

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université MUSTAPHA Stambouli  
Mascara

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

Département des Sciences Agronomiques



جامعة مصطفى إسمطبولي - معسكر

كلية علوم الطبيعة والحياة

قسم العلوم الزراعية

Laboratoire de Géomatique, d'Ecologie et d'Environnement (LGéo2E)

## THESE de DOCTORAT de 3<sup>ème</sup> Cycle

**Domaine :** Sciences de la Terre et de l'Univers

**Filière :** Géologie appliquée

**Spécialité :** Hydrogéologie, Sol et Environnement (HSE)

Etude de la vulnérabilité et des risques de la pollution des eaux souterraines dans l'agrosystème de Mascara, mesures de prévention et perspectives de valorisation

Présentée par : M<sup>elle</sup> KHELFI Messaouda

Soutenue le : 17/04/2025.

### Devant le jury :

M <sup>r</sup> . BEKKOUSSA B.	Professeur	Université de Mascara	Président
M <sup>r</sup> . BENZATER B.	MCA	Université Mascara	Examineur
M <sup>r</sup> . ZEROUALI B.	MCA	Université de de Chlef	Examineur
M <sup>r</sup> . TALBI O.	MCA	Université de Saïda	Examineur
M <sup>r</sup> . BENSLIMANE M.	Professeur	Université de Mascara	Directeur de thèse

Année Universitaire : 2024-2025

# ***DEDICACE***

Je dédie cette thèse à MES PARENTS, pour leur soutien inébranlable et leurs encouragements

## ***REMERCIEMENTS***

Je remercie Dieu « Allah » de m'avoir accordé la volonté d'achever cet humble travail.

Je voudrais dans un premier temps remercier, mon directeur de thèse, professeur BENSLIMANE Mohamed à l'Université de Mostapha Stambouli de Mascara, qui m'a encadré tout au long de cette thèse et qui m'a fait partager ses brillantes intuitions. Votre expertise et vos conseils ont été précieux. Vous avez toujours su me guider avec patience et bienveillance. Grâce à vous, j'ai pu approfondir mes connaissances et développer mes compétences. Je vous suis infiniment reconnaissant pour votre confiance.

Je tiens à remercier Monsieur Professeur BEKKOUSSA Belkacem, professeur à l'Université de Mascara, Être d'accord pour ce travail et d'assumer la présidence de ce jury.

Je tiens à exprimer ma gratitude spéciale à Monsieur le professeur BENZATER Benali de l'Université de Mascara, votre acceptation d'évaluer ce travail en tant qu'examineur est très appréciée.

Je tiens à exprimer ma gratitude spéciale à Monsieur le Professeur ZEROUALI Bilal de l'Université de Chelf, votre acceptation d'évaluer ce travail en tant qu'examineur est très appréciée.

Je tiens à exprimer ma gratitude spéciale à Monsieur le Professeur TALBI Oukacha de l'Université de Saïda, votre acceptation d'évaluer ce travail en tant qu'examineur est très appréciée.

Je voudrais également exprimer ma reconnaissance envers les personnes que je nomme « Ressources » dans ma thèse, et qui m'ont permis de mieux appréhender le fonctionnement actuel et passé de ce secteur.

Je tiens à exprimer ma gratitude spéciale à mon frère Abdelsalam et mes sœurs Fatima Zohra, Nora et Anffal. En plus de mes nièces Rassil Ichrak et Assil marwa.

Je voudrais également remercier mes collègues.

## ملخص

يرتبط سهل غريس الواقع في شمال غرب الجزائر ارتباطاً وثيقاً بطبقة المياه الجوفية المجاورة. ويعتبر مستودع المياه الجوفية البليو الرباعية. هذا أحد أهم الخزانات في غرب الجزائر. إلا أنه في السنوات الأخيرة، أدى الاستخدام المفرط للأسمدة النيتروجينية بالإضافة إلى تصريف مياه الصرف الصحي المتفرقة إلى تدهور مقلق في نوعية المياه الجوفية. والهدف من هذه الدراسة هو رصد سلوك طبقة المياه الجوفية هذه من وجهة نظر نوعية ودرجة تأثرها بالملوثات البشرية المنشأ. ولتحقيق هذه الغاية، نستخدم النمذجة الهيدروجيولوجية مثل نماذج DRASTIC و SI و GOD الكلاسيكية. تُظهر النتائج التي تم الحصول عليها بعد التحقق من الصحة درجة عالية من الحساسية في 31% من طبقة المياه الجوفية الطميية، ومناطق ذات حساسية متوسطة في 68% ومناطق ذات حساسية منخفضة في 1% من طبقة المياه الجوفية. وبالنظر إلى هذه النتائج غير المرضية، تم تصميم نموذج جديد يسمى DRASTIC-GOS وتطبيقه لاختبار درجة حساسية طبقة المياه الجوفية الطميية الرباعية. يكشف هذا الاقتران بين النماذج عن تحديد مكاني من خلال تطبيق نظم المعلومات الجغرافية ودقة التعرض لتلوث المياه حسب الموقع (بكسل). ويكشف هذا النهج متعدد التخصصات عن أربعة مستويات متميزة من الضعف: منخفضة (0.04%)، ومتوسطة (2.17%)، وعالية (1.21%)، ومرتفعة (1.21%)، ومرتفعة جداً (96.58%). وبالتالي، فإن تطبيق اختبارات التأكيد والاختبارات الإحصائية واختبارات الارتباط بين قيم النترات وفئات الضعف يكشف أن نموذج DRASTIC-GOS أقرب إلى الظروف الحقيقية لطبقة المياه الجوفية هذه، ومن هنا تأتي أهميته في رسم خرائط الحساسية للتلوث وفعاليتها كأداة لمراقبة موارد المياه الجوفية لصالح مديري هذه الطبقة المائية الجوفية ذات الأهمية الإقليمية.

**الكلمات الرئيسية:** قابلية التأثر، التلوث، المياه الجوفية، رسم الخرائط، DRASTIC، SI، GOD، DRASTIC-GOS، طبقة المياه الجوفية البليو الرباعية، غريس، الجزائر.

## **ABSTRACT**

Located in northwestern Algeria, the Ghriss plain is intimately linked to the adjacent aquifer. This Plio-Quaternary aquifer is considered one of the most important reservoirs in western Algeria. However, in recent years, excessive use of nitrogen fertilizers combined with sporadic wastewater discharges has led to a worrying deterioration in groundwater quality. The aim of this study is to monitor the behavior of this aquifer from a qualitative point of view and the degree of its vulnerability to anthropogenic pollutants. To this end, we have used hydrogeological modelling, such as the classic DRASTIC, SI and GOD models. The results obtained after validation revealed a high degree of vulnerability for 31% of the alluvial aquifer, medium-sensitivity zones for 68%, and a low-sensitivity zone for 1% of the aquifer. Given these unsatisfactory results, a new model, called DRASTIC-GOS, was designed and applied to test the degree of sensitivity of the Plio-Quaternary aquifer. This coupling of models reveals a spatialization through the application of GIS and an accuracy of vulnerability to water pollution by location (pixel). This multi-disciplinary approach reveals four distinct levels of vulnerability: low (0.04%), moderate (2.17%), high (1.21%) and very high (96.58%). Thus, the application of confirmation tests, statistical tests and correlation tests between nitrate values and vulnerability classes, reveals that the DRASTIC-GOS model is closer to the real conditions of this aquifer, hence its interest for pollution sensitivity mapping and its effectiveness as a groundwater resources monitoring tool for the benefit of managers of this regionally important aquifer.

**Keywords:** vulnerability, pollution, groundwater, mapping, DRASTIC, SI, GOD, DRASIC-GOS, Plio-Quaternary water table, Ghriss, Algeria.

## **RESUME**

Situé au nord-ouest de l'Algérie, la plaine de Ghriss est intimement liée à la nappe qui lui est adjacente. Il s'agit d'aquifère Plio-Quaternaire, considéré comme l'un des plus importants réservoirs de l'ouest du pays. Toutefois, au fil des dernières années, l'usage excessif des fertilisants azotés combinés aux rejets sporadique des eaux usées ont généré une dégradation inquiétante de la qualité des eaux souterraines. Cette étude a pour finalité de suivre le comportement de cet aquifère du point de vue qualitatif et le degré de sa vulnérabilité aux polluants d'origine anthropique. A cet effet, nous avons appel à la modélisation hydrogéologique, tels que des modèles classiques DRASTIC, SI et GOD. Les résultats obtenus après validation fond ressortir une forte vulnérabilité sur 31% de l'aquifère alluvial, des zones à moyenne sensibilité sur 68% et une zone de faible sensibilité sur 1% de l'aquifère. Face à ces résultats peu satisfaisant, un nouveau modèle, appelé DRASTIC-GOS, a été conçu et appliqué pour tester le degré de sensibilité de la nappe Plio-Quaternaire. Ce couplage de modèles, révèle une spatialisation par l'application du SIG et une précision de la vulnérabilité à la pollution des eaux par endroit (pixel). De cette approche pluridisciplinaire on en déduit la présence de quatre niveaux de vulnérabilité distincts : faible (0.04%), modéré (2.17%), forte (1.21%) et très forte (96.58%). Ainsi, l'application des tests de confirmation, les tests statistiques et les tests de corrélation entre les valeurs en nitrates et les classes de vulnérabilité, révèlent que le modèle DRASTIC-GOS est plus proche des conditions réelles de cet aquifère, d'où son intérêt pour la cartographie de la sensibilité à la pollution et son efficacité en tant qu'outil de surveillance des ressources en eau souterraines au profit des gestionnaires de cet aquifère d'importance régionale.

**Mots clés :** vulnérabilité, pollution, eaux souterraines, cartographie, DRASTIC, SI, GOD, DRASIC-GOS, nappe Plio-Quaternaire, Ghriss, Algérie.

# SOMMAIRE

DÉDICACE

REMERCIEMENTS

ملخص

ABSTRACT

RESUME

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES ABREVIATIONS

INTRODUCTION GENERALE .....1

CHAPITRE I: Caractérisation physique et naturelle de la zone d'étude .....4

I.1 Introduction..... 5

I.2 Présentation de la zone d'étude ..... 5

I.2.1 Localisation géographique ..... 5

I.2.2 Morphologie..... 6

I.3 Etude climatique ..... 8

I.3.1 Les précipitations ..... 8

I.3.1.1 Hhomogénéité des séries pluviométriques: test de WILCOXON ..... 9

I.3.1.2 Analyse statistique de la pluviométrie annuelle..... 10

I.3.1.3 Analyse des données pluviométriques -Station de Matmore ..... 11

I.3.1.4 Étude des variations précipitations de la Station de Matmore ..... 12

I.3.1.4.1 Pluviométrie annuelle ..... 12

I.3.1.4.2 Pluviométrie moyenne mensuelle de la station de Matmore ..... 13

I.3.1.4.3 Pluviométrie moyenne saisonnière ..... 14

I.3.2 Étude des températures ..... 14

I.3.3 L'humidité relative..... 15

I.3.4 Classification climatique..... 15

I.3.4.1 Méthodes pluviothermiques..... 15

I.3.4.2 Les indices climatiques ..... 17

I.3.4.2.1 L'indice DE DEMARTONNE..... 17

I.3.4.2.2 Indice aridité de la FAO..... 18

I.3.4.2.3 Indice de MORAL ..... 19

I.3.5 L'évapotranspiration ..... 19

I.3.5.1 L'évapotranspiration réelle ..... 20

I.3.5.2 Détermination de la lame d'eau ruisselée ..... 21

I.3.5.3 Estimation de la recharge naturelle de la zone d'étude..... 22

I.4 Analyse du contexte géologique et hydrogéologique ..... 22

I.4.1 Cadre géologie de la plaine de Ghriss..... 22

I.4.1.1 Bordure Nord et Ouest ..... 22

I.4.1.2 Bordure Sud ..... 23

I.4.1.3 Bordure Est ..... 24

I.4.1.4 Centre de la plaine de Ghriss ..... 24

I.4.2 Tectonique..... 24

I.4.3 Litho-stratigraphie..... 25

I.4.3.1 Trias ..... 25

I.4.3.2 Jurassique ..... 25

I.4.3.3 Crétacé ..... 26

I.4.3.4 Tertiaire..... 26

I.4.3.4.1 Eocène..... 26

I.4.3.4.2 Oligocène .....	26
I.4.3.4.3 Miocène.....	26
I.4.3.4.4 Pliocène.....	27
I.4.3.5 Le Quaternaire .....	27
I.4.4 Le Contexte hydrogéologique de la plaine de Ghriss .....	28
I.4.4.1 Les différents horizons de la zone aquifère .....	28
I.4.4.1.1 La Nappe Plio-Quaternaires.....	28
I.4.4.2.2 Nappe des Calcaires et Grès du Pliocène.....	29
I.4.4.2.3 Nappe des Calcaires dolomitiques du Jurassique .....	29
I.4.4.2 Les propriétés hydrogéologiques de l'aquifère Plio-Quaternaire .....	<b>30</b>
I.4.4.2.1 Epaisseur du toit de la nappe Plio-Quaternaire.....	30
I.4.4.2.2 Epaisseur de mur de la nappe Plio-Quaternaire.....	31
I.4.4.3 Evaluation de la nappe Plio-Quaternaire .....	31
I.4.4.3.1 Etude piézométrique .....	31
I.4.4.3.2 Fluctuation piézométrique de l'aquifère Plio-Quaternaire.....	33
I.4.4.4 L'exploitation des eaux souterraines de la plaine de Ghriss.....	34
I.4.4.4.1 Répartition des points d'eau.....	34
I.4.4.4.2 Débits extraits .....	34
I.4.4.5 Hydrochimie de la nappe .....	<b>35</b>
I.4.4.5.1 Classification chimique des eaux souterraines .....	35
I.4.4.5.2 Risque d'alcalinité et salinité des eaux de la plaine de Ghriss.....	38
<b>I.5 Description des composantes de l'agrosystème de Ghriss .....</b>	<b>39</b>
<b>I.6 Conclusion.....</b>	<b>42</b>
<b>CHAPITRE II: Description de la méthodologie et du matériel utilisé.....</b>	<b>40</b>
<b>II.1 Introduction .....</b>	<b>44</b>
<b>II.2 Les eaux souterraines.....</b>	<b>44</b>
II.2.1 Les eaux souterraines dans le monde .....	44
II.2.2 L'origine des eaux souterraine.....	45
<b>II.3 Classification des aquifères des eaux souterraines.....</b>	<b>46</b>
II.3.1 Aquifère à nappe libre .....	46
II.3.2 Aquifère à nappe captive .....	46
II.3.3 Aquifère à nappe semi-captive ou à drainance .....	47
<b>II.4 Notion de la pollution d'eau souterraine.....</b>	<b>48</b>
II.4.1 Type des pollutions.....	<b>48</b>
II.4.1.1 Les polluants physiques.....	48
II.4.1.2 Les polluants chimiques .....	49
II.4.1.3 La pollution d'origine organique et microbiologique.....	51
II.4.2 L'impact des polluants sur la santé et l'environnement .....	<b>52</b>
<b>II.5 Vulnérabilité des nappes souterraines .....</b>	<b>53</b>
II.5.1 Notions générales sur la vulnérabilité .....	53
II.5.2 Critères de la vulnérabilité.....	54
II.5.2.1 Critère de la vulnérabilité intrinsèque .....	54
II.5.2.2 Critère de la vulnérabilité spécifique.....	56
II.5.3 Cartographie d'estimation de la vulnérabilité des nappes .....	56
II.5.3.1 Principes des classes de choix d'un modèle .....	56
<b>II.6 Méthodes et matériels utilisés .....</b>	<b>58</b>
II.6.1 La méthode DRASRIC .....	58
II.6.1.1 Théorie.....	59
II.6.1.2 Principes de la méthode DRASTIC .....	59
II.6.1.3 Paramètres utilisés par la méthode DRASTIC .....	62

II.6.2 La méthode GOD.....	62
II.6.2.1 Approche théorique .....	62
II.6.2.2 Principe de la méthode GOD .....	63
II.6.2.3 Matériels utiles par méthode GOD .....	65
II.6.3 La méthode SI (Susceptibility Index) .....	66
II.6.3.1 Théorique.....	66
II.6.3.2 Principe de la méthode SI.....	66
II.6.3.3 Matériels utilisés par la méthode SI .....	67
II.6.4 Méthode DRASTIC-GOS .....	67
II.6.4.1 Théorique.....	68
II.6.4.2 Principe de la méthode DRASTIC-GOS .....	68
II.6.4.3 Matériels utilisé par la méthode DRASTIC-GOS .....	69
<b>II.7 Etude statistique .....</b>	<b>69</b>
II.7.1 Test de conformité .....	69
II.7.2 Fondement théorique .....	69
II.7.3 Principes du Test de conformité .....	70
II.7.4 Matériels utilisés .....	70
<b>II.8 Conclusion.....</b>	<b>71</b>
<b>CHAPITRE III: Apport des sig &amp; cartes thématiques.....</b>	<b>72</b>
<b>III.1 Introduction.....</b>	<b>73</b>
<b>III.2 Notion de cartographie.....</b>	<b>73</b>
<b>III.3 Notion de Système d'Information Géographique.....</b>	<b>73</b>
III.3.1 Notions générales .....	73
III.3.2 Théorie sur les SIG.....	74
III.3.2.1 La genèse du SIG .....	74
III.3.2.2 Les éléments constitutifs d'un SIG .....	74
III.3.2.2.1 Éléments matériels .....	74
III.3.2.2.2 Eléments logiciels .....	75
III.3.2.2.3 Données d'un SIG .....	76
III.3.3 Modes d'acquisition de données .....	76
III.3.3.1 Import de fichiers .....	76
III.3.3.2 Levé topographique.....	77
III.3.3.3 Photos aériennes .....	77
III.3.3.4 Images satellites .....	78
III.3.3.5 Système de positionnement global (GPS).....	79
III.3.3.6 Digitalisation .....	79
III.3.3.7 Scannage de plans .....	80
III.3.4 Types de données dans un SIG.....	<b>80</b>
III.3.4.1 Données spatiales .....	80
III.3.4.2 Données associées .....	81
III.3.5 Format de données dans les SIG .....	<b>82</b>
III.3.5.1 Format vecteur.....	82
III.3.5.2 Format raster .....	82
III.3.6 Système de gestion de base de données .....	<b>82</b>
III.3.6.1 Modèle Numérique de Terrain (MNT).....	<b>82</b>
III.3.6.1.1 Définition .....	82
III.3.6.1.2 Application du MNT dans la vulnérabilité des nappes .....	82
III.3.6.2 Télédétection.....	<b>83</b>
III.3.6.2.1 Définition .....	83
III.3.6.2.2 Application de la télédétection dans la vulnérabilité des nappes .....	83

III.3.7 Établissement de la carte de la sensibilité des nappes.....	84
III.3.7.1 Spatialisation d'informations pour la carte des risques de pollution .....	84
III.3.7.2 Carte de profondeur de la nappe .....	85
III.3.7.3 Carte de la recharge nette .....	86
III.3.7.4 Carte de lithologie de la zone saturée.....	87
III.3.7.5 Carte de la pédologie du sol .....	88
III.3.7.6 Carte des pentes.....	89
III.3.7.7 Carte de l'impact de la zone non saturée.....	90
III.3.7.8 Carte de la perméabilité d'aquifère .....	91
III.3.7.9 Carte d'occupation du sol.....	92
III.3.7.10 Carte du type d'aquifère .....	93
III.3.7.11 Carte de lithologie de la zone vadose.....	94
III.3.7.12 Carte de profondeur de la Zone Vadose.....	95
III.3.7.13 Carte de teneur en nitrate .....	96
<b>III.4. Conclusion.....</b>	<b>97</b>
<b>CHAPITRE IV: RÉSULTATS ET DISCUSSIONS.....</b>	<b>98</b>
<b>IV.1 Introduction.....</b>	<b>99</b>
<b>IV.2 Discussion des cartes thématiques.....</b>	<b>99</b>
IV.2.1 Cartes thématique des indices .....	99
IV.2.1.1 Carte d'indice de la profondeur de la nappe .....	99
IV.2.1.2 Carte d'indice de recharge .....	100
IV.2.1.3 Carte d'indice de lithologie de l'aquifère .....	101
IV.2.1.4 Carte d'indice de la pédologie du sol.....	102
IV.2.1.5 Carte d'indice des pentes .....	102
IV.2.1.6 Carte d'indice de l'impact de la zone non saturée .....	103
IV.2.1.7 Carte d'indice de la perméabilité d'aquifère.....	104
IV.2.1.8 Carte d'indice d'occupation des sols .....	105
IV.2.2 Croisement des cartographiques thématiques .....	106
IV.2.2.1 Application de la méthode DRASTIC .....	106
IV.2.2.2 Application de la méthode DRASTIC- GOS .....	107
IV.2.2.3 Application de la méthode GOD.....	109
IV.2.2.4 Application de la méthode SI.....	110
IV.2.3 Validation des résultats obtenus.....	112
IV.2.3.1 Cas de la méthode DARSTIC-GOS .....	112
IV.2.3.2 Cas de la méthode GOD et SI .....	114
<b>IV.3 Résultats du test de conformité.....</b>	<b>117</b>
<b>IV.4 Analyse comparative des méthodes.....</b>	<b>118</b>
IV.4.1 Méthode DRASTIC.....	118
IV.4.2 Méthode DRASTIC-GOS .....	118
IV.4.3 Méthode SI .....	119
IV.4.4 Méthode GOD .....	119
IV.4.5 Éléments de comparaison .....	120
<b>IV.5 Conclusion .....</b>	<b>122</b>
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>126</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>129</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>135</b>

## **LISTE DES FIGURES**

**LISTES DES FIGURES**

<b>Figure I.1.</b> Situation géographique de zone d'étude.....	6
<b>Figure I.2.</b> Carte des tranches d'altitudes de la plaine de Ghriss (Merzouk L., 2013).....	8
<b>Figure I.3.</b> Répartition des polygones de Thiessen dans la totalité de surface de la zone d'étude.....	12
<b>Figure I.4.</b> Histogramme des précipitations annuelles - station de Matmore (24 ans).....	13
<b>Figure I.5.</b> Courbe de la distribution des précipitations moyenne mensuelles - station de Matmore durant 24 ans.....	13
<b>Figure I.6.</b> Pourcentage de précipitation saisonnière - station de Matmore (1985/2008).....	14
<b>Figure I.7.</b> Evaluation des températures moyennes mensuelles - Station de Matmore.....	15
<b>Figure I.8.</b> Evaluation de l'humidité moyenne mensuelle - Station de Matmore.....	15
<b>Figure I.9.</b> Diagramme Ombrothermique - Station de Matmore.....	16
<b>Figure I.10.</b> Abaque d'indice d'aridité annuel de la station de Matmore.....	19
<b>Figure I.11.</b> Carte géologie de la nappe de Ghriss, extraite de la feuille NI - 31 - XIX, carte de Mostaganem1/200000 (ANRH, 2008).....	25
<b>Figure I.12.</b> Log litho-stratigraphique des formations de la plaine de Ghriss (Bekkoussa., 2009).....	28
<b>Figure I.13.</b> Les aquifères de la plaine de Ghriss (Sourisseau, 1974).....	30
<b>Figure I.14.</b> Epaisseur du toit de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss.....	31
<b>Figure I.15.</b> Epaisseur du mur de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss.....	31
<b>Figure I.16.</b> Carte piézométrique de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss (1997).....	32
<b>Figure I.17.</b> Carte piézométrique de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss (2005).....	32
<b>Figure I.18.</b> Carte piézométrique de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss (2019).....	32
<b>Figure I.19.</b> Faciès chimiques des eaux souterraines de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss (ENHYD, 2010).....	36
<b>Figure I.20.</b> Faciès chimiques des eaux souterraines de la nappe des Calcaires dolomitiques du jurassique supérieur (ENHYD, 2010).....	37
<b>Figure I.21.</b> Faciès chimiques des eaux souterraines de la nappe des Grès et des Calcaires lacustres du Pliocène (ENHYD, 2010).....	37
<b>Figure I.22.</b> Carte de répartition des surfaces agricole dans la plaine de Ghriss (DRE, 2016).....	39
<b>Figure I.23.</b> Pourcentage des superficies irriguées par types des cultures dans la plaine de Ghriss (DRE, 2016).....	40
<b>Figure I.24.</b> Pourcentage des superficie irriguées de la plaine de Ghriss (DRE, 2016).....	41
<b>Figure I.25.</b> Agrosystème du bassin versant d'Oued Fekan (CTS., 2019).....	42
<b>Figure II.1.</b> Le cycle d'écoulement des eaux (Thévenot, 2007).....	45
<b>Figure II.2.</b> Aquifère libre (d'après Castany, 1982 in Michel et al., 1993).....	46
<b>Figure II.3.</b> Schéma de l'aquifère à la nappe captive ( Castany, 1982).....	47
<b>Figure II.4.</b> Schéma de la drainance (Michel et al., 1993).....	47
<b>Figure II.5.</b> Comportement des hydrocarbures dans le milieu souterraine (Boucheseiche, 2002).....	51
<b>Figure II.6.</b> Estimation de la vulnérabilité d'un aquifère par la méthode de GOD ( Foster,1987 in Bouchahm et al., 2009).....	65
<b>Figure II.7.</b> Schématisation du test de Kappa (Bernard, 1993).....	70
<b>Figure III.1.</b> Ensemble de clichés effectués à plusieurs kilomètres d'altitude (Kouba, 2018).....	77
<b>Figure III.2.</b> Exemple de canevas de photos aériennes (Kouba, 2018).....	78
<b>Figure III.3.</b> Couple de stéréoscopique et leur zone de recouvrement: (a) cliché; (b) cliché 2; (c) zone de recouvrement des cliché 1 et 2 (Kouba, 2018).....	78
<b>Figure III.4.</b> Image satellite prise par le satellite IKONOS (Kouba, 2018).....	79
<b>Figure III.5.</b> (a) Système de localisation par satellite (GPS) et satellite (b et c) (Kouba, 2018).....	79

