
### I.3.3. Les précipitations

Selon la station de Boussaâda, la région sud reçoit entre 150 et 250 mm de pluie en moyenne par an. La quantité de pluie est mal répartie dans le temps et dans l'espace, et des orages peu fréquents, répartis sur une dizaine de jours par an. Les données des précipitations sont enregistrées dans le tableau III 1.

**Tableau I 1.** Précipitation moyenne mensuelle de la région de Boussaâda, période (2009-2018).

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aou	Sép	Oct	Nov	Déc
Pmoy (mm)	11	6.1	15.4	21.2	15.3	7.9	6.2	7.4	13.3	21.3	13.2	6.9

La figure I 4 montre l'évolution des précipitations montre une variation irrégulière ; les valeurs les plus élevées se trouvent en mois les plus pluvieux de mars, avril, mai et octobre, tandis que les valeurs les plus basses se trouvent en mois de juin, juillet et août. La moyenne annuelle des précipitations est de 145.2 mm.



**Figure I 5.** Précipitation moyenne mensuelle de la région de Boussaâda, période (2009-2018).

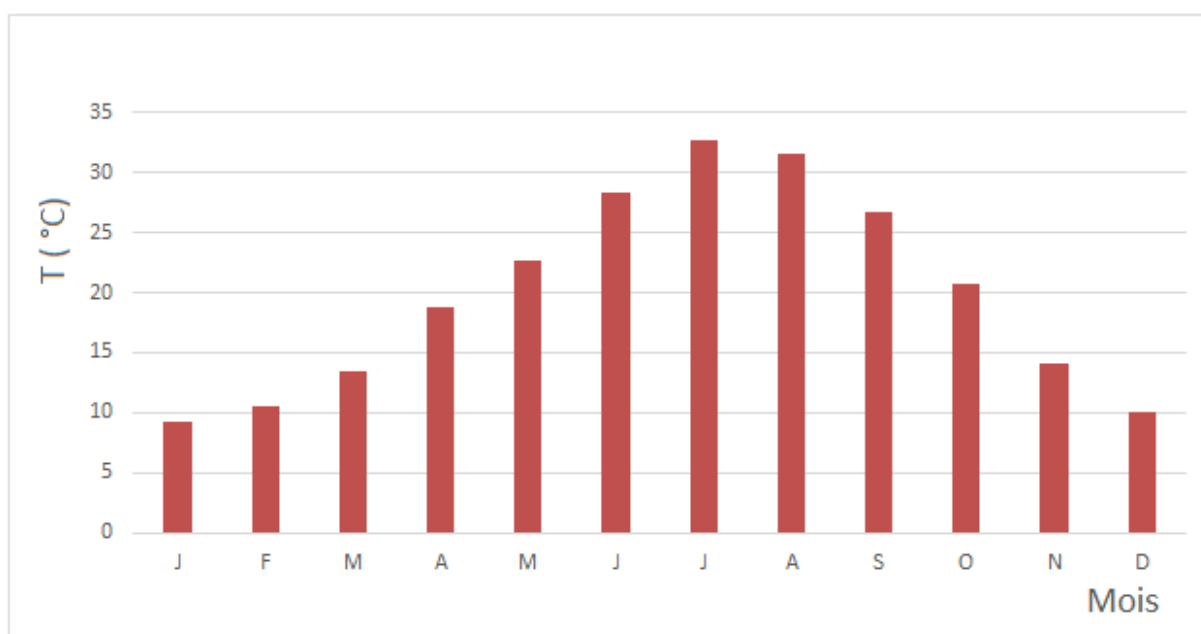
### I.3.4. Température

Le climat d'une région est déterminé par la température, qui contrôlant l'évapotranspiration et l'évaporation, ce qui affecte le bilan hydrique, par conséquent, les conditions d'approvisionnement en eau et la teneur en sel des aquifères (Ozenda 1977). La dépression du Hodna connaît des températures élevées et un temps extrêmement chaud pendant l'été en raison des courants chauds du sud et de l'est (Despois 1953 ; Bord 1981).

La figure I 5 illustre comment la température moyenne augmente au cours des mois de juin, juillet et août avec un maximum de 32.7°C en juillet et diminue pendant la saison hivernale avec un minimum de 9.3°C en janvier (Tableau I 2).

**Tableau I 2.** Température moyenne mensuelle de la région de Boussaâda, période (2009-2018)

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jeu	Jut	Aou	Sép	Oct	Nov	Dic
Vent (m/s)	2.5	3.24	3.41	3.2	2.94	2.24	2	2	1.59	1.19	2.3	2.14



**Figure 1 6.** Température moyenne mensuelle de la région de Boussaâda, période (2009-2018).

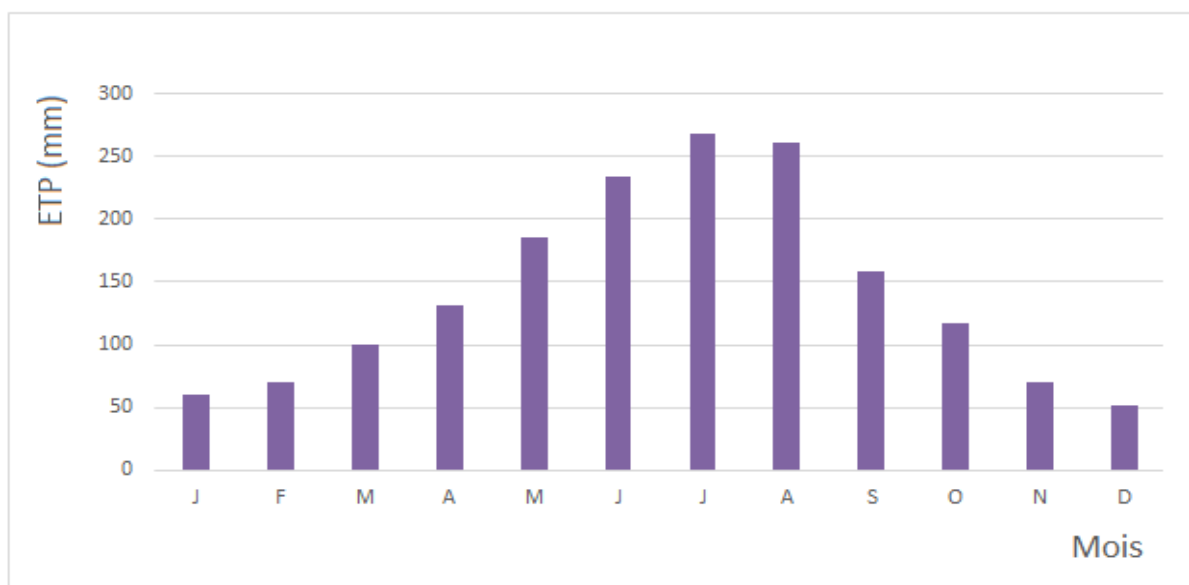
### I.3.5. Evapotranspiration potentielle (ETP)

La quantité combinée d'évaporation du sol et de transpiration des plantes est connue sous le nom d'évapotranspiration. L'évaporation de l'eau est influencée par un certain nombre de facteurs, notamment le rayonnement solaire, la température, le vent, l'humidité relative, l'humidité du sol, la couverture végétale et la fin du travail du sol (Nguyen-Minh 1966).

Après analyse des données d'évapotranspiration de la station de Boussaâda sur la période (2009-2018) dans le Tableau (I 3) et la figure (I 6), on constate que la région se caractérise par une évapotranspiration plus élevée durant la saison estivale (juin, juillet et août) par rapport aux autres mois.

**Tableau I 3.** Evapotranspiration dans la région de Boussaâda, période (2009-2018)

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aou	Sép	Oct	Nov	Déc
ETP (mm)	60	70.8	100.3	131	184.8	234	267.96	261.5	158.2	116.7	70.8	51.5



**Figure I 7.** Evapotranspiration de la région de Boussaâda, période 2009-2018.

### I.3.6. Les vents dominants

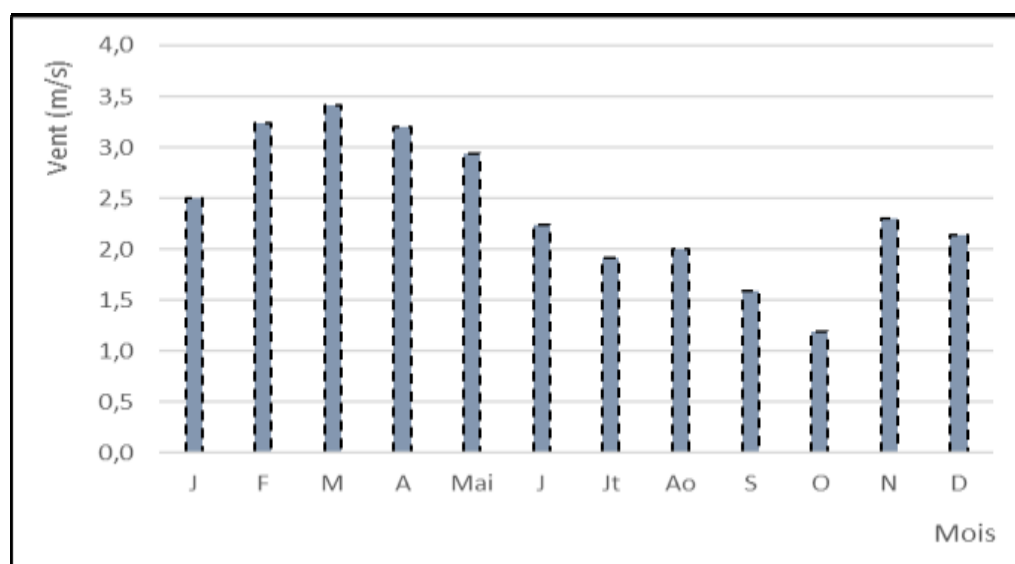
La région d'étude est caractérisée par des forts vents avec rotation violent des courants. Le vent souffle du sud et de l'est, du Nord-Ouest et Nord-Est, il transporte des tempêtes de sable et parfois avec de la pluie. Comme elle est soumise aux vents chauds et oppressants du Sud-Ouest en

été et aux vents froids et secs du Nord-Est en hiver. En hiver et au printemps, ces vents peuvent périodiquement souffler féroceement pendant des semaines d'affilée.

Les vents du nord-ouest affectés de plus fort pourcentage 25 %, également les vents du nord de 23 %. Ces vents sont responsables des accumulations de sable dans la région sud de la dépression Hodna (nord et nord-ouest de village) et de l'orientation nord-ouest à sud-est des dunes. Les masses d'air du versant ouest (20%) sont canalisées le long du corridor de l'Oued Maîter entre le Djebel Gorehor et le Djebel Moubakhera (Dechaicha 2010). Dechaicha (2010) a montré que la période de retour des vents forts (180 km/h) est de 20 ans et celle des vents de 200 km/h est de 50 ans dans la passe de Boussaâda (Fig. I 7). La figure III 13, montré que durant la durée (2009-2018) que la vitesse moyenne mensuelle du vent est élevée durant les mois février, mars, avril et mai.

**Tableau I 4.** Vitesses moyennes mensuelles de la région de Boussaâda, période (2009-2018).

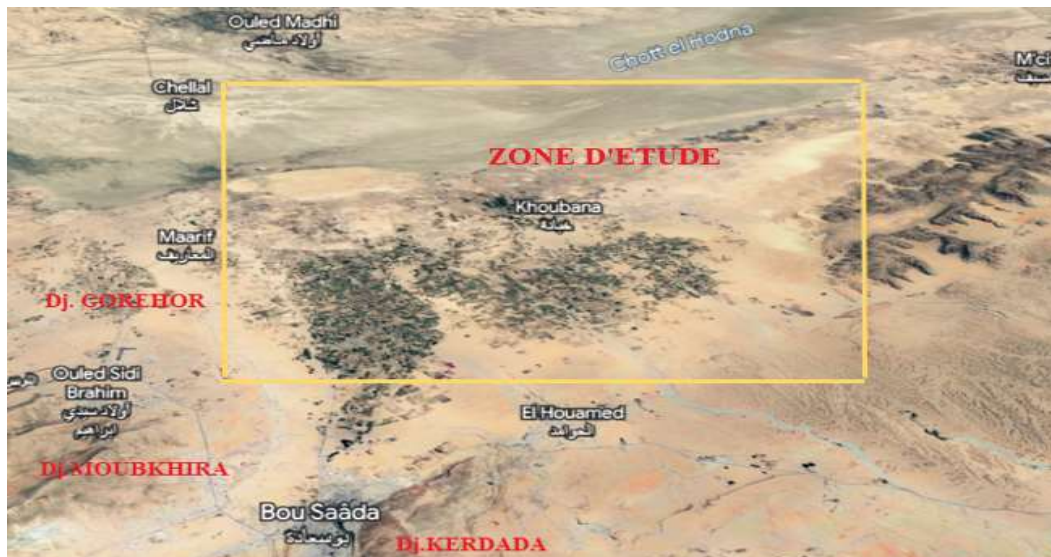
Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jeu	Jut	Aou	Sép	Oct	Nov	Dic
Vent (m/s)	2.5	3.24	3.41	3.2	2.94	2.24	2	2	1.59	1.19	2.3	2.14



**Figure I 8.** Vitesse du vent moyenne mensuelle dans la station de Boussaâda, période (2009-2018).

## I.4. Caractéristiques morphométriques et physiques du Sous B.V de Boussaâda

### I.4.1. Délimitation de la zone étudiée Dans le Sous B.V de Boussaâda



*Figure. I.9. Zone d'étude par satellite*

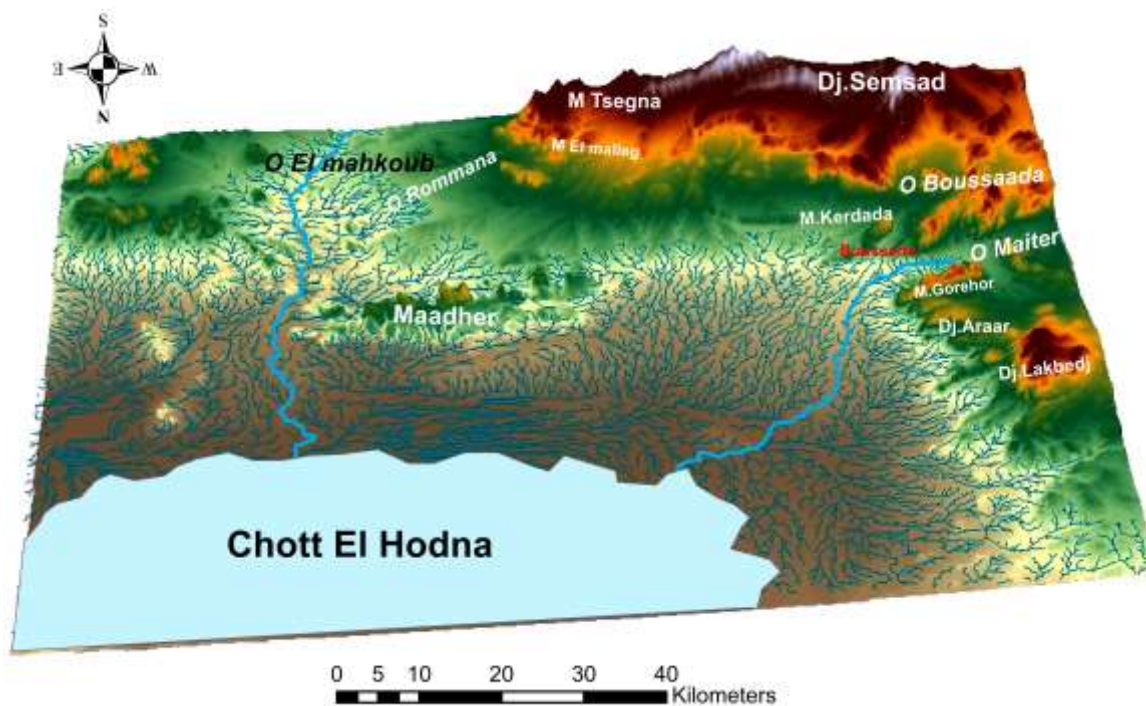
### I.4.2. Surface

Le bassin versant est l'aire de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau. Les débits vont donc être en partie reliés à sa surface, correspondant à l'aire délimitée par l'ensemble des points les plus hauts qui constituent la ligne de partage des eaux. Sa surface (A) exprimée en  $\text{km}^2$ , peut être déterminée à l'aide d'un planimètre ou mieux par les techniques de digitalisation. (Par exemple les logiciels : (Arc GIS, Global Mapper, MapInfo, ...etc.).

La surface été mesurée grâce au logiciel Arc Gis Elle est de l'ordre de :  $188,83 \text{ Km}^2$ .

### I.4.3. Périmètre

Le périmètre représente toutes les irrégularités du contour ou de la limite du bassin versant, il est exprimé en km. Le contour du bassin est constitué par une ligne joignant tous les points les plus élevés. Il n'influence pas l'état d'écoulement du cours d'eau au niveau du bassin versant. Le périmètre peut être mesuré à l'aide d'un curvimètre ou automatiquement par des logiciels cités précédemment. Le périmètre du sous B.V du Boussaâda mesuré par " Arc Gis " est de  $50,7 \text{ km}$ .



*Figure. I.10. Carte du sous bassin versant étudié*

#### I.4.4. Indice de compacité de Gravelius

L'indice de compacité ( $K_G$ ) renseigne sur la forme du bassin versant qui a une grande influence sur l'écoulement global du cours d'eau et surtout sur l'allure de l'hydrogramme à l'exutoire du bassin, résultant d'une pluie donnée. Il est établi en comparant le périmètre du bassin à celui d'un cercle qui aurait la même surface. Il s'exprime par la formule suivante (ROCHE, 1963) :

$$K_G = \frac{P}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot A}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Avec :

$K_G$  : Indice de compacité de Gravelius

$P$  : Périmètre stylisé en km du bassin versant

$A$  : Superficie du bassin versant en km<sup>2</sup>.

Le coefficient de Gravelius du sous B.V du Boussaâda est de 1,23.

\* Lorsque  $K_G$  est proche de 1 le bassin versant est de forme quasiment circulaire

\* Lorsque le  $K_G$  supérieur à 1 bassin versant est de forme allongée.

Un bassin versant circulaire est mieux drainé qu'un bassin allongé.

(	$K_G=1$	forme d'un cercle
	$K_G=1,12$	forme d'un carré
	$K_G>1,12$	forme d'un rectangle

D'après  $K_G$  obtenu, le sous bassin versant du Boussaâda est de forme allongée.

#### I.4.5. Courbe hypsométrique

Le relief est caractérisé par la courbe hypsométrique. Cette courbe est obtenue en portant en abscisses les surfaces partielles cumulées du bassin versant pour laquelle chaque point a une cote au moins égale à cette altitude et en ordonnées l'altitude considérées.

Le planimétrage des surfaces partielles comprises entre les différentes courbes de niveau à été réalisé par le logiciel Arc Gis. Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau I 5 ; et les courbes de niveau du sous bassin versant de la zone d'étude sont présentées dans la figure I 10.

**Tableau I.5.** Calcul des surfaces partielles et cumulées

Altitude (m)	Altitude moyenne (m)	Surfaces partielles		Surfaces cumulées	
		$S_i$ (Km <sup>2</sup> )	%	$S_{ic}$ (Km <sup>2</sup> )	% $S_{ic}$
900-1000	950	5,00	2,65	5,00	2,65
800-900	850	9,60	5,08	14,60	7,73
700-800	750	18,14	9,61	32,74	17,34
600-700	650	37,63	19,93	70,37	37,27
500-600	550	66,20	35,06	136,57	72,32
400-500	450	52,26	27,68	188,83	100,00
Somme	4200	188,83	100,00	188,83	100,00

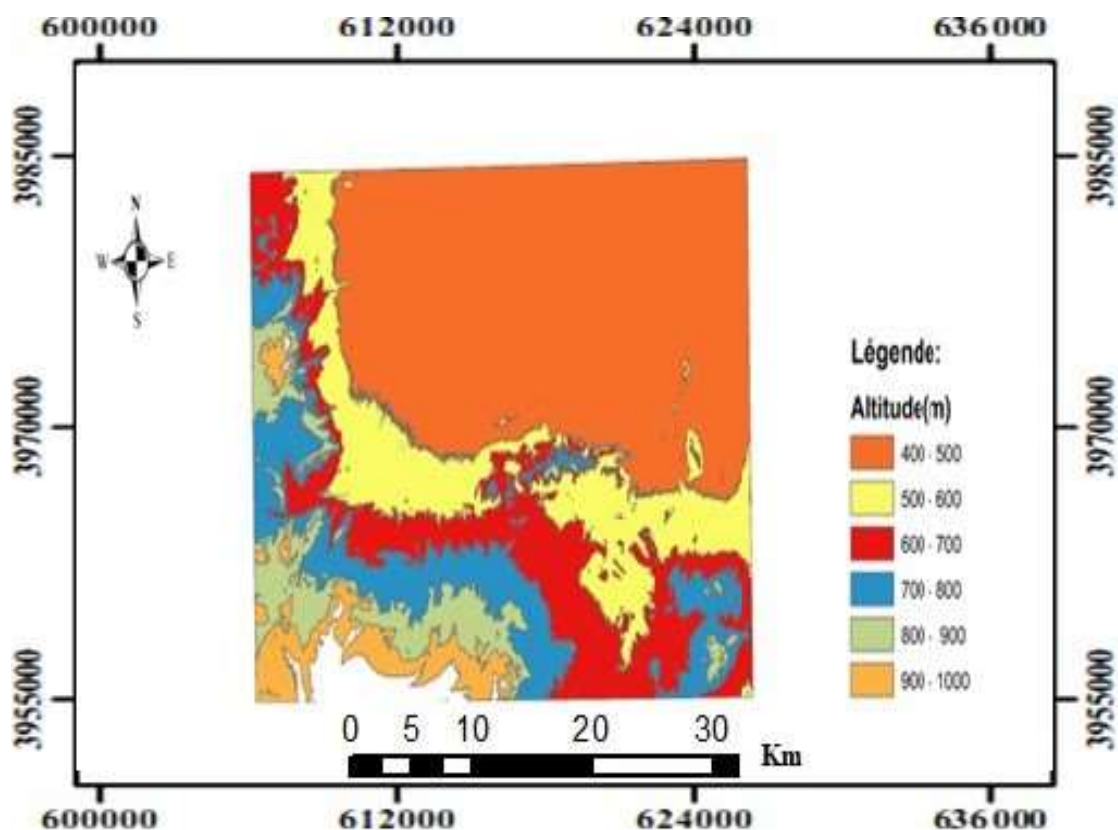


Figure I.11. Carte des tranches d'altitudes du sous bassin versant

La courbe hypsométrique représentée en figure I.11, montre que 92.27 % de la surface totale du sous bassin versant est comprise entre les altitudes 400 et 800 m. Au-dessous de 800 m le pourcentage des surfaces est très faible par rapport à la surface totale. Il est de l'ordre de 7,73 %.

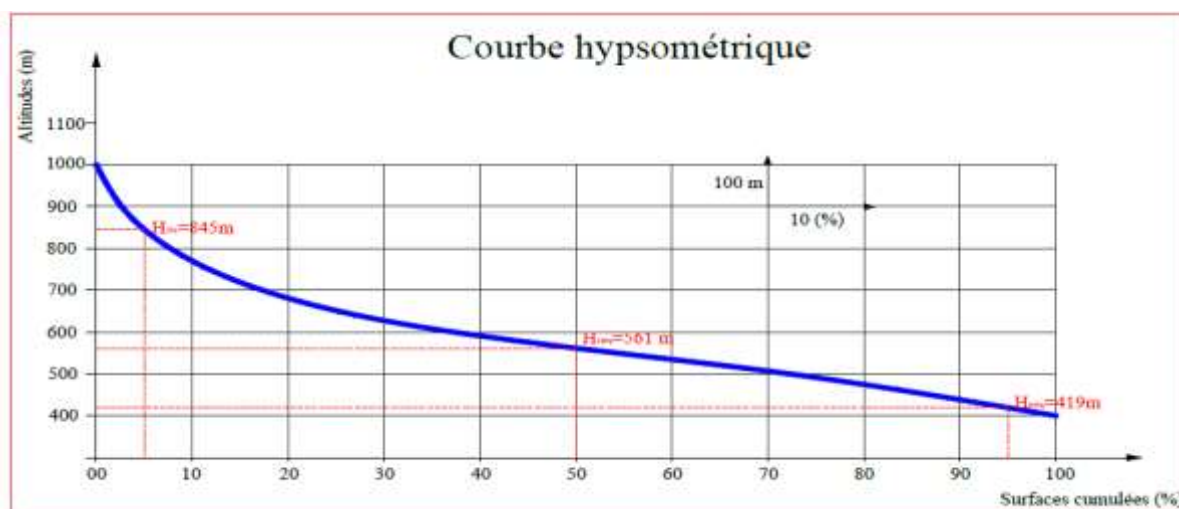


Figure I 12. Courbe hypsométrique

Les altitudes au dessus de 500 m occupent une surface de l'ordre de 72.32%. D'après la courbe hypsométrique, on peut déduire que la pente est relativement assez moyenne.

A partir de cette courbe, on détermine :

\* l'altitude à 95% de la surface,  $H_{95} = 419$  m

\* l'altitude à 5% de la surface,  $H_5 = 845$  m

\* l'altitude médiane,  $H_{50} = 561$  m

L'altitude moyenne est définie aussi par la formule suivante :

$$\bar{h} = \frac{\sum S_i \cdot \bar{H}_i}{S}$$

D'où :

S : surface totale du bassin versant

$S_i$  : surface partielle

$\bar{H}_i$  : L'altitude moyenne entre deux courbes niveaux

$\bar{h} = 591.79$  m

#### I.4.6. Rectangle équivalent

Le rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius correspond à une transformation purement géométrique du bassin versant. Il prend alors une forme rectangulaire tout en gardant la même superficie, le même périmètre, le même indice de compacité et par conséquent la même répartition hypsométrique. Dans ce cas, les courbes de niveau deviennent parallèles aux côtés du rectangle équivalent. La climatologie, la répartition des sols, la couverture végétale et la densité de drainage restent inchangées entre les courbes de niveau. Plus un rectangle équivalent est allongé moins il sera drainé. Les dimensions du rectangle équivalent sont déterminées par les formules suivantes (ROCHE, 1963) :

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

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

Avec :

L : Longueur du rectangle équivalent en Km ;

l : Largeur du rectangle équivalent en Km ;

KC : Indice de compacité ;

L'application de la relation précédente nous donne une longueur du rectangle équivalent du sous B.V de l'ordre de 17.86 Km et sa largeur *l* est de : 7.42 Km.

**I.4.7.Les indices de pente**

Le but de ces indices est de Caractériser les pentes d'un bassin versant et de comparer le bassin versant ente eux.

**a/Indice de pente Roche** : ROCHE a proposé un indice de pente plus facile à calculer que le l'autre, il est donné par la formule :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_i^n S_i (H_i - H_{i-1})$$

L : Longueur de rectangle équivalent (m)

Si : Surface partielle correspondante (%).

Soit:  $I_p = 0.17$

**b/Indices de pente globale**

Les reliefs des bassins versants sont classés d'après l'indice de classification de l'Orstom suivant :

$I_g < 0.002$ .....	relief très faible.
$0.002 < I_g < 0.005$ .....	relief faible.
$0.005 < I_g < 0.010$ .....	relief assez faible.
$0.010 < I_g < 0.020$ .....	relief modéré.
$0.020 < I_g < 0.050$ .....	relief assez fort.

$$I_g = D / L$$

Où :

$I_g$  : indice globale de Roche

$D$  : dénivelée totale (m).

$$D = H_{95} - H_5 = 845 - 419 = 426 \text{ m}$$

Donc l'indice de pente globale du sous bassin versant est de :  $I_g = 0.023$  ; d'après  $I_g$  obtenu le sous bassin versant est de relief modéré.

#### **I.4.8.Pente moyenne**

C'est une caractéristique importante des bassins versants qui renseigne sur la topographie du bassin. La pente moyenne du cours d'eau détermine la vitesse avec laquelle l'eau se rend à l'exutoire du bassin donc le temps de concentration. Elle influence sur l'état d'écoulement du cours d'eau au niveau du bassin versant. En effet, plus la pente est forte, plus la durée de concentration des eaux

de ruissellement dans les affluents et le cours principal est faible, par conséquent le bassin réagira d'une façon rapide aux averses. Les pentes fortes à très fortes peuvent produire des écoulements de nature torrentielle qui sont à l'origine des crues dévastatrices.

La pente moyenne du bassin versant est donnée par Roche (1963) comme étant la moyenne pondérée des pentes de toutes les surfaces élémentaires pour lesquelles on peut considérer que la ligne de plus grande pente est constante. Une valeur approchée de la pente moyenne est alors donnée par la relation suivante :

$$P_m = \frac{1}{A} \sum D_i$$

Avec :

$P_m$  : Pente moyenne du bassin versant en %

$l$  : Largeur du rectangle équivalent en km

$D_i$  : Différence de niveau entre deux courbes consécutives

$A$  : Surface élémentaire en km<sup>2</sup>.

La pente moyenne du bassin versant du Boussaâda est de l'ordre de 22,3 %. Pour le calcul de cette pente moyenne, on ne tient pas compte de la forme de la courbe hypsométrique. Cette dernière correspond à la superficie entre les courbes de niveau en fonction des altitudes correspondantes. Elle donne une idée sur la pente et l'allure du relief.

#### **I.4.9. Longueur du cours d'eau principal**

La longueur du cours d'eau principal est la distance curviligne depuis l'exutoire jusqu'à la ligne de partage des eaux, en suivant toujours le segment d'ordre le plus élevé. Lorsqu'il y a un embranchement et par extension du dernier jusqu'à la limite topographique du bassin versant, cette distance parcourue est exprimée en Km. Si les deux segments à l'embranchement sont de même ordre, on suit celui qui draine la plus grande surface.

### **I.5. Les caractéristiques du réseau hydrographique**

#### **I.5.1. Densité de drainage**

La densité de drainage est la longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface du bassin versant. Elle correspond pour un bassin versant donné de superficie A comme étant la longueur totale des cours d'eau d'ordre quelconque sur la superficie totale A du bassin versant. La densité de drainage est exprimée en km/km<sup>2</sup> ou en km<sup>-1</sup>.

Elle est donc :

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

Avec :

*i* : Longueur totale des cours d'eau en km

A : Superficie du bassin versant en km<sup>2</sup>.

La longueur totale des cours d'eaux du BV du Boussaâda est de :  $\sum L_i = 150.44 \text{ Km}$

Et leur surface  $A = 132,48 \text{ km}^2$

Donc :  $D_d = 1.13 \text{ Km} / \text{Km}^2$

La densité de drainage dépend de la géologie (structure et lithologie), des caractéristiques topographiques du bassin versant dans une certaine mesure, des conditions climatologiques et atmosphériques. En effet, les secteurs situés en zones de roches perméables ont en général des densités de drainage faibles, alors que les secteurs de roches imperméables ont des densités plus élevées.

### I.5.2. Dénivelée spécifique (Ds)

L'indice  $I_g$  décroît pour un même bassin, lorsque la surface augmente, il est donc difficile de comparer des bassins de taille différente, d'où la nécessité de l'introduction du paramètre (Ds).

$$D_s = D/L * \sqrt{A} \longrightarrow D_s = 23.85 \sqrt{132.48} = 274.51 \text{ m}$$

D'après la deuxième classification de l'ORSTOM (Office de Recherche Scientifique de Territoire d'Outre-Mer), la dénivelée spécifique du bassin de Bou-Saada se trouve dans la classe R5 : caractérisée par un relief assez fort (tableau I 6).

**Tableau I 6.** classification des Reliefs

R1	Relief très faible	$05 < D_s < 10 \text{ m}$
R2	Relief faible	$10 < D_s < 25 \text{ m}$
R3	Relief assez faible	$25 < D_s < 50 \text{ m}$
R4	Relief modéré	$50 < D_s < 100 \text{ m}$
R5	Relief assez fort	$100 < D_s < 250 \text{ m}$
R6	Relief fort	$250 < D_s < 500 \text{ m}$
R7	Relief très fort	$500 < D_s < 750 \text{ m}$

### I.5.3. Temps de concentration (Tc)

Le temps de concentration est défini comme étant la durée que met une goutte d'eau qui tombe dans le point le plus éloigné du bassin versant, pour atteindre l'exutoire. Il est exprimé par la formule suivante :

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1,54}{0,8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}}$$

On obtient : Tc= 3.43 heures

Avec :

A : Superficie du sous bassin = 132,48 km<sup>2</sup> ;

Lp : Longueur du talweg principale = 21,430 km ;

H<sub>moy</sub> = 700m

H<sub>min</sub> = 400m.

### I.5.4. Vitesse d'écoulement de l'eau (Vc)

Elle est donnée par l'expression suivante :

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

Avec :

Vitesse d'écoulement de l'eau en m/s (Vc)

Longueur du talweg principal : 21,430 km = 21430 m (L)

Temps de concentration 3.43 heures = 12348 S (Tc)

Donc : Vc = 1.73m/s

### I.5.5. Réseau hydrographique :

Le réseau hydrographique de Boussaâda est marqué par deux oueds, c'est l'oued Maitar issu du versant sud de djebel Moubakhria, et l'autre oued Boussaâda est issu du djebel Kardada. Et les eaux pluviales qui traversent ces deux Oueds se déversent dans le chott du Hodna.

### I.5.6. Récapitulatif des caractéristiques principales du sous B.V de la zone d'étude

Le tableau I 7, résume les caractéristiques principales du bassin versant du Boussaâda.

*Tableau I 7. Principales caractéristiques morphométriques du sous B.V de la zone d'étude*

Caractéristiques morphométriques	Résultats	Unité	Observation
Surface	188.83	Km <sup>2</sup>	-----
Périmètre	50,7	Km	-----
Altitude max	1000	m	-----
Altitude moyenne	700	m	-----
Altitude min	400	m	-----
Indice de Gravelius	1,23	-----	Forme allongée
Indice de pente globale	0.023	m/Km	Relief modéré
Longueur du rectangle équivalent	17.86	Km	-----
Largeur du rectangle équivalent	7.42	Km	-----
Longueur du cours d'eau principal	21,43	Km	
Pente moyenne	22,3	m/Km	-----
Dénivelée spécifique	254,71	m	-----
Densité de drainage	1,13	Km <sup>-1</sup>	Réseau moins dense
Temps de concentration	3,43	heures	
Vitesse d'écoulement d'eau	1.73	(m/s)	

## I.6. Conclusion

Le sous bassin versant de Boussaâda est caractérisé d'un climat semi-aride à aride, sec et très chaud en été et très froid hiver. Draine une grande surface, de forme allongée, de relief modéré, de pente moyenne, d'une densité de drainage moins dense et de longueur du cours d'eau importante.

La zone d'étude contient des formes de relief importantes, telles que de riches plaines agricoles entourées de montagnes au sud et à l'ouest. Il est parsemé d'un réseau d'oueds, les oueds de Boussaâda, Maiter et Roumana étant les plus importants. Elle contient des sols sablonneux et argilosableux dans lesquels abondent diverses activités agricoles. La principale source d'eau de boisson et d'irrigation dans la région est l'eau souterraine. Ce chapitre a présenté un aperçu général et complet sur la région d'étude.

***Chapitre II :***  
***Aperçu géologique***  
***et hydrogéologique***

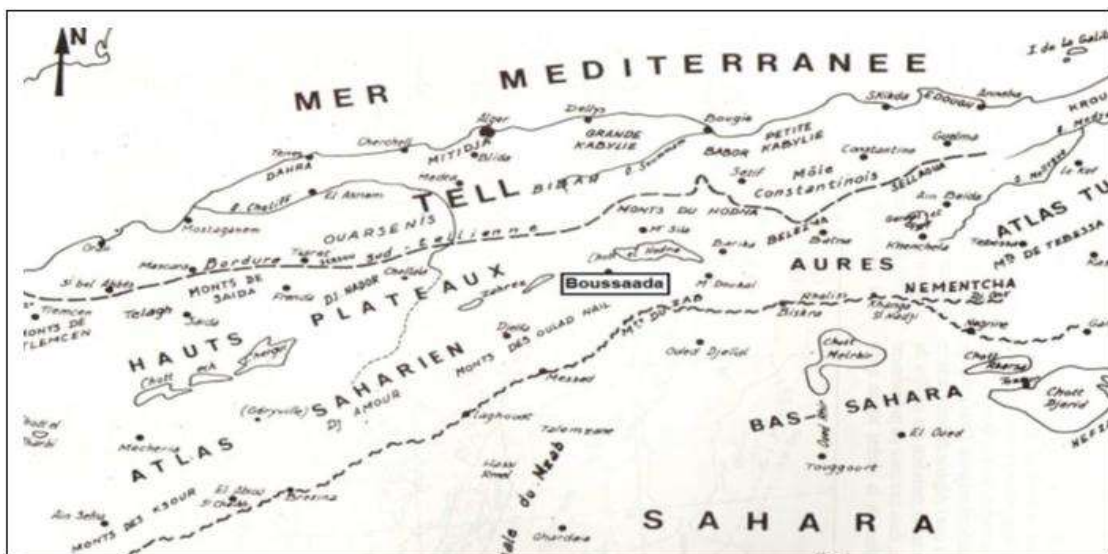
## Chapitre II : Aperçu géologique et hydrogéologique

### II.1. Aperçu géologique

L'étude géologique nous permet d'identifier les formations perméables détritiques et les formations résistantes fissurées ou karstique susceptibles d'être aquifères, ainsi que les formations imperméable qui constituent soit le toit, soit le substratum de ces informations ; leurs épaisseurs, et leurs étendues. L'étude tectonique nous renseigne sur la géométrie des différents aquifères de la région. Les familles de failles entraînant la formation de fossés d'effondrement ou de soulèvement modifient ainsi la géométrie des couches qui va caractériser chaque type de nappe et permettent la communication probable entre les aquifères.

#### II.1.1. Cadre géologique générale

Le bassin du Hodna est situé entre l'Atlas tellien et l'Atlas saharien, caractérisé par une grande complexité tectonique (Figure II 1). Au début du Miocène, le Hodna s'est constitué avec une partie de la chaîne de montagnes nord et est. Après cet épisode marin unique, le bassin s'est progressivement rempli de sédiments continentaux Mio-pliocènes issus de l'érosion des reliefs voisins (Despois 1953).



*Figure.II.1 : Localisation de Boussaâda dans l'ensemble géomorphologique du Nord de l'Algérie.*

Les dépôts Mio-pliocènes de la dépression se sont mêlés à la démolition des collines nord-est et nord-ouest (limon des rivières descendantes) (Despois 1953).

Le Mio-Pliocène de mont Meharga, au nord-est de Boussaâda (Figure II 2), indique l'érosion et les falaises ces montagnes ont été soumises (Despois 1953). La ligne des dunes se continue à travers Boussaâda sur toute la bordure du Chott Hodna, vers Mdoukal se composent des sables quartzeux, et riche en matériel argileux (Bernard et Ficheur 1902 ; Kaabeche 1990).

La région au sud du Chott est constituée de formations Mio-pliocènes et quaternaires anciens et récents, d'où la présence des alternances de marnes gréseuses et de conglomérats (Guiraud 1970 ; Bernard et Ficheur 1902).

La sebkha est une zone de captage des eaux de ruissellement et de décantation des particules solides (Kaabeche 1990), constituée par une mince pellicule salée qui recouvre des argiles noirâtres passant rapidement à des sables argileux bruns. Quelques profils ont révélé la présence d'un horizon salin cristallise irrégulier (10 à 40 mm d'épaisseur) qui se développe entre 30 et 70 cm de profondeur d'eau (Guiraud 1970).

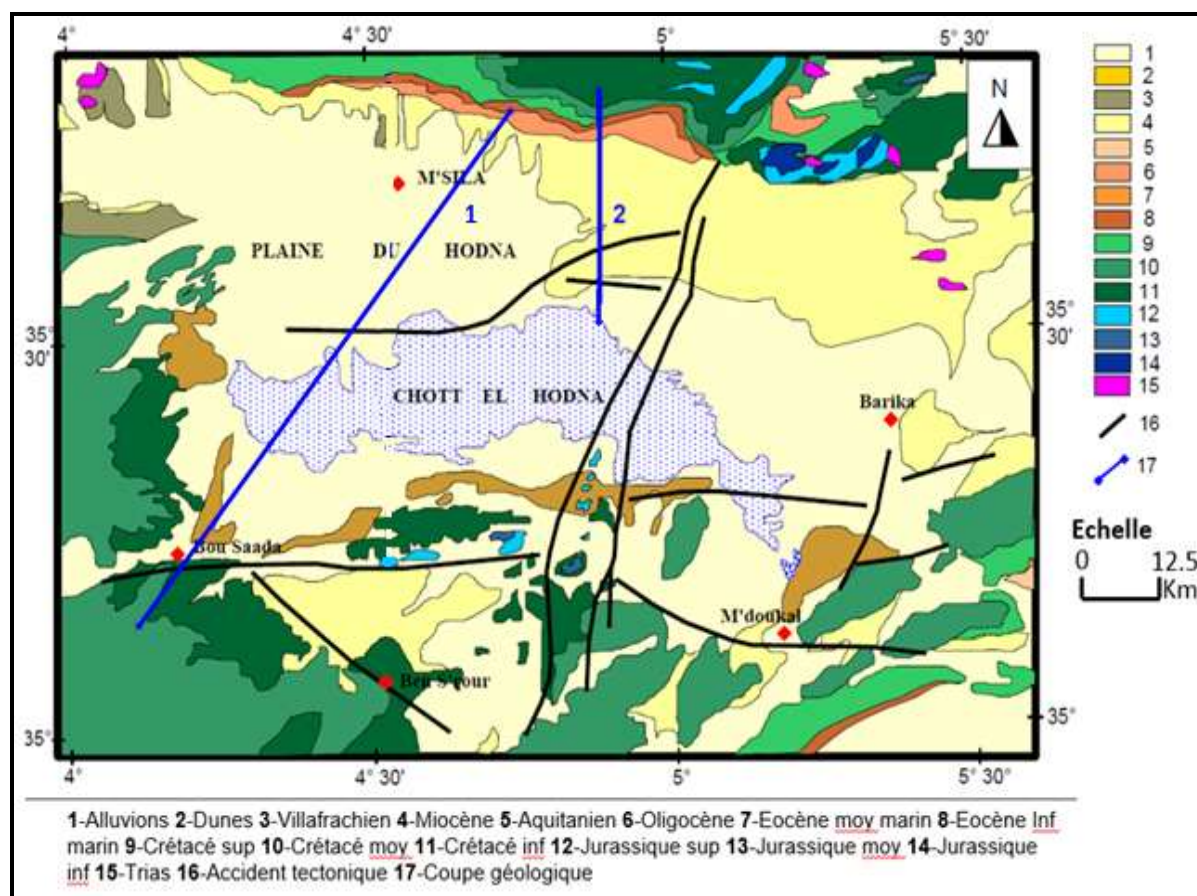


Figure II 2. Carte géologique du bassin El Hodna (Grine 2009).

### II.1.2. Géologie de la région d'étude

Dans cette partie, nous abordons les formations géologiques les plus importantes dans la zone d'étude. Cette approche fournit également des idées sur la qualité des eaux. Parce que les eaux souterraines acquièrent ses propriétés chimiques par les contacts entre eaux-roches.

Au début du Miocène et du Pliocène, le bassin de Hodna a été formé par la collision de l'Atlas saharien et de l'Atlas Tellien. Durant le quaternaire récent, la plaine alluviale du bassin s'est formée par le remplissage par les cours d'eau (Grine 2009).

Au sud de Chott El Hodna, nous trouvons la plaine agricole de Maadher. Il constitué d'alluvions (récentes et anciennes) et des dépôts fins d'épaisseur supérieure 10 cm dans certains endroits, de texture du limon grise à Ogres. Aussi des sols sableux dans certaines parties (Abdellaoui et Benchenite 2012).

La zone est caractérisée par de grandes structures géologiques avec des formations imbriquées, biaisées et coupées par de nombreux accidents géologiques (Figure II 3).

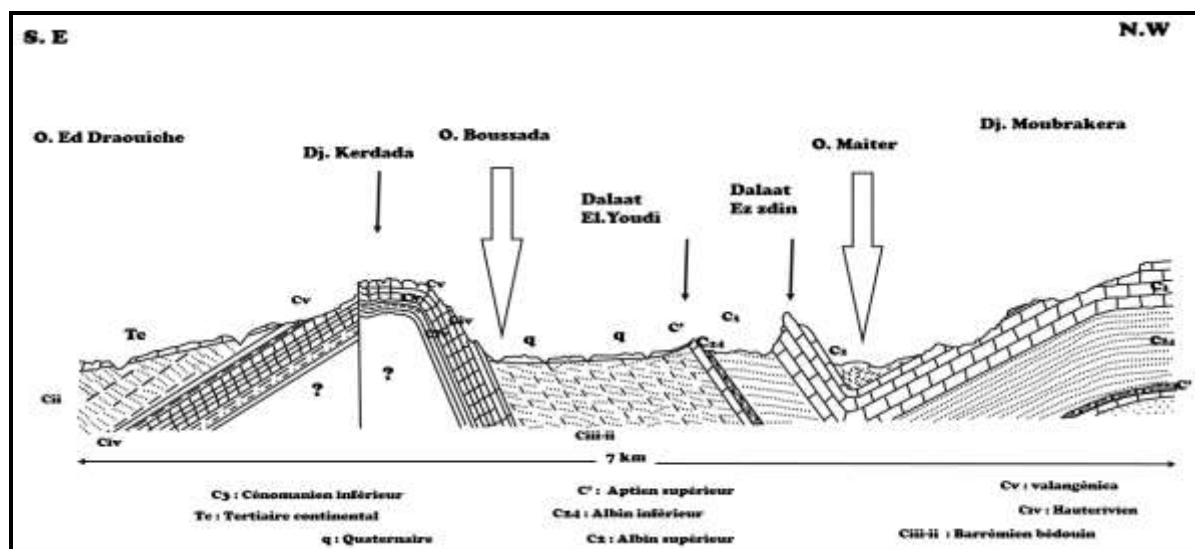
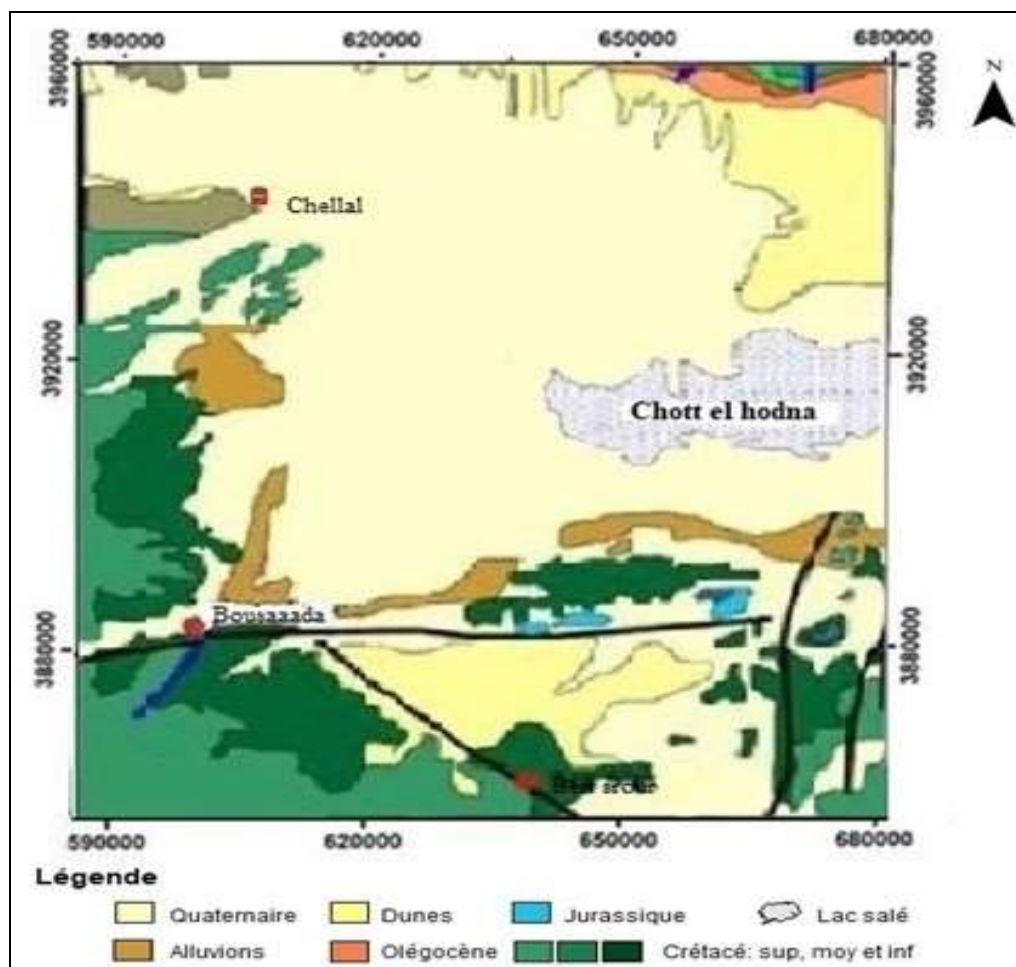


Figure II 3. Coupe géologique de la région de Boussaâda.

Il y a des affleurements crétacés dans la zone (Figure II 4) (Zerrouki et Lazib 2013). La zone de Boussaâda est caractérisée par la présence de dépôts alluviaux nouveaux et anciens riches en sable, dont l'épaisseur atteint 10 cm dans certaines parties.