<b>Figure III.6.</b> Une table de digitalisation (Kouba, 2018).....	80
<b>Figure III.7.</b> Scanner automatique, utilisé pour le scannage de plans (Kouba, 2018).....	80
<b>Figure III.8.</b> Données associées ( <a href="http://www.corse.fr/infogeo/">http://www.corse.fr/infogeo/</a> ).....	81
<b>Figure III.9.</b> Carte de la profondeur de l'eau de l'aquifère alluviale de Ghriss.....	86
<b>Figure III.10.</b> Carte de la recharge efficace de l'aquifère Plio-Quaternaire de Ghriss.....	87
<b>Figure III.11.</b> Carte de la lithologie de la zone saturée de l'aquifère Plio-Quaternaire.....	88
<b>Figure III.12.</b> Carte pédologie de l'aquifère Plio-Quaternaire de Ghriss.....	89
<b>Figure III.13.</b> Carte de la pente du terrain de l'aquifère Plio-Quaternaire de Ghriss.....	90
<b>Figure III.14.</b> Carte de l'impact de la zone non saturée de l'aquifère Plio-Quaternaire de la plaine de Ghriss.....	91
<b>Figure III.15.</b> Carte de perméabilité de l'aquifère Plio-Quaternaire de Ghriss.....	92
<b>Figure III.16.</b> Carte d'occupation du sol de l'aquifère Plio-Quaternaire de Ghriss.....	93
<b>Figure III.17.</b> Carte d'aquifère Plio-Quaternaire de la plaine de Ghriss.....	94
<b>Figure III.18.</b> Carte lithologie de la zone vadose d'aquifère Plio-Quaternaire de Ghriss.....	95
<b>Figure III.19.</b> Carte de profondeur de la zone vadose de Ghriss.....	96
<b>Figure III.20.</b> Carte de concentration en nitrate à travers l'aquifère Plio-Quaternaire de Ghriss.....	97
<b>Figure IV.1.</b> Carte de l'indice de profondeur de la nappe par la méthode DRASTIC.....	99
<b>Figure IV.2.</b> Carte de l'indice de profondeur de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss par la méthode SI.....	100
<b>Figure IV.3.</b> Carte de l'indice de la recharge de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss par la méthode DRASTIC.....	100
<b>Figure IV.4.</b> Carte de l'indice de la recharge de la nappe Plio-Quaternaire de la plaine de Ghriss par la méthode SI.....	101
<b>Figure IV.5.</b> Carte de l'indice de la lithologie de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss par la méthode DRASTIC.....	101
<b>Figure IV.6.</b> Carte de l'indice de la lithologie de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss.....	102
<b>Figure IV.7.</b> Carte de l'indice de la pédologie de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss par la méthode DRASTIC.....	102
<b>Figure IV.8.</b> Carte de l'indice des pentes de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss par la méthode DRASTIC.....	103
<b>Figure IV.9.</b> Carte de l'indice des pentes de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss par la méthode SI.....	103
<b>Figure IV.10.</b> Carte de l'indice de la zone non saturée de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss par la méthode DRASTIC.....	104
<b>Figure IV.11.</b> Carte de l'indice de perméabilité la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss par la méthode DRASTIC.....	105
<b>Figure IV.12.</b> Carte de l'indice d'occupation des sols de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss par la méthode DRASTIC.....	105
<b>Figure IV.13.</b> Carte de l'indice d'occupation des sols de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss par la méthode SI.....	106
<b>Figure IV.14.</b> Carte de l'intervalle d'indice DRASTIC dans la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss.....	106
<b>Figure IV.15.</b> Carte de la vulnérabilité DRASTIC de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss...	107
<b>Figure IV.16.</b> Carte de l'intervalle de l'indice DRASTIC-GOS de la nappe Plio-Quaternaire de la plaine de Ghriss.....	108
<b>Figure IV.17.</b> Carte de la vulnérabilité DRASTIC-GOS de la nappe Plio-Quaternaire de la plaine de Ghriss.....	108
<b>Figure IV.18.</b> Carte de l'intervalle de l'indice GOD de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss..	109
<b>Figure IV.19.</b> Carte de la vulnérabilité GOD de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss.....	110

<b>Figure IV.20.</b> Carte des classes de vulnérabilité SI de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss.....	111
<b>Figure IV.21.</b> Carte de l'intervalle de vulnérabilité de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss par la méthode SI.....	111
<b>Figure IV. 22.</b> Confirmation des cartes de vulnérabilité intrinsèque de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss par la méthode DRASTIC-GOS.....	113
<b>Figure IV. 23.</b> Confirmation des cartes de vulnérabilité intrinsèque de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss par la méthode DRASTIC.....	113
<b>Figure IV.24.</b> Répartition superficielle des différentes classes de vulnérabilité DRASTIC et DRASTIC-GOS.....	114
<b>Figure IV.25.</b> Validation de la vulnérabilité de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss par la méthode GOD.....	115
<b>Figure IV. 26.</b> Validation de la vulnérabilité de la nappe Plio-Quaternaire de la plaine de Ghriss par la méthode SI.....	116
<b>Figure IV. 27.</b> Distribution superficielle entre les différentes catégories de vulnérabilité par les deux méthodes GOD et SI.....	116

# **LISTE DES TABLEAUX**

**LISTE DES TABLEAUX**

<b>Tableau I.1.</b> Répartition par tranches d'altitude de la superficie (Hattab, 1993).....	7
<b>Tableau I.2.</b> Répartition des stations pluviométrique.....	8
<b>Tableau I.3.</b> Description de la pluviométrie moyenne annuelle entre 1985-2008.....	10
<b>Tableau I.4.</b> Evaluation des précipitations saisonnières -Station de Matmore (1985/2008).....	14
<b>Tableau I.5.</b> Evaluation des précipitations moyennes mensuelles et la température moyenne mensuelle - Station de MATMORE (1985 / 2008).....	16
<b>Tableau I.6.</b> Récapitulatif de la précipitation moyenne annuelle - Station Matmore durant 24 ans (1985-2008).....	17
<b>Tableau I.7.</b> L'évaluation de l'indice d'aridité mensuel- Plaine de Ghriss (1985-2008).....	18
<b>Tableau I.8.</b> Tableau récapitulatif des résultats de l'évapotranspiration réelle.....	21
<b>Tableau I.9.</b> Evaluation piézométrique entre 1997-2019 m.....	33
<b>Tableau I.10.</b> Répartition des points d'eau à travers la plaine de Ghriss (ANRH, 1997).....	34
<b>Tableau I.11.</b> Répartition des points d'eau destinés à l'irrigation (Sogreah, 2008).....	34
<b>Tableau I.12.</b> Répartition des points d'eau destinés à l'irrigation (ABH, 2010).....	34
<b>Tableau I.13.</b> Débit annuel prélevé de chaque formation aquifère. (ANRH, 1997).....	35
<b>Tableau I.14.</b> Débit annuel prélevé de chaque formation aquifère (DRE, 2010).....	35
<b>Tableau I.15.</b> Classification hydrochimique des eaux d'irrigation (ANRH, 2009).....	38
<b>Tableau II.1.</b> Effets des polluants sur la santé et l'environnement [2].....	52
<b>Tableau II.2.</b> Évaluation des sept paramètres DRASTIC en termes de classe et de poids (Aller et al., 1987).....	60
<b>Tableau II.3.</b> Évaluation des sept paramètres DRASTIC par termes de classe et de côtes (Drias et al., 2015).....	60
<b>Tableau II.4.</b> L'intervalles des catégories de l'indice de la vulnérabilité dans la méthode DRASTIC (Engel et al., 1996).....	61
<b>Tableau II.5.</b> Les principaux éléments la vulnérabilité des aquifères à la pollution (Murat., 2000).....	63
<b>Tableau II.6.</b> Indices SI en pourcentage et degré vulnérabilité (Jourda et al., 2007).....	67
<b>Tableau III.1.</b> Les différentes catégorie de logiciels de S.I.G (Reido et al., 2002).....	75
<b>Tableau III.2.</b> Paramètres hydrogéologiques obtenus à l'aide de la télédétection (Doris., 1998).....	83
<b>Tableau III.3.</b> Mode d'acquisition de données.....	85
<b>Tableau III.4.</b> Cotation de la profondeur d'eau de l'aquifère Plio-Quaternaire de Ghriss.....	86
<b>Tableau III.5.</b> Cotation de la recharge efficace d'aquifère Plio-Quaternaire de Ghriss.....	87
<b>Tableau III.6.</b> Cotation des matériaux d'aquifère Plio-Quaternaire de Ghriss.....	88
<b>Tableau III.7.</b> Cotation de la nature du sol d'aquifère Plio-Quaternaire de Ghriss.....	89
<b>Tableau III.8.</b> Cotation de la topographie du terrain d'aquifère Plio-Quaternaire de Ghriss...	90
<b>Tableau III.9.</b> Cotation de lithologie de zone vadose de l'aquifère Plio-Quaternaire de Ghriss.....	91
<b>Tableau III.10.</b> Cotation de la perméabilité d'aquifère Plio-Quaternaire de Ghriss.....	92
<b>Tableau III.11.</b> Cotation d'occupation du sol d'aquifère Plio-Quaternaire de Ghriss.....	93
<b>Tableau III.12.</b> Cotation d' d'aquifère Plio-Quaternaire de la plaine de Ghriss.....	94
<b>Tableau III.13.</b> Cotation de la lithologie de l'aquifère Plio-Quaternaire de Ghriss.....	95
<b>Tableau III.14.</b> Cotation de la profondeur de la zone vadose.....	96

## **LISTES ABRIVIATIONS**

**LISTE DES ABREVIATIONS**

**ABH** : Agence de Bassin Hydrographique.

**ADE** : Algérienne des eaux.

**AGIRE** : Agence de Gestion Intégrée des Ressources en Eau.

**Al** : Aluminium.

**ANRH** : Agence Nationale des Ressources en eau.

**c** : cote associée.

**CET** : Centre d'Enfouissement Technique.

**cm** : Centimètre.

**CO<sub>2</sub>** : Dioxyde de carbone.

**Cr** : Chrome

**CTS** : Centre des Techniques Spatiales.

**DBO<sub>5</sub>** : Demande Biologique en Oxygène pendant 5 jours.

**DCO** : Demande Chimique en Oxygène.

**DRASTIC** : **D**:Profondeur à la nappe (**Depth**) ; Recharge efficace de l'aquifère (**Net Recharge**) ; **A**: Nature de la zone saturée (**Aquifer**) ; **S**: Le type de Sol (**Soil media**) ; Topographie ou la pente (**Topography**) ; Impact de la zone non saturée (**Impact of the vadose**) ; Perméabilité ou la Conductivité hydraulique de l'aquifère.

**DRASTICGOS** : **D**:Profondeur à la nappe (**Depth**) ; Recharge efficace de l'aquifère (**Net Recharge**) ; **A**: Nature de la zone saturée (**Aquifer**) ; **S**: Le type de Sol (**Soil media**) ; Topographie ou la pente (**Topography**) ; Impact de la zone non saturée (**Impact of the vadose**) ; Perméabilité ou la Conductivité hydraulique de l'aquifère ; **G**roundwater occurrence (type d'aquifère) ; **o**ccupation des sols.

**E** : épaisseur de la zone non saturée.

**g** : gramme.

**ENHYD** : Entreprise nationale des études hydrauliques : bureau d'étude chargé des études et de l'engineering des travaux hydraulique.

**GOD** : **G**roundwater occurrence (type d'aquifère) ; **O**verall aquifer class (caractéristiques de l'aquifère en termes de lithologie et porosité) ; **D**: Profondeur à la nappe (**Depth**).

**Ha**: hectares.

**IDWA**: Inverse Distance Weighted Averaging.

**JORADP** : Journal Officiel de la République Algériennes Démocratique et Populaire.

**JORADP** : Journal Officiel de la République Algériennes Démocratique et Populaire.

**K** : perméabilité.

**Km** : Kilomètre.

**Km<sup>2</sup>** : Kilomètre carré.

**m** : mètres.

**m<sup>2</sup>/s** : mètres par seconde.

**m<sup>3</sup>** : mètre cube.

**m<sup>3</sup>/j** : mètre cube par jour.

**MES** : matière en suspension.

**mg/l** : Milligramme par litre.

**mm** : Millimètre.

**mm/an** : Millimètre par année.

**MNT** : Modèle Numérique de Terrain.

**MO** : Matière organique.

**N** : Nord.

**N.N.E** : Nord Nord-Est.

**NE** : Nord Est.

- NH<sub>4</sub><sup>+</sup>** : Azote ammoniacal.  
**NNO** : Nord Nord-Ouest.  
**NNS** : Nord Nord-Sud.  
**NO** : Nord-Ouest.  
**NO<sub>3</sub><sup>-</sup>** : Nitrates.  
**NS** : Nord-Sud.  
**NWWA** : National Water Well Association.  
**OMS** : l'organisation Mondiale de la santé.  
**ONM** : Office National de la Météorologie.  
**p** : poids du paramètre.  
**PT** : Phosphates totale.  
**S.S.O** : Sud Sud-Ouest.  
**SGBD** : Système de Gestion de Base des Données.  
**SI** : Susceptibilité Index.  
**SIG** : Système d'Information Géographique.  
**SI<sub>i</sub>** : indice SI.  
**SI<sub>max</sub>** : indice SI maximum.  
**SI<sub>min</sub>** : indice SI minimum.  
**USA** : Etats Unis d'Amérique.  
**USEPA** : U.S. Environmental Protection Agency.  
**UV** : Ultraviolet.  
**Z** : Altitude.  
**ZNS** : Zone non saturé.  
**C<sub>1</sub>** : cote de la lithologie.  
**C<sub>a</sub>** : cote du type d'aquifère.  
**C<sub>a</sub>** : cote de la profondeur de la nappe.  
**IG** : l'indice de vulnérabilité GOD  
**EP** : Evapotranspiration non corrigé.  
**ETP** : Evapotranspiration potentiel (cm).  
**K** : Le coefficient de correction.  
**S** : Aire totale du bassin versant de la zone d'étude.  
**Si** : Aire de polygone associée à chaque station pluviométrique.  
**n** : Nombre des stations.  
**%** : pourcentage.  
**P<sub>moy</sub>** : La précipitation moyenne annuelle au niveau de bassin versant (mm).  
**°** : degré.  
**°C** : degré Celsius.



# **INTRODUCTION GENERALE**

## INTRODUCTION GENERALE

L'eau, ressource essentielle et stratégique, revêt une importance capitale dans les régions arides et semi-arides, où sa rareté constitue un défi majeur. En Algérie, pays confronté à un stress hydrique récurrent et persistant, la gestion rationnelle et durable des ressources hydriques est devenue une priorité nationale inscrite dans les politiques publiques depuis les deux dernières décennies.

La rareté naturelle de l'eau, aggravée par des phénomènes tels que le changement climatique, la croissance démographique et l'urbanisation rapide, impose une gestion rigoureuse et intégrée visant à préserver cette ressource vitale, tout en répondant aux besoins croissants des secteurs domestique, agricole et industriel (Benblidia M., 2010).

De ce fait, l'eau a été hissée en Algérie au rang de priorité nationale avec l'avenue du 3ème millénaire car considérée comme socle de tout développement économique (Bouarfa B.F, 2018).

Par ailleurs, l'environnement physico-chimique dans lequel elle s'y trouve, l'eau souterraine diffère de l'eau de surface. Elle est présente dans la plupart des formations géologiques, notamment dans des sédiments et roches formant un réservoir souterrain ou un aquifère dans lequel l'eau peut être stockée et transmise (Baali, 2007).

Cette catégorie d'eau constitue une source approvisionnement d'eau potable inestimable pour l'humanité. Certes, la plupart des sociétés sont habituées à compter sur les eaux de ruissellement (lacs, rivières, fleuve) pour leur approvisionnement, mais, de plus en plus d'individus et municipalités se tournent vers cette ressource souterraine, en raison de ses vertus qualitatives et son coût d'exploitation raisonnable.

C'est le cas de certains pays à climat aride du Maghreb et du Moyen Orient, l'eau souterraine détient une place primordiale pour l'alimentation des populations et leur activité (Fatih, B., 2009). Toutefois, la forte concentration des usagers-consommateurs dans des agglomérations urbaines de plus en plus étalées engendre des effets indésirables sur la qualité des eaux souterraines environnantes.

Face à cette problématique, des outils de modélisation ayant pour objectifs la protection et la préservation de cette ressource reste le souci primordial pour les gouvernements pour sortir de la situation de pénurie d'eau qui touchait leurs pays (Morgan et al., 2013).

En Algérie, où les potentialités hydriques sont estimées actuellement à 18 milliards de m<sup>3</sup>/an, la part des eaux souterraines renouvelables constitue environ 10 %, soit 2 milliards de m<sup>3</sup>/an. Les fortes demandes en eau agricole (65%), suivi de celle de l'eau potable (35 %) de plus en plus croissantes sont à l'origine d'un déséquilibre de la balance actuelle qui pourrait s'accroître dans l'avenir (Kellouche, 2025).

Plus proche de nous, la plaine de Ghriss dans le nord-ouest algérien, ne cesse de susciter la curiosité de plusieurs recherches doctorales. Son intérêt repose sur une ressource hydrique mise en évidence par Sourisseau (1974), soutenue par l'ANRH (2016), une vocation agricole et un savoir-faire confirmé, ce qui lui a prévalu la réputation d'un agrosystème régional par excellence.

Paradoxalement, le taux d'urbanisation phénoménal et incontrôlé que connaît les espaces fertiles de cette plaine couplé au recours à une intensification agricole à forte charge polluante conduisent à des seuils de dégradation intolérables, menaçant les capacités hydriques souterraines tant sur le plan qualitatif que quantitatif.

Ce état des lieux met en évidence l'exposition de ce patrimoine hydrique, plus particulièrement la nappe du Plio-Quaternaire à une vulnérabilité extrêmement fragile, du fait des multiples influences anthropiques agissant directement ou indirectement sur la qualité intrinsèque des eaux.

S'agissant d'un conglomérat des grès et de calcaires lacustres du Pliocène, cet aquifère surmonte celui des calcaires dolomitiques du jurassique, favorisant ainsi un contact transmissif latéral (Sourisseau, 1974). Toutefois, il ne cesse d'inquiéter par le rabattement de son niveau piézométrique, déjà signalé par l'ANRH (2016) et confirmé récemment par des recherches doctorales (Benyamina, 2022; Kennich, 2022; Benadla 2023).

A ce constat hydrodynamique, s'ajoute la préoccupation liée à la vulnérabilité à la pollution par les intrants agricoles et des rejets d'eaux usées sporadiques à travers cet espace géographique. Cependant, les approches basées sur le suivi de l'évolution de certains paramètres hydrochimiques et géochimiques ont été insuffisantes à localiser avec précision les points névralgiques pour la protection efficace de ce aquifère.

L'objectif de cette thèse est de fournir un cadre analytique basé sur le couplage des modèles de vulnérabilité telles que DRASTIC, SI, GOD aux systèmes d'information géographique (SIG), afin de fournir aux gestionnaires de cette nappe un outil opérationnel garantissant la

préservation de la qualité de l'eau dans un contexte de forte demande et de diversité des usagers-consommateurs.

Autrement dit, l'apport de cette thèse réside dans l'apport d'une approche privilégiant la cartographie des points névralgiques de cet aquifère, en termes de sensibilité aux facteurs polluants, tels que les nitrates. Outre, l'application des modèles qui ont montré leur efficacité, la thèse propose également le développement d'une approche hybride, par le couplage des différents modèles, aux résultats jugés performants.

A cet effet, la présente thèse a été structurée en quatre chapitres successifs :

- Le premier chapitre est consacré à la caractérisation de la zone d'étude, notamment à la présentation de l'état de l'art de ses ressources hydriques.
- Le deuxième chapitre explore la méthodologie et les principes de base des différentes modèles d'approches et d'estimation de la vulnérabilité.
- Le troisième chapitre est consacré à l'apport des SIG décrivant la spatialisation des cartes thématiques utilisées à l'évaluation de la sensibilité de la nappe du Plio-Quaternaire de Ghriss aux polluants.
- Le quatrième chapitre synthétise les croisements des cartes thématiques ainsi que les tests statistiques de conformité et de comparaison entre les différents modèles étudiés.
- Enfin, une conclusion qui synthétise les résultats obtenus dans cette thèse, ouvrant des perspectives de son élargissement à l'avenir.

**CHAPITRE I:**

***Caractérisation physique et naturelle de  
la zone d'étude***

**CHAPITRE I : CARACTÉRISATION PHYSIQUE ET NATURELLE DE LA ZONE D'ÉTUDE****I.1 Introduction**

Il est indéniablement reconnu que le potentiel des ressources en eau souterraine tributaires de la méditerranée sont faiblement renouvelables. Par voie de conséquence, le manque d'eau conduit à sur-exploiter ces aquifères à recharge très limitée, ce qui engendre leur caractère vulnérable imposé par un urbanisme aléatoire et un forçage de captage des nappes de plus en plus intensif.

A ce titre, la plaine de Ghriss dans le nord-ouest algérien, réputée par sa vocation agricole, est lourdement confrontée à la pollution de l'emploi de grandes quantités d'engrais et des pesticides à usage de traitement et d'intensification des productions. Or, l'intrusion de ces polluants dans l'aquifère modifie la qualité de l'eau et réduit son usage par le consommateur.

Face à cette préoccupation, la nécessité d'une approche par la cartographie de la vulnérabilité permet à moyen terme de préciser les zones les plus sensibles aux activités anthropiques. Une fois identifiées, ces zones peuvent être gérées avec précaution par les planificateurs et les utilisateurs de la terre.