Des dunes de sable, résultant de l'érosion du grès, apparaissent dans les Oueds de Maiter et de Tamsa. Il se superpose au Cénomanien, à l'Aptien supérieur et à Albien supérieur au nord-ouest

de Boussaâda jusqu'à atteindre le mont Moubakhera (Figure II 3) d'une épaisseur de plus de 200 m riche en calcaires, dolomites et marnes (Abdellaoui et Benchenite 2012).



*Figure II 4. Carte géologique de la zone d'étude*

### II.1.3. Géomorphologie du bassin

Le bassin du Hodna se caractérise par des sols sédimentaires de nature alluvionnaire, colluvionnaire ou éolienne, il se positionne entre deux formations : tellienne et saharienne. L'étude descriptive géomorphologique est regroupée dans les quatre unités principales suivantes :

- **Unité 1 : cône et glacis d'accumulation à matériau grossier**

Elle correspond aux quaternaires ancien et moyen, et se rencontre essentiellement au piedmont méridional des monts du Hodna (au nord du Chott) ; ainsi qu'à l'Est au piedmont des djebels Belezma et djebel Metlili. Cette unité est caractérisée par la présence de croûtes et de gros galets calcaires ainsi que des croûtes gypseuses (Benguesmia 2009).

- **Unité 2 : Glacis d'accumulation et d'épandage fin**

Elle renferme les glacis du quaternaire récent, et caractérisé par des enrichissements essentiellement calcaires sous forme diffuse, ainsi que des enrichissements calcaro-gypseux ou uniquement gypseux.

Les matériaux du quaternaire récent étant plus fin que ceux du moyen et ancien, du fait que les accumulations se superposent au lieu de s'emboîter (croûtes, blocs...) (Benguesmia 2009).

- **Unité 3 : Les formes à matériaux éoliens**

Cette unité se localise surtout dans la zone du R'mel au sud, sud-est et aussi à l'ouest du chott El Hodna, qui se distingue par sa nature sableuse et les accumulations éoliennes ainsi que du limon (Benguesmia 2009 ; Ladgham et Zerguine 2001).

- **Unité 4 : Les étendues d'accumulation calcaro-gypseuse**

Composé des argiles gypso-salines, est un milieu transitoire accumulateur de dépôts argileux récents, il réforme des dépôts alluvionnaires du quaternaire. La plus grande étendue de la région se caractérise par des glacis d'accumulation et débandage à matériau fin qui correspondent aux glacis du quaternaire récent qui présente des accumulations riches sous forme diffusée ainsi que des accumulations calcaro-gypseuses au gypseuses (Ladgham et Zerguine 2001).

#### **I.1.4. Stratigraphie**

La série stratigraphique du bassin du Hodna est constituée, allant du Trias au Quaternaire ancien et récent. Les formations post-triasiques du bassin sont décrites dans l'ordre (Grine 2009) :

En général, les formations géologiques anciennes ne sont pas présentes dans la région. Cependant, dans le nord, ont été observées de minces formations du primaire (roches sédimentaires, volcaniques transformés).

##### **1.1.4.1. Le Secondaire**

**Trias** : Le Trias est des affleurements pseudo-diapils à Dj Kerdada, composée principalement d'argiles gypsifères grises et des blocs de dolomies

**Jurassique** : De majeurs accidents ont provoqué l'apparition d'affleurements jurassiques dans le centre et l'est des monts de Hodna. Ils sont dominés par les formations carbonatées comme le calcaire, le grès, la marne et la dolomite. (Kieken 1961).

**Crétacé** : La période du Crétacé, avec ses diverses formations et types, apparaît dans plusieurs régions du bassin de Hodna (Grine 2005) ; dans le sud et le nord de Hodna aussi que au Bousaada, Maadid, Ain Rich, Sidi Aissa, Berhoum. En général, le crétacé est constitué des différentes épaisseurs et des alternances de calcaires, marnes grises, dolomite et argile (Kieken 1962 ; Helali 2016).

#### 1.1.4.2. Tertiaire

**Paléocène** : Dans le niveau méridional des monts Hodna, les strates paléocènes se forment en bandes plus ou moins parallèles. Les strates généralement submergées vers le bassin de M'Sila. Il est constitué de marnes stratifiées recouvertes de pyrite (Tanetien) et de marnes calcaires phosphatées (Montien), et de fines couches de calcaires argileux et de silex (Grine 2009).

**Eocène** : L'Eocène de la région se divise en deux types : Yprésien, constitué de calcaires (15 m), puis argilo-calcaires et marnes indurées (20 m), et enfin calcaires noirs et phosphatés (70 m). Le Lutétien se forme de marnes brunes, gypseuses, calcaires.

**Oligocène** : composé de grès fins émiétés, de marnes rougeâtre et blanc et de grès à ciment argileux d'une épaisseur d'environ 200 m (Kieken 1962).

**Miocène** : Le Miocène se compose de trois cycles

Le 1<sup>er</sup> cycle est composé de marnes grises, de grès et de marnes gréseuses rouges.

Le 2<sup>ème</sup> cycle est constitué par l'alternance de marnes et de grès grossiers stratifiés croisés.

Le 3<sup>ème</sup> cycle est constitué d'une série de conglomérats de marnes et de grès.

**Mio-Pliocène** : Il s'agit du tertiaire continental et est constitué de pouding et argiles sableuses Orange (Bousaada et Ain Rich).

**Pliocène** : Les différents niveaux du Pliocène supérieur, moyen et inférieur sont en contact les uns avec les autres. Il apparaît d'ouest en est de M'Sila et autour de Berhoum. L'épaisseur de cette formation est de quelques dizaines de mètres. Le Pliocène dans son ensemble est représenté par des conglomérats de grès, marnes sableuses, et de galets bien roulés à marnes (Glaçon 1970).

### **1.1.4.3. Quaternaire**

Le Quaternaire est d'origine continentale et se divise en trois divisions : ancien, moyen et récent. Le Quaternaire ancien est mêlé au Pliocène supérieur en conglomérat et sable. Il se trouve au nord de Berhoum et est constitué de dépôts argilo-sableux rouges fins (2-3 m d'épaisseur) recouverts de calcaire. Elle est unie par un ciment rose très résistant (3-4 m) (Grine 2009). Le Quaternaire moyen est constitué de couches irrégulières de 15 à 20 m d'épaisseur de galets, de calcaire cailloutis, de blocailles et de colluvions plus ou moins rougeâtres (Grine 2009). Le Quaternaire récent se situe dans la plaine du Hodna, qui apparaît nettement au sud sur l'axe du Maârif et M'Cif avec ses trois niveaux Soltanien I Soltanien II et Rharbien. Constitue de galets des sables des graviers, des marnes, des limons, des argiles et des gypses (Helali 2016).

### **I.1.5. Identification des formations aquifères**

Il y a cinq aquifères dans le Hodna (Derekov, 1973), complètement indépendants les uns des autres, mais regroupés dans le Chott. Chaque aquifère forme de couche supérieure perméable (grès et conglomérats) et de couche imperméable de miocène (cristaux de gypse et argile verte). Ces propriétés rendent ces couches incompatibles entre elles (Savornin 1908).

La zone d'étude caractérise par la présence de deux aquifères mixte ; l'aquifère superficiel est constitué principalement par la formation du quaternaire, par contre l'aquifère profond est formé majoritairement par le Mio-pliocène (Amel 2021).

## **II.2- Aperçu hydrogéologique**

Les formations aquifères de la région d'étude constitués de sables, calcaire, argile et marnes du Quaternaire en passant par Mio-pliocène jusqu'à crétacé. Les eaux de la nappe phréatique en 1967 présentent une salinité élevée : la moyenne de total des solides dissous (TDS) est 4.2 g/l (FAO 1967). C'est un aquifère renouvelable elle rechargé par Infiltration directe des précipitations et les eaux d'irrigation, infiltration d'eau d'oueds (ANRH 2006). L'aquifère profond est constitué de marnes, argile et de conglomérats intercalés (Tertiaire continental) (Mio pliocène et crétacé) (Figure II 6). Cette formation à 100-400 m d'épaisseur, c'est une formation ancienne et très importante pour la région. L'eau dont elle provient est de bonne qualité et moins salée que celle du la nappe phréatique (la moyenne TDS est 0.8 g/l (ADE 2019), elle rechargé principalement par les formations environnantes profondes.

En effet, les limites entre aquifère phréatique et aquifère profond sont toujours floues, car elles ne sont pas séparées par une formation continue de faible perméabilité, mais par des lentilles discontinues de perméabilité variable (Abdesselam et al. 2012). Par conséquent, les deux eaux souterraines peuvent communiquer et la contamination de l'aquifère profond à partir de la surface est possible (Abdesselam et al. 2012).

La nappe de l'Albien remonte par le haut et s'étend à l'ouest et vers la profondeur du Chott où la nappe est chargée. Elle se jette dans les formations tertiaires pour alimenter les sources tell qu'Ain Diss, Ain Koucha et Ain Zira (Derekov 1973).

### **II.2.1-Les cartes structurales**

- Les cartes en courbes isohypses ou isobathes représentent la morphologie et la position des surfaces limites.
- Les cartes en courbes isopaches donnent les épaisseurs, elles constituent la base de calcul de la réserve en eau souterraine.

Compte tenu de l'absence d'une étude géophysique de la région, l'évaluation des épaisseurs et des surfaces limites des aquifères seront estimée à partir de la carte géologique.

Dans le même contexte, il est nécessaire de signalé qu'aucune analyse granulométrique relative au recouvrement quaternaire n'a été effectuée, par conséquent, le coefficient d'emmagasinement ne sera déterminé qu'à partir des essais de débits.

### **II.2.2. Etude de la piézométrie**

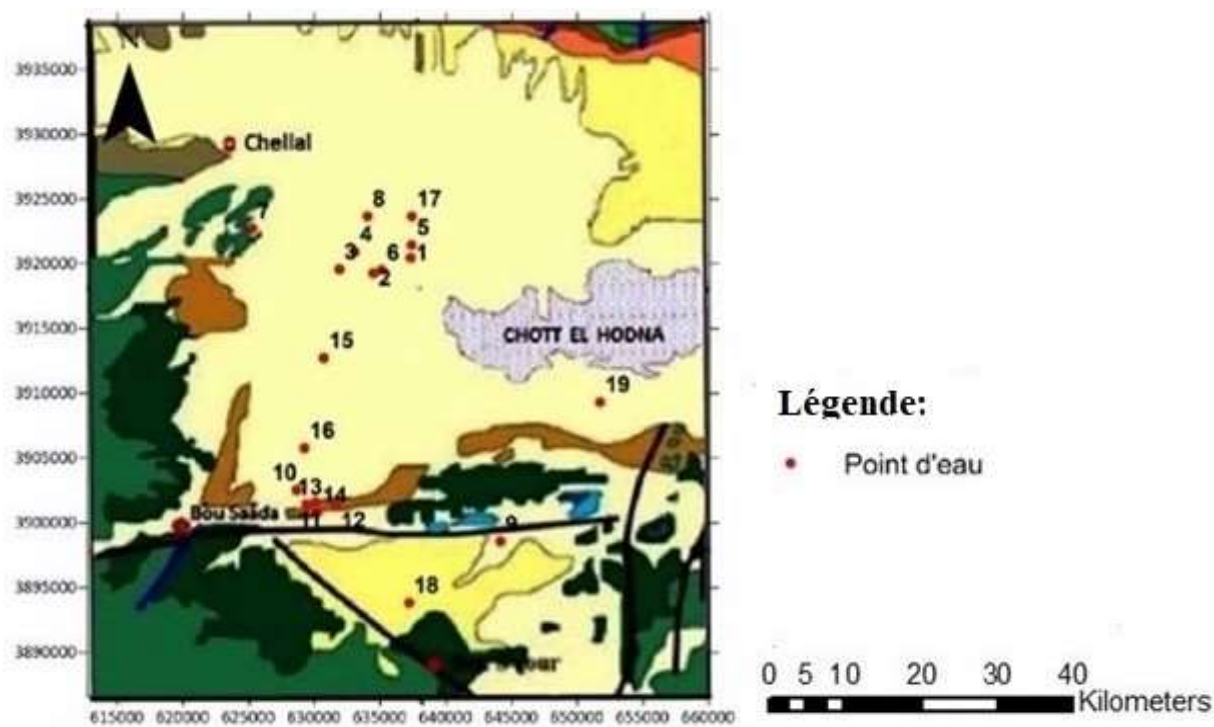
La piézométrie constitue la synthèse de l'étude hydrogéologique, elle joue un rôle déterminant dans la connaissance du comportement hydrodynamique de l'aquifère, avec la configuration des conditions aux limites d'une nappe.

#### ***II.2.2.1. Inventaire des points d'eau***

Pour tracer les cartes piézométriques et cerner du fonctionnement de la nappe dans la zone d'étude, nous avons effectué : une campagne de mesure en mois de Mars 2021 pour 19 points d'eau (Tableau II.1 et figure. II.5).

*Tableau II 1. Inventaire et caractéristiques piézométriques des points d'eau.*

N	Point d'eau	X	Y	Z	NS	NP
1	Guassia / Chellal	634289	3933164	403	60	343
2	Fraiha 01 / Chellal	629204	3931076	403	70	333
3	Sidi Laoubi / Chellal	629445	3931591	404	70	334
4	Fraiha 02 / Chellal	629916	3930933	401	70	331
5	Laamarate / Chellal	634409	3934897	407	60	347
6	Fraiha 03 / Chellal	630331	3931465	402	70	332
7	Gumaimer / Chellal	612715	3937122	430	45	385
8	Baniou/Maarif	622471	3919624	410	26,2	383,8
9	Lamdjedet/Maarif	619832	3907479	451	70	381
10	Djebel thamer/Maarif	628401	3938783	425	49,9	375,1
11	Bir baala/maarif	634443	3938779	414	65	349
12	Haoamed/oum chemal	646504	3894842	596	70	526
13	Ain aicha/haoamed	634058	3886576	765	90	675
14	Bennacer/M'cif	660072	3913660	402	70	332
15	Romana dhahria 216/255	618770	3901795	478	70	408
16	M'hasseb nouveau	621320	3900210	500	70	430
17	M'hasseb 205/255	621776	3899773	505	70	435
18	Mhasseb 02 "Nouveau"	621333	3899872	504	70	434
19	M'hasseb Nouveau	621536	3898739	519	70	449

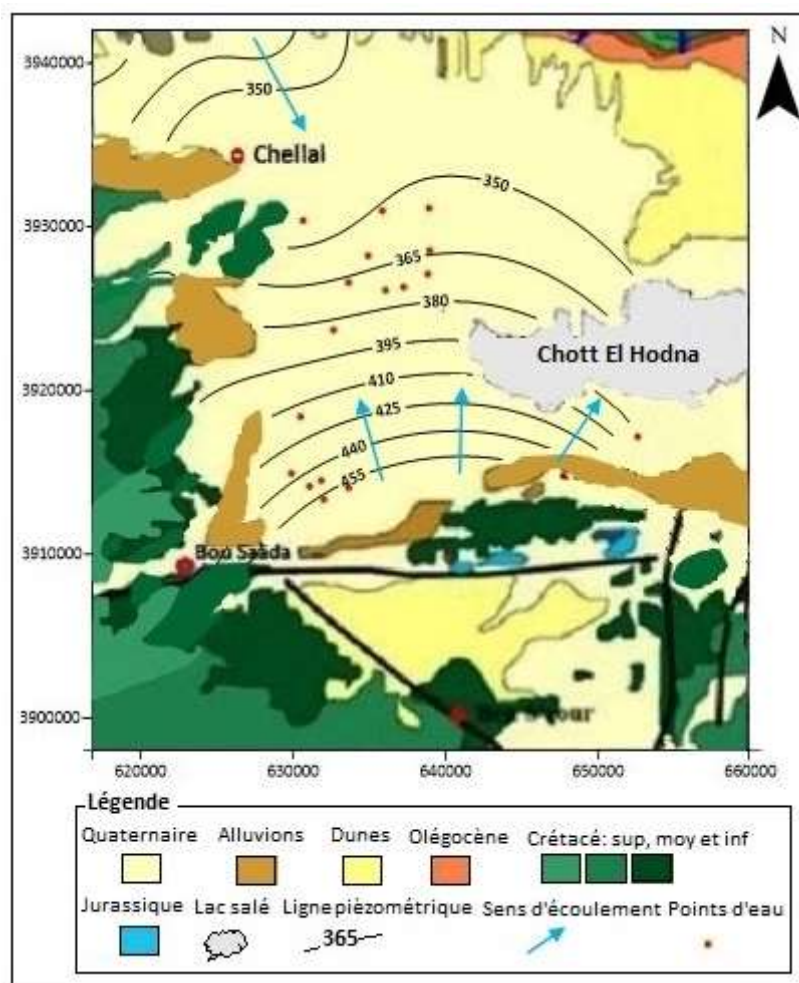
*Figure II 5. Carte de positions des forages étudiés*

### ***II.2.2.2. Interprétation des cartes piézométriques***

L'établissement de la carte piézométrique a été effectué par le logiciel surfer.10. L'analyse morphologique de la surface piézométrique doit obligatoirement passer par l'habillage de la carte piézométrique qui consiste à tracer les lignes de courant, le fléchage de ces lignes de courant, repérer les axes principaux des flux et les lignes de partage des eaux souterraines délimitant les bassins hydrogéologiques.

L'examen de la carte piézométrique (Figure II 6) permet de dire que la nappe a un écoulement orienté suivant trois directions vers la dépression (Chott-El-Hodna) et à partir de trois parties.

- La première partie (Centre de la zone d'étude) : est caractérisée par un gradient hydraulique décroissant de plus en plus en allant vers la dépression (Chott-El-Hodna) et l'écoulement est de direction Sud vers le Nord.
- La deuxième partie (Est) : est caractérisée par des courbes serrées, ce qui correspond à un gradient hydraulique fort et l'écoulement est de direction Sud vers le Nord-est.
- La Troisième partie (Nord-ouest) : est caractérisée par des courbes moyennement serrées, ce qui correspond à un gradient hydraulique moyen décroissant de plus en plus en allant vers la dépression (Chott-El-Hodna) et l'écoulement est de direction Nord-ouest vers le Sud-est.



*Fig. II.6 : La Carte piézométrique du sous B.V de la zone étudiée (Mars 2021)*

### II.3-Conclusion

La formation géologique de la zone d'étude a connue plus évènements successifs, dès la période crétacée jusqu'à la période miocène et quaternaire et caractérisée par une grande complexité. Le miocène présente une alternance des argiles et des marnes avec des grès, l'oligocène est représenté par alternance calcaire avec les grès et le crétacé avec les grès et les carbonates. Les dépôts alluvionnaires ont été déposés par différents oueds. La géologie de la zone d'étude présente les conditions favorables pour l'accumulation des eaux souterraines.

La zone d'étude renferme deux aquifères hydrogéologiques superposés et séparés par une couche d'argiles plastiques, marnes et argiles sableuses. Cette couche contribue à la protection des eaux souterraines profondes de l'intrusion d'eau salée, avec la présence de zones de contact entre elles (nappe mixte). La nappe phréatique constituée de sables, graviers, galets argileux et argiles

sableuses (Mio-Plio-Quaternaire). La nappe profonde a débuté d'argiles et marnes miocènes au nord, et laissé place à des formations grésos-carbonatées du Crétacé (Barrémo-Bédoulien, albien) au sud.

L'analyse de carte piézométrique de notre zone d'étude montre :

- ✓ Les zones correspondantes à des horizons à fort écoulement avec les directions de l'écoulement S-N, S –NE et NO-SE.
- ✓ L'alimentation de l'aquifère superficiel se fait à partir des massifs qui bordent la plaine où les axes d'écoulement prennent naissance. Ces écoulements sont orientés vers la dépression (Chott-El-Hodna).

***Chapitre III :***  
***Etude hydrochimique et évaluation***  
***de la salinité des eaux souterraines***  
***de la zone Nord-est de Boussaâda***

## ***Chapitre III :***

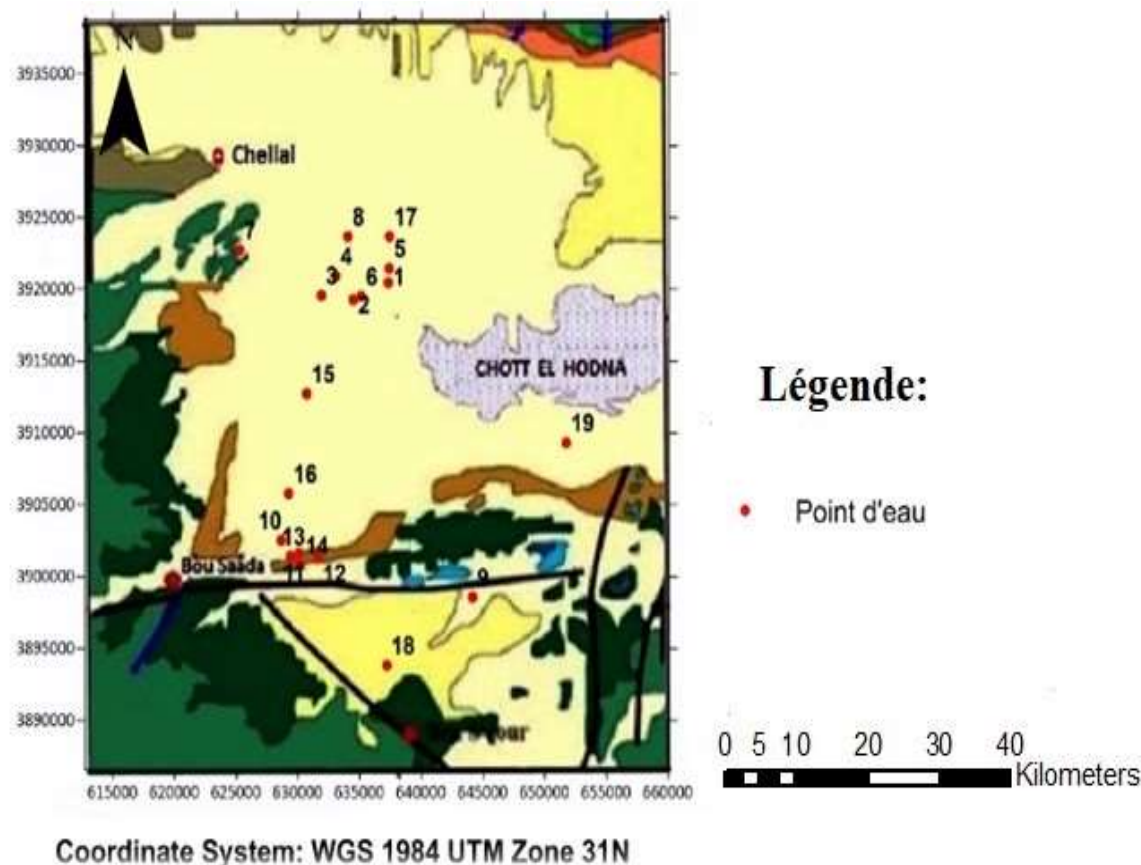
### ***Etude hydrochimique et évaluation de la salinité des eaux souterraines de la zone Nord-est de Boussaâda***

#### **III.1. Introduction**

A l'égard des pays du Nord de l'Afrique, ces dernières années l'Algérie a été influencée par la sécheresse engendrée par le changement climatique. Cela a connu une grande demande sur les eaux souterraines en provoquant la surexploitation excessive de cette ressource, l'abaissement du niveau de l'eau et la modification de la qualité hydrochimique des aquifères. Ces facteurs ont affectés la chimie des eaux souterraines par la dissolution minérale due à l'altération des roches, les activités humaines et également par l'influence saline dans les milieux arides et semi-arides.

Dans ce contexte une approche pour la caractérisation hydrochimique des eaux souterraines pour apprécier les processus hydrogéochimiques et l'évaluation de la salinité, a été effectuée dans l'aquifère mixte de la région de Nord-est de Boussaâda. Une campagne d'analyse physico-chimique a été réalisée au laboratoire de qualité de l'algérienne des eaux (ADE), sur 19 échantillons d'eau collectés de 19 forages en Mars 2021 (Figure III 1). L'étude et le traitement des données sont effectués par les méthodes graphiques et statistiques telles que ;

Diagrammes de Piper et Schoeller-Berkaloff, les graphes bivariés, les techniques statistiques multivariées (ACP et CAH) et les diagrammes de classification de la salinité.



*Figure III 1. Localisation géographique des forages étudiés-Campagne Mars 2021.*

### III.2. Fiabilité des résultats des échantillons mesurés au laboratoire

Pour apprécier la qualité des résultats des analyses chimiques des échantillons d'eau, une vérification à été faite par l'analyse de la balance ionique selon la formule suivante :

$$\text{Balance ionique (en \%)} = [(\sum \text{cations} - \sum \text{anions}) / (\sum \text{cations} + \sum \text{anions})] * 100. \text{ (meq/l).}$$

Le résultat donne une valeur acceptable inférieure à 8% (10 à 15% - Cüneyt, 2002) et Les eaux analysées présentent en générale un équilibre ionique.

### III.3. Analyses statistiques des données de qualité

Les données permettent de calculer les paramètres statistiques des éléments chimiques des eaux souterraines : Minimum ; Maximum ; Moyenne ; Ecart type et le coefficient de variation pour chaque éléments chimique (Tableau III 1).