**I.2 Présentation de la zone d'étude****I.2.1 Localisation géographique**

Rattachée administrativement à la wilaya de Mascara, la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss est située au nord - ouest de l'Algérie, plus précisément sur le flanc Sud des Monts de Béni Chougrane. Du point de vue hydrologique, elle fait partie du haut bassin hydrographique de la Macta, sous-bassin versant d'Oued Fekan. Au plan géographique, elle est localisée entre la latitude  $35^{\circ} 07'$  et  $35^{\circ} 31'$  Nord et les longitudes  $0^{\circ} 0' 56''$  à  $0^{\circ} 26'$ .

S'étendant sur une superficie de  $605 \text{ km}^2$ , elle a pour limites :

- Au Nord par les Monts de Béni Chougrane.
- Au Sud par les monts de Saïda.
- A l'Ouest par les collines de Bouhanifia.
- A l'Est par le plateau Tirenifine (**Figure I.1**).

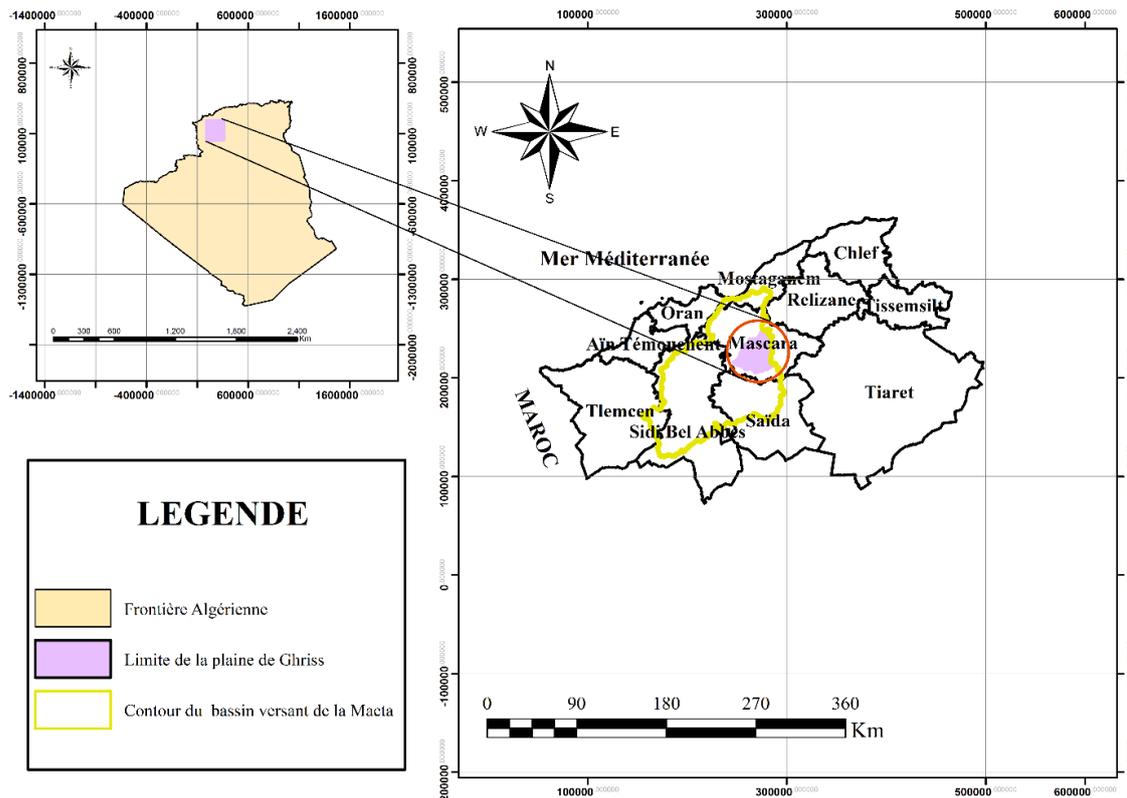


Figure I. 1. Situation géographique de zone d'étude.

### I.2.2 Morphologie

Globalement, la plaine de Ghriiss est à une altitude moyenne de 470 m, surplombée par des reliefs de bordure élevés jusqu'à 1100 m d'altitude au Sud (montagne de Nesmoth). Sa morphologie présente différents aspects :

- Au Nord et à l'Ouest des piémonts formant des bas-reliefs.
- Au centre des buttes témoins d'un autre environnement et des monticules rocheux assez élevés.
- Au Sud d'importants massifs d'aspect tabulaire, coiffés de sommets dépassant 1000 mètres (monts de Nesmot).
- A l'Est, un relèvement du sol forme le sol de Témaznia entre Tighenif et la vallée de l'oued Haddad.

La répartition par tranche d'altitude (Km<sup>2</sup> ou en % de la surface totale) est résumée dans le tableau ci-après.

**Tableau I. 1.** Répartition par tranches d'altitude de la superficie (Hattab, 1993).

Surface	Tranche d'altitude [cm]	Surface partielle [Km <sup>2</sup> ]	% de la surface totale	% des surfaces cumulées
S1	1100-1000	43	3.7	3.7
S2	1000- 900	60	5.2	9.8
S3	900-800	52	4.5	13.4
S4	800-700	104	9	22.4
S5	700-600	145	12	34.4
S6	600-500	309.1	27.04	61.44
S7	500-400	436.5	37.77	99.21
S8	400-300	7	0.64	99.85

La courbe hypsométrique de la plaine, dressée à partir des données altimétriques, donne les fréquences échelonnées en superficie en Km<sup>2</sup> (ou en %). A partir des quelles, on peut constater les tranches d'altitudes les plus caractéristiques (Figure I.2):

- **Altitude maximale:** elle correspond au point le plus haut du bassin :  $H_{max} = 11000\text{m}$ .
- **Altitude minimale :** elle correspond au point le plus bas du bassin :  $H_{min} = 300\text{m}$ .
- **Altitude la plus fréquente:** Elle correspond au maximum du diagramme fréquences altimétriques :  $H_{freq} = 400\text{m}$  à  $500\text{m}$ .
- **Altitude médiane:** elle correspond au l'ordonnée moyenne de la courbe hypsométrique :  $m = 640\text{ m}$ .
- **Altitude moyenne:** Elle correspond au rapport de la somme des produits de surfaces élémentaires par l'altitude moyenne sur la surface totale du bassin versant.

$$H_{moy} = \frac{\sum H_{moy} \times \sum S_i}{S} \quad (\text{I.2.1})$$

Avec :

- $H$  : altitude moyenne entre deux courbes de niveau [m].
- $S_i$  : surface élémentaire compris entre deux courbes de niveau [m<sup>2</sup>].
- $S$  : surfaces du bassin versant [Km<sup>2</sup>].

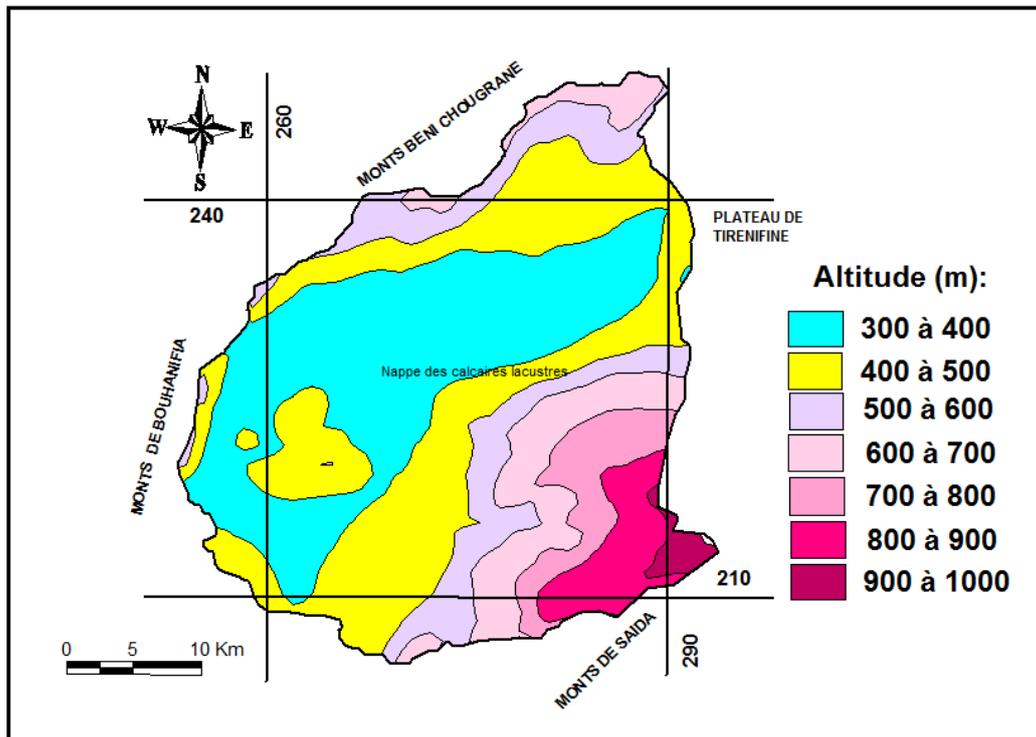


Figure I. 2. Carte des tranches d'altitudes de la plaine de Ghriss (Merzouk L., 2013)

### I.3 Etude climatique

La localisation géographique de la zone d'étude est influencée directement par ses caractéristiques climatiques, comprises entre les effets climatiques de sahariens et méditerranéens. Les données pluviométriques ont été fournies à l'office national météorologie de Mascara (ONM). Elles concernent les moyennes des pluies mensuelles de neuf (9) stations pluviométriques, mises en place entre 1972 et 2002.

#### I.3.1 Les précipitations

Les précipitations jouent un rôle très important pour assurer l'alimentation et d'écoulement des eaux superficielles et souterraines. Qu'il s'agisse des précipitations ou de l'évapotranspiration, les stations pluviométriques (**Tableau I.2**) présentent les principales caractéristiques des bassins hydrographiques.

**Tableau I.2.** Répartition des stations pluviométrique.

Station	Code	Longitude (°)	Latitude (°)	Altitude (m)	Période
Froha	111402	0.130	35.303	467	1985-2011
Ghriss	111424	0.167	35.246	498	1985-2011
Maoussa	111401	0.248	35.378	494	1985-2011
Mascara	111429	0.146	35.393	607	1985-2011
Matemore	111405	0.215	35.330	482	1985-2011

Nesmoth	111418	0.382	35.252	930	1985-2011
Oued Taria	111201	0.091	35.116	501	1985-2011
Sidi Kada	111414	0.344	35.330	549	1985-2011
Tizi	111413	0.076	35.320	493	1985-2011

Ces stations sélectionnées se trouvent dans la période homogène et ont peu de discontinuités. La critique des données de précipitations permet une étude assez fiable. A cet effet, les statistiques et les graphiques représentent le moyen le plus sûr et le plus efficace pour repérer les anomalies.

### I.3.1.1 Hhomogénéité des séries pluviométriques: test de WILCOXON

Toutes les études qui portent sur des variables climatiques doivent prendre en compte la correction des inhomogénéités dans les séries climatiques. Plus spécifiquement, l'utilisation de séries de précipitations de qualité permettra de prendre des décisions basées sur des données fiables.

La plupart des tests (test de Mann-Whitney, test de Kruskal, Wallis et test Wilcoxon) supposent que la variable aléatoire suit la loi normale. Cette hypothèse n'est pas toujours réalisée. Tous les tests non paramétriques incluant tous ceux qui ne requièrent pas de faire des estimations de moyenne et de la variance, y compris les valeurs  $X_i$ , mais uniquement leurs rangs dans la série ordonnée de toutes les valeurs.

Dans notre cas, nous avons retenu pour cette étude climatique, le test de WILCOXON, où l'échantillon X provient d'une même population Y et le terme XUY est issu de cette même population. Supposons qu'une série d'observation de taille N ait été réalisée, ce qui permet de tirer deux échantillons X et Y :  $N_1$  et  $N_2$  sont les valeurs des tailles des échantillons, avec  $N=N_1+N_2$  et  $N_1 \leq N_2$ .

On établit un classement des valeurs de notre série en fonction de leur ordre croissant. Ensuite, nous nous concentrerons uniquement sur le classement de chaque élément des deux échantillons dans cette série. Lorsqu'une valeur se répète plusieurs fois, on lui attribue le rang moyen correspondant. Enfin, on procède au calcul de la somme  $W_x$  des éléments du premier échantillon dans la série commune (**Formule I.3.1**) :

$$W_x = \sum \text{Rang}(x) \quad (\text{I.3.1})$$

$$W_{\min} = \frac{(N_1+N_2+1)N_1-1}{2} - Z_{1-\alpha/2} \frac{\sqrt{N_1N_2(N_1+N_2+1)}}{12} \quad (\text{I.3.2})$$

$$W_{\max} = (N_1 + N_2 + 1)N_1 - W_{\min} \quad (\text{I.3.3})$$

$1-\alpha/2$  Signifie que  $Z_{1-\alpha/2}$  représente la valeur de variable centrée réduite de la loi normale.

L'application de test de Wilcoxon pour vérifier l'homogénéité des données de précipitation annuelle de la station de Matmore (wilaya de Mascara) au niveau de signification de 5% (**C.f Annexe A**). Dans le but de simplifier les calculs, nous divisons notre série de précipitations en deux sous-ensembles de longueurs respectives  $N_2 = 18$  et valeurs  $N_1 = 9$ .

$$W_x = 131$$

$$W_{\min} = 73.89$$

$$W_{\max} = 178.11$$

On contrôle l'inégalité :  $W_{\min} < \sum \text{Rang}(x) < W_{\max}$  (**I.3.4**)

C'est-à-dire :  $73.89 < 131 < 178.11$

La vérification de l'inégalité est donc réalisée et notre série est donc homogène.

### I.3.1.2 Analyse statistique de la pluviométrie annuelle

Les facteurs climatiques ont un impact significatif très important sur le débit des cours d'eau, car ils influent sur la qualité d'eau qui s'écoule depuis le bassin versant. Pour le cas de la zone d'étude, les caractéristiques descriptives des stations pluviométriques ont été définies en prenant en compte une période d'observation allant de 1985 à 2008. La description des pluies moyennes annuelles est représentée dans le **Tableau I.3**.

**Tableau I.3.** Description de la pluviométrie moyenne annuelle entre 1985-2008.

Station	Moyenn	Médiane	Minimum	Maximum	Ecarte-type	CV	max/min
MAOUSSA	282.25	270.4	136	408.3	71.81	0.25	3
FROHA	278.60	278.95	169.4	380.7	68.55	0.25	2.25
MATEMORE	267.94	271.15	174.7	377.6	52.26	0.19	2.16
TIZI	328	335.05	190.6	462.3	74.40	0.23	2.42
SIDI KADA	320.89	307.35	186.9	466.4	80.44	0.25	2.49
NESMOTH	426.02	382.6	176.5	772.3	159.46	0.37	4.38
GHRIS	261.07	250.4	161.8	417.3	64.21	0.25	2.58
MASCARA	326.06	329.4	165.4	470.7	86.03	0.26	2.85

Selon le **Tableau I.3**, la précipitation moyenne annuelle sont comprise entre 261,07 mm et 426,02 mm. La valeur élevée est enregistrée au niveau de la station de NESMOTH, alors que la plus faible valeur est enregistrée au niveau de la station de Ghriss.

Cette observation indique clairement que la loi de distribution est symétrique, parce qu'il a été observé que les moyennes des stations utilisées se situent à peu près à la médiane, ainsi que le coefficient de variation varie entre 0.19 et 0.37, là où la station de Nesmoth prend la haute

valeur et la basse valeur enregistrée au niveau de la station de Matmore. Le rapport Max/Min est compris entre 2,16 à la station de Matmore et 4,38 à la station de Sidi Kada. La variation annuelle des pluies au niveau de la plaine de Ghriss est clairement régulière.

### I.3.1.3 Analyse des données pluviométriques -Station de Matmore

Les conditions météorologiques ont un impact décisif sur le débit des cours d'eau, car elles influencent la quantité de précipitations dans le bassin versant. Les observations ponctuelles des pluies sont obtenues à partir des postes pluviométriques installés au sol. Il existe différentes méthodes d'évaluation. Dans le cas de la zone d'étude, nous avons utilisé huit (08) stations pluviométriques (*C.f annexe B*). Pour le calcul de la précipitation moyenne annuelle on a procédé comme suit :

- La méthode de la moyenne arithmétique.
- La méthode de Thiessen.

#### A. La méthode de la moyenne arithmétique

L'objectif est de déterminer la valeur moyenne des précipitations enregistrées sur une période donnée aux différentes stations.

$$P_{moy} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{P_i}{n} \right) \quad (\text{I.3.5})$$

Où :

$P_{moy}$  : La précipitation moyenne annuelle au niveau de bassin versant (mm).

$P_i$  : La précipitation moyenne annuelle de chaque station (mm).

$n$  : Nombre des stations.

D'après l'application de cette méthode dans le bassin versant de la zone d'étude. Nous estimons que la valeur de la précipitation moyenne arithmétique dans la période 1985-2008 soit de :  $P_{moy} = 622,698$  mm/an.

La rigueur de cette méthode est remise en question, car elle ne prend pas en compte l'organisation spatiale des stations sur le bassin.

#### B. La méthode de Thiessen

Grâce à cette méthode, il est possible d'évaluer les valeurs pondérées en tenant compte de l'ensemble des stations pluviométriques. Elle est particulièrement adaptée lorsque le réseau pluviométrique n'est pas uniforme dans l'espace, avec des pluviomètres répartis de manière irrégulière.

Chaque pluviomètre reçoit une zone d'influence qui représente son influence sur la valeur locale, et cette zone d'influence est exprimée en pourcentage. Le bassin est découpé

géométriquement sur une carte topographique pour déterminer les différentes zones d'influence (**Figure I.3**).

La somme des précipitations  $P_i$  de chaque station permet d'obtenir la précipitation moyenne pondérée  $P_{moy}$  du bassin. Le tout est divisé par la surface totale du bassin, multiplié par le facteur de pondération de l'aire  $S_i$ . Sur le bassin, la moyenne de la précipitation est de :

$$P_{moy} = \sum \left( \frac{P_i \times S_i}{S} \right) \quad (\text{I.3.6})$$

Avec :

- $P_{moy}$  : La précipitation moyenne annuelle au niveau de bassin versant (mm).
- $P_i$  : Précipitation enregistré à chaque station pluviométrique.
- $S_i$  : Aire de polygone associée à chaque station pluviométrique.
- $S$  : Aire totale du bassin versant de la zone d'étude.

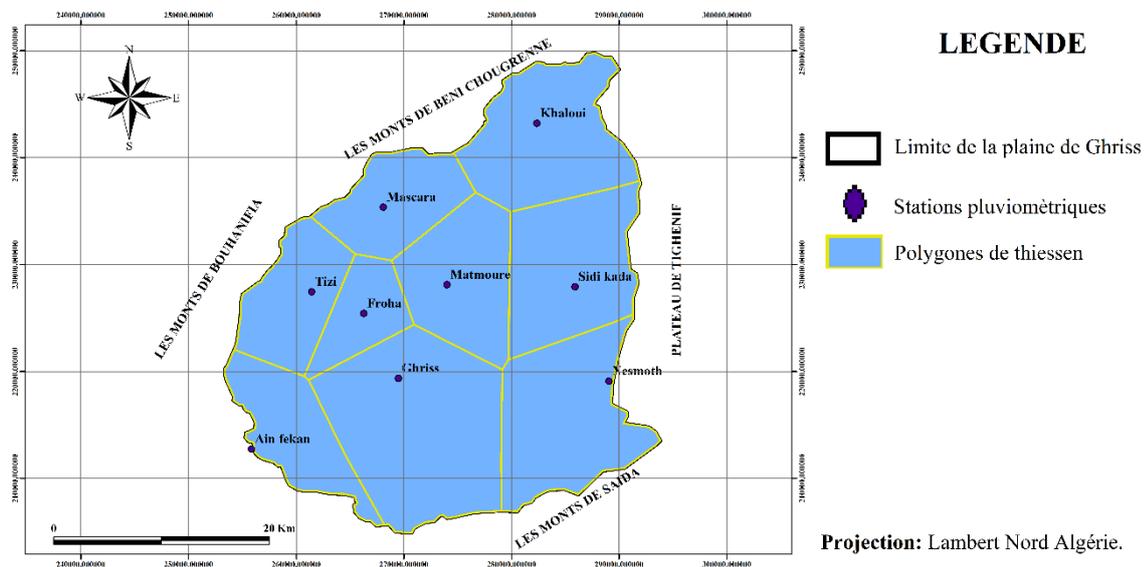


Figure I. 3. Répartition des polygones de Thiessen dans la totalité de surface de la zone d'étude.

Après l'application de cette formule, les résultats sont de :  $P_{moy} = 618,11 \text{ mm/an}$ .

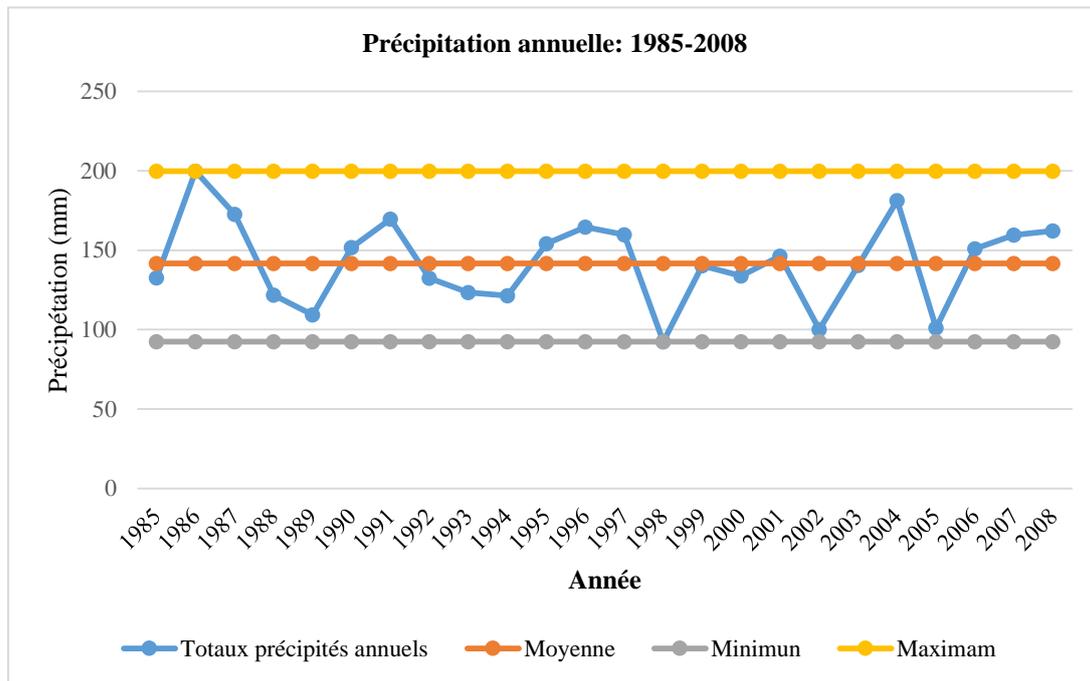
Le risque d'erreur prend un poids très élevé avec cette méthode, presque elle ne prend pas en considération la composition de l'intervalle de précipitant. Il est préférable de l'éviter dans des sur des plans d'eau avec des reliefs marqués et peu d'instruments aux altitudes les plus élevées.