**Tableau III 1.** Données statistiques des paramètres physico-chimiques, campagne Mars 2021.

Variable	Norme Algérienne (2011)	Norme OMS 2011	Min	Max	Moy	Ecart-type	CV (%)
T (°C)	25	/	19,1	33,6	26,03	3,35	12,87
pH	6.5 – 8.5	6.5-9.5	6,54	9,3	7,44	0,59	7,95
CE	2800	1500 a	896	5980	2187,84	1123,99	51,37
TH	200	500	240	1868	804,74	426,92	53,05
TDS	/	1000	403,2	2691	913,51	520,67	57
RS	/	100	555	3827	1562	704,75	45,12
Ca	200	75 a	24	395	172,16	97,25	56,49
Mg	150	100 a	38,88	214	90,47	52,13	57,62
Na	200	200	52	211	141,53	51,96	36,71
K	12	20 a	3	8,6	6,31	1,69	26,75
HCO <sub>3</sub>	/	300	39	427	219,72	88,91	40,47
Cl	500	250	42,6	902	214,56	194,55	90,67
SO <sub>4</sub>	400	250	180	800	520,53	180,2	34,62
NO <sub>3</sub>	50	50	0	65,5	24,32	21,08	86,7

T en (°C), CE en (µS/cm), pH sans unité, les autres paramètres en (mg/l)

### III.3.1. Le Potentiel d'hydrogène (pH) :

Le pH est une mesure de l'activité chimique des ions hydrogènes H<sup>+</sup> d'une solution, représente l'acidité ou l'alcalinité du milieu aqueux. Le pH d'une solution correspondant à la concentration [H<sup>+</sup>] = -log<sub>10</sub> (H<sup>+</sup>). Cependant le pH dépend de l'origine des eaux, de la nature géologique de l'aquifère et du bassin versant traversé (Dussart, 1966 ; Bermond et Vuichard, 1973). Dans la plupart des eaux naturelles, le pH est compris habituellement entre 6 et 8,5 alors que dans les eaux tièdes, celui-ci doit être compris entre 5 et 9 (Hcefler, 2007).

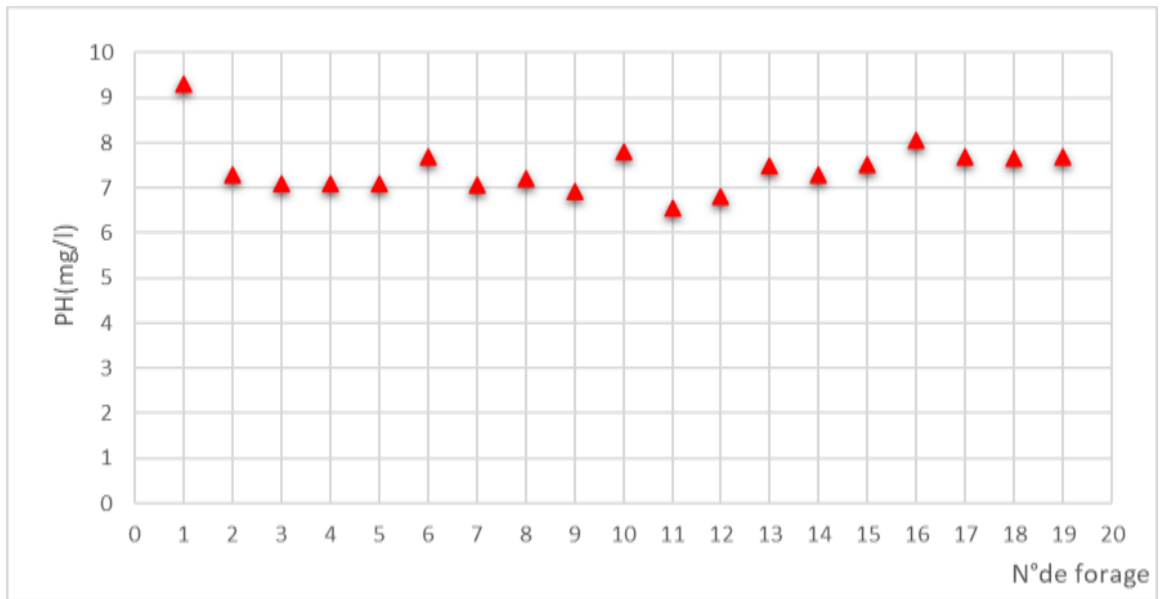


Figure III 2. Répartition de pH des eaux souterraines - Période de Mars 2021

Selon les résultats obtenus les eaux souterraines présentent un pH variant de 6,54 à 9,3. Les valeurs de pH mesurées à différents points d'eau se situent dans la plage recommandée pour l'aptitude nutritionnelle par l'Organisation mondiale de la santé, qui est de 6,5 à 9,5.

Les eaux de la partie Sud-ouest de la zone d'étude présentent une tendance neutralisée de pH varie de 6,54 à 7,4 qui caractérise un milieu humide. Au centre le pH bascule entre 7,5 à 8 caractérise les sédiments et les dépôts alluvionnaires. Tandis que la partie Nord-ouest est de pH varie de 8 à 8,5 est celui des formations calcaires couvertes des dépôts argileux lumineux d'origines lacustre (Figure III 3).

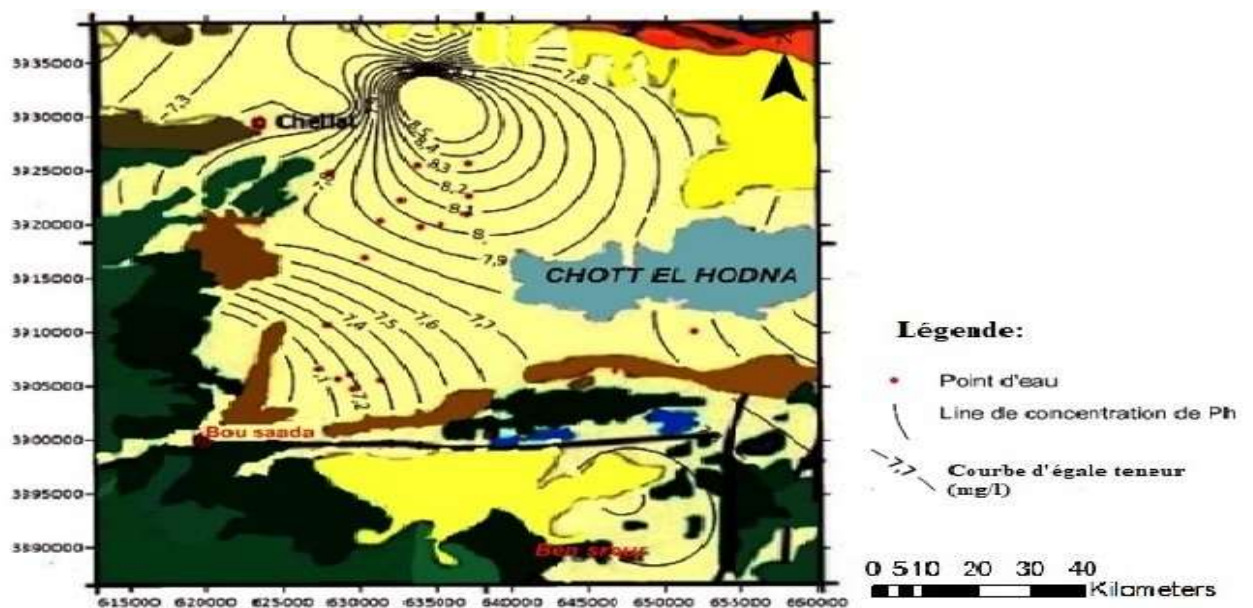
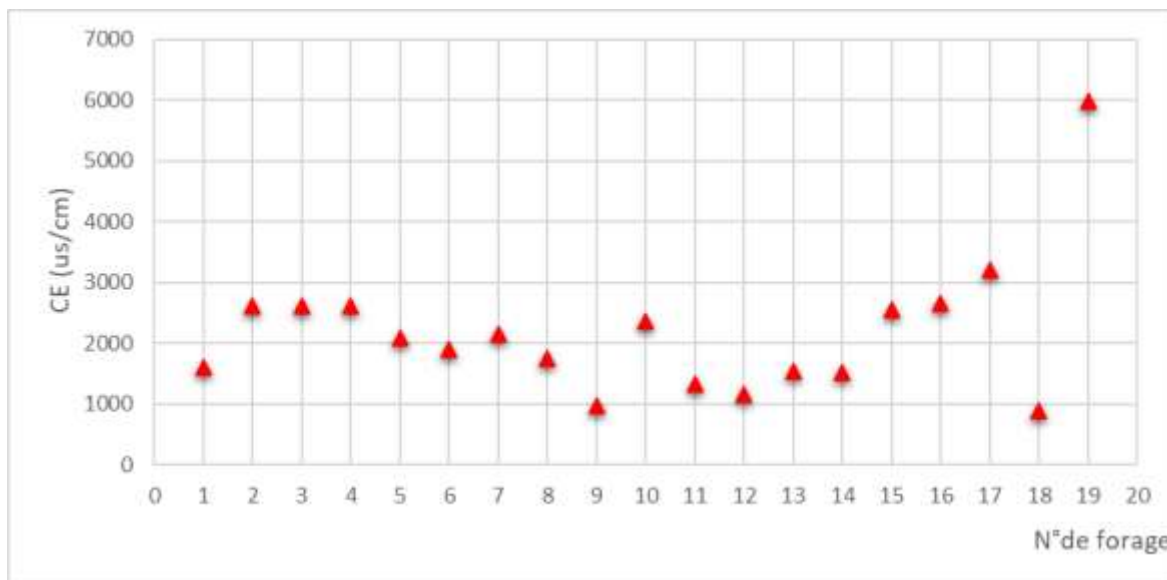


Figure III 3. Variation spatiale des valeurs de pH- Mars 2021

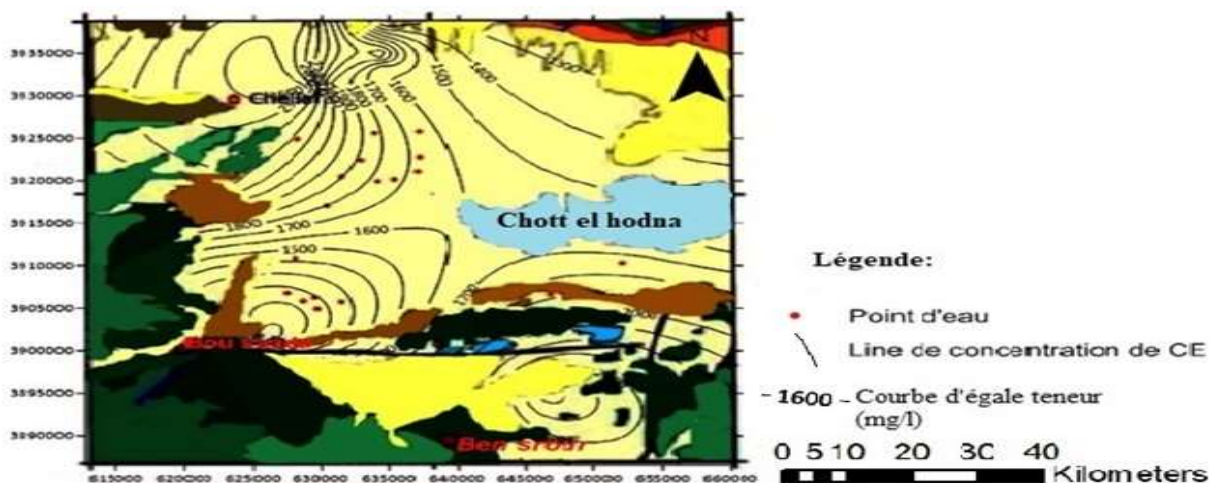
**III.3.2. La conductivité électrique (CE) :**

D’après les valeurs de la conductivité électrique (Figure III 4). On remarque que 54% des eaux de la zone nord-est de Bou Saada a une concentration élevée à très élevée, de sorte que ces eaux sont plus conductrices et plus minéralisées.



*Figure III 4. Répartition de CE des eaux souterraines -Mars 2021*

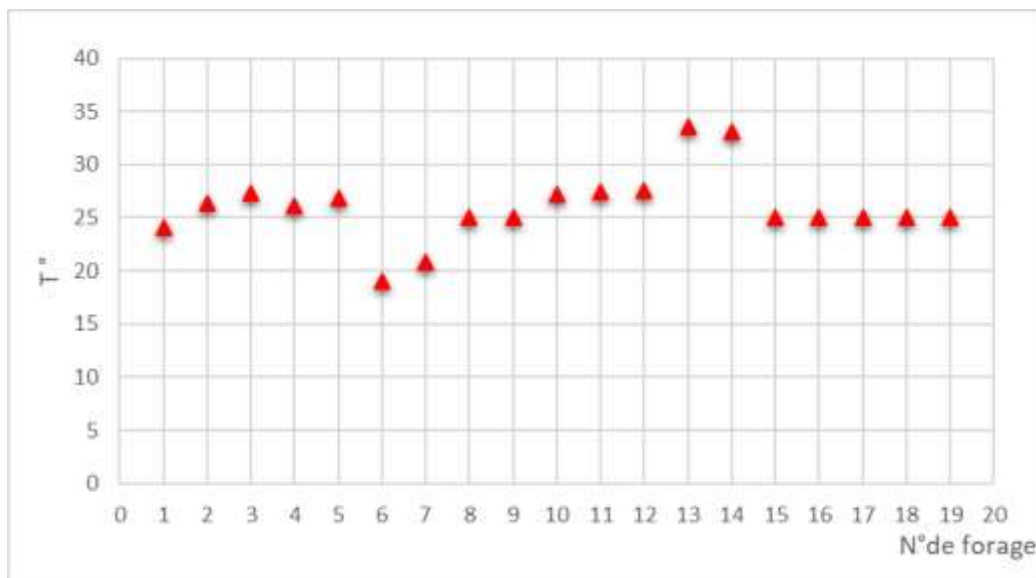
Les valeurs montrent que 10.53% des eaux sont de CE très élevées, localisées à la partie nord et est de la zone d’étude proches de la sebkha (Chott El Hodna), plus influencées par la salinité. La partie nord et nord-ouest présente 57.89% des eaux de moyenne conductivité et concerne les eaux minéralisées touchés par la salinité. Cependant 31.58% des eaux localisées à la partie sud sont faiblement minéralisés (Figure III.6).



*Figure III 5. Variation spatiale des teneurs de CE -Mars 2021*

### III.3.3. La température :

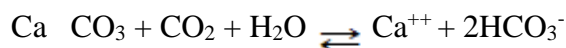
La figure III 6 montre que les valeurs de la température mesurées aux points d'eau 1 et 14 dépassent la norme (25°C) recommandée par l'Organisation mondiale de la santé.



*Figure III 6. Répartition de la température des eaux souterraines -Mars 2021*

### III.3.4. Le Calcium (Ca<sup>++</sup>) :

Le calcium est un élément alcalino-terreux extrêmement répandu dans la nature et en particulier dans les roches calcaires sous forme de carbonates, fréquent dans les roches sédimentaires sous forme aussi de carbonates ; calcite, dolomite et aragonite. Il provient principalement de la dissolution des roches carbonatées sous l'effet de la présence du gaz carbonique. Par ailleurs, le calcium peut également être issu des formations de gypse (CaSO<sub>4</sub>, 2H<sub>2</sub>O), qui sont facilement solubles selon l'équation suivante :



L'examen de la figure III.7, montre que toutes des valeurs des teneurs en calcium dépassent la norme de l'OMS (75 mg/l), sauf au niveau des forages 1,5 et 9. Tandis que la norme Algérienne (NA =200mg/l) est dépassée au niveau des forages 15, 16,17, et 19. Les concentrations les plus élevées sont enregistrées à la partie nord-ouest et est de la zone d'étude, due possiblement à la dissolution des roches carbonatés et gypsifères dans le sens d'écoulement (Figure III.7).

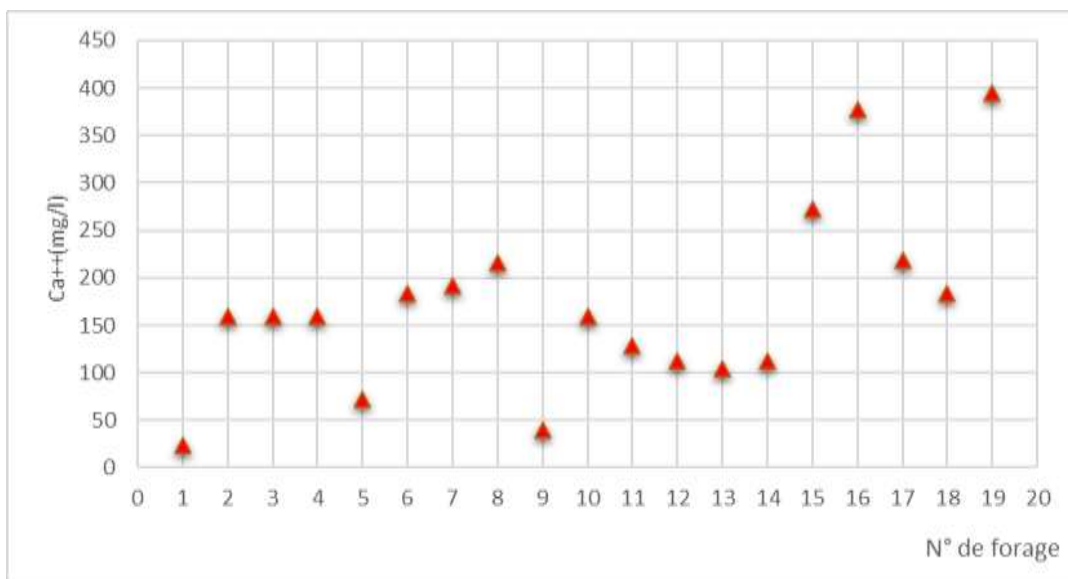


Figure III 7. Répartition des valeurs des teneurs de calcium (Ca<sup>2+</sup>) - Mars 2021

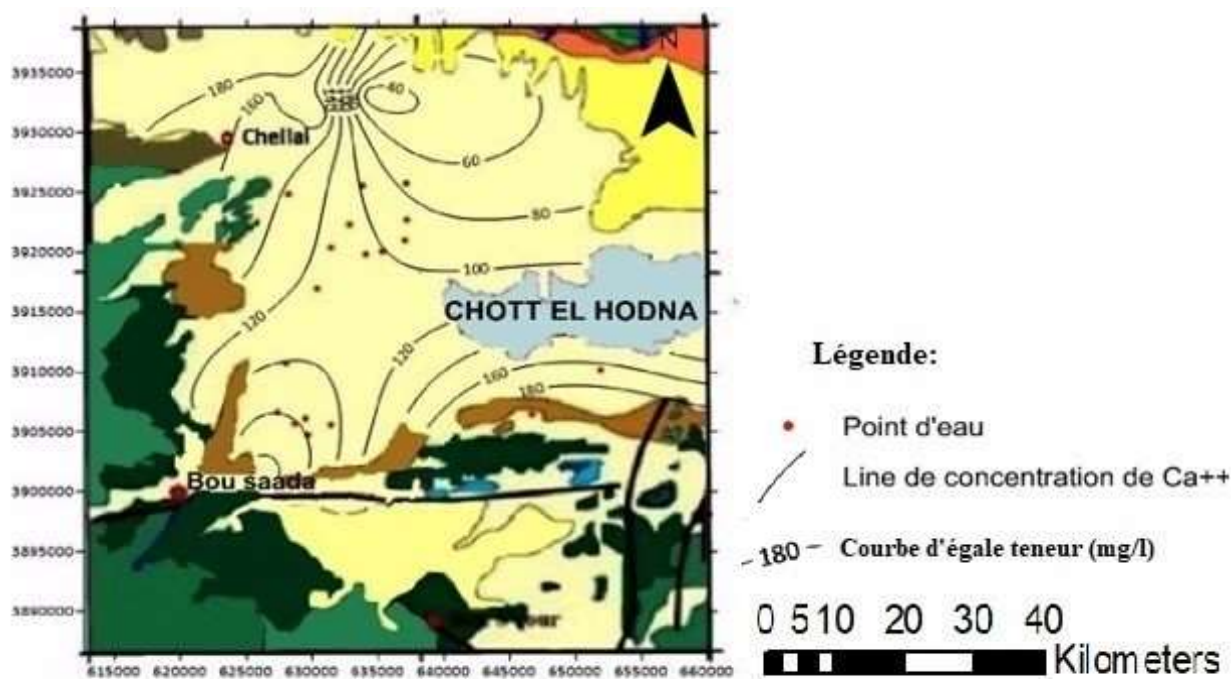


Figure III 8. Variation spatiale des teneurs de calcium (Ca<sup>2+</sup>) - Mars 2021

### III.3.5. Le magnésium Mg<sup>++</sup> :

La teneur en magnésium dépend, comme celle du calcium, de la composition des roches sédimentaires rencontrées. Le magnésium dans l'eau provient de l'attaque par l'acide carbonique des roches magnésiennes et de la mise en solution de magnésium sous forme de carbonate, de bicarbonate et de magnésite.

La figure III.9 montre que les eaux de la plaine nord-est de Bou Saada respectent les normes de l'OMS et Algérienne en ce qui concerne la norme de magnésium (150mg/l), sauf pour le point d'eau 19 qui est dépassée.

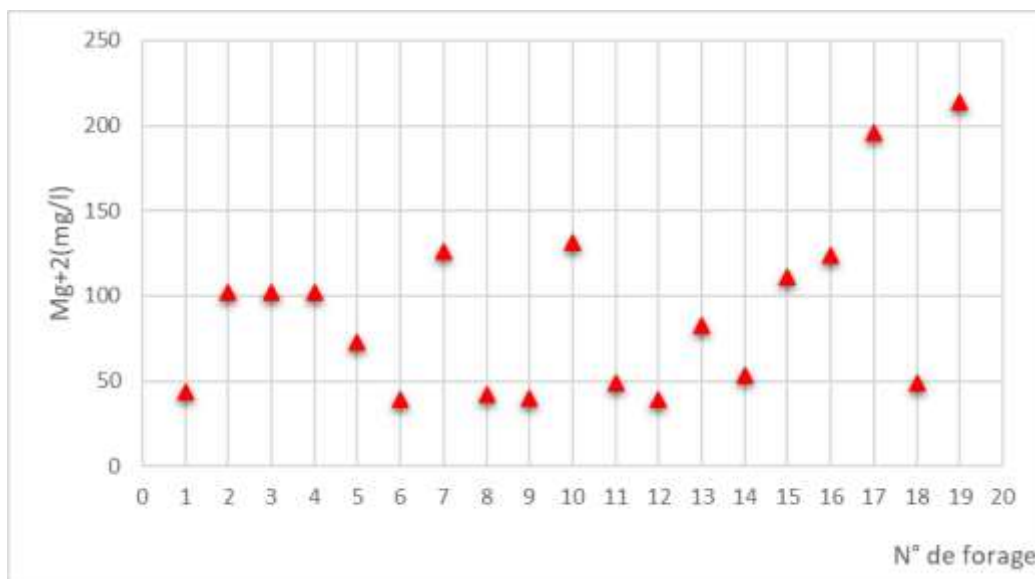


Figure III 9. Répartition des valeurs des teneurs de magnésium (Mg<sup>2+</sup>) -Mars 2021

La valeur maximale 214 mg/l est enregistrée à la partie Est de la zone d'étude due, probablement à la solution de magnésium dans le sens d'écoulement des roches carbonatées et magnésite (Figure III.10).

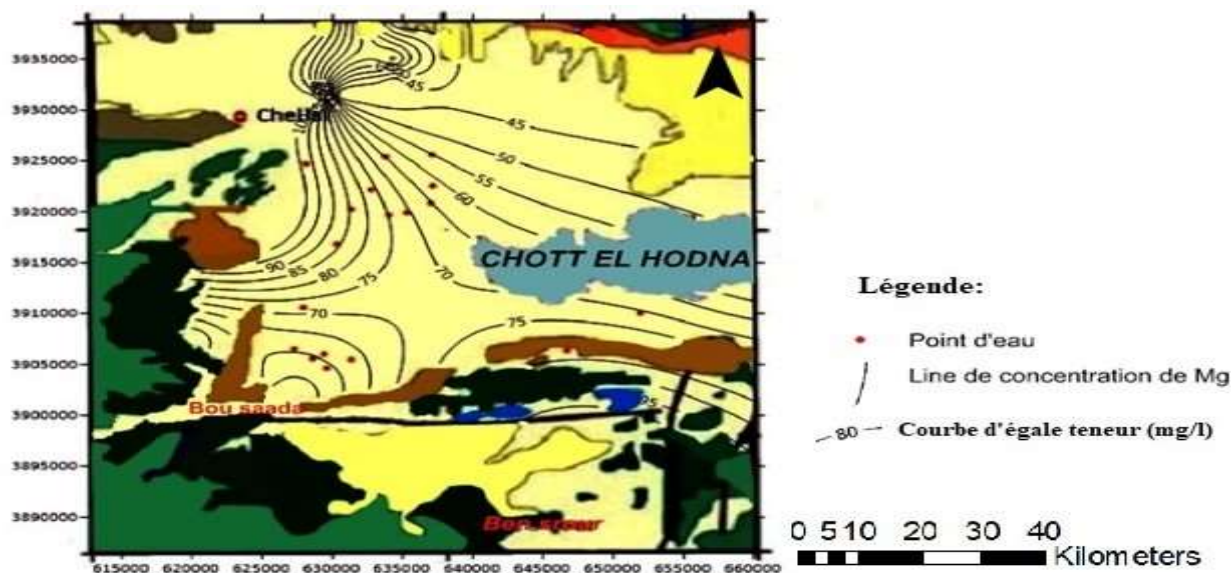
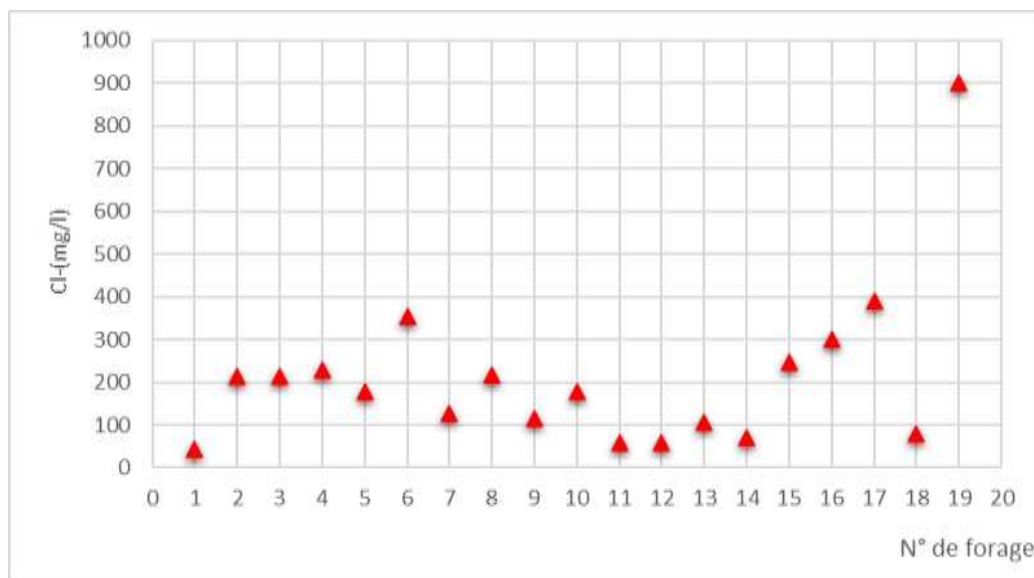


Figure III 10. Variation spatiale des teneurs de magnésium (Mg<sup>2+</sup>) -Mars 2021

### III.3.6. Les chlorures Cl<sup>-</sup> :

Les chlorures peuvent provenir d'une intrusion d'eau marine, ou suite à l'action humaine à partir du soulage des routes, ou par contamination des eaux usées. Ils peuvent provenir également de la dissolution des sels par lessivage des terrains salifères. Les chlorures donnent un goût désagréable et posent le problème de corrosion dans les canalisations et les réservoirs. L'éloignement de la mer, et l'absence des rejets d'origine industrielle laissent supposer une origine géologique en relation avec les formations argileuses, marneuses et salifères triasiques.

D'après la figure III 11, toutes les eaux de la plaine Nord-est de Boussaâda ont des teneurs en chlorures inférieures à la norme maximale admissible de l'OMS (500 mg/l), sauf pour les eaux du forage 19.



**Figure III 11.** Répartition des valeurs des teneurs des chlorures (Cl<sup>-</sup>) -Mars 2021

Les concentrations des chlorures dépassant la norme algérienne 250 mg/l à la partie Nord-ouest et Est de la zone d'étude est concernent les forages 6,16, 17 et 19. Aussi on constate un dépassement de la norme OMS de 500 mg/l au niveau du forage 19. Cet excès des teneurs en chlorures revient possiblement à la dissolution des sels par lessivage des terrains salifères, les rejets et percolation des eaux usées surtout des fosses septiques de nombre élevé dans la région, ainsi de l'intrusion des eaux salines (Figure III.12).

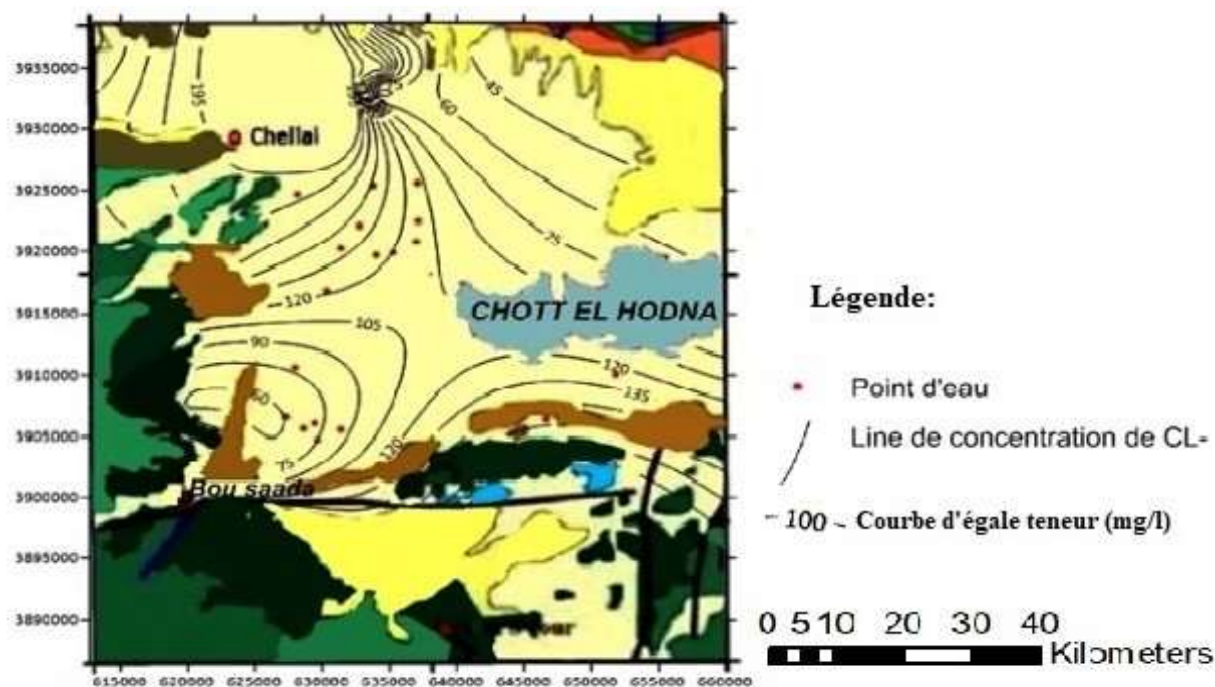
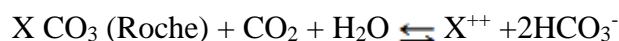


Figure III 12. Variation spatiale des teneurs des chlorures ( $Cl^-$ ) -Mars 2021

### III.3.7. Les Bicarbonates $HCO_3^-$ :

Les bicarbonates résultent de l'équilibre physico - chimique entre la roche, l'eau et le gaz carbonique selon l'équation générale suivante :



Leur origine principale réside dans la dissolution des roches carbonatées, ce qui signifie que leur concentration dans l'eau dépend des paramètres suivants :

- ✓ Concentration du  $CO_2$  dissous
- ✓ Température de l'eau
- ✓ pH de l'eau

Selon la figure III 13, la valeur maximale des bicarbonates est enregistrée au point d'eau 7 avec 427mg/l et la valeur minimale au niveau du point d'eau avec 39mg/l.

Les valeurs élevées des bicarbonates sont enregistré à la partie Ouest de la plaine nord-est de Bou Saada. Cette augmentation est principalement due à la décomposition des roches carbonates et lessivage des sols sédimentaires (Figure III.14).

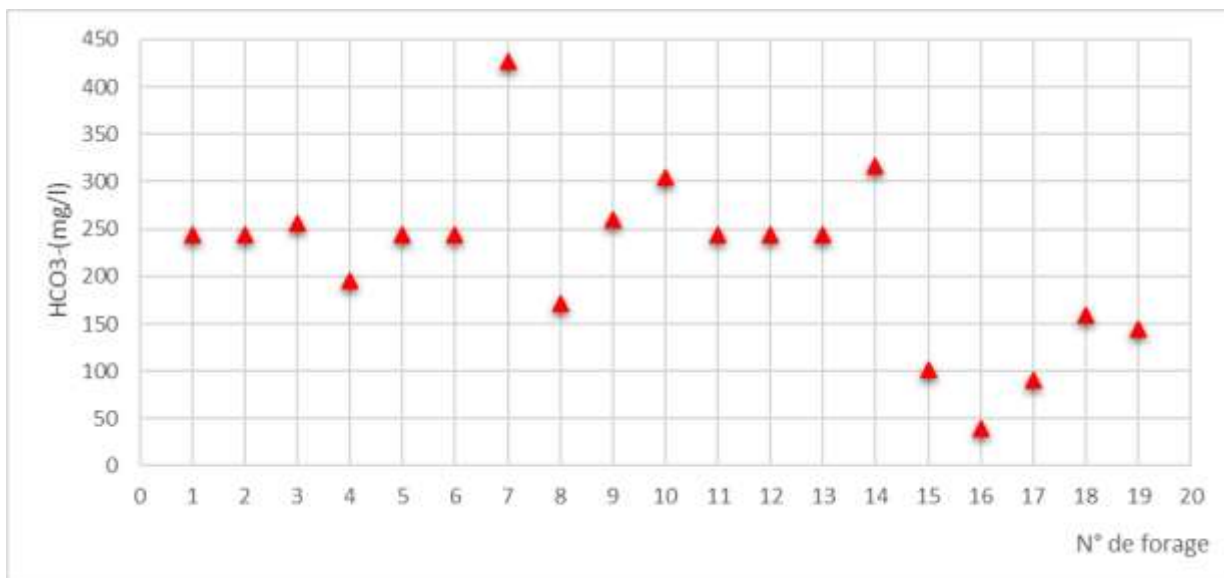


Figure III 13. Répartition des valeurs des teneurs des bicarbonates (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) -Mars 2021

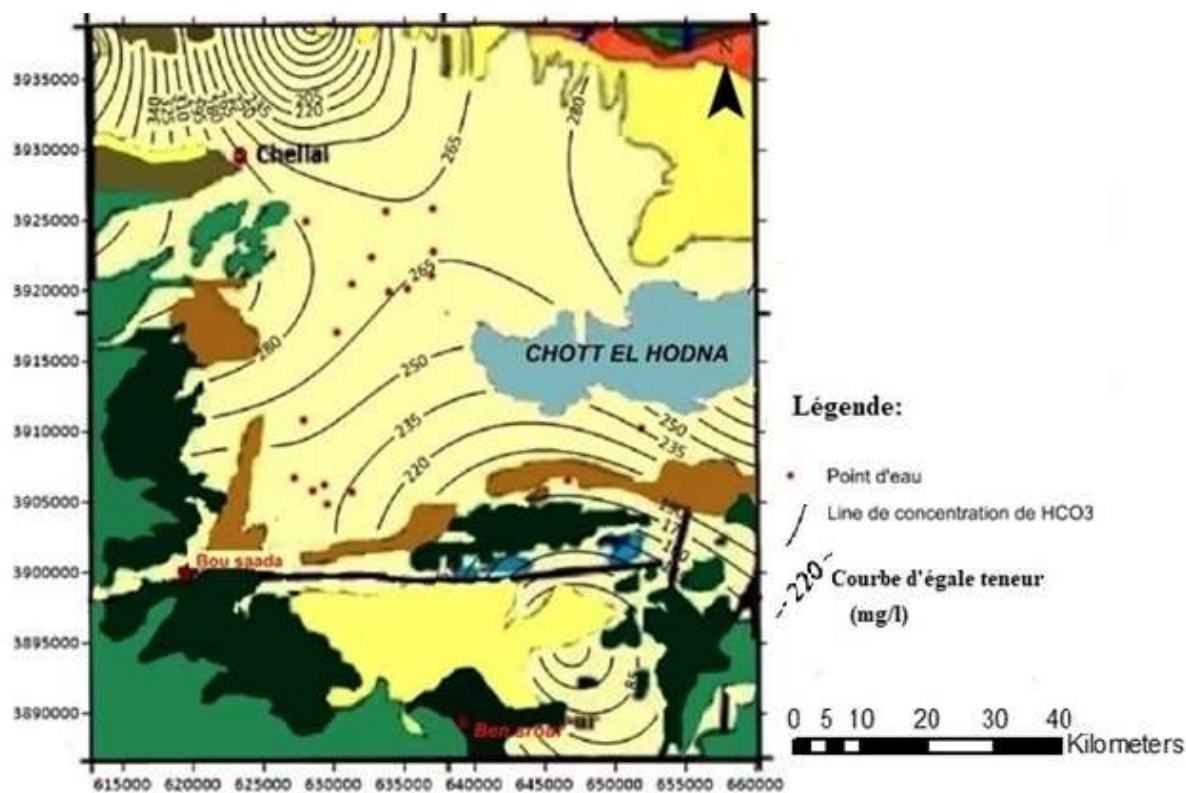


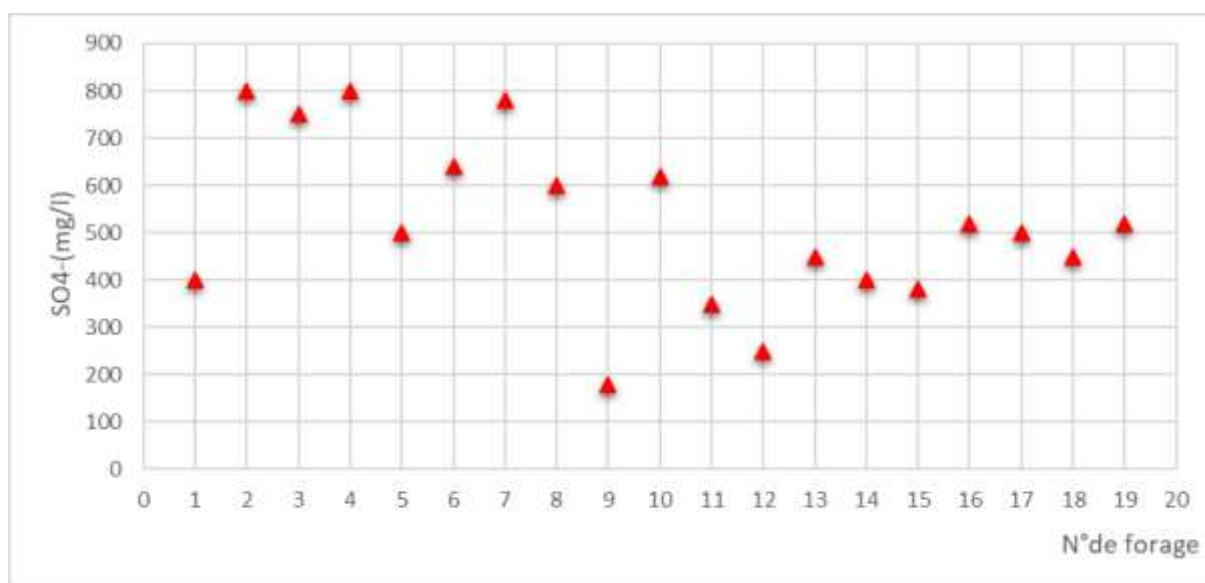
Figure III 14. Variation spatiale des teneurs des bicarbonates (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) -Mars 2021

### III.3.8. Les sulfates SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> :

Les sulfates contenus dans l'eau souterraine résultent de la dissolution du gypse (CaSO<sub>4</sub> 2H<sub>2</sub>O), l'utilisation des engrais chimiques, le lessivage des terrains argileux et marneux.

Elles proviennent également des eaux usées industrielles. De plus l'oxydation de  $H_2S$  et des oxydes de soufre émis dans l'atmosphère entraîne lors de précipitation l'acidification des lacs et des rivières, ainsi qu'une augmentation de la teneur en sulfates. La forte concentration en sulfates provoque de troubles gastro-intestinaux ; aussi elles peuvent donner un goût désagréable à l'eau et créer des dépôts tenaces dans les chaudières.

Après avoir examiné les résultats des analyses chimiques et statistiques (Figure III 15), on constate que 68,42 % des eaux de la plaine nord-est de Bou Saada dépassent la norme de l'Organisation mondiale de la santé OMS (400 mg/l), avec une valeur maximale de 800 mg / l.



**Figure III 15.** Répartition des valeurs des teneurs des sulfates ( $SO_4^{2-}$ ) -Mars 2021

Les valeurs des concentrations élevées dans les eaux de la partie Nord-ouest de la zone d'étude résultent probablement de la dissolution des formations gypsifères, le lessivage des terrains argileux et marneux et l'utilisation des engrais chimiques (Figure III 16).

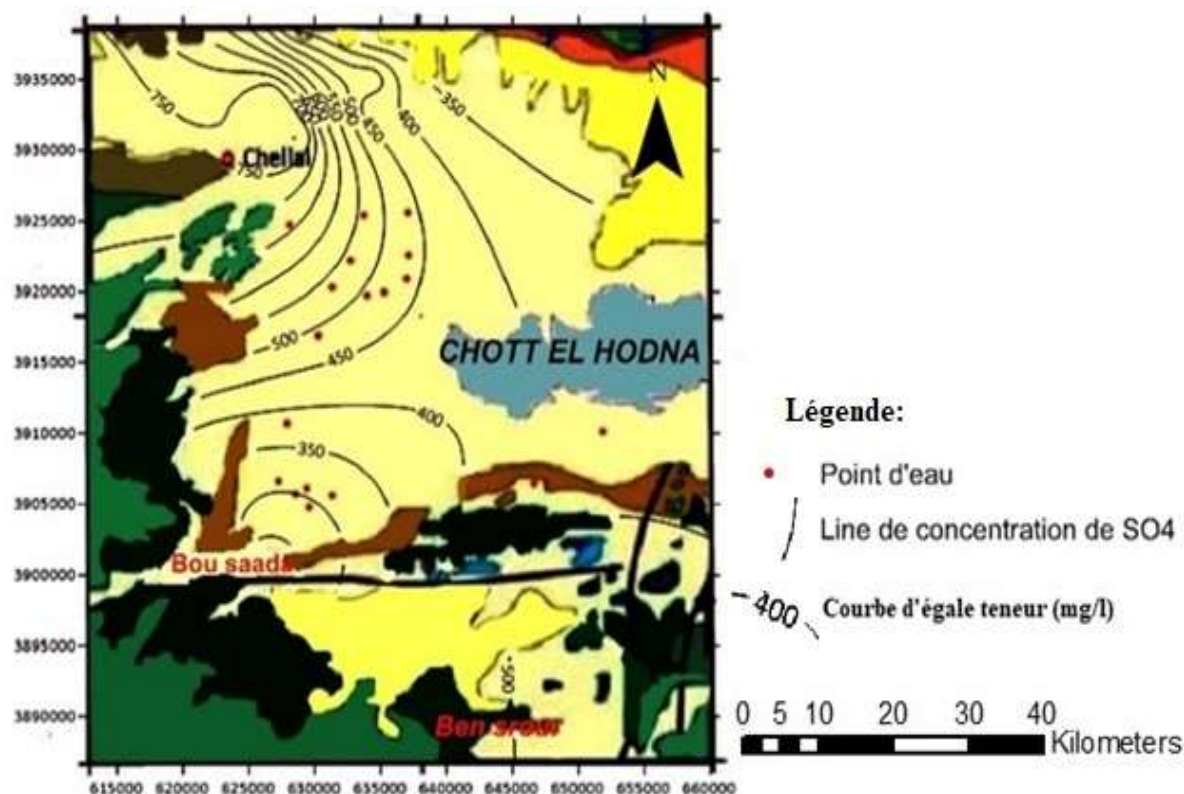


Figure III 16. Variation spatiale des teneurs des sulfates ( $SO_4^{2-}$ ) -Mars 2021

### III.3.9. Le sodium $Na^+$ :

Le sodium est un élément extrêmement répandu dans la nature, en particulier dans l'eau de mer, et il provient également du lessivage ou de la percolation des sols salés. Son rôle en irrigation est essentiel en raison de son influence sur la perméabilité des sols.

D'après les données recueillies, il a été constaté que toutes les eaux de la plaine nord-est de Bou Saada présentent des niveaux de sodium élevés, conformément aux normes établies par l'OMS. Cette observation est probablement attribuable à une augmentation de l'échange fondamental entre les ions sodium et les ions calcium. Voici une représentation graphique illustrant cette relation :

L'examen de la figure III 17, la majorité des points d'eau présentent leurs eaux un niveau de sodium dans la norme de la potabilité (200mg/l), sauf les eaux du point d'eau 19 présentent une teneur en sodium de 211mg/l qui dépasse la norme.

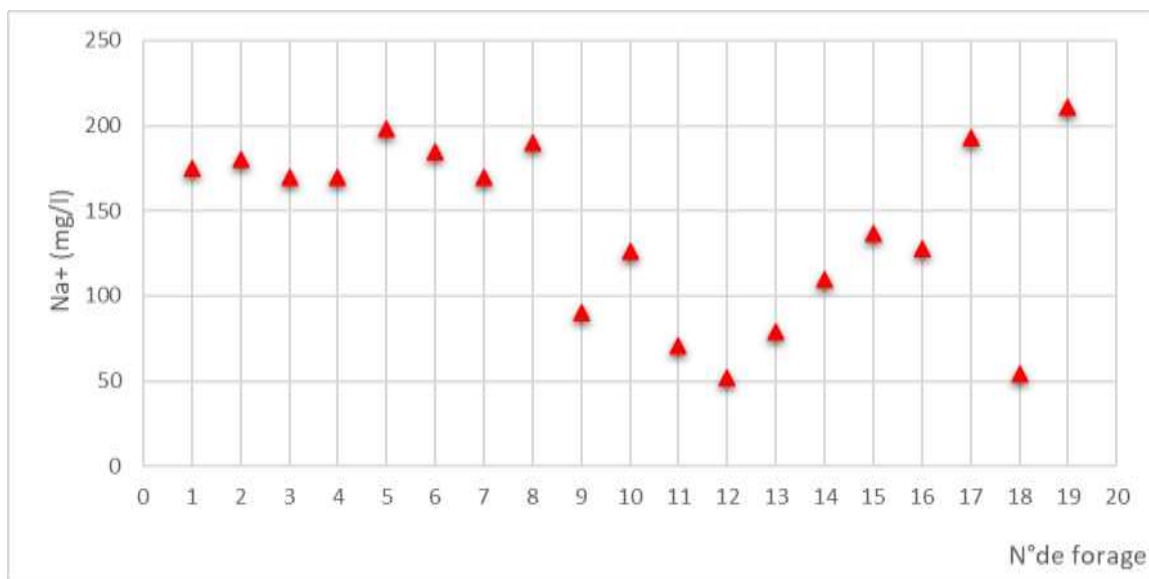


Figure III 17. Répartition des valeurs des teneurs de sodium ( $Na^+$ ) -Mars 2021

Les valeurs élevées de sodium due à l'intrusion des eaux salines de la sebkhia (Chott El Hodna) et au lessivage et percolation des sols salés (Figure III 15).

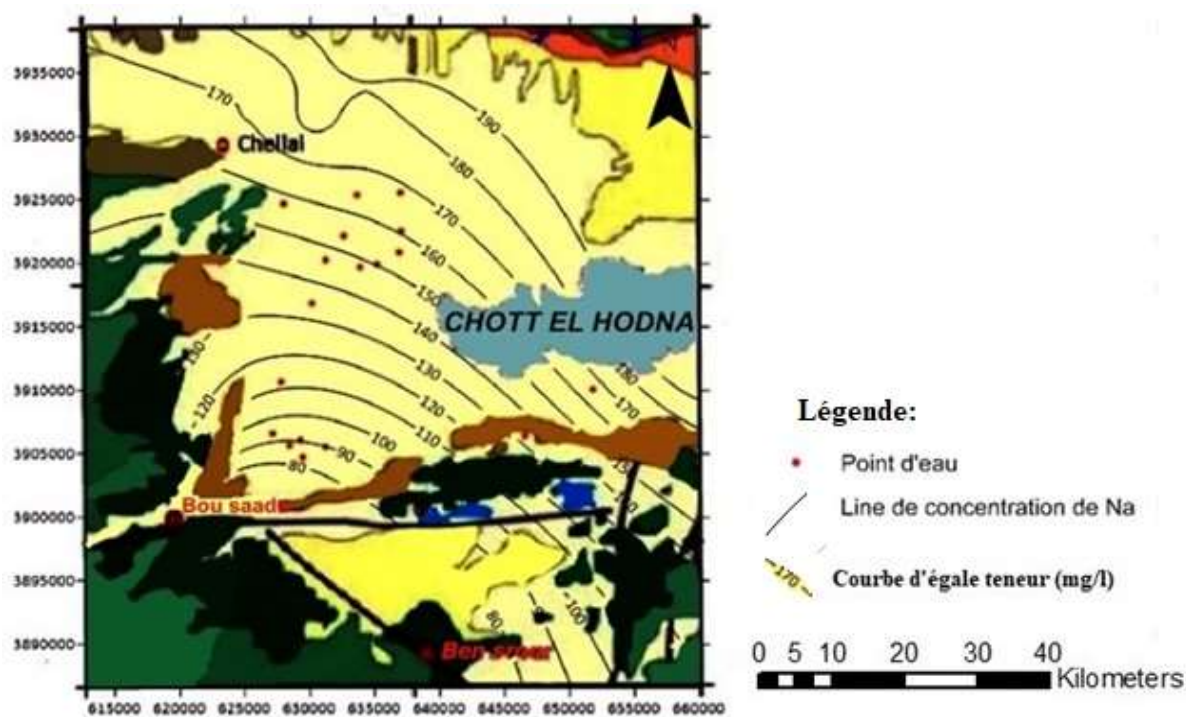


Figure III 18. Variation spatiale des teneurs de sodium ( $Na^+$ ) -Mars 2021

### III.3.10. Le potassium $K^+$

La concentration admissible pour le potassium est de 20 mg/l (OMS), au delà de cette valeur l'eau présente certain gout indésirable.