### I.3.1.4 Étude des variations précipitations de la Station de Matmore

#### I.3.1.4.1 Pluviométrie annuelle

Compte tenu de son emplacement au centre de la plaine et la nature de ses équipements, la station de Matmore, représente une référence de choix. Les précipitations annuelles entre

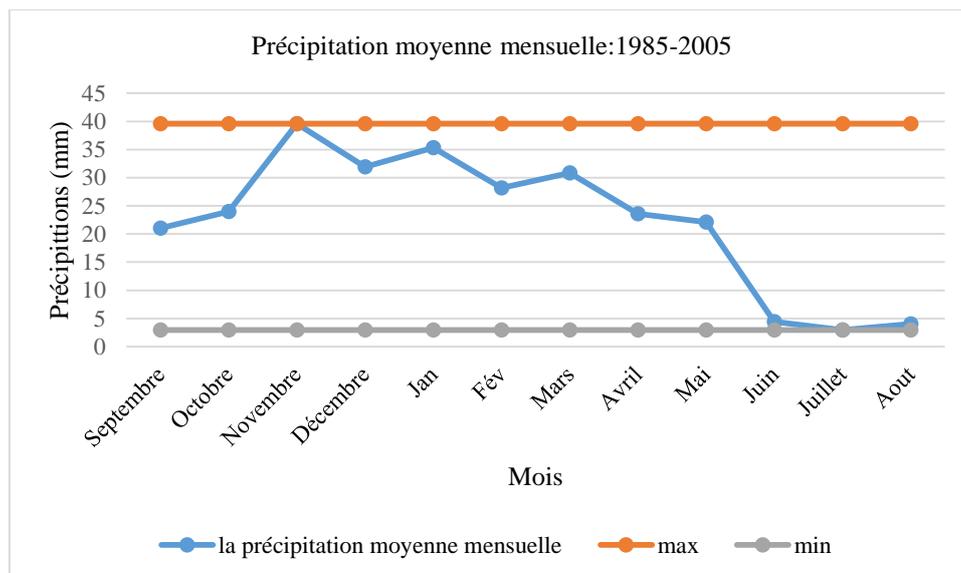
l'année 1985 et l'année 2008 (**Figure I.4**) enregistrent une valeur moyenne de 141.72 mm, alors que les totaux précipités annuels sont compris entre 200 mm et 92.40 mm.



**Figure I.4.** Histogramme des précipitations annuelles - station de Matmore (24 ans).

#### I.3.1.4.2 Pluviométrie moyenne mensuelle de la station de Matmore

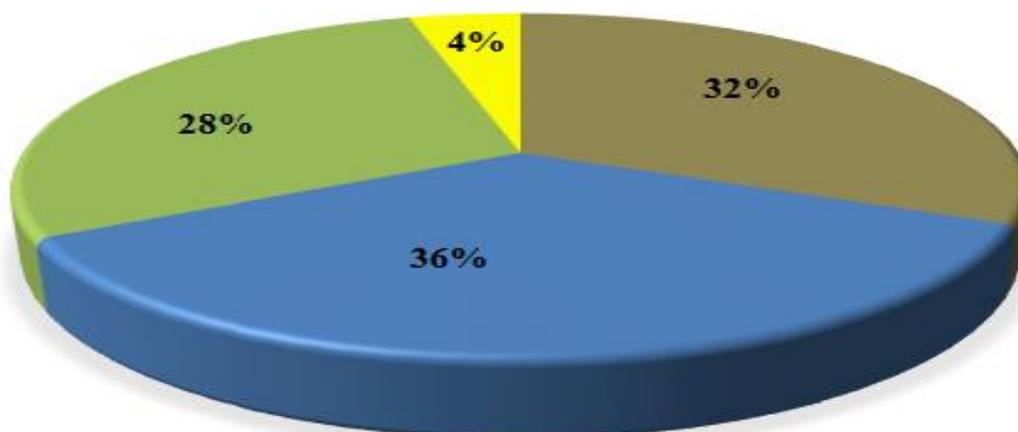
L'histogramme des précipitations moyennes mensuelles est très élevé aux périodes humides de la série chronologique et diminue vers la période sèche. Ils sont comprises entre 35.55 mm et 2.95 mm (**Figure I.5**).



**Figure I.5.** Courbe de la distribution des précipitations moyenne mensuelles - station de Matmore durant 24 ans.

### I.3.1.4.3 Pluviométrie moyenne saisonnière

L'évaluation chronologique des précipitations moyennes saisonnières durant la période d'étude nous permet d'enregistrer des précipitations évaluées à 95.433 mm en hiver, soit de 36% (de globale annuel). En été, les précipitations moyennes saisonnières n'enregistrent que 11.4 mm, soit de 4% du total (**Tableau I.4 - Figure I.6**).



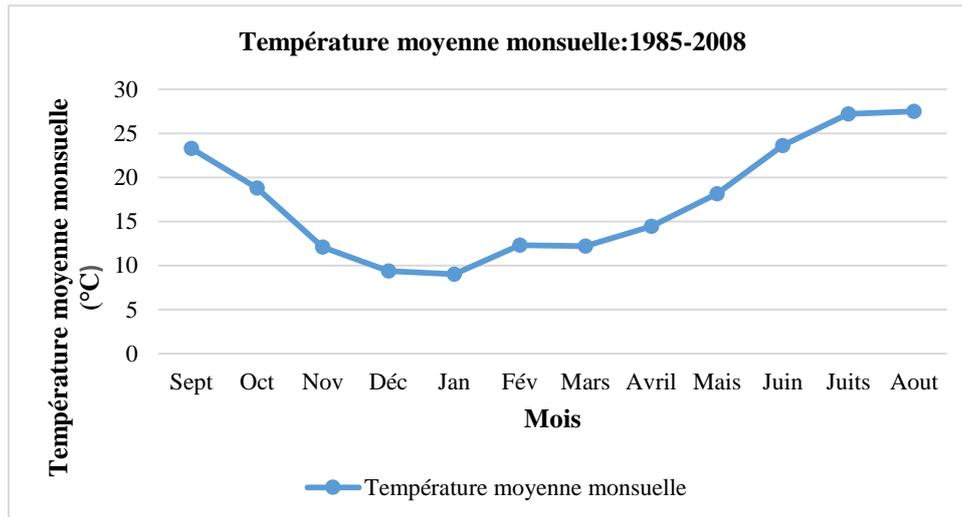
**Figure I.6.** Pourcentage de précipitation saisonnière - station de Matmore (1985/2008).

**Tableau I.4.** Evaluation des précipitations saisonnières -Station de Matmore (1985/2008).

Les saisons	Automne	Hiver	Printemps	Été	Total
Précipitation moyenne saisonnière (mm)	84.59	95.43	76.51	11.4	267.94

## I.2 Étude des températures

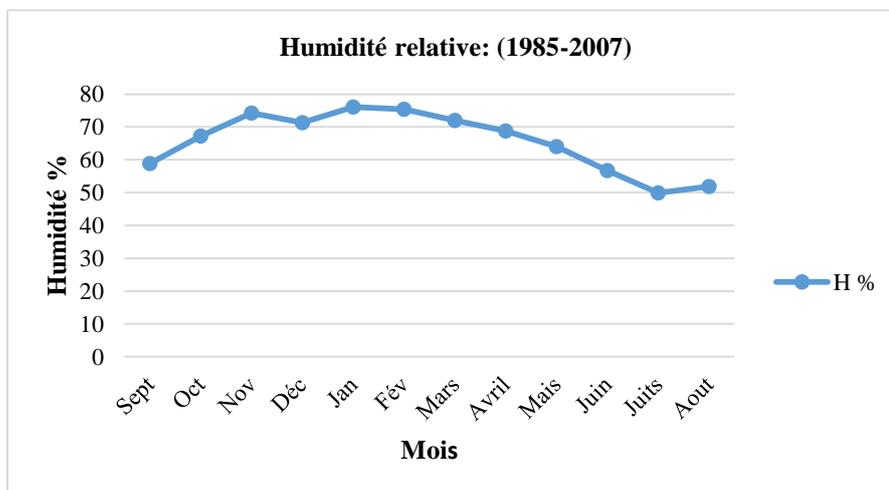
L'évaluation de la température moyenne mensuelle de la station de Matmore durant 24 ans est comprise entre 9.02 et 27.5°C. Les faibles valeurs sont enregistrées durant la saison d'hiver et augmentent durant le reste de l'année (**Figure I.7**).



**Figure I.7.** Evaluation des températures moyennes mensuelles - Station de Matmore (1985-2008).

### I.3.3 L'humidité relative

L'humidité moyenne mensuelle est établie entre 1985-2007, soit une période de 22 ans (**Figure I.8**). On observe une valeur relative moyenne mensuelle comprise entre 49.92 et 74.25%. Les valeurs les plus fréquentes correspondent aux mois d'Octobre jusqu'au mois de Mai ; alors que les mois les moins fréquents se trouvent entre Juin et Septembre.



**Figure I.8.** Evaluation de l'humidité moyenne mensuelle - Station de Matmore (1985-2007).

### I.3.4 Classification climatique

#### I.3.4.1 Méthodes pluviothermiques

GAUSSEN et BAGNOULS ont établi qu'un mois est considéré comme sec, s'il y a une différence entre le total moyen des précipitations et la température moyenne ( $P/2T$ ). Grâce à

cette relation, il est possible d'établir des diagrammes pluviothermiques sur lesquels la température est portée sur un double échelle, en tenant compte des précipitations.

- Dans le cas où la courbe des températures dépasse celle des précipitations, on peut considérer qu'il y a eu un mois de sécheresse.
- Si la courbe des températures se situe en-dessous de la courbe des précipitations, nous avons un mois pluvieux.

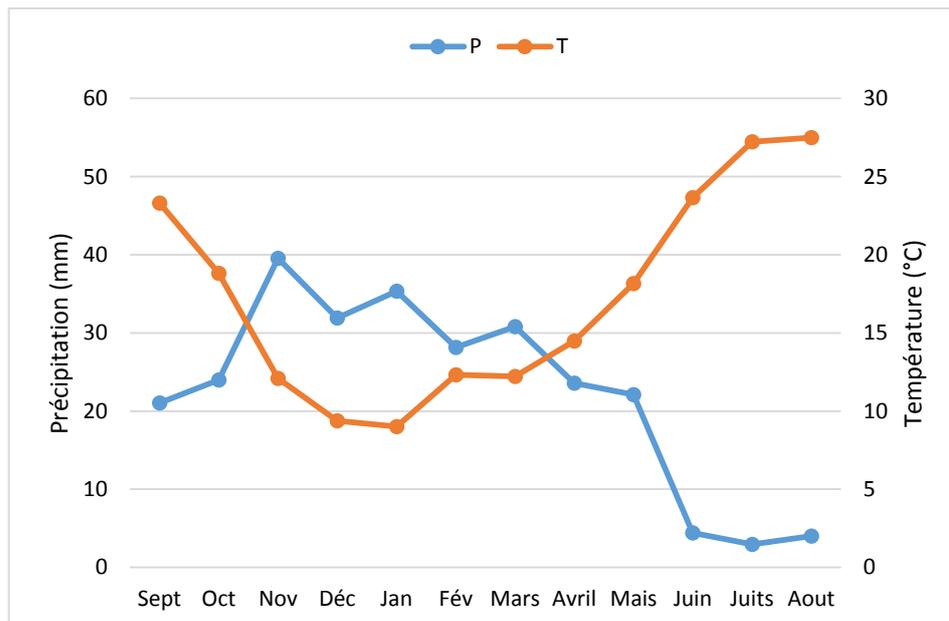
Le **tableau I.5** représente les précipitations moyennes mensuelles et la température moyenne mensuelle pendant 24 ans, enregistrées à la station de Matmore.

**Tableau I. 5.** Evaluation des précipitations moyennes mensuelles et la température moyenne mensuelle - Station de MATMORE (1985 / 2008).

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juit	Août
P (mm)	21.03	24.00	39.55	31.929	35.333	28.171	30.821	23.587	22.104	4.425	2.958	4.017
T (°C)	23.31	18.81	12.1	9.383	9.016	12.316	12.216	14.476	18.166	23.65	27.233	27.5
Relation (P-2T)	Aride	Aride	Humide	Humid	Humide	Humide	Humide	Aride	Aride	Aride	Aride	Aride

Le diagramme ombrothermique favorise la détermination des périodes humides et sèches.

D'après la **Figure I.9**, la période humide sélectionnée correspondante à la courbe des précipitations est plus importante que la courbe de température (saisons d'hiver et printemps) ; alors que la période sèche couvre les mois restants.



**Figure I. 9.** Diagramme Ombrothermique - Station de Matmore.

### I.3.4.2 Les indices climatiques

Dans le but de mieux cerner le type de climat de cette région, nous allons mettre en évidence les indices climatiques.

#### I.3.4.2.1 L'indice DE DEMARTONNE

##### a) Indice d'aridité annuel :

En 1933, DEMARTONNE introduit l'indice d'aridité. Le principe pour calculer cet indice implique la hauteur moyenne des précipitations annuelles et la température moyenne annuelle. Sa formule peut être écrite de la manière suivante :

$$I = \frac{P}{T+10} \quad (\text{I.3.7})$$

Où :

$I$  : Indice d'aridité annuel.

$P$  : Précipitation moyenne annuelle (mm).

$T$  : Température moyenne annuelle (°C).

L'utilisation des données de tableau N°I.5 et N°I.6, on se trouve avec :

$P = 620.405 \text{ mm}$  ;  $T = 17.349^\circ\text{C}$ .

Donc :  $I = 22.68$ .

**Tableau I. 6.** Récapitulatif de la précipitation moyenne annuelle - Station Matmore durant 24 ans (1985-2008).

Méthode utilisée	
Arithmétique	Polygone de Thyssen
622.698mm/an	618.113 mm/an
Moyenne annuelle	
620.405mm/an	

Dans le thème d'utilisation de classification des indices climatiques (**C.f annexe C**). Le climat du bassin versant d'Oued Fekan est semi-humide.

##### b) Indice d'aridité mensuelle :

Les élèves de DE-MARTONNE ont apporté des modifications à la formule afin d'obtenir les valeurs de l'indice d'aridité mensuel est :

$$I = \frac{P \times 12}{T+10} \quad (\text{I.3.8})$$

Avec :

$I$  : Indice d'aridité mensuelle.

$P$  : Précipitation moyenne mensuelle (mm).

$T$  : Température moyenne mensuelle (°C)

A partir de l'application de la formule modifiée de DE-MARTONNE pour la plaine de Ghriss le **Tableau I.7** présente les résultats obtenus.

**Tableau I.7.** L'évaluation de l'indice d'aridité mensuel- Plaine de Ghriss (1985-2008).

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juils	Août
I	7.577	9.996	15.260	19.767	22.296	15.148	16.648	9.939	9.417	1.578	0.953	1.285

À l'aide de **Tableau I.7** et **l'annexes (C.f annexe D)**, nous pouvons classer ces résultats d'indice d'aridité mensuel comme suit :

- 1)  $0 < I < 5$  Pour les mois de (Juin, Juillet et Août), au climat hyper aride.
- 2)  $5 < I < 10$  Pour le mois de (Septembre, Octobre, Avril et Mai), au climat aride.
- 3)  $10 < I < 20$  Pour les mois de (Nov., Déc., Fév. et Mars), au climat semi-aride.
- 4)  $20 < I < 30$  Pour le mois de Janvier, au climat semi-humide.
- 5) Pour les autres classes restes sont nul.

#### I.3.4.2.2 Indice aridité de la FAO

Pour calculer de cet indice, on utilise la formule suivant :

$$I = \frac{P}{ETP} \quad (\text{I.3.9})$$

Avec :

$I$  : Indice d'aridité de FAO.

$P$  : Précipitation moyenne annuelle (mm).

$ETP$  : Evapotranspiration potentiel.

$I = 0.690$ .

En ce qui concerne l'utilisation de la classification des indices climatiques, les résultats de calcul de l'indice d'aridité de la FAO (**C.f annexe E**) pour la plaine de Ghriss sont caractérisés par un climat subhumide.

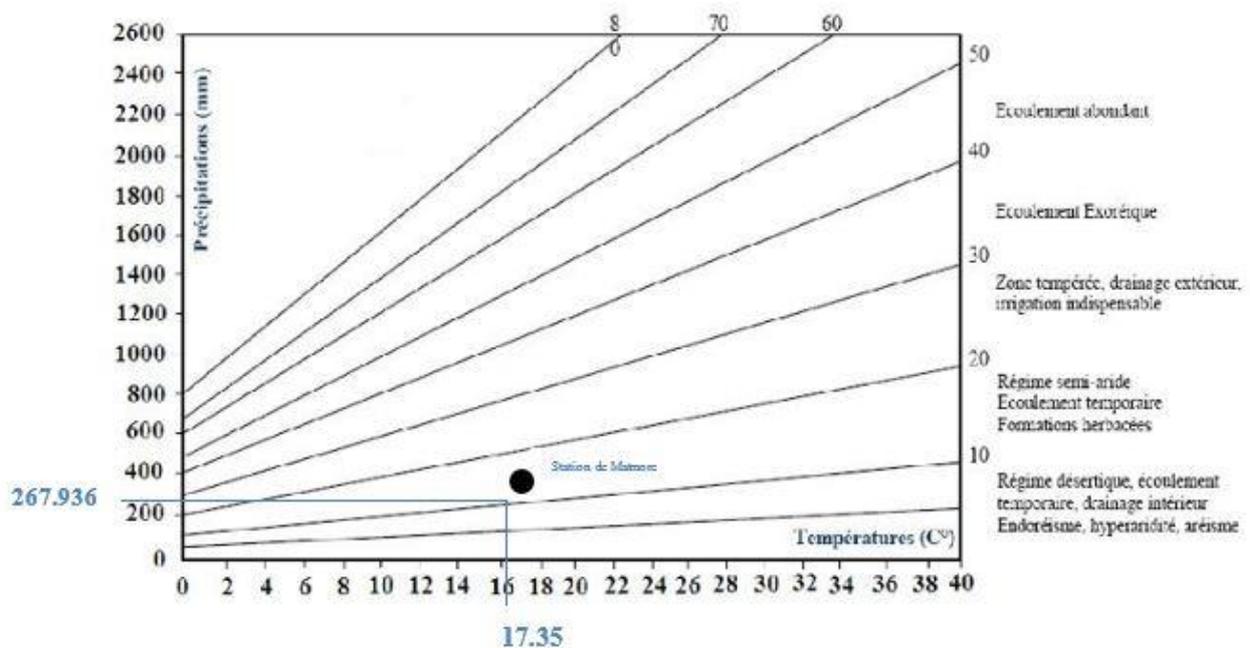
### I.3.4.2.3 Indice de MORAL

L'indice de moral est calculé en fonction de la hauteur mensuelle des précipitations (en mm) et des températures moyennes annuelles (en mm), afin de délimiter l'humidité et la sécheresse. Avec  $I_A < 1$  est requis pour un climat sec et  $I_A > 1$  pour un climat humide.

$$I_A = \frac{P_A}{T^2 - 10T + 200} \quad (\text{I.3.10})$$

Avec :

- $I_A$  : Indice annuel de Moral.
- $P_A$  : Précipitation moyenne mensuelle.
- $T$  : Température moyenne annuelle.



**Figure I.10.** Abaque d'indice d'aridité annuel de la station de Matmore.

Le climat sec caractérisant la région étudiée est illustré par la valeur obtenue ( $I_A=0.82$ ).

### I.3.5 L'évapotranspiration

La formule de THORNTWAITE (en 1948) permet d'estimer une évapotranspiration potentielle (ETP).

$$ETP = K \times EP \quad (\text{I.3.11})$$

Avec :

- $ETP$  : Evapotranspiration potentiel (cm).
- $K$  : Le coefficient de correction K est déterminé en se référant à l'Annexes de THORNTW-

- AITE, qui est adapté aux mois et aux altitudes (*C.f annexe F*).
- $EP$  : Evapotranspiration non corrigée d'estimer par la formule (I.3.12) comme suit :

$$EP = 1.6 \times \left(\frac{10 \times T}{I}\right)^a \quad (\text{I.3.12})$$

Avec :

- $T$  : Température moyenne annuelle (°C).
- $I$  : Somme des indices thermiques mensuels de l'année à l'aide des formules (I.3.13) et (I.3.14).

$$I = \sum i \quad (\text{I.3.13})$$

$$i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1.514} \quad (\text{I.3.14})$$

Où :

- $i$  : Indice de calculer l'évapotranspiration des indices mensuelles.

$$a = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 1.79 \times 10^{-2} I + 0.492 \quad (\text{I.3.15})$$

Donc :  $ETP = 75.222$ .

Les détails des calculs des indice thermiques se trouvé dans l'Annexe (*C.f annexe C*).

### I.3.5.1 L'évapotranspiration réelle

L'évapotranspiration réelle est l'expression des pertes d'eau sous forme de vapeur d'eau. Elle constitue un phénomène complexe qui englobe à la fois les processus d'évaporation physiques de l'eau présente dans le sol et les processus de transpiration qui concernent l'utilisation de l'eau par les végétaux et de l'eau dans l'atmosphère.

Pour désigner un déficit d'écoulement, il faut tenir compte de la différence entre la hauteur moyenne annuelle des précipitations et la hauteur moyenne annuelle de la lame d'eau écoulée à l'échelle du bassin versant. Pour obtenir une estimation convenable des valeurs de l'évapotranspiration (déficit d'écoulement), nous employons des méthodes empiriques.

#### a) La méthode de THONTHWAITE

L'estimation de l'évapotranspiration réelle à l'aide de la méthode du bilan de THORNTHWAITE se fait selon les conditions suivantes :

- Si  $P < ETP$ : L'évapotranspiration est responsable de la reprise de toute la pluie, ce qui donne  $ETR = P + dRU$ .
- Si  $P > ETP$  alors  $ETP = ETR$ . Toutefois, la réserve utile est épuisée et  $P - ETR$  va s'infiltrer ou s'écouler. C'est l'excès du bilan hydrique (*C.f annexes C*).

**b) La méthode de TURC**

TURC établit le déficit d'écoulement par rapport à un paramètre (L) et à la moyenne annuelle des précipitations.

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad (\text{I.3.16})$$

$$L = 300 + 25 \times T + 0.05 \times T^2 \quad (\text{I.3.17})$$

**c) La méthode de COUTAGNE**

Cette méthode permet de calculer le déficit d'écoulement en se basant sur le paramètre ( $\lambda$ ) et la température moyenne annuelle.

$$ETR = P - \lambda P^2 \quad \text{Avec } \lambda = \frac{1}{0.8 + 0.14T} \quad (\text{I.3.18})$$

$$\frac{1}{8\lambda} < \lambda < \frac{1}{2\lambda} \quad (\text{I.3.19})$$

Les résultats récapitulatifs de l'évapotranspiration réelle sont présentés au **Tableau I.8**. Pour la suite des calculs, on prend une valeur moyenne  $ETR = 420.495 \text{ mm}$ .

**Tableau I.8.** Tableau récapitulatif des résultats de l'évapotranspiration réelle.

Méthode de calcul	Résultats
La méthode de THONTHWAITE	267.936mm
La méthode de TURC	492.554mm
La méthode de COUTAGNE	0.501m

**I.3.5.2 Détermination de la lame d'eau ruisselée**

L'identification de la lame d'eau qui ruisselle se fait par l'application de trois méthodes avec utilisation des trois paramètres cités comme suit :

1. **P** : précipitations moyennes annuelles (mm).
2. **ETP** : évapotranspiration potentielle (mm).
3. **S** : surface du bassin versant.

**a) Méthode de TIXERONT-BERCALOFF**

$$R = \frac{P^3}{3 \times (ETP)^2} \quad (\text{I.3.20})$$

**b) Méthode de SOGREAH**

$$R = 720 \times \left(\frac{P-250}{1000}\right)^{1.85} \quad (\text{I.3.21})$$

**c) Méthode de COUTAGNE**

$$R = (0.164 - 0.00145\sqrt{S}) \times P \quad (\text{I.3.22})$$

Les résultats récapitulatifs de la lame d'eau ruisselée sont présentés en annexes (**C.f annexe G**). Pour la suite des calculs on prend une lame d'eau  $R = 98.614$  mm avec un coefficient de ruissellement  $R/P = 15.25\%$ , Ce qui revêt une grande importance en ce qui concerne les précipitations dans le bassin.

**I.3.5.3 Estimation de la recharge naturelle de la zone d'étude**

Estimer l'infiltration ou la recharge en fonction de la disparité entre les divers éléments du bilan hydrique par la formule suivante :

$$I = P_{\text{moy}} - ETR_{\text{moy}} - R_{\text{moy}} \quad (\text{I.3.24})$$

Donc :  $I = 101.296\text{mm}$ .

L'infiltration est faible compte tenu des précipitations enregistrées ; alors que le bassin versant d'Oued Fekan reçoit 16.33% des quantités d'eau par année.

**I.4 Analyse du contexte géologique et hydrogéologique**

La première étude géologique et hydrogéologique de la plaine de Ghriss a été faite par Sourisseau en 1974, complétée depuis par plusieurs auteurs, notamment Bekkoussa (2009) et l'ANRH (agence nationale des ressources hydrauliques) en 2016.

**I.4.1 Cadre géologie de la plaine de Ghriss**

Le cadre géologique est défini par des formations, constituées de diverses structures géologiques présentées comme suit (**Figure I.11**) :

**I.4.1.1 Bordure Nord et Ouest**

Les Monts de Béni-Chougrane sont plantés sous forme de cercle selon la direction Sud - Sud-Ouest - Nord -Nord Est. Ces Monts forment un terrain plissé à ossature crétacée et à recouvrement Tertiaire très épais. Ce sont les vestiges de l'ancien sillon méditerranéen, écroulé et transporté par charriage dans deux ensembles principaux.

- **Le Crétacé moyen et supérieur** : cette formation est composée par les Marnes et les blancs des Calcaires gris à semelle très gypseux et salifère en contact des terrains miocènes anté-nappe.
- **Eocène et Oligocène (Nummulitique)** : ce sont des marnes et des grès qui recouvrent en contact anormal soit le crétacé constituant la première nappe, soit le Miocène anté-nappe.

A travers deux phases discordantes est venu s'établir des terrains allochtones, régissant les formations du Miocène post-nappe et du Pliocène. Ces sièges du Néogène sont légèrement ondulés par la tectonique récente. Ils couvrent presque la majorité de la bordure méridionale des Monts de Béni Chougrane.

La limite septentrionale et occidentale de la nappe de Ghriss prend une structure massive à ossature totalement constituée par le terrain nappé (marneux et argileux), recouvert par des terrains plus ou moins perméables qui vont assurer l'alimentation des nappes du Plio-Quaternaire de Ghriss, empêchant ainsi les fuites d'eaux vers l'exutoire du bassin d'Ain Fekan (Benfatta et al., 2011).

#### **I.4.1.2 Bordure Sud**

La bordure du sud de la plaine de Ghriss est composée par les Monts de Saida. Ces Monts forment un plateau rectiligne avec faible ondulation et continu de Sidi Kada à l'Est vers Tizi à l'Ouest. Ces derniers sont composés des formations Karstiques qui ont subi une tectonique fragile intense, dont subsistent quelques témoins (horsts des djebels Emfouss et Bourradou).

Ce groupe s'enfonce légèrement en direction du Nord, qui assure l'écoulement et la zone de drainage des eaux à travers la plaine, consistée par un groupe Calcaréo-dolomitique du Jurassique supérieur. Ce dernier est limité par une faille en contact avec Crétacé inférieur argilo-gréseux. Cette rupture soudaine de la perméabilité du terrain est à l'origine des sources d'Ain Fékan.

La formation Calcaréo-dolomitique rigide, des Monts de Sid Kada consiste en une mauvaise déformation. On observe certaines ondulations de petites amplitudes, mais relativement solides, touchées par une tectonique fragile dans deux directions principales :

- **Première direction des failles** : Ces failles se trouvent dans la direction Ouest-Sud-Ouest et Est-Nord-Est. Elles sont limités par un effondrement en marches d'escaliers d'altitude de +500 m sur les reliefs à -700 m et plus sous les Monts de Béni Chougrane.

- *Deuxième direction des failles* : Ces failles se trouvent aux deux directions, orientées au Sud-Nord dans la partie occidentale et au Sud-Est à Nord-Ouest dans la partie occidentale, séparant les marches précédentes en horsts et grabens.

Les dépôts de subversion, sont formés des sables argileux rouges et des conglomérats groupés aux pieds des Monts de Sidi Kada sur de large épaisseur par endroits.

#### **I.4.1.3 Bordure Est**

La partie Est de la région de Teghennif est constitué par les affleurements de Marne, d'Argile Oligocène et du Miocène formant ainsi une limite imperméable. Ce dernier borde nettement le bassin versant de la plaine ainsi que l'Oued Mina.

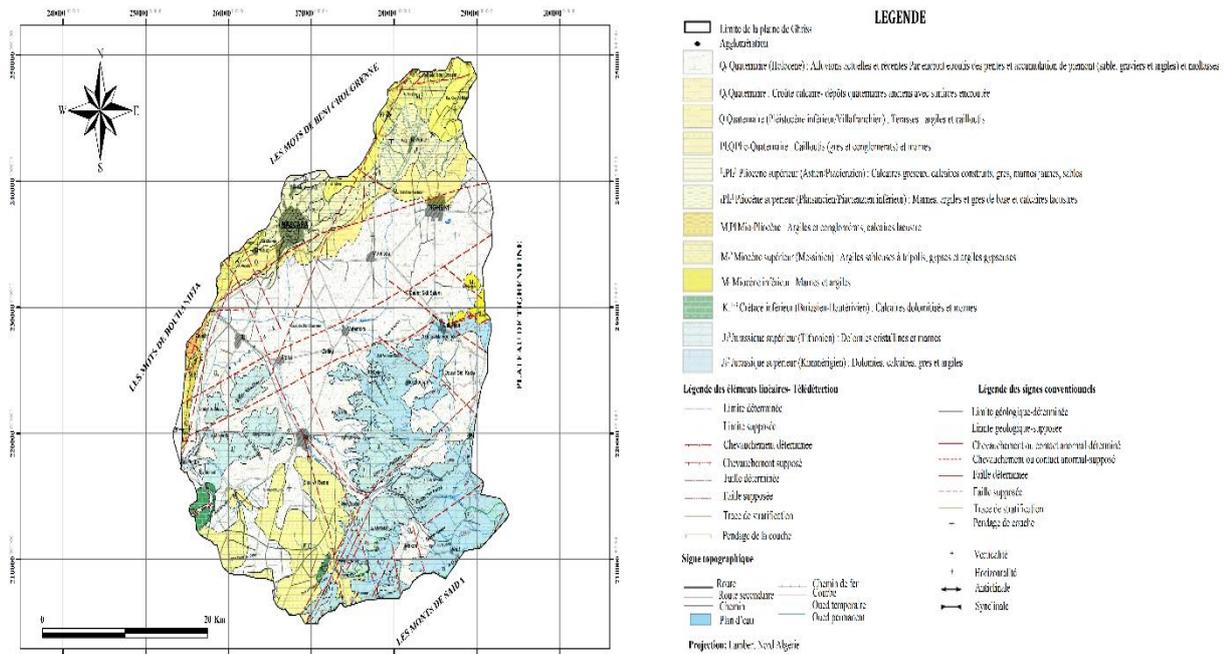
#### **I.4.1.4 Centre de la plaine de Ghriss**

Il s'agit d'une cuvette d'effondrement, correspondant à une zone d'affaissement marquée par la tordre des couches de Néogène, en bordure des monts de Béni Chougrane. Les contributions de l'argile sableuse alluviale de l'oued Maoussa continuent à permettre à cet affaissement d'évoluer.

Le substrat affaissé se compose de calcaires dolomitiques du Jurassique supérieur. Plus haut, des conglomérats de base ont été déposés localement, suivi d'un remplissage marin d'argile grisâtre et verdâtre et de marne du Miocène inférieur et moyen. Dans le centre de la plaine, l'affaissement autorisait l'accumulation d'une forte épaisseur de calcaire lacustre.

#### **I.4.2 Tectonique**

L'aire de la plaine de Ghriss n'est le site d'aucun incident tectonique important (absence de trias). Les seuls phénomènes tectoniques connus sont les faibles ruptures du substratum Jurassique, dont le jeu continue aujourd'hui et sont à l'origine des sources d'Ain Fekan.



**Figure I.11.** Carte géologique de la nappe de Ghriss, extraite de la feuille NI - 31 - XIX, carte de Mostaganem1/200000 (ANRH, 2008).

### I.4.3 Litho-stratigraphie

En 1974, SOURISSEAU a établi une succession stratigraphique de bas en haut, à partir des affleurements et des forages (**Figure I.12**).

#### I.4.3.1 Trias

On retrouve cette formation Trias dans les Monts de Béni Chougrane, au niveau de la nappe du Crétacé et dans l'accident dioptrique au Sud dans la vallée de l'oued Taria. Il est toujours gypseux parfois salifères avec des roches vertes, accompagné de roches vertes, ophites et gabbros de dolomies, cargneules et bréchets fétides et de marnes bariolées (Dahmani, 2010).

#### I.4.3.2 Jurassique

##### ➤ Callovo- Oxfordien

Il s'agit d'un ensemble de bancs de sable peu profond et alternant, avec une puissante succession d'argiles et de marnes grises, jaunes et vertes, affleurant dans la vallée d'Oued Taria. Sa largeur est d'environ 250 m (Dahmani., 2010).

##### ➤ Le Lusitanien

Rencontré lors des sondages, il affleure dans la partie sud des Monts de Sidi Kada. Cette formation géologique est constituée d'une alternance entre des bancs gréseux et dolomitiques. L'épaisseur de cette formation est environ de 150 m (Dahmani., 2010).

### ➤ **Le Jurassique Supérieur**

Il se retrouve à la limite de la plaine de Ghriss, composé d'un substratum résistant effondré. Au sommet, il existe des calcaires gris à pâte fine et zoogénique, qui se déplacent graduellement vers les calcaires dolomitiques et les dolomites. Il s'agit de petits niveaux de marne noire qui freinent l'infiltration d'eau et peuvent provoquer des résurgences perchées. La résistance totale de la formation peut excéder 400 mètres (Dahmani, 2010).

#### **I.4.3.3 Crétacé**

##### ➤ **Le crétacé Inférieur**

Il remonte vers l'ouest du Djebel Enfeus et vers le Sud-Ouest de la plaine de Guerdjoum près de la ville de Fekan. On y trouve des calcaires gréseux, devenant argileux en profondeur. La résistance globale de la formation s'élève à environ 100 mètres (Dahmani, 2010).

#### **I.4.3.4 Tertiaire**

##### **I.4.3.4.1 Eocène**

Affleurent vers les bordures occidentales à l'Ouest de la plaine. Il s'agit d'une alternance de bancs métriques de grès-calcaire et d'argile-marne épaisses de plusieurs mètres.

##### **I.4.3.4.2 Oligocène**

Affleurent dans les monts de Béni-Chougrane et à l'Est de Tighennif. Il s'agit des couches argilo-marneuses avec des passages de bancs de grès. Au niveau de la base se trouve un conglomérat polygénique.

##### **I.4.3.4.3 Miocène**

###### ➤ **Le Miocène moyen marin**

Affleurent dans les monts de Béni-Chougrane. Il s'agit d'un ensemble monotone, très épais, principalement de marnes vertes, aux passages très riches en macrofaune de gastéropodes et de lamellibranche (ostréa), aussi d'un conglomérat de base polygénique. Il s'agit du toit imperméable de la nappe profonde et du mur imperméable d'aquifère Grés et Calcaire Lacustres du Pliocène.

###### ➤ **Le Miocène continental**

Au Djebel Oucilles, la formation Miocène marin disparaît et se transforme en formation continentale d'argilo-sableuse rouge nommée Bouhanifia. Sur cet ensemble marneux reposent

en concordance des sables fins argileux à concrétions calcaires, le sable d'El Bordj et des calcaires récifaux massifs.

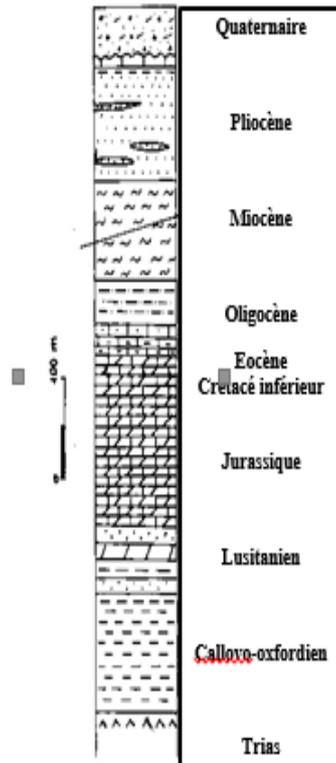
#### **I.4.3.4.4 Pliocène**

Elle se compose pour l'essentiel de deux formations géologiques, à savoir le grès de l'Astien et le calcaire lacustre. Les affleurements de grès dans le secteur de Khalouia et proche de la ville de Mascara en biseau sous la plaine. Ces formations, d'origine maritime, se déplacent graduellement vers les sables consolidés vers le sommet de la série. Leur largeur varie entre 40 et 100 mètres.

Un affleurant au long du massif des Beni Chougrane, repose directement sur le grès ou en sont séparés par une mince couche de sable sablonneux rouge. L'épaisseur du calcaire lacustre s'accroît au-dessous de la plaine jusqu'à 270 mètres dans un forage au Sud-Est de la ville de Mascara. Au sud d'une ligne desservant les Djebels d'Emfous et Bourradou et le Nord des monts de Saïda, ils se trouvent dissimulés de ces formations.

#### **I.4.3.5 Le Quaternaire**

Les formations continentales du Quaternaire sont formées d'argiles rouges détritiques qui surmontent les calcaires lacustres du pliocène. Ces dépôts se trouvent à l'Ouest et à l'Est de la plaine de Ghriss. Le Quaternaire moyen se caractérise par la présence d'une terrasse alluviale formée de sable fin et de quelques petits graviers centimétriques entre Tighennif, Maoussa et Froha.



**Figure I.12.** Log litho-stratigraphique des formations de la plaine de Ghriss  
(Bekkoussa., 2009).

## I.4.4 Le Contexte hydrogéologique de la plaine de Ghriss

### I.4.4.1 Les différents horizons de la zone aquifère

La classification des nappes dans la plaine de Ghriss se fait à base des études géologiques et du diagnostic des coupes et des logs synthétiques. D'après ces études, on compte trois horizons aquifères, identifiés comme suit (**Figure I.13**) :

#### I.4.4.1.1 La Nappe Plio-Quaternaires

Il s'agit d'une nappe alluviale à tout le long de la plaine (**Figure I.11**), composée de dépôt alluviaux indigènes à la désintégration, des grès, du sable et de l'altération des roches calcaires lacustres et dolomitiques.

La formation de cette nappe est limitée par intersection de la structure sur les bordures, où le mur est composé avec des marnes bleues Miocène, alors que le toit de la nappe est compatible avec la surface libre de la nappe.

L'infiltration est estimée à environ 20% des précipitations sur la plaine, dont la perméabilité diminue vers l'exutoire de la nappe, situé au niveau de la source d'Aïn Fekan. Quant à la

transmissivité de la nappe des alluvions Plio-Quaternaires varie entre  $5.10^{-5}$  à  $10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s (Sourisseau, 1972, in Bekkoussa, 2009).

#### **I.4.4.2 Nappe des Calcaires et Grès du Pliocène**

La nappe des calcaires lacustre du Pliocène constitue le même ensemble hydrogéologique avec celle des grès de l'Astien. Les deux structures s'enfoncent sous les dépôts alluviaux après s'être soumis à une flexion en bordure de la plaine.

Les grès affleurant sont plutôt grands dans la région de Khalouia, et offrent une nappe captive dans le sud de la plaine, en faciès marneux sous la formation des calcaires lacustres.

L'horizon de la nappe de calcaire lacustre et des Grès se trouve en biseau, sous la plaine et dans le Sud dissimulée à la bordure reliant les Djebels Emfous et Bouradou et le Nord des Monts de Saïda.

Cet horizon, d'une structure très faiblement perméable avec la plantation d'argile rouge au Sud et au Nord d'une ligne Tizi-Matmore par une large couche de marnes vertes du Miocène.

Le contact entre la structure Plio-Quaternaire jusqu'à la nappe s'infiltrer par le drainage ascendant et assure la décharge de l'aquifère des calcaires et des Grès du Pliocène. Ce dernier est improbable à cause de son grande épaisseur et de sa faible perméabilité.

La transmissivité de la nappe des calcaires et grès du pliocène varie entre  $5.10^{-5}$  à  $3.10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s, alors que le coefficient d'emménagement se situerait autour de 0,005 (Sourisseau, 1974, in Bekkoussa, 2009).

#### **I.4.4.3 Nappe des Calcaires dolomitiques du Jurassique**

Cette nappe occupe toute la partie Sud de la plaine. Il s'agit d'une nappe karstique relativement évoluée. Les calcaires et les dolomies du Jurassique se trouvent dans les Monts de Saïda d'un côté, et dans les Djebels Emfous et Bouradou de l'autre.

Le cheminement de la circulation des eaux souterraines se fait dans le réseau karstique sous la plaine et se dirige vers la source d'Ain Fekan. Par la suite, les eaux entrent en contact avec une faille bordant les terrains imperméables du Crétacé (Kenniche, 2022).

Les dépôts de galets et conglomérats des piémonts assurent le drainage de la nappe. La formation du mur de l'aquifère des calcaires dolomitiques est caractérisé par une formation calcaréo-dolomitique en bon état, compacte, non fissurée. Le toit est composé de marnes du

Miocène ou d'argiles rouges détritiques. Les caractérisations hydrodynamiques de la nappe sont représentées par la transmissivité, évaluée à  $0,003 \text{ m}^2/\text{s}$  (Sourisseau, 1974).

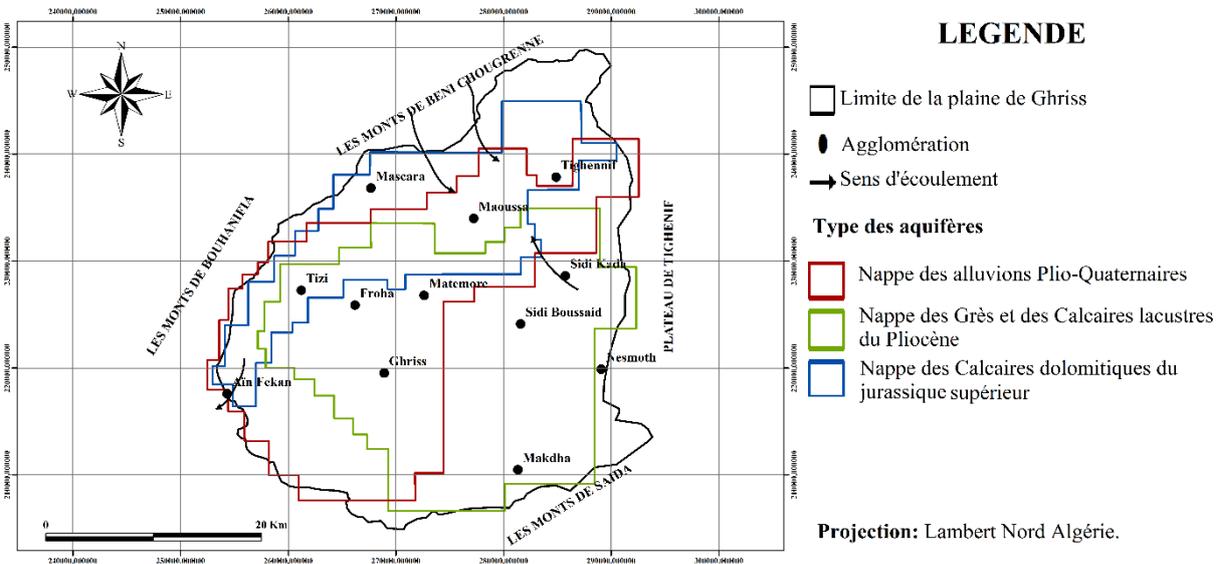


Figure I. 13. Les aquifères de la plaine de Ghiss (Sourisseau, 1974).

#### I.4.4.2 Les propriétés hydrogéologiques de l'aquifère Plio-Quaternaire

La surveillance des aquifères est très importante dans la protection de nos ressources en eau souterraine. En 1974, Sourisseau avait mené la première étude piézométrique à travers la plaine de Ghiss, suivie par plusieurs organismes. Actuellement, l'ANRH (Agence Nationale des Ressources en Eau) assure la surveillance quantitative et qualitative des nappes d'eau de la plaine de Ghiss au niveau des points contrôlés.

##### I.4.4.3.1 Epaisseur du toit de la nappe Plio-Quaternaire

La carte d'épaisseur du toit de nappe phréatique (**Figure I.14**) est caractérisée par un format plissé avec une grande cuvette centrale. Dans cette zone, la plus grande épaisseur de l'aquifère Plio-Quaternaire de la plaine de Ghiss varie entre 300 à 470 m au Nord et l'Est. L'épaisseur la moins importante se localise au niveau de la direction NO à NE.

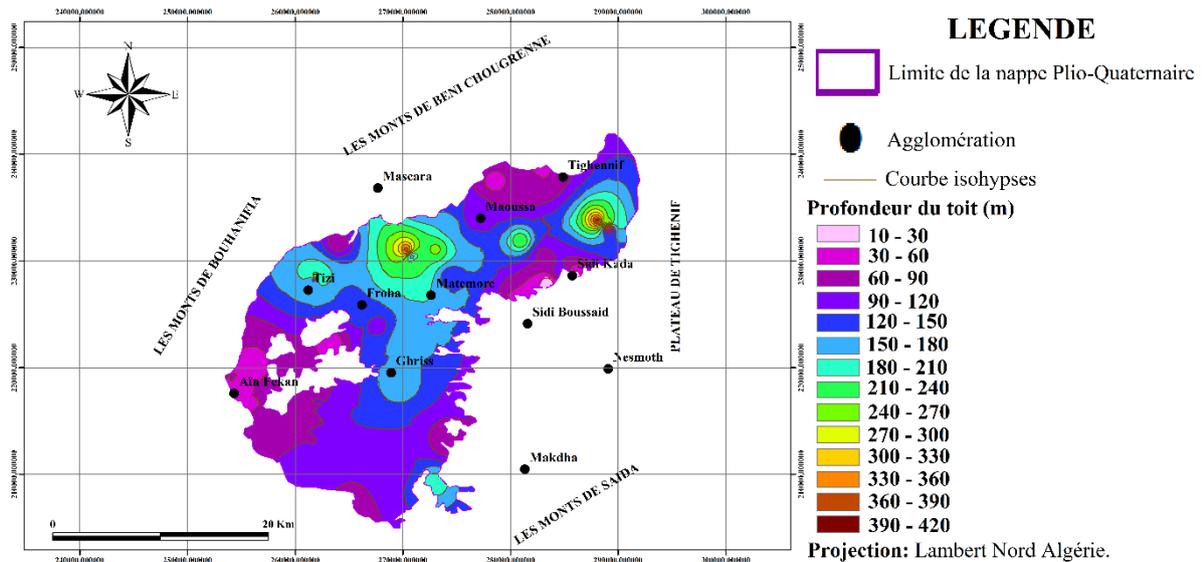


Figure I. 14. Epaisseur du toit de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss.

### I.4.4.3.2 Epaisseur de mur de la nappe Plio-Quaternaire

Le substratum de mur atteint d'une épaisseur maximum de 480 m au Nord vers l'Est. La profondeur du mur de l'aquifère Plio-Quaternaire de la nappe de Ghriss (Figure I.15) montre des valeurs moyennes de direction N.E vers N.S.