L'analyse de la figure III 19 révèle que toutes les eaux de la plaine Nord-est de Boussaâda présentent des concentrations de potassium inférieures aux normes de l'OMS et varient de 3 à 8,6 mg/l.

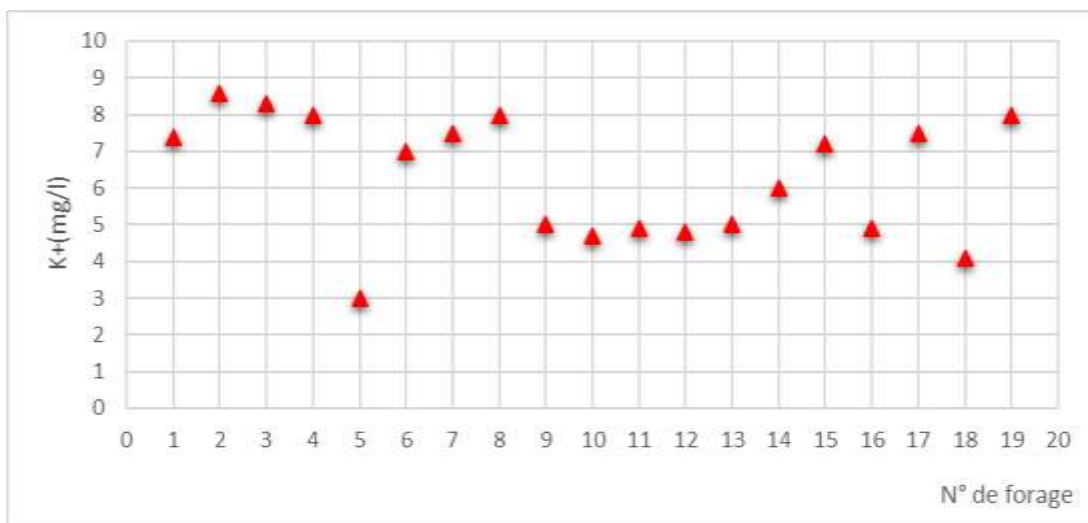


Figure III 19. Répartition des valeurs des teneurs de potassium (K+) -Mars 2021

Les valeurs des concentrations de potassium sont faible et loin du seuil de la norme. On remarque leur augmentation dans le sens d'écoulement (Figure III 20).

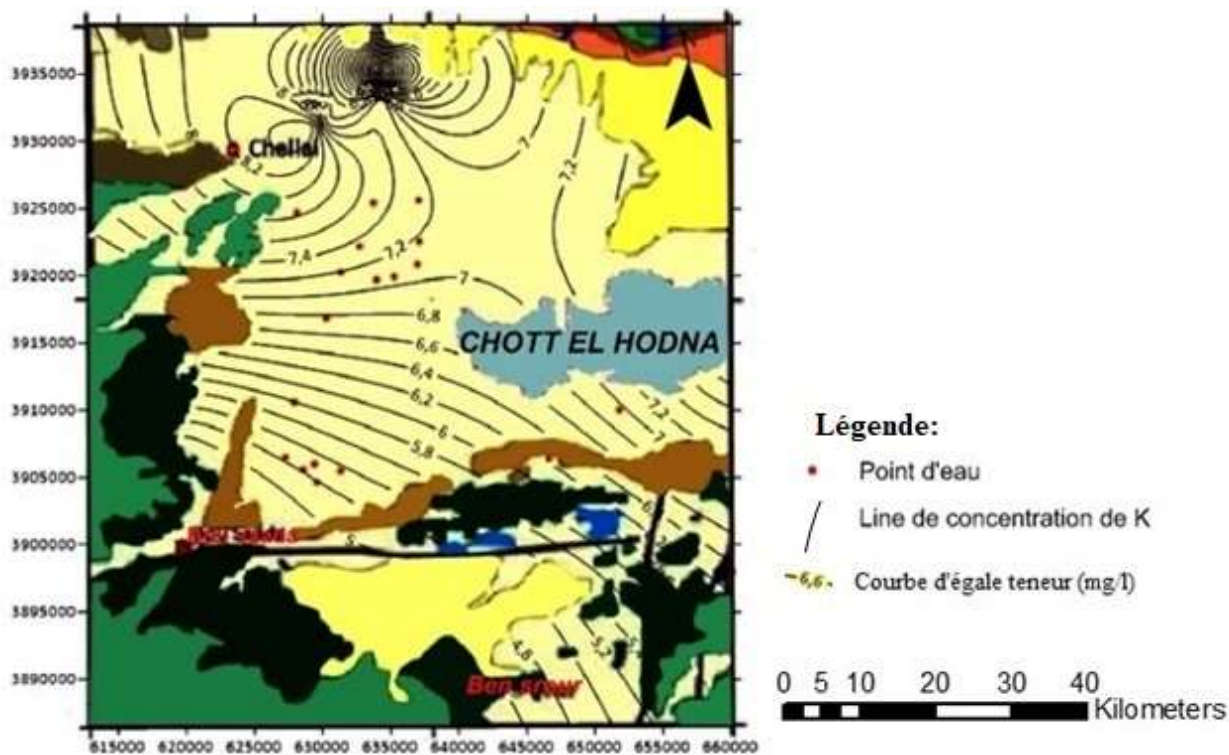
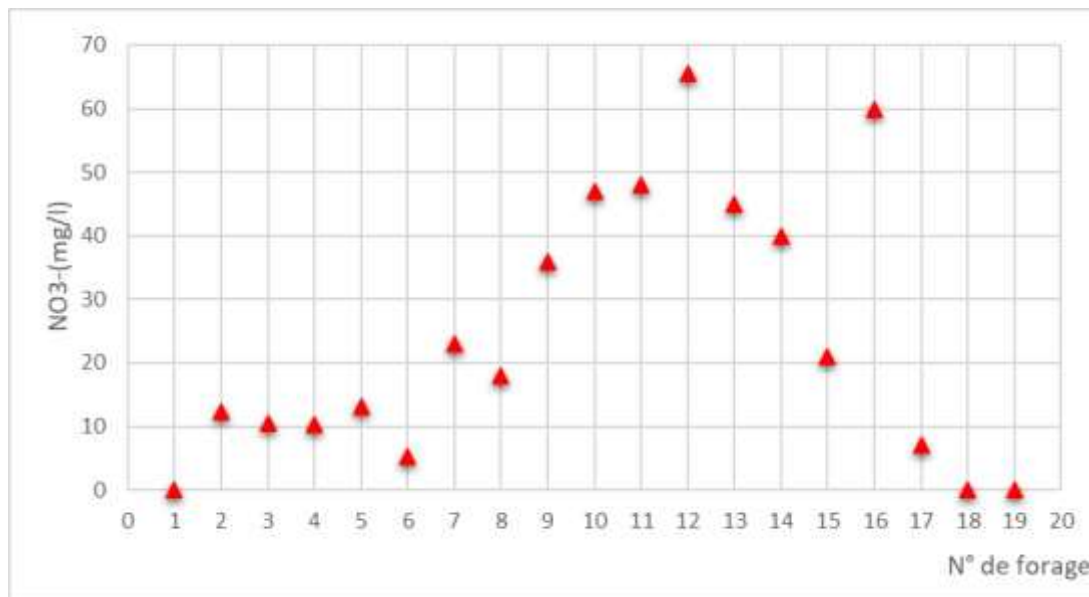


Figure III 20. Variation spatiale teneurs de potassium (K+) -Mars 2021

### III.3.11. Les nitrate $\text{NO}_3^-$ :

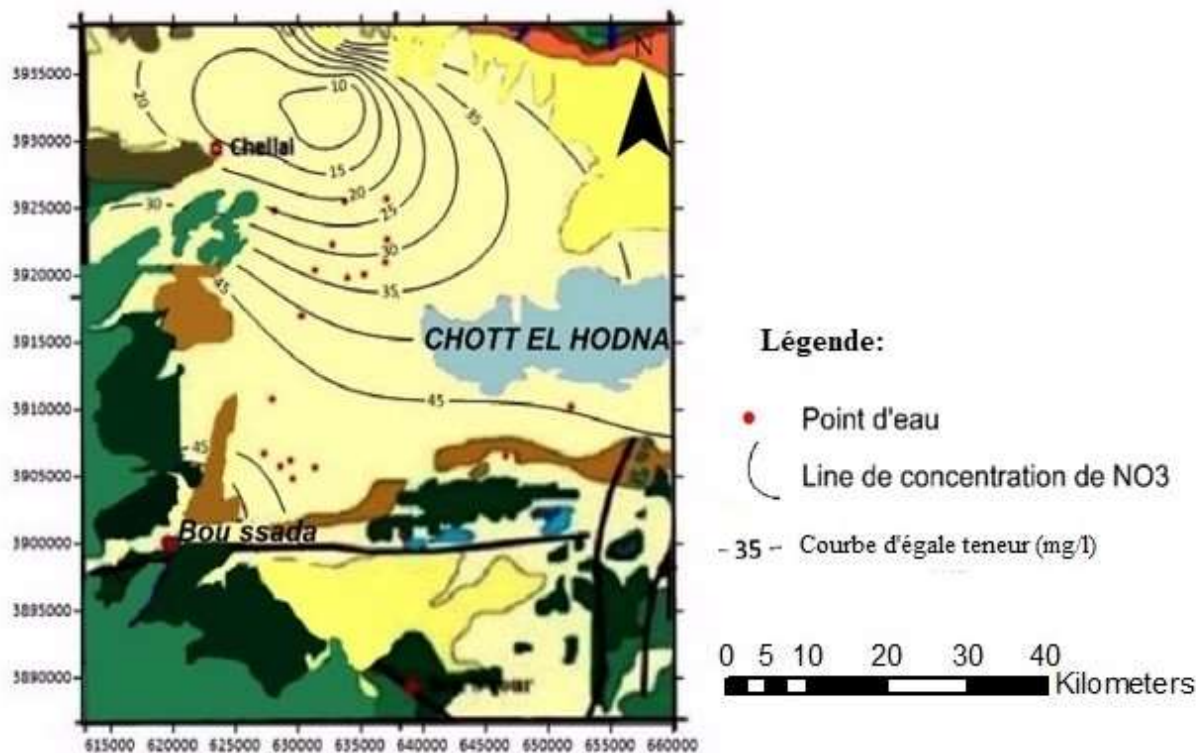
Les nitrates sont des composés naturels présents dans tous les écosystèmes. Ils jouent un rôle essentiel dans la croissance des végétaux, mais ils peuvent devenir nuisibles pour les plantes et les animaux lorsqu'ils sont présents en quantités excessives. Les nitrates sont également utilisés dans la composition des engrais chimiques et organiques tels que les fumiers. Les cours d'eau, les lacs et les étangs peuvent contenir des nitrates provenant de diverses sources, notamment les zones agricoles où les engrais sont largement utilisés, les parcs d'élevage du bétail et les pâturages, ainsi que les stations de traitement des eaux usées, ce qui indique une origine principalement agricole (engrais, élevage) et urbaine (égouts). Les nitrates dans l'eau potable sont mesurés en termes de quantité d'azote présente ou de quantité d'oxygène et d'azote. Les normes pour les nitrates dans l'eau potable sont de 50 mg/l de nitrate mesuré en mg/l de nitrate  $\text{NO}_3$ , lorsque l'oxygène est mesuré comme de l'azote. Un excès de nitrates et le dépassement de ces normes peuvent présenter un danger potentiel pour la santé humaine, en particulier pour les nourrissons.

Les résultats obtenus à partir de la figure III 21, montrent que les eaux de la plaine nord-est de Bou Saada présentent des concentrations en teneurs des nitrates dépassant les normes établies par l'OMS et cela il est marqué aux points d'eau 12, 16.



**Figure III 21.** Répartition des valeurs des teneurs en Nitrate  $\text{NO}_3^-$  -Mars 2021

Le dépassement de la norme de l'OMS en teneurs des nitrates (50 mg/l) est marqué au niveau de la partie Sud de la sebkha (Chott El Hodna) dans la plaine agricole El Maadher. Cette augmentation est principalement due à l'utilisation fertilisants (Engrais chimiques, fumiers,...), les eaux usées (fosses septiques) et le lessivage des terres agricoles pendant la période pluviale.



*Figure III 22. Variation spatiale teneurs des teneurs en Nitrate NO<sub>3</sub><sup>-</sup> -Mars 2021*

### III.4. Détermination et répartition des faciès chimiques des eaux souterraines

La détermination des faciès chimiques des eaux souterraines de la zone Nord-est de Boussaâda a été effectué par le diagramme de piper et celui de Schoeller – Berkloff.

#### III.4.1. Le diagramme de Piper

Le diagramme de Piper a été largement utilisé pour montrer les classifications de l'eau et les tendances de la qualité de l'eau pour des groupes d'échantillons (Dalton et al. 1978).

L'analyse du faciès chimique des eaux souterraines de la zone Nord-est de Boussaâda (campagne Mars 2021) par le diagramme de Piper (Figure III 23), a montré trois faciès chimiques ; le premier Chloruré calcique et magnésien, le deuxième Sulfaté sodique et le dernier Bicarbonaté sodique.

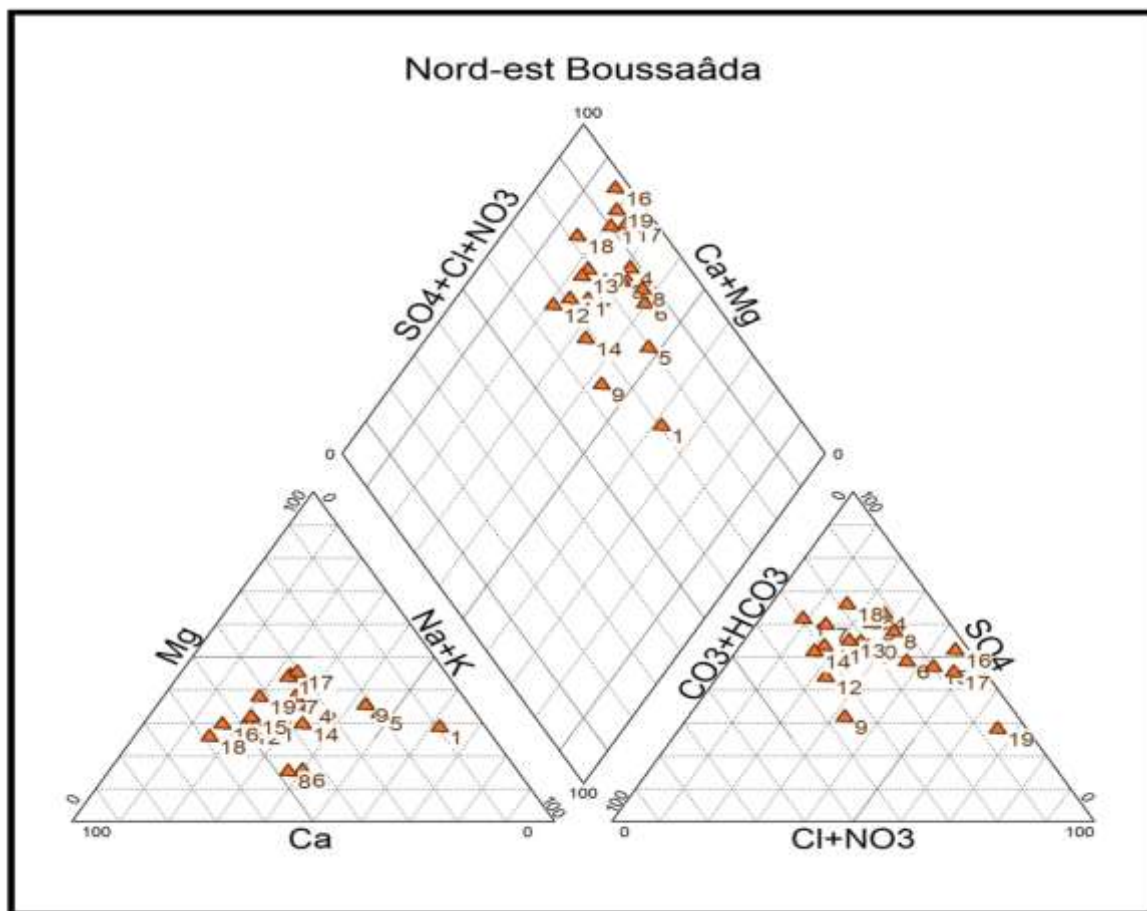


Figure III 23. Diagramme de piper

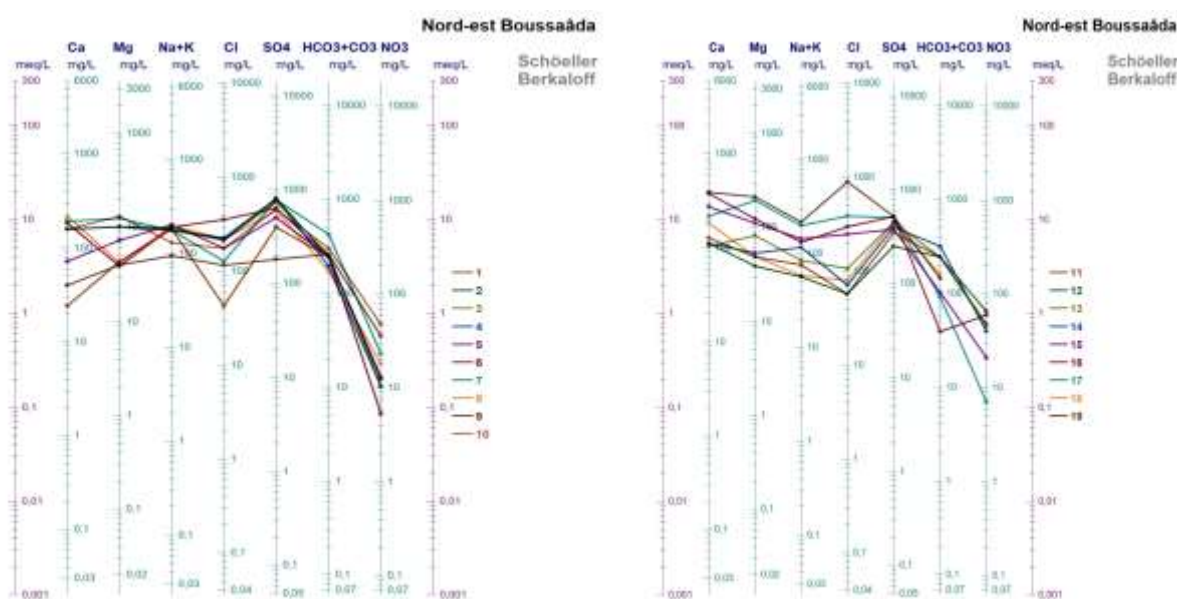
#### III.4.2. Le diagramme de Schoeller - Berkloff

Le diagramme de H. Schoeller (1932), révisé par Berkloff en 1952, est constitué de sept échelles logarithmiques verticales représentant les principaux ions analysés dans l'eau. Les données ont été représentées sur le diagramme (Figure III 23).

L'analyse des résultats obtenus révèle que eaux de la zone d'étude présentent trois familles de faciès chimiques distinctes (Tableau III 2). La première famille est caractérisée par un faciès chloruré calcique et magnésien avec 10.52% de la totalité des points d'eau. La deuxième famille montre une dominance d'ions sulfatés sodiques avec 84.21%. Enfin, la dernière famille se distingue par une prévalence d'ions bicarbonatés sodiques avec 5.26% de l'ensemble des points d'eau.

**Tableau III 2.** *Faciès chimiques des eaux selon la méthode de Schoeller – Berkaloff*

Compagne chimique	Faciès chimiques		Effectif	Pourcentage (%)		
Familles de faciès chimiques	Famille Chloruré	des	Chloruré calcique	1	5,26	10,53
			Chloruré magnésien	1	5,26	
	Famille des Sulfaté		Sulfaté sodique	16	84,21	84,21
	Famille des eaux Bicarbonatées		Bicarbonaté sodique	1	5,26	5,26

**Figure III 24.** *Diagramme de Schoeller – Berkaloff*

### III.5. Analyses de la qualité des eaux par les méthodes statistiques multivariées

#### III.5.1. Analyse en composantes principales (ACP)

L'analyse en composantes principales, souvent notée ACP. C'est une méthode statistique descriptive multidimensionnelle, dont l'objectif est de présenter sous une forme graphique, le maximum d'informations contenu dans un tableau de données. Ce tableau est constitué, en lignes par des individus (Observations : Forages) et en colonnes par des variables quantitatives (Eléments physico-chimiques) : Le but recherché est de déterminer la structure des variables (familles) et leur répartition.

### III.5.1. 1. Application de l'ACP sur des données chimiques de la zone d'étude :

L'ACP a été appliquée sur les données de la zone d'étude pour la période de mars 2021, sur 19 échantillons et 10 variables, notamment la conductivité électrique (CE), le  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  et la salinité (S), à l'aide du logiciel XLSTAT 2023. Cette analyse vise à synthétiser et classer un ensemble important de données afin d'identifier les principaux facteurs responsables de l'évolution simultanée des variables et de leur relation réciproque (Biémi, 1992). Elle permet également de mettre en évidence les similarités entre deux ou plusieurs variables chimiques au cours de leur évolution.

#### ✓ Matrice de corrélation :

La corrélation des éléments est distinguée par une matrice carrée caractérisée selon un coefficient de corrélation entre les variables, deux à deux (Degré d'association entre deux variables), (Wuersch, 2001).

Les différentes corrélations entre les variables deux à deux peuvent être déterminées sur la base du coefficient de corrélation significatif (critique) tiré de la table de Bravais-Pearson en fonction du nombre d'observations et de variables mis en jeux (Lefebvre, 1988). La corrélation entre les paramètres physico-chimiques dans les eaux souterraines permet de comprendre certains phénomènes résultant de l'interaction entre l'eau et la roche, et offre une approche pour expliquer l'origine commune de certains de ces paramètres. Du tableau. III.3, ce coefficient sera égal à  $r_c = 0,5$ . La matrice de corrélation a été réalisée pour l'ensemble des prélèvements d'eau analysés (Tableau. III.4).

**Tableau III 3.** Coefficient de corrélation linéaire selon Bravais- Pearson

v / e	0.1	0.05	0.02	v / e	0.1	0.05	0.02
1	0.9877	0.9969	0.9995	17	0.3887	0.4555	0.5285
2	0.9000	0.9500	0.9800	18	0.3783	0.4438	0.5155
3	0.8054	0.8783	0.9343	19	0.3687	0.4329	0.5034
4	0.7293	0.8114	0.8822	20	0.3598	0.4227	0.4921
5	0.6694	0.7545	0.8329	25	0.3233	0.3809	0.4451
6	0.6215	0.7067	0.7887	30	0.2960	0.3494	0.4093
7	0.5822	0.6664	0.7498	35	0.2746	0.3246	0.3810
8	<b>0.5494</b>	0.6319	0.7155	40	0.2573	0.3044	0.3578
9	0.5214	0.6021	0.6851	41	0.2428	0.2875	0.3384
10	0.4973	0.5750	0.6581	50	0.2306	0.2732	0.3218
11	0.4762	0.5529	0.6339	60	0.2108	0.2500	0.2948
12	0.4575	0.5324	0.6120	70	0.1954	0.2319	0.2737
13	0.4409	0.5139	0.5923	80	0.1829	0.2172	0.2565
14	0.4259	0.4973	0.5742	90	0.1726	0.2050	0.2422
15	0.4124	0.4821	0.5577	100	0.1638	0.1946	0.2301
16	0.4000	0.4683	0.5425				

v: le degré de liberté.  $v = n-p-1$  avec n: le nombre d'observations.

p: le nombre de variables explicatives. e : le risque d'erreur.