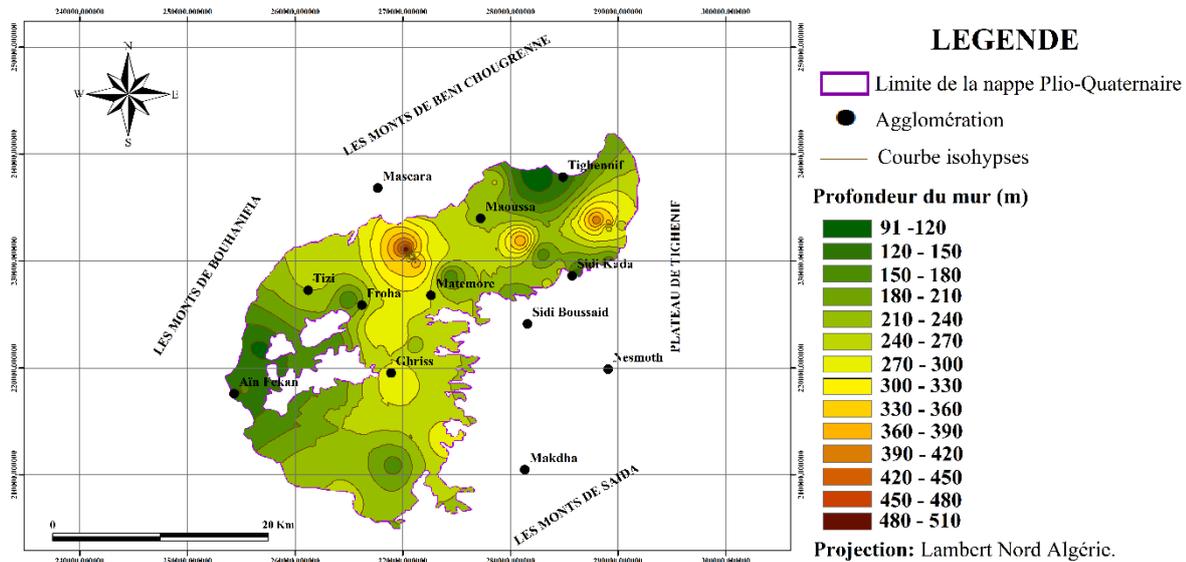


Figure I.15. Epaisseur du mur de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss.

### I.4.4.3 Evaluation de la nappe Plio-Quaternaire

#### I.4.4.3.1 Etude piézométrique

Les données piézométriques de l'aquifère Plio-Quaternaire de Ghriss (Fig.I.16, I.17 & I.18) ont été obtenues en combinant celles des années 1997, 2005 et 2019.

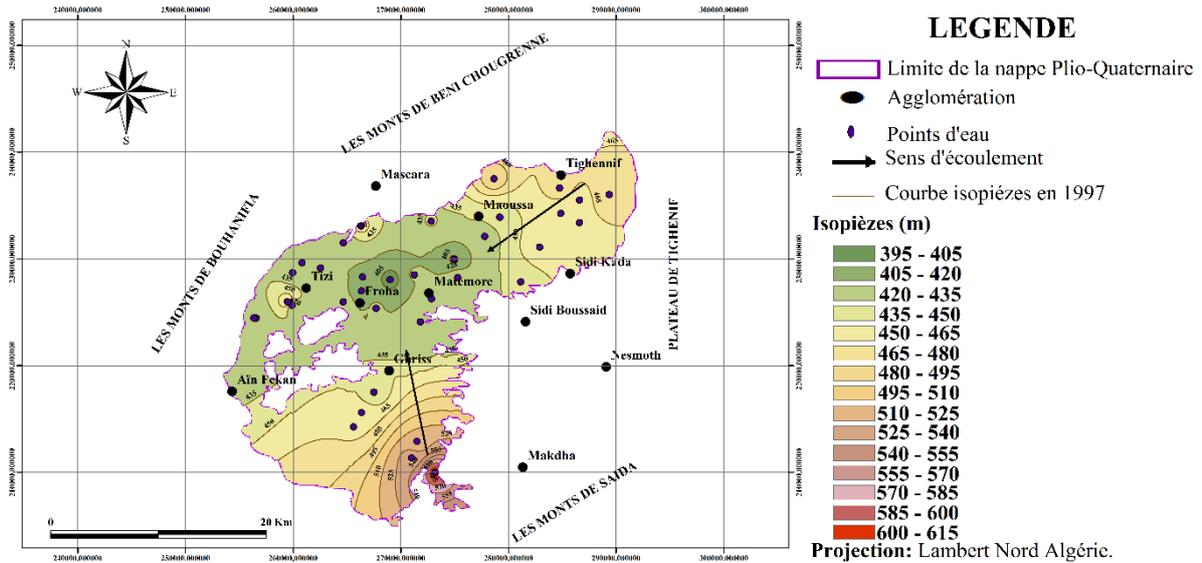


Figure I. 16. Carte piézométrique de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss (1997).

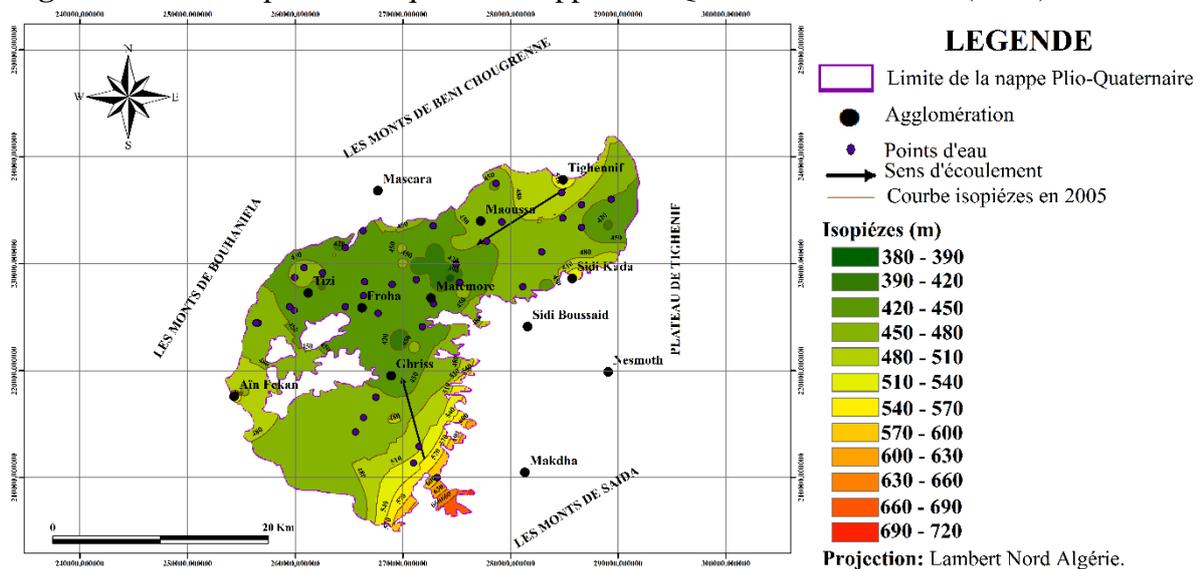


Figure I. 17. Carte piézométrique de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss (2005).

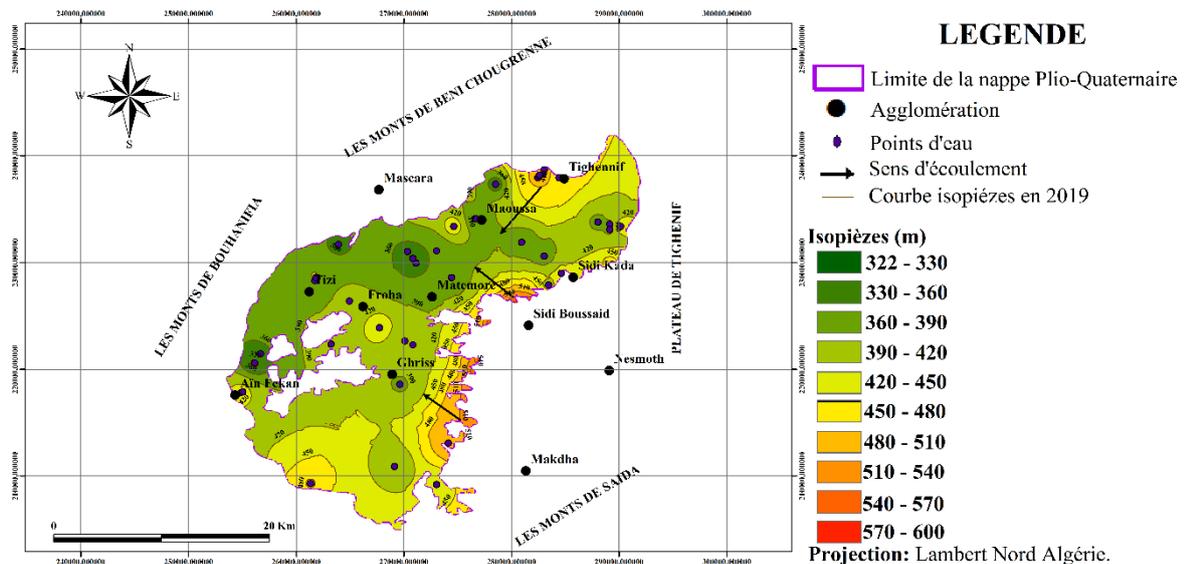


Figure I. 18. Carte piézométrique de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss (2019).

Au centre de la plaine se trouvent les hauteurs les plus basses situées aux dépressions piézométriques de Matmore (420 m) vers l'agglomération de Tizi (450 m) et s'élargissent jusqu'à la ville de Ghriss (390 m). Année après années, nous observons la diminution du rabattement de la nappe à cause de pompages agressifs. Les côtes piézométriques les plus élevés sont localisés en direction de NE vers le Sud de l'aquifère Plio-Quaternaire.

Ces eaux souterraines assurent l'alimentation et l'écoulement vers la partie centrale de l'aquifère alluvial (Ghriss) puis se dirige vers Aïn Fekan. La perméabilité de l'aquifère Plio-Quaternaire est augmentée au centre de la plaine où les altitudes sont faibles alors qu'elle affaiblie aux bordures de la plaine là où l'altitude est très élevée.

#### I.4.4.3.2 Fluctuation piézométrique de l'aquifère Plio-Quaternaire

Globalement, on observe une diminution de hauteur piézométrique de la nappe phréatique. Néanmoins, la baisse du niveau n'est pas constante, ni dans le temps ni dans l'endroit. Le Tableau I.9 représente les profondeurs d'eau entre les niveaux statiques et le substratum de la nappe durant 22 ans (entre 1997 et 2019).

Ainsi, on constate une baisse de niveau dépassant les 11 mètres au niveau des puits N°1014 et N°82. La piézométrie la plus élevée se trouve au point d'eau N° 230 avec 17 m. Pour les autres puits on observe une piézométrie comprise entre 0.8 à 16 m.

**Tableau I.9.** Evaluation piézométrique entre 1997-2019 m.

Point d'eau	Piézo1997	Piézo1999	Piézo2019	Evaluation piézométrique1997-2019
519	434.40	411.87	417.59	-16.81
35	492.59	497.65	491.77	-0.820
1014	459.56	447.58	448.13	-11.430
661	454.49	453.13	447.36	-7.130
107	454.37	451.37	436.55	-17.820
82	436.94	433.53	425.36	-11.580
727	422.98	413.79	426.84	3.860
230	533.03	527.74	546.64	13.610
622Bis	462.64	457.80	462.06	-0.580

D'autre part, l'observation de ce tableau montre que le niveau piézométrique était stable pendant la période d'étude car dans le puits N° 622-bis il varie entre 462.643 et 462.063. Enfin, durant l'année 2019, on peut constater une augmentation d'environ à 0.58 mètres par rapport à 1997.

#### I.4.4.4 L'exploitation des eaux souterraines de la plaine de Ghriss

Les besoins hydriques de l'agrosystème de la plaine de Ghriss sont fournis essentiellement par les eaux souterraines locales à travers des puits, des forages et des sources.

##### I.4.4.4.1 Répartition des points d'eau

La distribution des points d'eau localisés à travers la plaine de Ghriss est attribuée aux services de l'ANRH et de l'ABH (**Tableau I.10, I.11 & I.12**). Ce nombre de points d'eau a été diminué par le temps. En 1997, la plaine de Ghriss présente 5325 points d'eau tous types confondus. Ce nombre a diminué à 2647 en 2008.

D'autre part, on remarque une baisse des points d'eau opérationnels à 2109 en 2010 par rapport aux années précédentes (1997/2008). De cette comparaison entre les points d'eau, nous observons une évolution des nombres des forages entre 1997 et 2008, mais la croissance des 'non-fonctionnels' favorise la diminution des nombres de ce type de point d'eau en 2010. Alors que le nombre des puits est en ordre décroissant durant une période de 13 ans.

**Tableau I. 10.** Répartition des points d'eau à travers la plaine de Ghriss (ANRH, 1997).

Nom de région agricole	Puits	Forage	Sources	Total
Plaine de Ghriss	4975	335	15	5325

**Tableau I.11.** Répartition des points d'eau destinés à l'irrigation (Sogreah, 2008).

Nom de région agricole	Nombre de forage	Nombre de puits	Source	Total
Plaine de Ghriss	780	1866	1	2647

**Tableau I. 12.** Répartition des points d'eau destinés à l'irrigation (ABH, 2010).

Région agricole	Nbre forage	Nombre puits	Total	Observation
Plaine de Ghriss	510	1599	2109	Opérationnel
Plaine de Ghriss	50	91	141	Non opérationnel

##### I.4.4.4.2 Débits extraits

Les débits prélevés annuels pour chaque formation d'aquifère dans la plaine de Ghriss en 1997 ont été répertoriés de manière exhaustive par l'ANRH (**Tableau I.13**), ainsi que l'inventaire de la DRE (direction des ressources en eau) de la wilaya de Mascara (**Tableau I.14**). Selon les deux tableaux, nous observons une augmentation de débit annuel extrait par les différentes formations d'aquifère planté dans la plaine de Ghriss durant 13 ans.

Globalement, les débits extraits par les formations d'aquifère ont été inventoriés, dont la majorité à partir de l'aquifère calcaire dolomitique Kimméridgien. Ceci est dû aux changements climatiques favorisant l'accroissement d'exploitation de nos ressources en eaux souterraines.

**Tableau I.13.** Débit annuel prélevé de chaque formation aquifère. (ANRH, 1997).

Formation d'aquifère	Alluvions Plio-Quaternaire	Grès pliocène	Calcaires lacustres pliocène	Calcaire Dolomitique Kimméridgien
Débit annuel hm <sup>3</sup> /an	7.1692	3.8344	9.0575	12.8916

**Tableau I.14.** Débit annuel prélevé de chaque formation aquifère (DRE, 2010).

Formation d'aquifère	Alluvions Plio-Quaternaire	Grès et des calcaires lacustres	Calcaires dolomitique Kimméridgien
Débit annuel hm <sup>3</sup> /an	33.7	4.4	18.7

#### I.4.4.5 Hydrochimie de la nappe

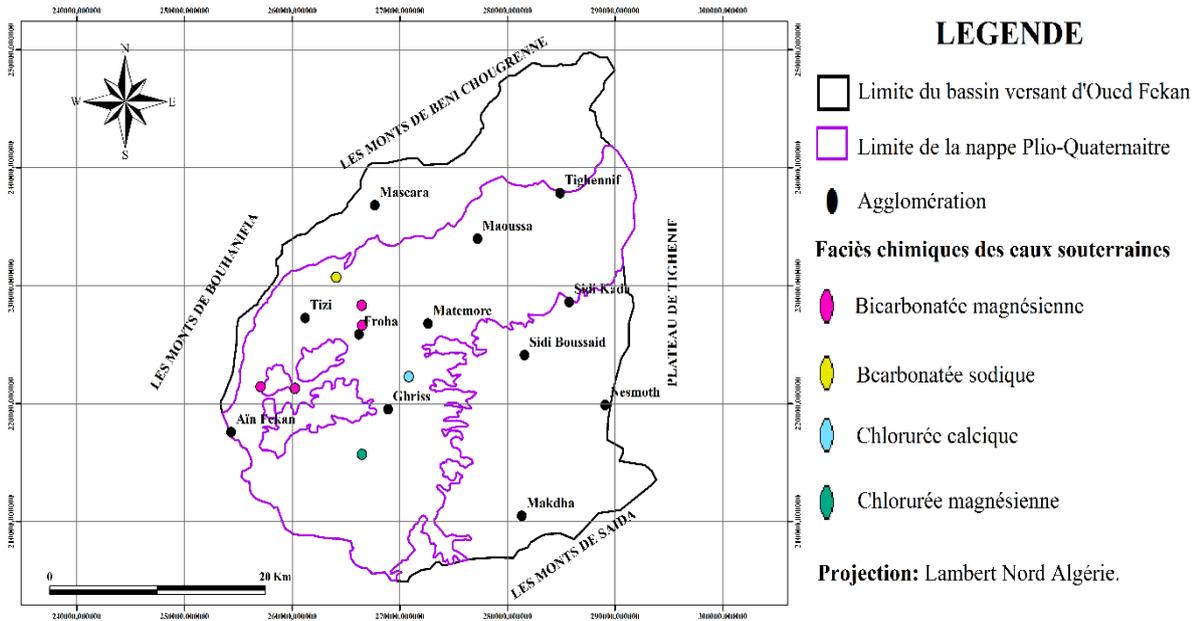
Outre, les recherches antérieures ont été effectués sur les ressources en eau souterraines de la plaine de Mascara, notamment les travaux de Sourisseau (1972), l'ENHYD (2010) a entrepris des analyses récentes dans le cadre de l'exploration l'hydrochimie des trois aquifères de la plaine de Ghriss :

##### I.4.4.5.1 Classification chimique des eaux souterraines

###### ➤ Nappe des alluvions

Les diagrammes de Piper et Schöller de la figure I.A.1 jusqu'à la figure I.A.6 (*C.f. annexes*) regroupent les eaux de l'aquifère alluvial par des faciès bicarbonatés à chlorurés magnésiens. La présence de bicarbonates est due à leur teneur relativement élevée, souvent supérieure à 250 mg/l, parfois dépassant 650 mg/l. Les eaux des alluvions peuvent être catégorisées en trois familles (**Figure I.19**).

- Bicarbonatée magnésienne ;
- Chlorurée sodique ;
- Chlorurée magnésienne à Est de la plaine.

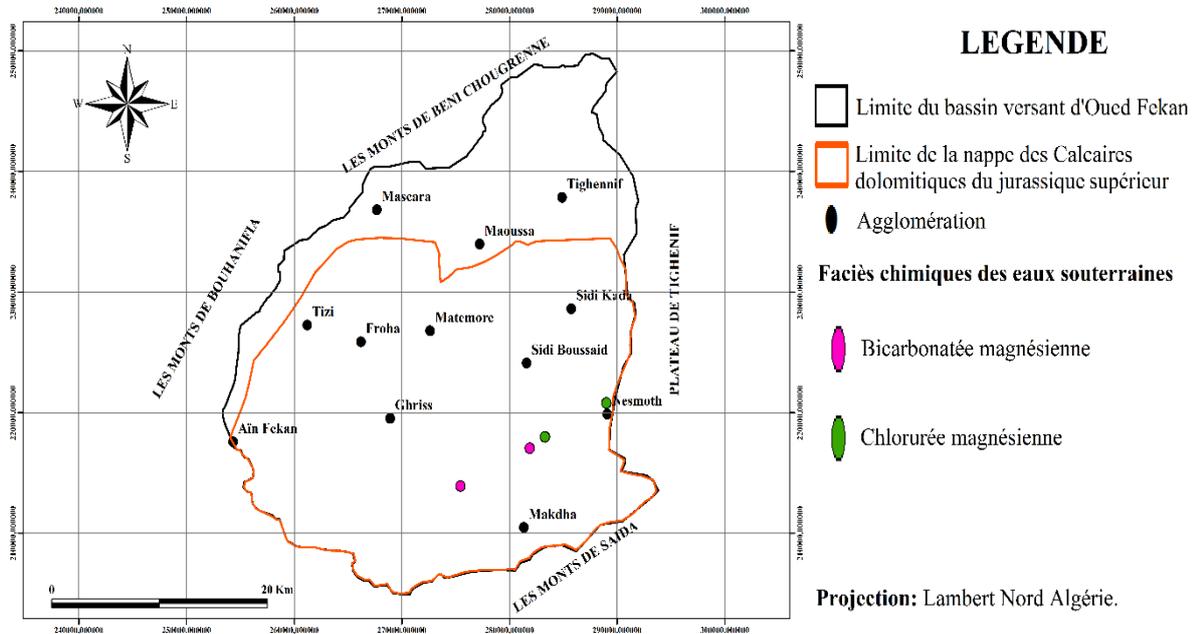


**Figure I.19.** Faciès chimiques des eaux souterraines de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss (ENHYD, 2010).

#### ➤ Nappe des calcaires dolomitiques du Jurassique supérieur

Le faciès des eaux de la nappe des calcaires dolomitiques est principalement bicarbonaté magnésien, tandis que les eaux du deuxième faciès présentent une extension de faible envergure, de type chlorurée magnésien.

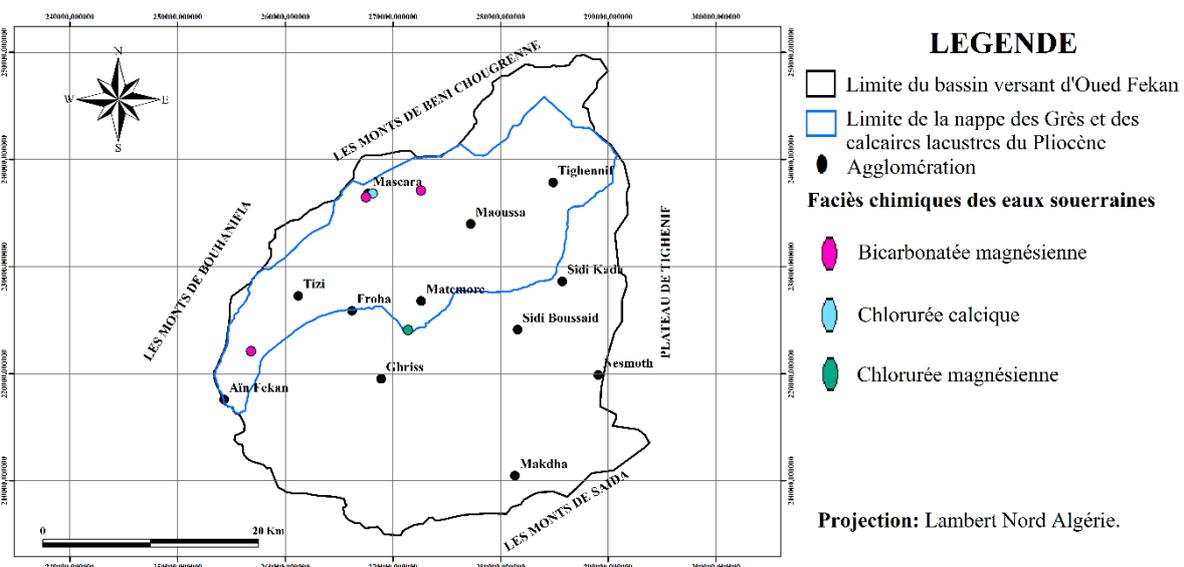
La dissolution des calcaires dolomitiques est causée par les teneurs relativement élevées en bicarbonates et en magnésium. Les eaux chargées en chlorures de cette nappe pourraient résulter de la dissolution des sels présents dans les couches marneuses entrelacées dans les calcaires dolomitiques (**Figure I.20** et de la **Figure I.A 7 et I.A 8** ; Cf. annexes).



**Figure I.20 .** Faciès chimiques des eaux souterraines de la nappe des Calcaires dolomitiques du jurassique supérieur (ENHYD, 2010).

➤ **Nappe des Grès et des Calcaires lacustres du Pliocène**

Sur le plateau de Mascara, les grès et les calcaires lacustres du Pliocène sont recouverts d'une seule nappe dont la composition chimique est similaire. Le faciès bicarbonaté calcique dans la région de Mascara est un indicateur de la présence importante de ciment calcaire. Au Nord de Mascara à Tighennif, on peut observer des teneurs élevées de chlorure provenant des terrains argileux et le versant Sud des Béni-Chougrane est recouvert d'un dépôt marno-sableux provenant du Mio-pliocène (**Figure I.21** et de la **Figure I.A 9** et **I.A 10** ; Cf. Annexes).



**Figure I. 21.** Faciès chimiques des eaux souterraines de la nappe des Grès et des Calcaires lacustres du Pliocène (ENHYD, 2010).

#### I.4.4.5.2 Risque d'alcalinité et salinité des eaux de la plaine de Ghriss

En ce qui concerne l'irrigation, nous utilisons un diagramme qui prend en compte la conductivité de l'eau à 25 °C et le taux d'absorption du sodium (SAR). Cette méthode fait intervenir la salinité et le danger d'alcalinisation des sols. Le SAR est donné par la formule suivante :

$$SAR = \frac{Na}{[(Ca+Mg)/2]^{-0.5}} \quad (\text{I.4.1})$$

En fonction de leur conductivité, les eaux se répartissent de la manière suivante :

- ✓ C<sub>1</sub> : conductivité à 25°C < (250 µmho/cm) → eau de faible salinité ;
- ✓ C<sub>2</sub> : conductivité à 25°C de 250 à 750 µmho/cm) → eau de salinité moyenne ;
- ✓ C<sub>3</sub> : conductivité à 25°C de 750 à 2250 µmho/cm) → eau de forte salinité ;
- ✓ C<sub>4</sub> : conductivité à 25°C de 2250 à 5000 µmho/cm) → eau à très forte salinité.

La classification suivante est basée sur le taux d'absorption du sodium (SAR) :

- ✓ S1 : eau à faible risque d'alcalinisation des sols (SAR < 10) → Eau excellente ;
- ✓ S2 : risque d'alcalinisation assez appréciable (10 < SAR < 18) → Eau bonne ;
- ✓ S3 : risque d'alcalinisation assez important : (18 < SAR < 26) → Eau convenable ;
- ✓ S4 : risque d'alcalinité important : (SAR > 26) → Eau médiocre.

L'ENHYD a sélectionné 16 points représentatifs des trois principales nappes de la plaine de Ghriss extraits du réseau de l'ANRH, dont les résultats sont résumés dans tableau I.15.

**Tableau I. 15.** Classification hydrochimique des eaux d'irrigation (ANRH, 2009).

Code	Nappes	Classes
212/1344	Nappe des alluvions zone centrale	C <sub>3</sub> S <sub>2</sub>
212/1282	Nappe des alluvions zone centrale	C <sub>3</sub> S <sub>1</sub>
213/104	Nappe des alluvions zone Est	C <sub>3</sub> S <sub>3</sub>
213/66	Nappe des alluvions zone Est	C <sub>4</sub> S <sub>3</sub>
212/1819	Nappe des alluvions zone Ouest	C <sub>3</sub> S <sub>2</sub>
212/1810	Nappe des alluvions zone Ouest	C <sub>3</sub> S <sub>1</sub>
212/2593	Nappe des alluvions zone Ouest	C <sub>4</sub> S <sub>4</sub>
244/9	Nappe des calcaires dolomitiques	C <sub>3</sub> S <sub>1</sub>
244/18	Nappe des calcaires dolomitiques	C <sub>2</sub> S <sub>1</sub>
244/24	Nappe des calcaires dolomitiques	C <sub>3</sub> S <sub>1</sub>
244/52	Nappe des calcaires dolomitiques	C <sub>3</sub> S <sub>1</sub>
212/509	Nappe des calcaires lacustres	C <sub>4</sub> S <sub>3</sub>
212/1452	Nappe des calcaires lacustres	C <sub>3</sub> S <sub>3</sub>
212/1346	Nappe des calcaires lacustres	C <sub>3</sub> S <sub>2</sub>
212/2775	Nappe des calcaires lacustres	C <sub>3</sub> S <sub>2</sub>
212/1535	Nappe des calcaires lacustres	C <sub>3</sub> S <sub>3</sub>

Ainsi, la qualité hydrochimique des eaux de la nappe alluviale est répartie géographiquement en trois secteurs :

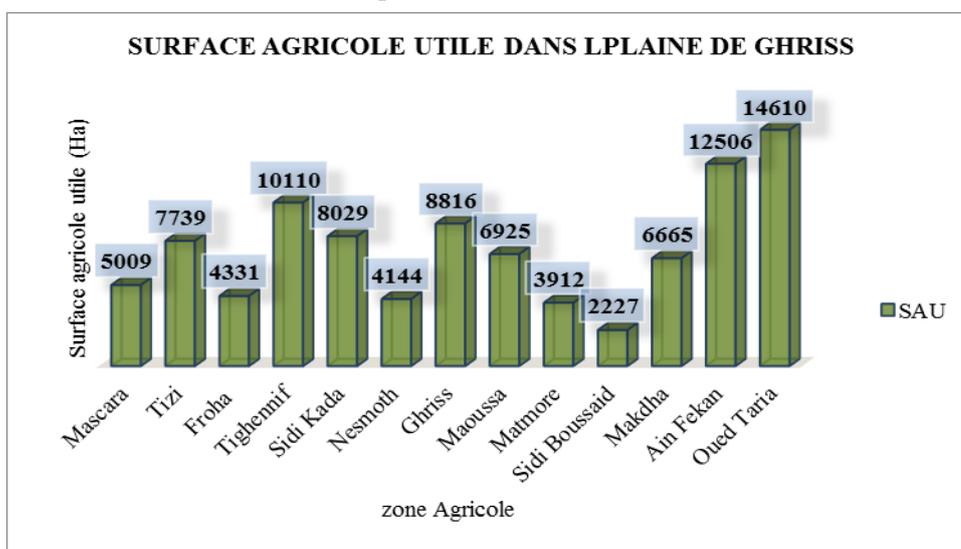
- Les secteurs Centre et Ouest, où les eaux sont généralement de qualité passable à mauvaise pour l'alimentation en eau potable, classées dans les catégories C<sub>3</sub>S<sub>1</sub> à C<sub>3</sub>S<sub>2</sub> des eaux d'irrigation avec une salinité forte et un faible degré d'alcalinisation des terrains.
- Le secteur Est présente des eaux de mauvaise qualité pour l'alimentation en eau potable. Pour l'irrigation les eaux sont classées dans les catégories C<sub>3</sub>S<sub>3</sub> à C<sub>4</sub>S<sub>3</sub>, ce qui indique une eau à forte salinité et moyen d'alcalinisation.

Les eaux de la nappe des grès et des calcaires lacustres sont généralement passables à médiocres pour l'alimentation en eau potable. Elles sont classées dans les catégories C<sub>3</sub>S<sub>3</sub> à C<sub>3</sub>S<sub>2</sub> des eaux d'irrigation, avec un danger fort de salinité et moyen d'alcalinisation des terrains.

Les eaux de la nappe des calcaires dolomitiques sont de bonne qualité chimique pour l'alimentation en eau potable, classées dans les catégories C<sub>2</sub>S<sub>1</sub> à C<sub>3</sub>S<sub>1</sub> des eaux d'irrigation, avec un risque relativement faible de salinité et d'alcalinisation des terrains.

### I.5 Description des composantes de l'agrosystème de Ghriss

La plaine de Ghriss occupe une surface agricole d'environ 95 023 Ha, avec une surface agricole utile de 12 506 Ha (**Figure I.22**). La commune d'Oued Taria dispose de la plus grande surface à 14 610 Ha, soit de 15.37% du total de la plaine. La plus petite surface revient à Sidi Boussaid avec 2 227 Ha, soit de 2.34% de la plaine.

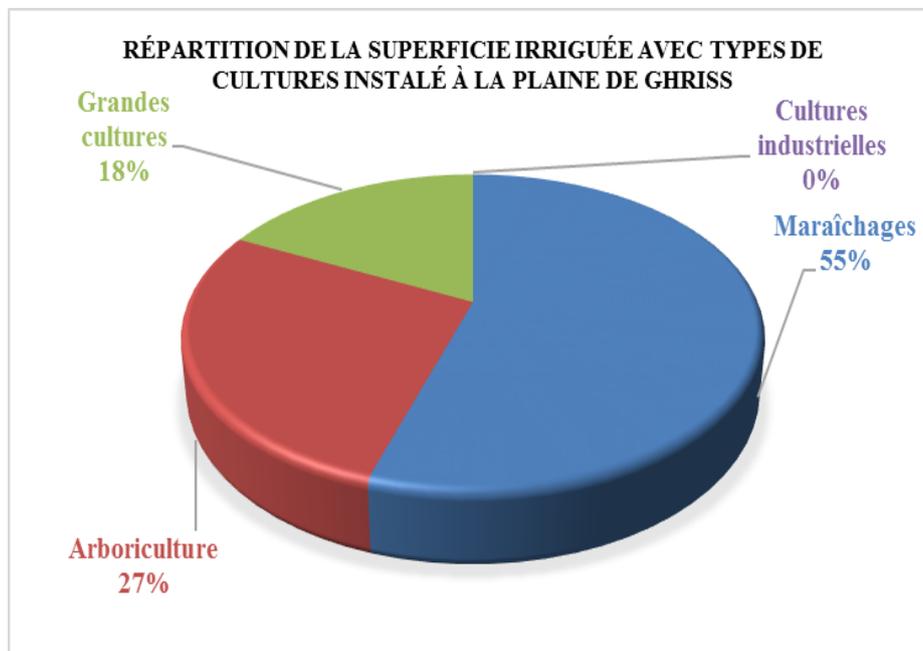


**Figure I.22.** Carte de répartition des surfaces agricole dans la plaine de Ghriss (DRE, 2016).

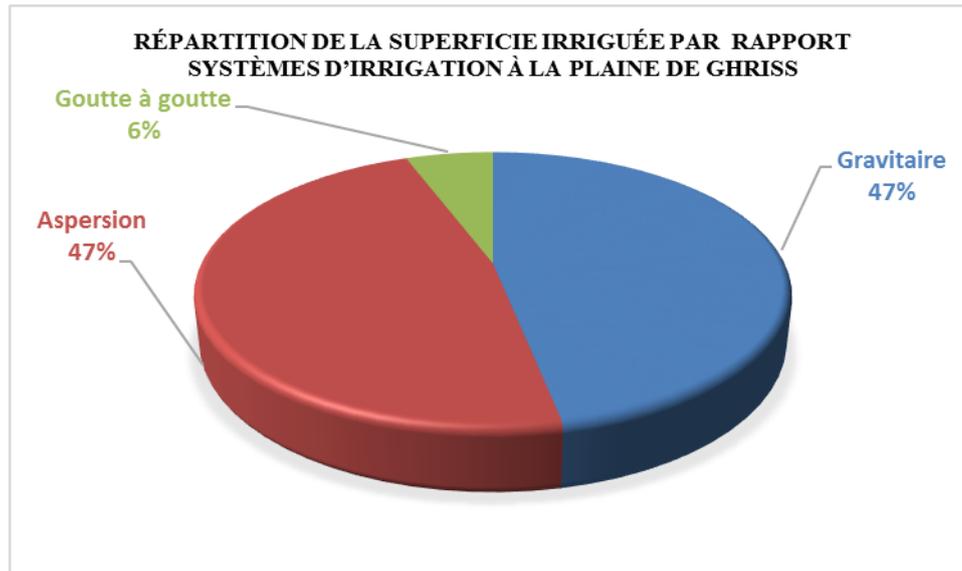
D'autre part, l'occupation végétale de la plaine de Ghriss est peu diversifiée (**Figure I.23**). La superficie irriguée couvre 18% des parcelles de la plaine. L'arboriculture est principalement basée sur les oliviers et les vignes couvrent 55% du total

La plaine de Ghriss offre de nombreux arbres fruitiers tels que les agrumes près des villes de Maoussa et de Teghennif. Les amandiers et pommiers aux environs de Froha. On a récemment introduit des cultures maraîchères dans des zones de plaine qui ont une vocation autrefois céréalière mais qui se transforment actuellement en maraîchage.

Le développement de ces cultures se base sur les différents systèmes d'irrigation par gravité et aspersion sur 47% de la surface irriguée contre seuls 6% de la surface agricole irriguée utilise le goutte-à-goutte (**Figure I.24**).



**Figure I.23.** Pourcentage des superficies irriguées par types des cultures dans la plaine de Ghriss (DRE, 2016).



**Figure I.24.** Pourcentage des superficie irriguées de la plaine de Ghriss (DRE, 2016).

Outre, la diversité de la végétation favorisant un équivalent d'écosystème de la région, se trouvent des jujubiers et quelques rares caroubiers, ainsi que quelques palmiers nains sur les hautes terrasses. Quant aux basses terres, elles abritent des plantes hydrophiles comme l'Atriplex, Typha, Roseaux et Scirpus. Les reliefs sont parsemés d'oliviers sauvages, de thym, de lentilles, de genêts et de ronces.

La couverture végétale du sol en altitude est constituée de plantes rustiques, épineuses appelées asparagus ou grimpantes appelées salsepareilles. Certains arbres ont été intégrés, tels que le platane, l'eucalyptus utilisé pour purifier les étangs, le figuier d'Amazonie et quelques acacias.

Ainsi, l'agrosystème de Ghriss, tel que représenté par la carte de couverture des sols montre que les cultures et la jachère occupent de grandes superficies à travers la totalité de plaine, tandis qu'au Sud-Est on trouve des forêts (**Figure I.25**).

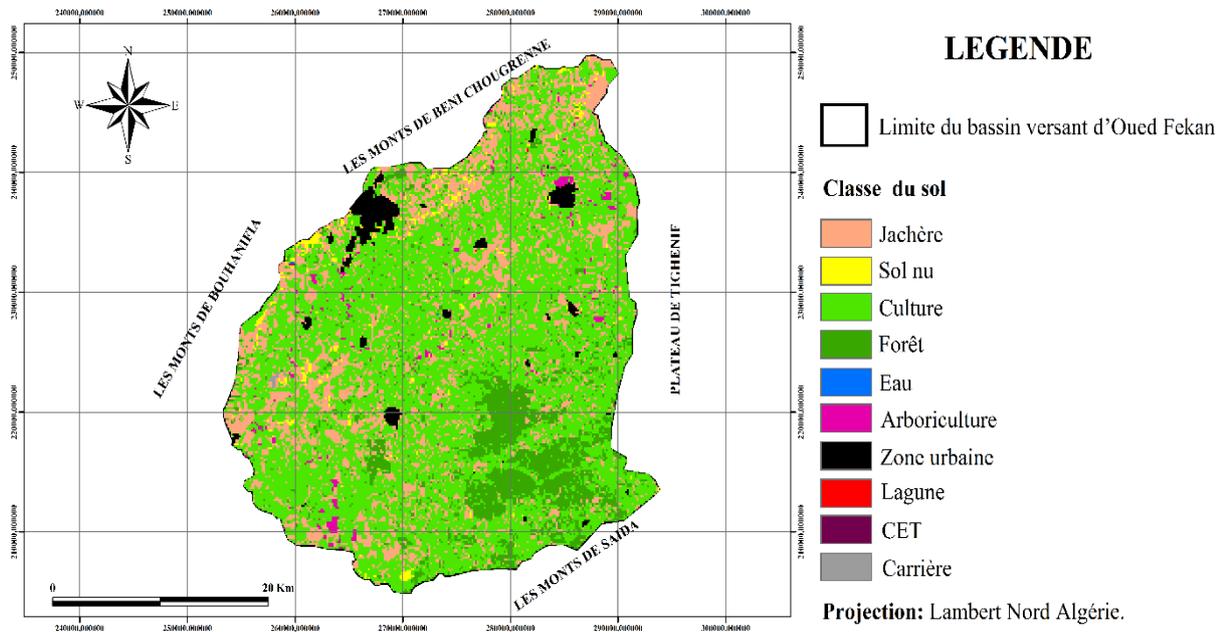


Figure I.25. Agrosystème du bassin versant d'Oued Fekan (CTS., 2019).

## I.6 Conclusion

Ce premier chapitre met en lumière l'importance stratégique de la plaine de Ghriss dans son contexte géographique, géologique et hydrogéologique. En effet, sur une superficie d'environ 605 Km<sup>2</sup>, la plaine de Ghriss est favorisée par la superposition de trois (03) aquifères, surmonté d'une nappe Plio-Quaternaire.

Le contexte climatique est caractérisé par un climat semi-aride avec une faible infiltration d'environ 101.296 mm. L'irrigation des surfaces agricoles contribue considérablement à la réalimentation de l'aquifère Plio-Quaternaire, avec une hauteur piézométrique évaluée à 13 m.

Ces données de base constituent un des piliers de notre démarche, aboutissant à l'évaluation de la vulnérabilité de la nappe, dans la mesure où les activités anthropiques s'adosent à un milieu naturel fragilisé, ce qui impose une rigueur dans la gestion des ressources locales, notamment par l'application des outils de modélisation performant. Telle est l'ambition du chapitre II de cette thèse.

**CHAPITRE II:**

***Description de la méthodologie et du  
matériel utilisé***

## CHAPITRE II : CHAPITRE II:DESCRIPTION DE LA MÉTHODOLOGIE ET DU MATÉRIEL UTILISÉ

### **II.1 Introduction**

La vulnérabilité est généralement matérialisée par la facilité avec laquelle une nappe d'eau souterraine peut être atteinte d'une pollution anthropique. En pratique, cela peut être engendré soit par une source ponctuelle (décharge, cimetière, rejet d'eau usée brute domestique ou industrielle, etc.), soit linéaire (pipeline, réseau d'eau usée, réseau de drainage agricole, etc.) ou encore diffuse de certains polluants (engrais chimiques, pesticides, herbicides, eaux usées) au travers des formations perméables.

Toutefois, cette vulnérabilité reste une notion relative, non mesurable et sans dimension précision. Son évaluation dépend essentiellement de la nature, de la quantité et de la fiabilité des données utilisées. Sa caractérisation est basée généralement sur l'estimation d'un certain nombre de paramètres plus ou moins important, relatifs notamment à la couverture de la nappe (sol et zone non saturée) et à la zone saturée proprement dit.

Dans ce deuxième chapitre, nous allons mentionner l'état de la recherche sur la vulnérabilité des aquifères à la pollution des eaux souterraines, dont le but principal est de maîtriser la méthodologie appliquée.

A cet effet, une attention particulière est réservée à l'identification des sources de propagation des polluants d'origine agricole ou autres, à travers des données relatives aux analyses d'échantillons d'eau prélevée des points d'eau captés ainsi que les morphométriques des aquifères de la plaine de Ghriss.

### **II.2 Les eaux souterraines**

#### **II.2.1 Les eaux souterraines dans le monde**

Les eaux souterraines sont la principale source d'eau douce de l'humanité. Elles représentent 30% de l'eau douce de la planète; le reste constitue les calottes polaires (69%) ainsi que les fleuves et les lacs (1%) (IAEA, 2023).

Une partie des eaux de pluie s'écoule à la surface des terrains avant de se condenser dans les cours d'eau et les lacs. Cependant, une partie considérable des eaux de pluie s'infiltre dans

les pores du sol et dans les fissures des rochers, pour devenir ce qui est nommé « les eaux souterraines » (Véronique et al., 2000).

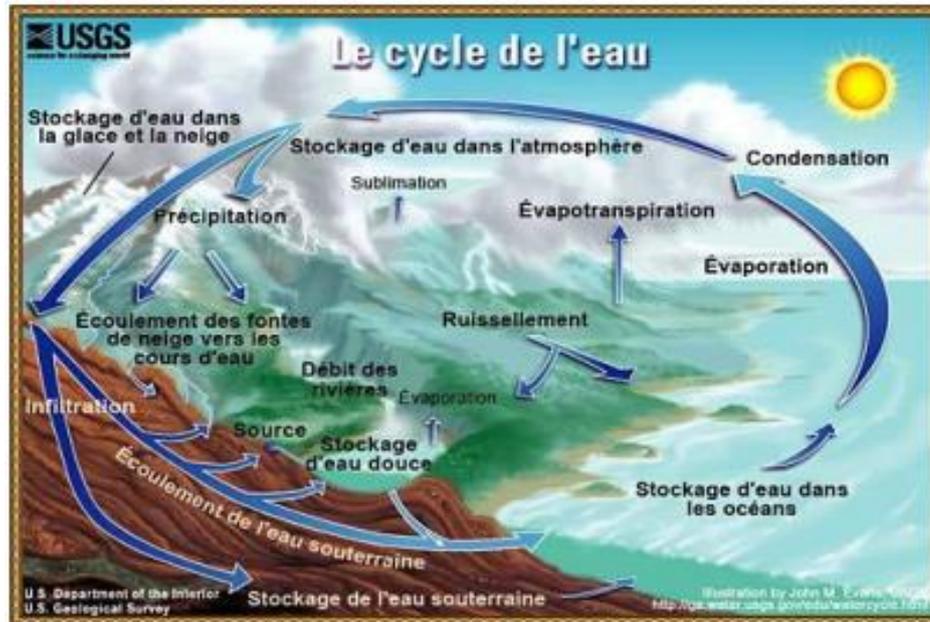


Figure II. 1. Le cycle d'écoulement des eaux (Thévenot, 2007).

## II.2.2L'origine des eaux souterraine

En 2005, François Renard classe les sources des eaux souterraines comme suit :

### ✓ Eaux météoriques :

La majorité des eaux souterraines sont produites par les précipitations et s'infiltrent dans le sous-sol. Les aquifères de grande taille peuvent contenir de l'eau provenant de périodes où le climat était différent, ce qui peut servir d'indicateur des changements climatiques.

### ✓ Eaux cornées :

Les eaux présentes en profondeur dans la croûte terrestre (à partir de 1 à 2 Km) proviennent de réservoirs d'eau météoriques qui ont réagi avec les roches environnantes. Habituellement, ces eaux sont relativement salées. Les eaux collectées peuvent avoir un impact sur l'hydrologie des formations géologiques qui ont été récemment enfouies (Gulf Coast aux USA) ou bien rester enfermées dans des roches dont la perméabilité est très faible et dont toute l'eau n'a pas été retirée. Cette eau est souvent présente depuis la formation de la roche.

### ✓ Eaux juvéniles :

Les eaux sont libérées de manière directe par des processus magmatiques en profondeur. Elles ont du mal à être distinguées des eaux en profondeur, par exemple l'eau qui remplit le forage

profond (11 km) dans la péninsule de Kola en Russie. En plus de l'eau, les processus magmatiques peuvent également relâcher des composés gazeux tels que le  $\text{CO}_2$ .

### II.3 Classification des aquifères des eaux souterraines

#### II.3.1 Aquifère à nappe libre

C'est le premier aquifère qui se trouve sous la surface du sol. Son altitude est désignée sous le nom de niveau piézométrique ou niveau hydrostatique, mesuré à l'aide de petits ouvrages appelés piézomètres. On utilise le terme phréatique pour décrire sa nappe phréatique.

Il s'agit d'une nappe qui se trouve sur un terrain recevant l'eau sur toute sa surface. En d'autres termes, le terrain qui l'entoure n'est pas recouvert par une roche imperméable, ce qui empêche l'eau d'y accéder par infiltration directe à partir de la surface. Dans la nappe libre, l'eau peut se déplacer librement et prendre la forme qui lui convient, c'est pourquoi elle est appelée nappe libre.

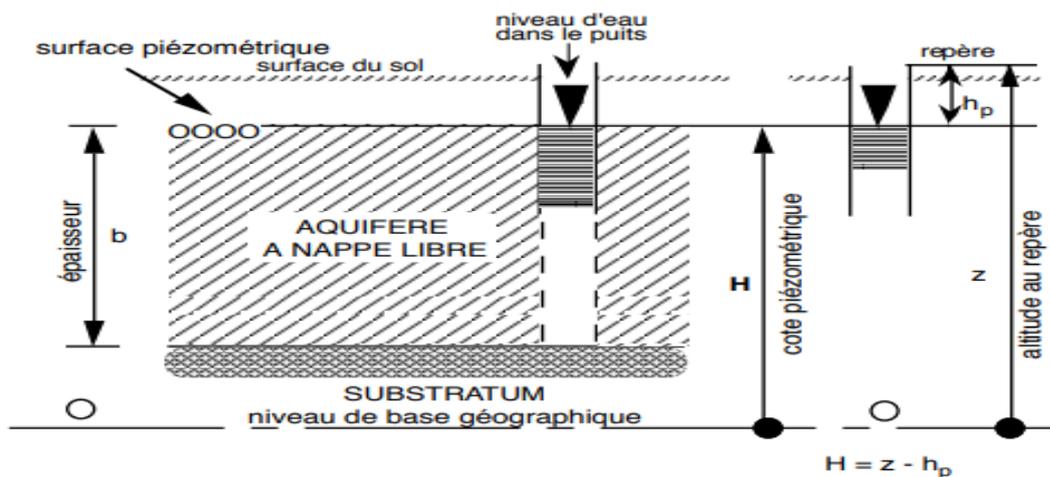


Figure II. 2. Aquifère libre (Castany, 1982 in Michel et al., 1993).