**Tableau III.4:** Matrice de corrélation des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines de la zone Nord-est de Bousaada- compagnie Mars 2021-

Variabes	S	CE	Ca	Mg	Na	K	HCO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>
S	<b>1</b>									
CE	0,463	<b>1</b>								
Ca	0,186	<b>0,717</b>	<b>1</b>							
Mg	0,299	<b>0,870</b>	<b>0,669</b>	<b>1</b>						
Na	<b>0,788</b>	<b>0,643</b>	0,294	0,477	<b>1</b>					
K	<b>0,532</b>	0,483	0,292	0,352	<b>0,630</b>	<b>1</b>				
HCO <sub>3</sub>	0,113	-0,347	<b>-0,598</b>	-0,313	-0,089	-0,039	<b>1</b>			
Cl	0,389	<b>0,929</b>	<b>0,750</b>	<b>0,740</b>	<b>0,581</b>	0,399	-0,441	<b>1</b>		
SO <sub>4</sub>	<b>0,707</b>	0,363	0,266	0,352	<b>0,609</b>	<b>0,567</b>	0,180	0,229	<b>1</b>	
NO <sub>3</sub>	<b>-0,536</b>	-0,359	-0,069	-0,208	<b>-0,654</b>	<b>-0,522</b>	0,111	-0,384	-0,411	<b>1</b>

D'après les résultats obtenus on peut distinguer selon le coefficient de corrélation critique des ensembles des couples dépendants et indépendants (Tableau III.5).

**Tableau III 5: Ensembles des couples dépendants et indépendants.**

Compagne – Mars 2021		Coefficient de corrélation	Qualité de corrélation
Couples	CE-Cl	> 0,90	Très bonne
	CE-Mg	0,80-0,90	bonne
	S-Na, S-SO <sub>4</sub> , CE-Ca, CE-Na, Ca-Mg, Ca-Cl, Mg-Cl, Na-K, Na-SO <sub>4</sub> , Na-NO <sub>3</sub>	0,60-0,80	significative
	S-K, S-NO <sub>3</sub> , Ca-HCO <sub>3</sub> , Na-Cl, K-SO <sub>4</sub> , K-NO <sub>3</sub>	0,50-0,60	moyenne
	Couples indépendants	< 0,5	non significative

#### ✓ Etude des liaisons significatives entre les éléments physico-chimiques

L'examen du tableau III 5, montrent une très bonne corrélation entre la conductivité électrique (CE) et les ions de Cl<sup>-</sup> avec  $r > 0,9$ , cela explique possiblement l'intrusion des eaux salées. Comme nous remarquons une bonne corrélation aussi de CE avec les ions de Mg ( $0,8 < r < 0,9$ ) et des corrélations significative ( $0,6 < r < 0,8$ ) entre les couples (S-Na, S-SO<sub>4</sub>, CE-Ca, CE-Na, Ca-Mg, Ca-Cl, Mg-Cl, Na-K, Na-SO<sub>4</sub>, Na-NO<sub>3</sub>). Ce qui indique la contribution directe de ces éléments dans la salinité des eaux souterraines de la zone nord-est de Bousaada. La corrélation entre Ca<sup>2+</sup> et Mg<sup>2+</sup> explique possiblement la dissolution de la calcite et de la dolomite due au contact eau –roches carbonatés de l'aquifère. Les ions moyennement corrélés (S-K, S-NO<sub>3</sub>-Ca-HCO<sub>3</sub>, Na-Cl, K-SO<sub>4</sub>) renseignent probablement sur l'acquisition des ions de (Sodium, Calcium).

#### ✓ Corrélation entre les variables et les facteurs

La contribution de chaque variable dans la formation d'une composante principale est donnée par le coefficient de corrélation entre la variable et l'axe considéré. Plus le coefficient est important, plus la variable contribue à la formation de l'axe. Les résultats sont résumés dans le Tableau (III.6).

**Tableau.III.6** : Corrélations entre les variables et les facteurs

	<b>F1</b>	<b>F2</b>
<b>S</b>	<b>0,694</b>	-0,560
<b>CE</b>	<b>0,903</b>	0,282
<b>Ca<sup>2+</sup></b>	<b>0,681</b>	0,588
<b>Mg<sup>2+</sup></b>	<b>0,774</b>	0,375
<b>Na<sup>+</sup></b>	<b>0,834</b>	-0,381
<b>K<sup>+</sup></b>	<b>0,687</b>	-0,349
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	-0,323	<b>-0,639</b>
<b>Cl<sup>-</sup></b>	<b>0,848</b>	0,382
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	<b>0,622</b>	-0,522
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	<b>-0,592</b>	0,372

- Les valeurs en "Gras" indiquent les variables corrélées -

Les résultats des ACP en se basant sur le coefficient de corrélation critique de Pearson de  $r=0.5$  (Tableau. III.2), montrent les facteurs significatifs qui expriment l'ensemble de la variance (Tableau. III.7) : Le premier facteur exprime 46,27 % de la variance totale, corrélé et chargé positivement par les éléments : S, CE, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Ce facteur symbolise les éléments évaporitiques et carbonatés résultant de la dissolution de minerais et lessivage des terrains chargés en sels. Comme il est chargé négativement par la pollution anthropique (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Le second facteur est caractérisé par des chargements positifs de (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) et explique 27,19% de la variance totale, ce facteur représente les eaux profondes caractérisées par dissolution importante de formations carbonatées et influencé par la pollution des nitrates, possiblement d'origine agricole due à l'eau d'irrigation et les eaux usées.

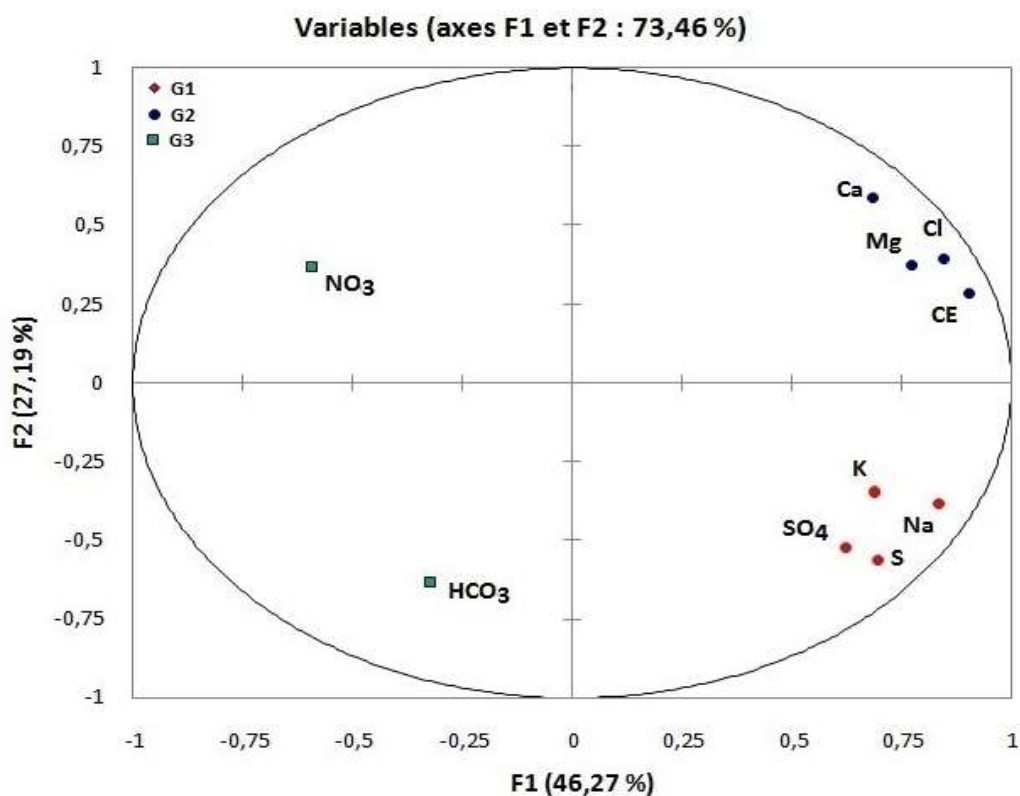
**Tableau.III.7** : Pourcentage de variance

<b>Facteur (Axe)</b>	<b>F1</b>	<b>F2</b>
<b>Valeurs propres</b>	5,09	2,99
<b>% Variance exprimée</b>	46,27	27,19
<b>% Variance cumulée</b>	46,27	73,46

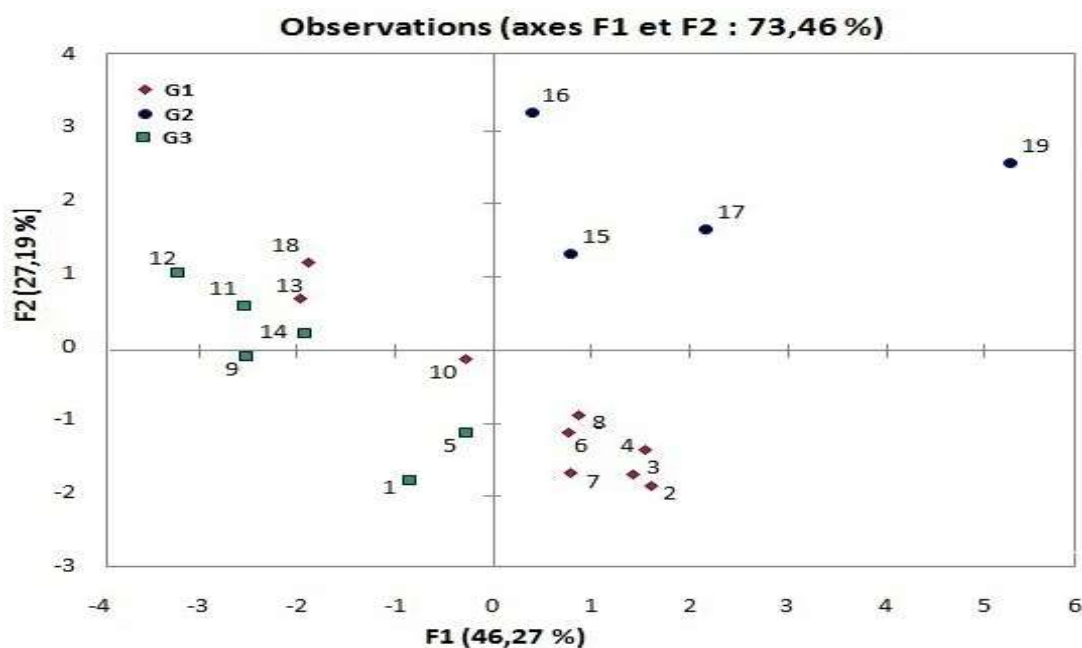
✓ **Etude des observations ( Forages ) :**

La projection des observations sur le plan (F1-F2), explique 73,46 % de la variance totale et permis d'identifier trois groupes principaux des eaux souterraines.

- Le premier groupe (G1 :  $\text{SO}_4$ , Na, K, Salinité) est caractérisé par le faciès Sulfaté et influencé par la salinité, renferme les points d'eau (G1 : F2, F3, F4, F6, F7, F8, F10, F13 et F18).
- Le second est minéralisé, caractérisé par le faciès Chloruré (G2 : Cl, Ca, Mg, CE) et comporte les points d'eau (G2 : F15, F16, F17, F19).
- Le dernier (G3 :  $\text{HCO}_3$ ,  $\text{NO}_3$ ) est carbonaté touché par la pollution des nitrates et concerne les points d'eau (G3 : F1, F5, F9, F11, F12, F14), (Figures, 24 et 25).



*Figure III 25. Projection des variables sur le plan factoriel – F1-F2-*



*Figure III 26. Représentation graphique des Observations (Forages).*

### III.5.2. Analyse par la méthode de classification ascendante hiérarchique (CAH) :

La méthode de classification ascendante hiérarchique (CAH) est basée sur le regroupement des objets ou de données dans des classes à partir des similarités ou des dissimilarités entre ces objets que l'on veut regrouper. L'un des résultats de cette méthode est le dendrogramme, qui permet de visualiser le regroupement progressif des données. On peut alors faire une idée d'un nombre adéquat de classe dans lesquelles les données peuvent être regroupées.

Le choix de cette méthode a pour objectif de déterminer si les échantillons peuvent être regroupés dans des groupes hydrochimiques statistiquement distincts, qui peuvent être significatifs dans le contexte géologique.

#### Principe de la méthode :

La classification est effectuée en regroupant les échantillons en fonction de leur 'similitude' basée sur la comparaison entre leurs paramètres multiples. Deux modes (Q-mode et R-mode) peuvent être appliqués pour identifier les faisceaux de dendrogramme.

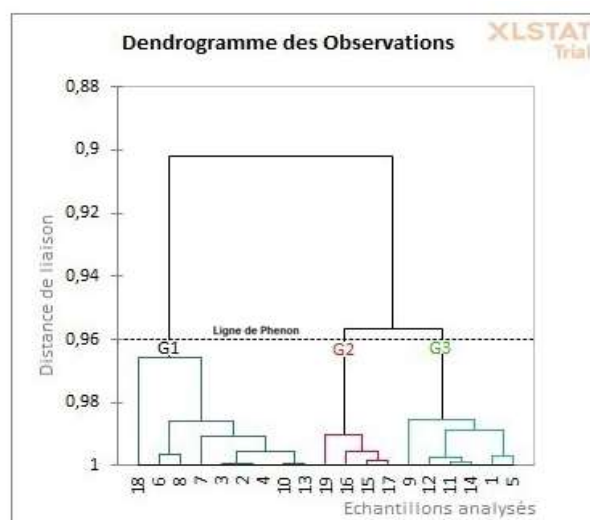
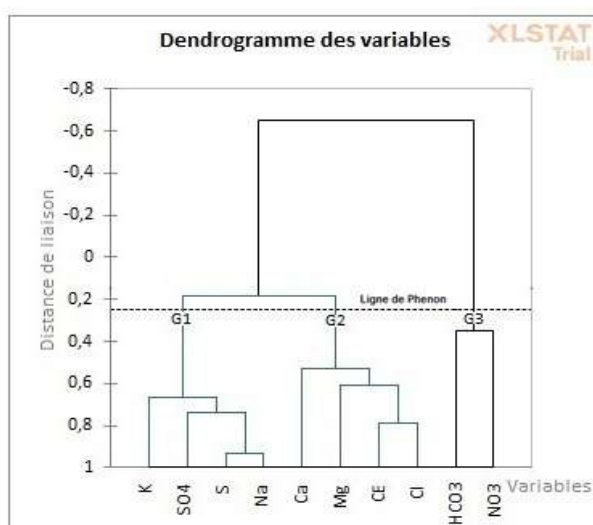
Le R-mode est habituellement appliqué aux variables de qualité de l'eau pour indiquer les interactions entre elles, alors que le Q-mode indique les interactions entre les échantillons étudiés. Un schéma (dendrogramme) de classification en utilisant la distance euclidienne (distance en ligne

droite entre deux points dans l'espace c-dimensions défini par des variables c) pour la mesure de similarité, produit les groupes les plus distinctifs où chaque membre dans le groupe est plus similaire à ses membres que tout membre en dehors du groupe. Comme il n'y a pas de test pour déterminer le nombre optimal des groupes dans l'ensemble de données, l'inspection visuelle est le seul critère à sélectionner les groupes dans le dendrogramme. La ligne de Phénion a été choisie à une distance de liaison par laquelle on peut distinguer les groupes en termes d'hydrochimie Variables.

### III.5.2.1. Application de CAH sur les données de la zone d'étude

Dans cette application on utilise pour classer les échantillons en groupes hydrochimiques distinctes la méthode d'agrégation de Ward et Les comparaisons sont basées sur des paramètres multiples de différents échantillons et les échantillons ont été regroupés en fonction de leur 'similitude' entre eux.

Les dix variables hydrochimiques mesurées (CE,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , S et  $\text{NO}_3^-$ ), ont été classées par CAH et les résultats sont présentés en dendrogrammes (R-mode -Figure. III 26, Q-mode- Figure. III 27).



**Figure III27.** Dendrogramme de faisceaux des variables (R-mode)

**Figure III28.** Dendrogramme de faisceaux des Observations (Q-mode)

L'analyse des dendrogrammes R-mode et Q-mode permet de distinguer trois groupes comme ceux déterminés par l'ACP et les eaux souterraines de la zone Nord-est de Boussaâda peuvent être rassemblés en trois groupes :

**Groupe 1** : représente le groupe minéralisé ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  et S), caractérise les eaux des forages (F2, F3, F4, F6, F7, F8, F10, F13, F18). Ces forages sont localisés à la partie Nord-ouest de la zone d'étude et à concernent les eaux caractérisées par le faciès sulfaté et influencées par la salinité du lac salé (Chott El Hodna).

**Groupe 2** : représente le groupe minéralisé ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et CE), représente les eaux les plus minéralisées des forages (F15, F16, F17, F19), résultant de la dissolution et le lessivage dans le sens d'écoulement, caractérisées par le faciès Chloruré.

**Groupe 3** : représente les eaux carbonatées influencées par la pollution des nitrates, caractérise les eaux des forages (F1, F5, F9, F11, F12, F14).

### III.6. Indice d'échange de base (i.e.b) :

L'indice d'échange de base défini par Schoeller en 1934 est le rapport entre les ions échangés et les ions de même nature primitivement existants dans l'eau. Il est obtenu par la relation suivante :

$$i.e.b1 = \frac{rCl^- - r(Na^+ + K^+)}{rCl^-}$$

Si l'i.e.b est négatif, les ions  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{Mg}^{++}$  de l'eau sont échangés contre les ions  $\text{K}^+$  et  $\text{Na}^+$  des formations encaissantes. Par contre si l'i.e.b est positif, les ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  de l'eau sont remplacés par les ions  $\text{Mg}^{++}$  et  $\text{Ca}^{++}$  des formations encaissantes. Dans le cas où l'i.e.b est négatif c'est-à-dire lorsqu'il y a échange des alcalino-terreux de l'eau contre les alcalins des permetolites, il est préférable de calculer l'i.e.b par la formule suivante :

$$i.e.b2 = \frac{rCl^- - r(Na^+ + K^+)}{rSO_4^{--} + rHCO_3^- + rNO_3^-}$$

L'utilisation de cet indice est importante car il met en évidence les modifications du chimisme de l'eau au cours de son trajet souterrain.

L'interprétation des données des indices d'échange de bases (IEB) calculés (Tableau III 8) révèle que la majorité des eaux souterraines de la plaine de Nord-est Boussaada présentent un IEB positif. Cela indique que les ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  de l'eau sont remplacés par les ions  $\text{Mg}^{++}$  et  $\text{Ca}^{++}$  provenant des formations géologiques environnantes. Cette substitution explique la présence du faciès calcique et magnésien dans les eaux souterraines de la région.

**Tableau III 8 : Indices d'échanges de base de Mars 2021**

échantillon	Mars 2021		échantillon	Mars 2021	
	I.E.B 1	I.E.B 2		I.E.B 1	I.E.B 2
<b>1</b>	-3,339	-0,217	<b>11</b>	-0,342	-0,030
<b>2</b>	0,117	0,023	<b>12</b>	0,000	0,000
<b>3</b>	0,166	0,034	<b>13</b>	0,215	0,030
<b>4</b>	0,220	0,049	<b>14</b>	-0,645	-0,059
<b>5</b>	-0,135	-0,031	<b>15</b>	0,421	0,202
<b>6</b>	0,467	0,183	<b>16</b>	0,567	0,270
<b>7</b>	-0,396	-0,040	<b>17</b>	0,494	0,317
<b>8</b>	0,093	0,025	<b>18</b>	0,279	0,036
<b>9</b>	0,184	0,044	<b>19</b>	0,770	1,029
<b>10</b>	0,268	0,048			

### III.7. Appréciation de la qualité des eaux pour la potabilité

L'évaluation de la qualité chimique des eaux souterraines de la zone Nord –est de Boussaada pour la potabilité, a été réalisé en se basant sur les normes de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et sur le degré hydrotimétrique (D.H.T).

#### III.7.1. Classification selon les normes l'O.M.S :

Les normes de l'OMS définissent deux types de concentrations maximales (Tableau III 9) qui traduisent les limites de potabilité. On distingue :

- Une concentration maximale acceptable à partir de laquelle une eau provoque une certaine réticence chez le consommateur ;
- Une concentration maximale admissible qui correspond à la quantité maximale de substance à tolérer et dont la teneur supérieure peut être dangereuse à la santé.

L'examen du tableau III 9 montre :

- Plus 84% des échantillons ont des teneurs en calcium dépassent la norme maximale acceptable et plus 5% dépassent la norme maximale admissible.

- Plus 63% des échantillons ont des teneurs en magnésium dépassent la norme maximale acceptable et plus 26 % dépassent la norme maximale admissible.
- Plus 94% des échantillons ont des teneurs en sulfates dépassent la norme maximale acceptable et plus 78 % dépassent la norme maximale admissible.
- Pour les chlorures on marque que plus 47% des échantillons ont des teneurs dépassent la norme maximale acceptable et plus 5% dépassent la norme maximale admissible

**Tableau III 9. Normes de potabilité de l'O.M.S**

Eléments chimiques	Concentration maximale acceptable (mg/l)	Concentration maximale admissible (mg/l)	% des échantillons ayant une concentration inférieure à la concentration maximale acceptable	% des échantillons ayant une concentration inférieure à la concentration maximale admissible
<b>Chlorures</b>	200	600	52,63	94,74
<b>Calcium</b>	75	200	<b>15,79</b>	73,68
<b>Magnésium</b>	50	150	<b>36,84</b>	89,47
<b>Sodium</b>	/	200	/	94,74
<b>Potassium</b>	12	20	100	100
<b>Sulfates</b>	200	400	<b>5,26</b>	<b>21,05</b>
<b>Nitrates</b>	50	100	89,48	100

### III.7.2. Classification selon degré hydrotimétrique total (D.H.T) :

Le degré hydrométrique ou la dureté d'une eau correspond à la somme des concentrations en calcium et en magnésium.

$$DHT = rCa^{++} + rMg^{++} \quad (\text{en méq/l})$$

$$DHT = (rCa^{++} + rMg^{++}) \times 5 \quad (\text{en degré Français } ^{\circ}F)$$

Le tableau III 10 montre que 68,41% des eaux analysées sont très dure avec D.H.T est supérieur à 54 °F, 21,06% dure et 10,53% assez douce. Donc la majorité des eaux souterraines de la plaine Nord-est de Boussaâda présentent une qualité très dure donc impropre à la consommation et peut entraîner des conséquences assez néfastes, une consommation excessive de savon et une mauvaise cuisson des légumes.

**Tableau III 10 : Dureté des eaux en °F (W. THEOBALD et A. GAMA, 1969)**

D.H.T (en °F)	0 - 7	7 - 22	22 - 32	32 - 54	> 54
Qualification de l'eau	Douce	Modérément douce	Assez douce	Dure	Très dure
% des points d'eau			10,53	21,06	68,41

### III.8. L'influence saline et aptitude des eaux souterraines à l'irrigation :

En raison de la rareté des précipitations et de l'évaporation élevée connues au niveau de la région de Boussaada en cours de la dernière décennie, les eaux souterraines sont utilisées intensément pour l'irrigation des terres agricoles. La qualité de l'eau utilisée en agriculture doit présenter les meilleurs paramètres physico-chimiques et les eaux chargées en sels minéraux posent des problèmes pédologiques et agronomiques qui ont une influence sur la croissance des plantes. Parmi ces sels, on peut citer les sulfates et le sodium, qui, avec des concentrations élevées, affectent la structure physique du sol et le développement des plantes. Pour mettre ce phénomène en évidence, nous allons utiliser trois méthodes qui sont les suivantes :

- ✓ La classification de la salinité en fonction de la conductivité électrique CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
- ✓ La Classification de Richard (SAR)
- ✓ LA Classification de Wilcox

#### III.8.1. La classification de la salinité en fonction de la CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )

Selon R. S. Ayers et D. W. Westcot (1988), lorsque les eaux d'irrigation sont chargées en sels, ces sels s'accumulent dans la zone racinaire après que la plante ait absorbé l'eau. Ces sels se concentrent et limitent la disponibilité de l'eau dans le sol pour la culture.

Les directives pour l'interprétation de la qualité d'une eau d'irrigation indiquent que :

- Si, la salinité exprimée par la conductivité en  $\mu\text{S} / \text{cm}$  est inférieure à 700, il n'y aucune restriction pour l'irrigation.
- Si, la conductivité varie entre 700 et 3000  $\mu\text{S} / \text{cm}$ , la restriction pour l'irrigation est légère à moyenne.
- Et si, elle est supérieure à 3000  $\mu\text{S} / \text{cm}$ , la restriction pour l'irrigation est forte.

L'examen du tableau III 11 montre que la majorité des points d'eau de la zone Nord-est de Boussaada représentent une restriction légère à moyenne (modéré). En cas d'irrigation avec ces eaux on peut s'attendre à des chutes de rendements (R. S. Ayers et D. W. Westcot, 1988) de certaines cultures pratiquées.

**Tableau III 11.** Directives pour l'interprétation la salinité d'une eau d'irrigation

Restriction pour l'irrigation	CE en ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Pourcentage des échantillons (%)
		Mars 2021
Aucune	< 700	
Légère à modéré	700 – 3000	89,47
Forte	> 3000	10,53

Il est recommandé dans ce cas d'irrigation avec ces eaux des cultures tolérantes en sels, de pratiquer des cultures sur les sols légers (sableux), de faire des apports d'eau supplémentaires.

#### III.8.1.1. Les eaux peu salées :

Il est à noter que les eaux peu salées, avec une conductivité électrique inférieure à 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , ont tendance à mobiliser rapidement le calcium du sol, entraînant ainsi une dispersion accrue des particules et une obturation des espaces poreux (R. S. Ayers et D. W. Westcot, 1988). Cependant, il convient de souligner que la valeur minimale de conductivité des eaux de la plaine de Nord-est Boussaâda est supérieure à 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , ce qui indique que ce phénomène n'est pas rencontré dans cette région.

#### III.8.1.2. Les eaux à forte teneur en sodium (La sodicité) :

La présence excessive de sodium dans l'eau d'irrigation peut également entraîner la dispersion et la destruction de la structure du sol, particulièrement lorsque la teneur en sodium est au moins trois fois supérieure à celle du calcium (R. S. Ayers et D. W. Westcot, 1988). Dans de telles conditions, il devient extrêmement difficile de répondre aux besoins hydriques des cultures. Le risque est évalué en fonction de la valeur du « Sodium Absorption Ratio » (S.A.R), qui mesure la capacité d'absorption du sodium par le sol. À une même conductivité électrique, plus le coefficient S.A.R est élevé, plus le risque est élevé. Le S.A.R est calculé en combinaison avec la conductivité électrique de l'eau.

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{++} + Mg^{++}}{2}}}, \text{ où tous les éléments sont exprimés en meq/l.}$$

### III.8.2. Classification de Richard

Le report des valeurs du SAR en fonction de la conductivité électrique de l'eau sur le diagramme de Richard (Figure III 28) nous a permis de distinguer trois classes selon le degré de salinité : admissible, médiocre et mauvaise, dont chaque classe présente ses propres caractéristiques. Le tableau III.12 donne les résultats d'interprétation des diagrammes et permet de localiser les types d'eau et les variétés de cultures utilisées.

*Tableau III.12 : Résultats obtenus après l'interprétation de diagramme de Richards*

Classes	Mars 2021	% points d'eau
Excellente	/	/
Bonne	/	/
Admissible	C3S1	47.37%
Médiocre	C3S2, C4S1	42.11%
Mauvaise	C4S2, C5S1	10.52%
<b>Caractéristiques :</b>		
C3-S1	Eau convenant à l'irrigation des cultures tolérantes au sel sur sol ayant une bonne perméabilité	
C3-S2, C4-S1	Eau convenant à l'irrigation de certaines espèces de cultures bien tolérantes au sel et sur des sols bien drainés.	
C4-S2, C5-S1	Eau est ne peut être utilisé pour l'irrigation et pour certaines espèces bien tolérantes au sel qu'après drainage et lessivage des sols.	

### III.8.3. Classification de Wilcox

La classification de Wilcox est déterminée par la représentation du pourcentage de sodium absorbé par l'eau en fonction de la conductivité sur le diagramme de Wilcox, définit cinq classes d'eau: Excellente – Bonne – Admissible- Médiocre - Mauvaise. Généralement cette classification connue en pourcentage du sodium et définie par la relation:

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

Où tous les éléments sont exprimés en meq/l.

Les Résultats obtenus de diagramme de Wilcox (Figure III 29), rapportés dans le tableau III.13, montrent que la majorité des points d'eau ont une qualité médiocre à mauvaise (52.63%).

**Tableau III.13** : Résultats obtenus après interprétation de diagramme de Wilcox

Classes	% des points d'eau
	(Mars 2021)
Excellente	/
Bonne	42,11
Admissible	5,26
Médiocre	42,11
Mauvaise	10,52

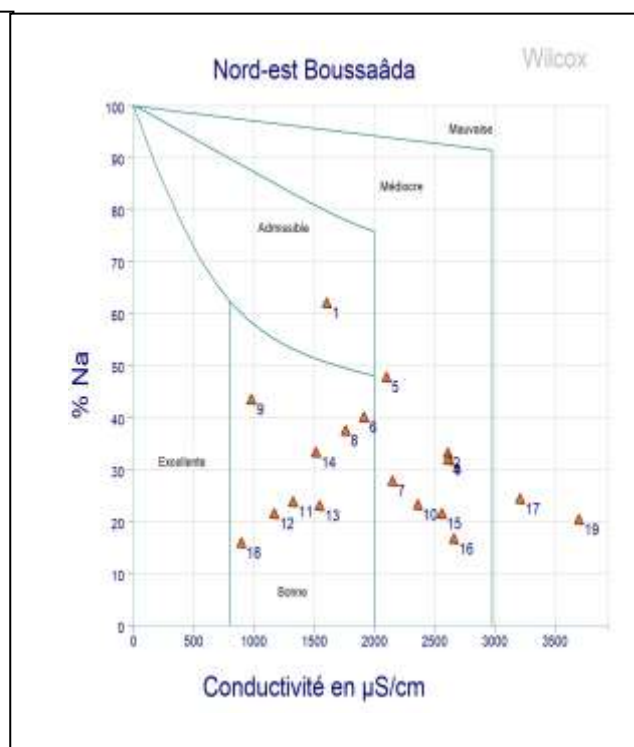
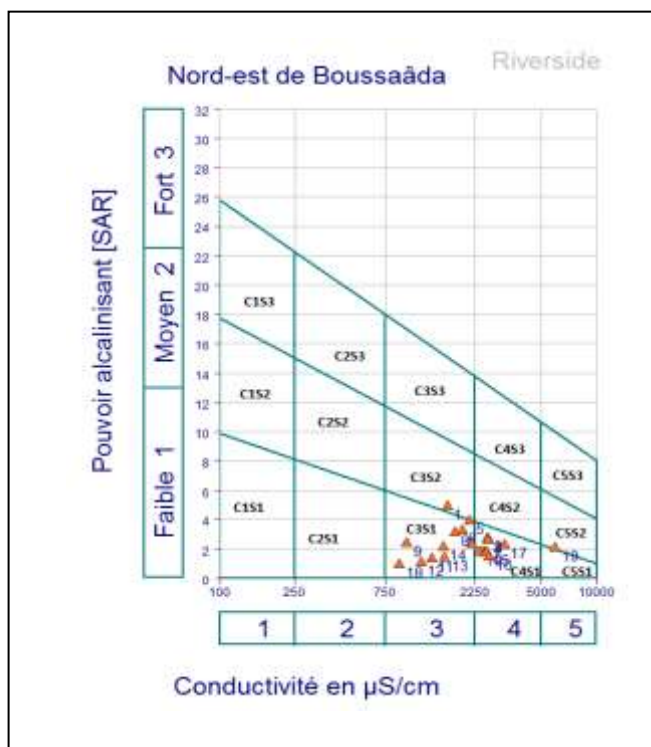
✓ **Interprétation des résultats Obtenues par les méthodes de Richards et de Wilcox**

Les classifications des eaux pour l'irrigation par les diagrammes de Wilcox et Riverside donnent :

- La classe **C3S1**, désigne les eaux de bonnes à admissibles pour l'irrigation des cultures tolérantes aux sels, sur des sols bien drainés ou de bonne perméabilité dont la salinité doit être contrôlée. Elles caractérisent les forages qui se situent au Sud de la zone d'étude 47.37% de la totalité des échantillons analysés.

- Les classes **C3S2**, **C4S1** indiquent les eaux médiocres fortement minéralisées, susceptibles de convenir à l'irrigation de certaines espèces comme (Tomate, choux, poivron, laitue, maïs, pomme de terre, melon, carotte, oignon, petit pois, courgette, concombre...), bien tolérantes aux sels et sur des sols bien drainés et lessivés avec 42.11 % des points d'eau analysés et concernent les forages situent à la partie Ouest au Nord-ouest.

- La classe **C5S1** mauvaise avec des conductivités très élevées et d'une salinité très élevée. Cette classe représente 10,52% des points d'eau situent à la partie Sud-est et à la partie ouest, très influencée par la salinité du lac salé (Chott El-Hodna) et lamas du sel surtout pendant la période de la sécheresse. Ces eaux conviennent à l'irrigation de certaines espèces de cultures (Betterave rouge, asperge, épinard, ...), bien tolérantes au sel et sur des sols bien drainés et lessivés avec des importants débits d'irrigation.



**Figure III 29: Diagramme de Riverside**

**Figure III 30: Diagramme de Wilcox**

**III.8.4. Classification de certaines cultures maraîchères par tolérance à la salinité :**

La classification de certaines cultures maraîchères en fonction de leur tolérance à la salinité est présentée dans le tableau III 13, ci-dessous :

**Tableau III.14 :** Classification de certaines cultures maraîchères en fonction de leur tolérance à la salinité

Cultures peu tolérantes	Cultures à tolérance moyenne	Cultures très tolérantes
Haricot vert, fraise, melon.	Tomate, chou, poivron, laitue, mais, pomme de terre, melon, carotte, oignon, petit pois, courgette, concombre	Betterave rouge, asperge, épinard

## Conclusion :

Grâce à l'étude hydrochimique et des eaux souterraines de la zone d'étude, nous avons pu récapituler les résultats suivants :

- ❖ L'analyse du faciès chimique par Les diagrammes de Piper, Schoeller-Berkaloff ont montré trois faciès chimiques : le premier Chloruré calcique et magnésien, le deuxième Sulfaté sodique et le dernier Bicarbonaté sodique.
- ❖ L'analyse cartographique révèle que les eaux plus minéralisés de concentrations élevées en calcium, magnésium, chlorures, sulfates. Ces eaux se localisent au centre de la zone d'étude influencée par la salinité. Cette augmentation est due à la dissolution des roches calcaires et les calcaires dolomitiques dans le sens d'écoulement, ainsi qu'aux formations évaporitiques (gypse, Trias, ...) d'un côté et le lessivage des formations sédimentaires (argiles, marnes et salifères) par gradient inverse provenant du lac salé de l'autre côté. En revanche, les eaux caractérisées par des concentrations élevées en bicarbonates se localisent à la partie Sud et Sud-ouest dues probablement à la dissolution des roches carbonatées.
- ❖ L'analyse statistiques effectuée par l'ACP et CAH, nous a permis d'identifier trois groupes principaux des eaux souterraines, le premier est minéralisé, caractérisé par le faciès Chloruré concernent les eaux situées la partie Sud-ouest de la plaine. Le second est caractérisé par le faciès Sulfaté et influencé par la salinité, localisé à la partie Ouest et centre de la plaine. Le dernier est bicarbonaté touché par la pollution des nitrates et situé au Sud près de formations carbonatées.
- ❖ L'appréciation de la qualité des eaux pour la potabilité à montrer que la majorité des eaux de la zone Nord-est de Boussaada sont dures à très dure (D.H.T supérieur à 54 °F), impropre à la consommation et peut entraîner des conséquences assez néfastes comme une consommation excessive de savon et une mauvaise cuisson des légumes.

Les classifications des eaux pour l'irrigation par les méthodes de (R. S. Ayers et D. W. Westcot, 1988), Wilcox et Richards montrent que la majorité des points d'eau de la zone Nord-est de Boussaada présentent une restriction en termes de salinité. L'irrigation avec ces eaux peut entraîner une baisse des rendements pour certaines cultures pratiquées dans cette région. Environ 47,37% des points d'eau sont classés comme bons à admissibles, et cela concerne principalement la partie centrale jusqu'au Nord-est de la zone d'étude, qui se trouve dans le sens de l'écoulement fournissant un apport supplémentaire des éléments minéraux. En revanche, environ 42,11% des eaux sont classées comme médiocres, et cela concerne les points d'eau situés au Nord-est du Chott. Enfin, les

10,52% restants sont classés comme mauvais en raison de leur conductivité très élevée, et cela concerne principalement la partie Sud-est, qui est fortement influencée par la salinité du lac salé (Chott El Hodna).

.

# *Conclusion générale*

## Conclusion générale

Suite à notre étude dans la région du nord-est de Bou Saada, nous avons pu approfondir notre compréhension de la salinité des eaux souterraines en recourant à diverses techniques graphiques et à des analyses statistiques multivariées.

Le Sous bassin versant de Boussaâda est caractérisé d'un climat semi-aride à aride, sec et très chaud en été et très froid hiver. Draine une grande surface, de forme allongée, de relief modéré, de pente moyenne, d'une densité de drainage moins dense et de longueur du cours d'eau importante.

La formation géologique de la zone d'étude deux aquifères hydrogéologiques superposés et séparés par une couche d'argiles plastiques, marnes et argiles sableuses. Cette couche contribue à la protection des eaux souterraines profondes de l'intrusion d'eau salée, avec la présence de zones de contact entre elles (nappe mixte). La nappe phréatique constituée de sables, graviers, galets argileux et argiles sableuses (Mio-Plio-Quaternaire). La nappe profonde a débuté d'argiles et marnes miocènes au nord, et laissé place à des formations gréso-carbonatées du Crétacé (Barrémo-Bédoulien, albien) au sud.

L'analyse de carte piézométrique de notre zone d'étude montre :

- ✓ Les zones correspondantes à des horizons ont fort écoulement avec les directions de l'écoulement S-N, S –NE et NO-SE.
- ✓ L'alimentation de l'aquifère superficiel se fait à partir des massifs qui bordent la plaine où les axes d'écoulement prennent naissance. Ces écoulements sont orientés vers la dépression (Chott-El-Hodna).

L'analyse du faciès chimique par Les diagrammes de Piper, Schoeller-Berkaloff ont montré trois faciès chimiques ; le premier chloruré calcique et magnésien, le deuxième sulfaté sodique et le dernier bicarbonaté sodique.

L'analyse cartographique révèle que les eaux plus minéralisées de concentrations élevées en calcium, magnésium, chlorures, sulfates. Ces eaux se localisent au centre de la zone d'étude influencée par la salinité. Cette augmentation est due à la dissolution des roches calcaires et les calcaires dolomitiques dans le sens d'écoulement, ainsi qu'aux formations évaporitiques (gypse, Trias, ...) d'un côté et le lessivage des formations sédimentaires (argiles, marnes et salifères) par gradient inverse provenant du lac salé de l'autre côté. En revanche, les eaux caractérisées par des

concentrations élevées en bicarbonates se localisent à la partie Sud et Sud-ouest dues probablement à la dissolution des roches carbonatées

L'étude statistiques effectuée par l'ACP et CAH, nous a permis d'identifier trois groupes principaux des eaux souterraines, le premier est minéralisé, caractérisé par le faciès chloruré. Le second est caractérisé par le faciès sulfaté et influencé par la salinité. le dernier est carbonaté touché par la pollution des nitrates.

L'appréciation de la qualité des eaux pour la potabilité à montrer que la majorité des eaux de la zone Nord-est de Boussaada sont dures à très dure (D.H.T supérieur à 54 °F), impropre à la consommation et peut entraîner des conséquences assez néfastes comme une consommation excessive de savon et une mauvaise cuisson des légumes.

Selon les méthodes de classification des eaux pour l'irrigation proposées par R.S. Ayers et D.W. Westcot en 1988, ainsi que les travaux de Wilcox et Richards, la majorité des points d'eau de la zone Nord-est de Boussaada présentent une restriction en termes de salinité. L'irrigation avec ces eaux peut entraîner une baisse des rendements pour certaines cultures pratiquées dans cette région. Environ 47,37% des points d'eau sont classés comme bons à admissibles, et cela concerne principalement la partie centrale jusqu'au Nord-est de la zone d'étude, qui se trouve dans le sens de l'écoulement fournissant un apport supplémentaire des éléments minéraux. En revanche, environ 42,11% des eaux sont classées comme médiocres, et cela concerne les points d'eau situés au Nord-est du Chott. Enfin, les 10,52% restants sont classés comme mauvais en raison de leur conductivité très élevée, et cela concerne principalement la partie Sud-est, qui est fortement influencée par la salinité du lac salé (Chott El Hodna).

## *Recommandations*

Les résultats obtenus nous permis de bien déterminer distinctement la salinité des eaux souterraines de la Zone Nord-est de Boussaada en quatre classes selon la classification de Wilcox. Leurs utilisations pour l'irrigation doit révéler certaines restriction en terme de salinité.

- ✓ La première classe désigne les eaux de qualité bonne avec 42,11 % des points d'eau, caractérisent les forages qui se situent à la partie Sud-ouest de la zone d'étude. Conviennent à l'irrigation sans restriction.
- ✓ La deuxième classe concerne les eaux de qualité admissible et renferme les forages localisés à la partie Sud avec 5,26% des points d'eau. Conviennent à l'irrigation des cultures tolérantes aux sels, sur des sols bien drainés ou de bonne perméabilité, dont la salinité doit être contrôlée.
- ✓ La Troisième classe désigne les eaux de qualité médiocre, avec 42,11 % des points d'eau, caractérisent les forages qui se situent à la partie Ouest jusqu'au Nord-ouest de la zone d'étude. Ces eaux fortement minéralisées. Susceptible de convenir à l'irrigation de certaines espèces comme (Tomate, choux, poivron, laitue, maïs, pomme de terre, melon, carotte, oignon, petit pois, courgette, concombre...), bien tolérantes aux sels et sur des sols bien drainés et lessivés.
- ✓ La dernière classe concerne les eaux de mauvaise avec des conductivités et salinité très élevées. Cette classe représente 10,52% des points d'eau situent à la partie Sud-est et à la partie centrale jusqu'au Nord, très influencée par la salinité du lac salé (Chott El-Hodna) et lamas du sel surtout pendant la période de la sécheresse. Ces eaux conviennent à l'irrigation de certaines espèces de cultures (Betterave rouge, asperge, épinard ...), bien tolérantes au sel et sur des sols bien drainés et lessivés avec des importants débits d'irrigation.

## *Références bibliographiques*

## Références bibliographiques

- Amel F (2021). Effets des activités humaines sur les ressources en eaux dans les régions semi-arides et arides d'Algérie. Thèse de Doctorat, Université de M'sila.
- Abdellaoui F, et Benchenite A (2012) Caractérisation des sols et des eaux d'irrigation dans deux stations : Bensrouer et Maadher (W. M'Sila). Mémoire d'Ingénieure. Université. M'Sila. 62p.
- ADE (2019) Entreprise Algérienne des eaux. Zone de Djelfa unité de M'sila. Algérie
- ANRH (2006) Modelling of the Hodna aquifer. Mission I: data collection, analysis and synthesis (in French). Tech Rep. Agence nationale des ressources hydrauliques. Algérie
- Annuaire Statistique (2015), Direction de la planification de la Wilaya de M'sila. Algérie.
- Benchetrit Maurice (1956) Les sols d'Algérie. Revue de géographie alpine 44(4) : 749-761.  
DOI : <https://doi.org/10.3406/rga.1956.1790>.
- Belouam N (1976) Caractéristiques macromorphologiques et micro-morphologiques de quelques sols à accumulation calcaire du Hodna. Algérie
- Belagoune Fares (2012). Etude et modélisation des crues des cours d'eau en Milieu semi-aride « Cas des grands bassins versants 05, 06 et 07 », thèse de Magister, Université Kasdi Merbah Ouargla. Algérie.
- Bernard Augustin, Ficheur Émile (1902) Les régions naturelles de l'Algérie » In: Annales de Géographie, t. 11, N°60, 1902. pp. 419-437
- Bernard Augustin, Ficheur Émile (1902) Les régions naturelles de l'Algérie » In: Annales de Géographie, t. 11, N°60, 1902. pp. 419-437.
- Boudoukha A., Ghodbane M (2014). Characterization of the mineralization of the Chemora water table (Eastern Algeria) by geochemical and statistical methods. Handbook on the Applied Sciences and Engineering. Vol. 1 p. 16–25. DOI 10.18488/journal.1001/2014.1/1001.1.
- Benguesmia Leila (2009). Qualité des eaux souterraines du bassin du Hodna (Zone de M'sila) université de M'sila. Algérie.
- Bermond. R, Vuichard. R, (1973). Les paramètres de la qualité des eaux. Documentation Française, Paris, 179p.
- Cüneyt. G, Geoffrey. D, Thyne. J.E., Mccray.A, Keith.T, (2002). Evaluation of graphical and

- multivariate statistical methods for classification of water chemistry data, *Hydrogeology Journal*, 10, 455-474.
- Dechaicha Assoule (2010). L'étalement urbain et les contraintes physiques et naturelles Cas d'étude : La ville de Bousaada. Thèse de Magistère en architecture. Université de Biskra. Algérie
- Derekov A M (1973) Etudes hydrologiques dans le bassin du chott et Hodna. FAO
- Dussart. B, (1966). *Limnologie : Etude des eaux continentales*. Gauthier-Villars, Ed., Paris. Collection Géobiologie, Ecologie, Aménagement. 704 p.
- Jean-Paul Bord (1981) *Cartographie de l'utilisation du sol dans l'Est algérien : essai de zonage agricole*. Géographie. Université Paul Valéry - Montpellier III. Français
- Jean Despois (1953) *Le Hodna (Algérie)* presses universitaires de France. 108, boulevard Saint-Germain. PARIS. <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k3406577p>
- HCEFLCD : Haut-Commissariat aux Eaux et Forêt et la Lutte Contre la Désertification. Maroc, (2007). *Etude diagnostique de la zone humide AL Massira-Faija, cercle d'EL Brouj et Cercle de Settat*, 242p.
- Helali N El Houda (2016) analyse statistique multivariées des eaux souterraines de la région de
- Guerra A (1998) *Processus érosifs sur les pentes. Géomorphologie : actualisation de bases et concepts*, A.J.T. Guerra & S.B. Cunha (eds.), Bertrand Brésil, Rio de Janeiro.
- Ghodbane M (2018). Estimation des potentialités des eaux souterraines et estimation de la pollution par les nitrates ; Cas de la région de Chemora-Est algérien University of Batna 2 pp. 157.
- Ghodbane M., Boudoukha A., Benaabidate L (2016). Hydrochemical and statistical characterization of groundwater in the Chemora area, Northeastern Algeria, desalination and water treatment. Taylor & Francis. Vol. 57(32) p. 14858–14868. DOI 10.1080/19443994.2015.1067924.
- Glaçon G, Guiraud R (1970) : La série Mio-pliocène du Hodna et des régions voisines Algérie du nord ; de : C.R. Ac. Sc. Paris -, tome 271, plaquette in 4, 4 pages
- Grine R (2009). Les perspectives hydrogéologiques de la cuvette hodnéennes. Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de magister en sciences de la terre. Spécialité : Hydrogéologie, université des sciences et de la technologie Houari Boumediene. 130 p.
- Grine. R (2005) : Rapport de fin de travaux des 12 piézomètres du bassin du chott Hodna ; wilaya de M'sila. ANRH ; DR. Djelfa ; N°045/DRHPS/2005.
- Kaabeche M (1995) *Flore et végétation dans le Chott El-Hodna (Algérie)*. Documents

- Phytosociologiques, Nouvelle Série, Université Degli Studi, Camerino, 15, 393-402
- Kaabeche M (1990) les groupements végétaux de la région de Bousaada (Algérie) Essai de synthèse sur la végétation steppique du Maghreb » thèse de doctorat en sciences Université DE Paris sud. France.
- Kebiche Mustapha (1994) Le bassin versant du Hodna (Algérie) : Ressources en eau et possibilités d'aménagement » In : Travaux de l'Institut Géographique de Reims, N°85-86, 1994. Etudes Algériennes. pp. 25-34
- Kieken. M (1961) : Carte géologique au 1/50000ème ; feuille de Sidi Aissa
- Kieken. M (1962) : Carte géologique au 1/50000ème ; feuille de M'sila
- Lasad M C (2022). Diversité de l'avifaune et effets des facteurs environnementaux sur sa distribution dans la région de Boussaâda. Thèse de Doctorat, Université de M'sila.
- Ladgham Chicouche A, Zerguine Delloula (2001) Fiche descriptive sur les zones humides Ramsar (Chott El Hodna) Algérie.
- Mimoune S (1995) Gestion des sols salés et désertification dans une cuvette endoréique d'Algérie (sud du Chott Hodna). Thèse de doctorat, Université Aix-Marseille 1, France, 209p
- Ozenda P (1977) Flora of the Sahara. Flora of the Sahara. (ed. 2).
- Salah Abdesselam, Amor Halitim, Anthony Jan, Fabienne Trolard, Guilhem Bourrie (2012) Anthropogenic contamination of groundwater with nitrate in arid region: case study of southern Hodna (Algeria).
- Savornin J (1908) Carte géologique de l'Algérie 3<sup>e</sup> série géologie appliquée - études régionales essai sur l'hydrologie du Hodna.
- Zerrouki A et Lazib N (2013) Contribution des images Alsat-2A à l'étude géologique de la région de M'sila (monts du Hodna). Agence Spatiale Algérienne.