#### II.3.2 Aquifère à nappe captive

L'aquifère à nappe captive se distingue par la présence de deux formations imperméables. La pression est régulée par les roches poreuses ou la couche à l'intérieur de l'aquifère, ce qui le rend aussi connu sous le nom d'aquifère sous pression. Le potentiel hydraulique dépasse ou excède l'altitude du mur de la formation au-dessus de l'écoulement.

L'aquifère est complètement saturé d'eau. Si un sondage atteint le toit de l'aquifère, cela provoque une diminution de la pression dans l'aquifère et une fuite d'eau. La différence de charge entre la zone d'alimentation et l'ouvrage considéré entraîne une stabilisation du niveau

à une altitude qui reflète le niveau piézométrique. En cas d'artésianisme, l'eau s'écoule naturellement.

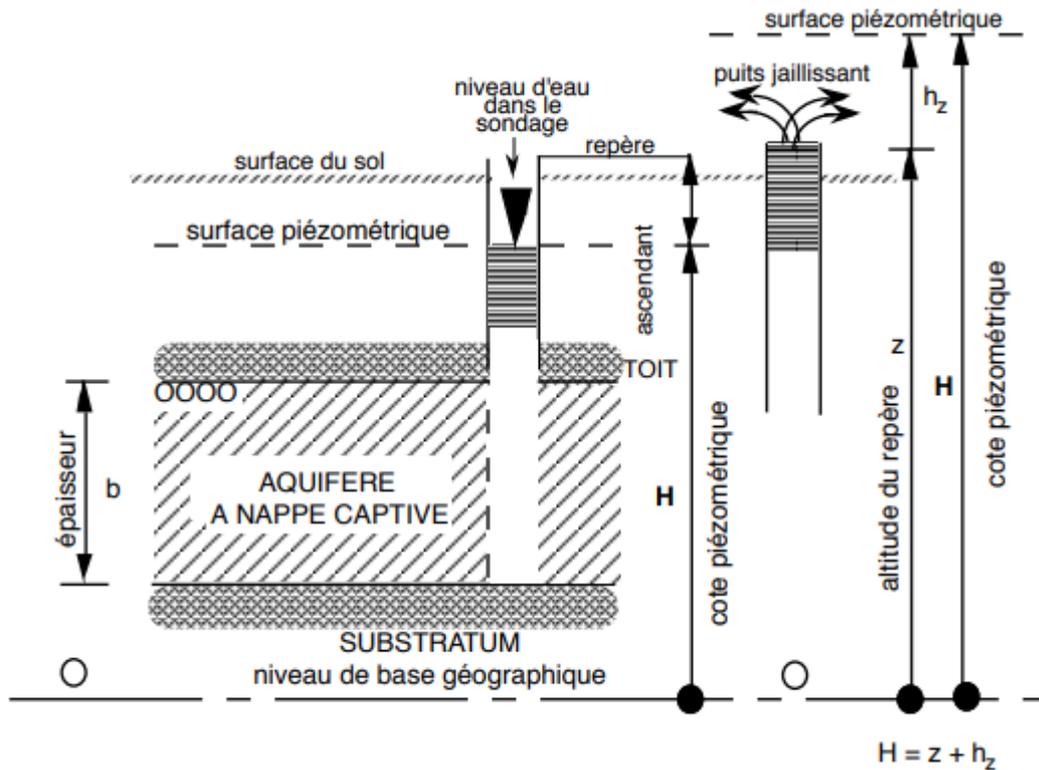


Figure II. 3. Schéma de l'aquifère à la nappe captive ( Castany, 1982).

### II.3.3 Aquifère à nappe semi-captive ou à drainance

La formation semi-perméable est présente sur son toit et/ou son substratum. Les échanges d'eau avec l'aquifère sus- et sous-jacent se traduisent par des phénomènes de drainage. La formation est intégrée à un aquifère multicouche (Kevin, 2012).

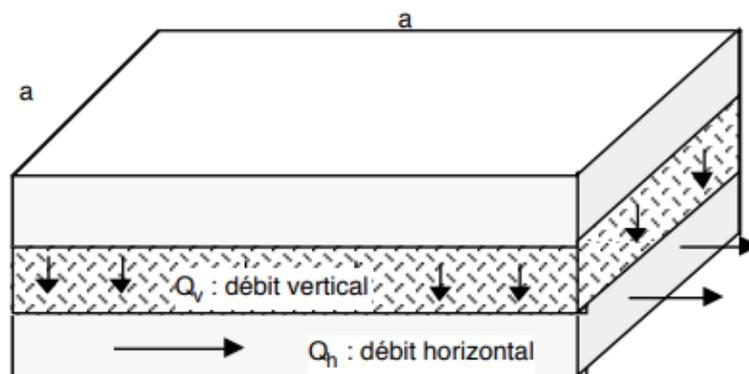


Figure II. 4. Schéma de la drainance (Michel et al., 1993).

## II.4 Notion de la pollution d'eau souterraine

La pollution est l'altération de la qualité naturelle, à la fois physique et chimique de l'eau. Il s'agit de l'action et des processus de détérioration de la qualité de l'eau où le risque de limiter cette ressource à l'avenir est permanent en raison de la pollution des eaux souterraines.

Elle est principalement causée par l'activité humaine, sans tenir compte de la détérioration naturelle due aux facteurs géologiques. Dans ce contexte, l'étude de la vulnérabilité oriente le mode de gestion et d'exploitation des eaux souterraines (Boucenna, 2009).

Le terme polluant est utilisé pour faire référence à un agent physique, une substance minérale ou biologique. Une dégradation de la qualité de l'eau naturelle est causée par l'activité humaine, que ce soit sous une intensité ou une concentration anormale. Les régions agricoles sont caractérisées par une forte concentration de nitrates, un produit hautement nuisible à la santé publique et à l'environnement.

Deux facteurs principaux sont à la base de la détermination du pouvoir polluant d'une substance :

1. La dose introduite dans le milieu récepteur, déterminée par la concentration dans l'eau et le volume d'eau en mouvement, véhicule de transport ;
2. La fréquence des apports, dont la répétition accroît les risques car les sédiments et les êtres vivants ont un effet cumulatif (Drouiche, 2012).

### II.4.1 Type des pollutions

Selon Lallemand B. et al. (1999), les différents types de pollution sont classés en quatre (4) grands groupes, mentionnés comme suit :

#### II.4.1.1 Les polluants physiques

La chaleur, le transport de matières solides en suspension et la radioactivité sont parmi les principaux agents physiques de la pollution.

##### ✓ La chaleur

La chaleur, qui augmente la température de l'eau, surtout en surface, a un impact écologique sur la vie aquatique permettant le développement des microorganismes comme les algues (Castany, 1982). L'augmentation de la température, diminue la quantité d'oxygène dissoute dans l'eau, ce qui restreint la capacité de vie des différentes espèces aquatiques (Bordet, 2007).

**✓ La radioactivité**

Les substances radioactives sont utilisées de plus en plus fréquemment, que ce soit dans le secteur industriel ou agricole. Elle pourrait être considérée comme l'un des polluants physiques les plus dangereux. C'est pour cette raison que tous les rejets sont strictement réglementés et contrôlés (Castany, 1982).

**✓ Les matières solides en suspension (MES)**

Elles sont produites par les précipitations et les eaux de surface. De minuscules particules, de l'ordre du micro, peuvent se déplacer de cette manière. Les MES ont pour effet de diminuer la luminosité dans l'eau, ce qui freine la photosynthèse. Le développement des espèces végétales est plus difficile en raison de la diminution de leur oxygène dans le milieu, ce qui affecte négativement les espèces animales (Koller, 2004 ; Castany, 1982).

**II.4.1.2 Les polluants chimiques**

Les substances rejetées par l'activité humaine sont dissoutes dans l'eau. Il existe de nombreux polluants chimiques qui proviennent de diverses origines : sels minéraux dissous, métaux lourds, pesticides, détergents et hydrocarbures (Castany, 1982).

**✓ Sels minéraux dissous****- *Nitrates***

La principale source des nitrates est l'agriculture. Pourtant, leur présence dans l'eau souterraine ancienne prouve que cette pollution n'est pas toujours attribuable à des causes récentes. En général, ils se déplacent à une vitesse relativement faible dans le sol et les eaux souterraines : il faut environ 20 ans pour que l'activité de pollution se manifeste et que le polluant soit détecté dans les eaux souterraines. Leur croissance dans les eaux souterraines au cours des dernières décennies est inquiétante. Leur concentration maximale dans l'eau potable est de 44 mg/l.

**- *Sulfates***

L'eau souterraine contient naturellement des sulfates et des chlorures. Les chlorures, en raison de leur persistance dans tous les environnements, sont d'excellents traceurs naturels. Néanmoins, la croissance importante de leurs niveaux est préoccupante. Ils sont générés par l'eau des précipitations, les engrais chimiques et les déchets industriels. Leur concentration maximale dans l'eau potable est de 250 mg/l.

**✓ Les micropolluants**

Les micropolluants sont constitués de substances toxiques à très faible concentration dans l'eau, les activités industrielles produisent généralement des particules de l'ordre du

microgramme, voire du nanogramme par litre, en rejetant des déchets et en lessivant les produits stockés dans le sol.

- ***Métaux lourds***

Les métaux lourds ingérés de manière répétée par l'homme entraînent des dépôts nocifs dans le squelette. (Plomb) Les éléments les plus risqués sont : les cyanures très toxiques (rejets interdits), le mercure sous sa forme de composés solubles (dose mortelle : 1 à 2 g), le chrome cancérigène sous sa forme polyvalente (chromates et bichromates), le plomb (saturnisme), sévèrement réglementé, même dans les eaux brutes de rivière utilisées par les stations de traitement (Castany ., 1982).

D'autres éléments sont jugés indésirables et peuvent causer des désagréments au consommateur en termes d'aspect organoleptique : goût, saveur, coloration. Cela concerne les métaux tels que le cuivre, le zinc, le fer, le manganèse et l'aluminium (Fellah, 2012).

- ***Pesticides***

Réunir tous les produits de lutte contre les parasites des cultures et des animaux. Leur évolution dans le sol, qui conduit à la formation de dérivés toxiques, est encore peu connue. En raison de l'auto-épuration du sol. La majorité d'entre eux sont rapidement éliminés, et presque rien n'est présent dans les eaux souterraines (Castany, 1982).

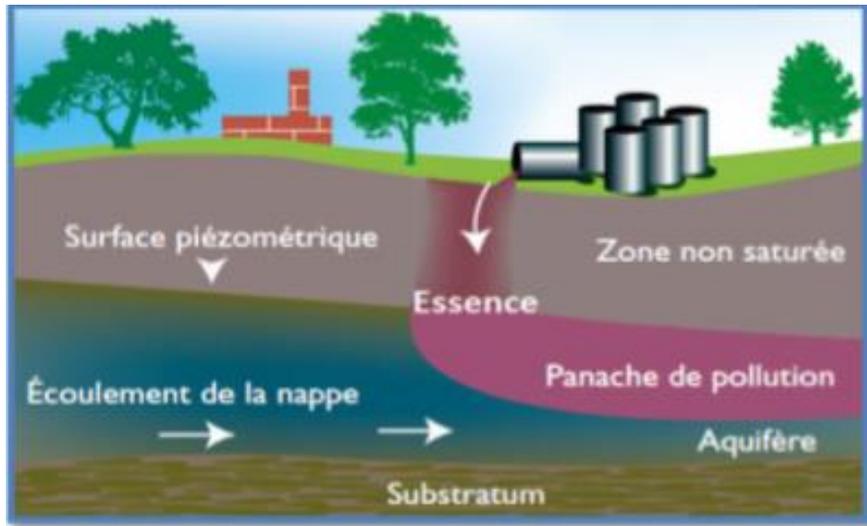
- ***Détergents***

Ce sont des substances employées pour les différentes opérations de nettoyage. Un détergent se compose souvent d'agents de surface et de composés minéraux, parfois liés à des matières organiques améliorantes et à des enzymes hydrolysats. Ces substances ont une biodégradabilité très variable. Les eaux souterraines manquent de détergents. Excepté dans les zones suburbaines, en relation avec les canalisations d'évacuation des eaux usées, et dans certaines nappes alluviales en contact étroit avec un cours d'eau pollué in (Fellah ., 2012). Ces produits de nettoyage sont peu toxiques, mais ils favorisent, grâce à leur capacité à mouiller, la dispersion et le transport d'autres polluants, comme les pesticides. Ils limitent la croissance des microorganismes du sol et bloquent la réoxygénation (Castany, 1982).

✓ ***Hydrocarbures***

Les produits pétroliers peuvent causer la pollution des eaux souterraines en raison de déversements accidentels sur le sol ou en sous-sol, ainsi que d'infiltrations non contrôlées de rejets. Les effluents domestiques ou industriels peuvent être à l'origine de ces substances. Ces substances sont présentes dans les eaux rejetées sous forme de suspension flottante, ce qui

empêche leur oxygénation et entraîne ainsi des asphyxies des êtres vivants (Souikni et al., 2006). En raison de leur capacité de dilution, les hydrocarbures peuvent être nocifs à des niveaux très bas. Une concentration de 1/10000 à 1/100000 peut causer des odeurs et des saveurs désagréables dans l'eau. Entre 1000 et 5000 m<sup>3</sup> d'eau sont souillés par un litre d'essence (Castany, 1982).



**Figure II. 5.** Comportement des hydrocarbures dans le milieu souterraine (Boucheseiche, 2002).

#### - *Les solvants chlorés*

Appelés également chlorurés-aliphatiques, ces solvants servent à nettoyer et à séparer divers produits. Ils sont aussi utilisés en tant que réfrigérants, répandus en grande quantité. La présence de ces éléments dans les décharges de tous types représente un danger pour la pollution des nappes phréatiques. Les polluants très volatils peuvent causer une contamination des eaux souterraines près des zones urbaines ou industrielles (décharges industrielles) après leur percolation dans le sol. Ils sont peu altérés et ont tendance à se déposer dans la partie inférieure de la nappe (Fellah, 2012).

#### **II.4.1.3 La pollution d'origine organique et microbiologique**

Ces polluants ont pour origine l'agriculture, sanitaire (hôpitaux) et même la vie domestique. Elles ont la capacité d'introduire des micro-organismes dans l'eau, dont certains sont pathogènes (Bordet., 2007). L'eau souterraine est le principal lieu de propagation des microorganismes, qu'ils soient extrêmes pathogènes ou non.

Pratiquement l'eau souterraine en est dépourvue dans les conditions naturelles. Les aquifères karstiques sont confrontés à un problème particulier car leur capacité d'autoépuration naturelle est faible, voire nulle (Castany, 1982). Des micro-organismes pathogènes peuvent être contenus dans l'eau (virus, bactéries, parasites), préjudiciables pour la santé humaine et limitent l'utilisation de l'eau potable.

## II.4.2 L'impact des polluants sur la santé et l'environnement

Le tableau II.1 mentionne les différents polluants et leurs effets sur l'environnement et la santé publique.

**Tableau II. 1.** Effets des polluants sur la santé et l'environnement [2].

Polluants	Effets environnementaux	Effets sanitaires
Les matières en suspension	-Eaux plus troubles : perturbe la photosynthèse, la respiration des poissons et colmate les milieux aquatiques	-Transportent des polluants ; ce qui augmente les risques d'absorption de substances toxiques par l'organisme
Pollution organique	-Asphyxie du milieu par la consommation de l'oxygène dissous, mort des poissons -Stimulation de la production végétale (eutrophisation) et accumulation des boues -Faiblement biodégradable	-Favorise le développement d'organismes pathogènes pour l'Homme
Azote (nitrates, nitrites), Phosphore	-Eutrophisation des milieux aquatiques par excès matières nutritives pour les végétaux (algues) et conduisant à l'asphyxie des milieux. -Toxicité de l'ammoniaque et des nitrites	-Nitrates : empoisonnement du sang chez les nourrissons par blocage de l'hémoglobine interdisant le transport de l'oxygène (maladie bleue). -Nitrites : cancers à long terme (même à faible concentration) si associés à certains pesticides
Métaux (Al, Ni, Cr)	-Non biodégradable, bioaccumulables	-Troubles respiratoires, digestifs, nerveux ou cutanés -Arsenic, Nickel et Chrome : cancérigènes Aluminium : neurotoxique, suspecté de jouer un rôle dans la maladie d'Alzheimer
Pesticides	-Substances très dangereuses. -Polluants organiques persistants -S'adsorbent sur les matières en suspension et s'accumulent dans certains compartiments (sédiments, matières organiques, chaîne alimentaire)	-Les plus toxiques : les insecticides. -Effets reprotoxiques (malformations, stérilité, troubles de la reproduction), mutagènes et cancérogènes. -Glyphosate : Effets sur placenta
Radon	Gaz radioactif naturellement présent dans l'environnement	-Classé cancérigène certain par le CIRC (Centre National de Recherche sur le Cancer) -Cancers broncho-pulmonaires

## II.5 Vulnérabilité des nappes souterraines

### II.5.1 Notions générales sur la vulnérabilité

La première mention de la « vulnérabilité » de l'eau souterraine à la contamination remonte à Margat en 1968 (Guillaume, 2012). Son objectif est de sensibiliser la population à l'importance de la pureté de l'eau souterraine. Toutefois, cette ressource demeure sensible aux agents externes et peut être polluée (Murat, 2000).

Selon l'effet de l'agent transport est le pivot entre les conditions climatiques et la structure physique de milieu à la contamination des eaux souterraine. En 2008, Rahmani définit la vulnérabilité de l'eau souterraine comme « *la capacité d'un système hydrogéologique à transmettre un contaminant potentiel depuis la surface du sol jusqu'à atteindre la zone saturée* ».

D'après Lafrance et al. (1989), la définition de la vulnérabilité peut être classée en trois catégories distinctes.

- Aptitude d'un système d'eaux souterraines à être contaminé ;
- Intégration de l'aptitude des eaux souterraines à propager et à conserver la contamination ;
- Prise en considération des caractéristiques polluantes du contaminant, ce qui fait appel aux concepts de normes et de seuils de toxicité.

Généralement, l'identification de termes de vulnérabilité se fait par plusieurs hauteurs. Ils combinent la caractérisation de la vulnérabilité intrinsèque et spécifique du contaminant. Schnebelen et al., (2002) explique la différence entre les deux types de vulnérabilité comme suit :

- ***La vulnérabilité intrinsèque*** est le terme utilisé pour représenter les caractéristiques du milieu naturel qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la pollution par les activités humaines.
- ***La vulnérabilité spécifique*** est le terme utilisé pour définir la vulnérabilité d'une eau souterraine à un polluant particulier ou à un groupe de polluants. Elle prend en compte les propriétés des polluants et leurs relations avec les divers composants de la vulnérabilité intrinsèque.

Différentes définitions de la vulnérabilité existent à l'heure actuelle et témoignent que ce sujet d'étude est encore susceptible d'améliorations et de standardisations futures (Guillaume, Mai 2012).

## II.5.2 Critères de la vulnérabilité

Selon Bézèlgues (2012), les critères de vulnérabilité sont précisés comme suit :

### II.5.2.1 Critère de la vulnérabilité intrinsèque

Plusieurs facteurs influents sur la vulnérabilité d'une nappe, tels que la nature et/ou la concentration de la contamination ainsi que le temps de transfert. Les caractéristiques des sols, de la zone non saturée et de la zone saturée sont prises en considération pour évaluer le comportement des polluants. Les différents critères de vulnérabilité évoqués dans la littérature sont décrits ci-dessous.

#### a) Critères relatifs du sol

- ✓ **Ruissellement – infiltration** : La recharge de la nappe se reflète dans le ruissellement et l'infiltration efficace. Ils sont intimement liés à la topographie et à la nature des formations superficielles, ce qui les rend représentables dans l'espace.
- ✓ **Couverte pédologique** : Là où la nature, la texture, la teneur en argiles et en matière organique, plus de l'épaisseur et la perméabilité verticale jouent un rôle dans la régulation des échanges entre la surface et la zone non saturée

#### b) Critères relatifs à la zone non saturée

- ✓ **Profondeur de la nappe libre** : Le temps de transport d'un polluant jusqu'à la nappe est influencé par l'épaisseur de la ZNS, y compris sa rétention, son stockage et ses interactions physico-chimiques avec l'encaissant, ce qui peut entraîner sa dégradation en cours de transfert.
- ✓ **L'amplitude de battement de la nappe** : L'amplitude de battement de la nappe est un facteur déterminant de l'épaisseur du recouvrement de la nappe (sol + ZNS). Par conséquent, elle peut devenir un critère de vulnérabilité.
- ✓ **Perméabilité verticale de la ZNS** : La perméabilité verticale de la ZNS détermine le temps nécessaire pour transférer un polluant vers la nappe.
- ✓ **Structure de la ZNS** : La variabilité du faciès, l'épaisseur des discontinuités de faciès et leur emplacement dans le profil vertical, la texture, la teneur en matière organique et les formations en argile influent sur la migration des fluides vers la nappe.

**c) Critères relatifs à la zone saturée**

- ✓ **Type de nappe** : La nappe libre est plus vulnérable qu'une nappe captive qui n'a pas d'horizon imperméable entre la surface et le toit, grâce à des formations imperméables.
- ✓ **Paramètres hydrodynamiques** : Des formations aquifères qui renferment des éléments tels que la transmissivité, la perméabilité, le coefficient d'emménagement, le gradient hydraulique : Ils évaluent la vitesse à laquelle les polluants migrent dans la nappe et le temps pendant lequel ils demeurent dans la zone saturée.
- ✓ **Piézomètre** : Elle décrit la forme et la dynamique de la nappe, qui peuvent changer au cours d'un cycle hydrologique complet. Entre les périodes de hautes eaux et des basses eaux.
- ✓ **Direction et sens d'écoulement** : Ils repèrent les endroits susceptibles d'être touchés par un polluant une fois qu'il a atteint la nappe.
- ✓ **Type de système hydrogéologique** : Pour comprendre la vulnérabilité d'un système, il faut tenir compte de sa réactivité aux impulsions pluviométriques. Les temps de transfert et de séjour longs sont des caractéristiques typiques d'un système inertiel et/ou capacitif fort.
- ✓ **Relations nappe/cours d'eau** : Les échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines peuvent se présenter sous deux formes : le drainage ou l'alimentation. Ils déterminent si les eaux souterraines peuvent être contaminées en provenance des eaux superficielles.
- ✓ **Épaisseur de l'aquifère** : La quantité d'eau stockée dans l'aquifère joue un rôle important dans la définition des conditions de dilution d'un polluant qui a atteint la nappe.
- ✓ **Présence ou non d'un horizon moins perméable** : C'est là que se trouve la nature libre ou captive de la nappe.

**d) Critères communs au sol, à la zone non saturée et à la zone saturée**

- ✓ **Fracturation** : Dans certaines conditions, des discontinuités verticales, telles que des failles, peuvent agir comme un drain et entraîner une augmentation très sensible des vitesses d'infiltration depuis la surface vers la nappe.
- ✓ **Recharge** : Cela représente la quantité d'eau atteignant la zone saturée pendant une période donnée (recharge annuelle nette). Elle est conditionnée par l'efficacité de l'infiltration et sa répartition dans l'espace et dans le temps, ainsi que par le climat (ETP, précipitations). Elle peut être interprétée en se basant sur la représentation de ces différents éléments constitutifs.

### II.5.2.2 Critère de la vulnérabilité spécifique

✓ **Comportement du polluant potentiel** : En raison de leur nature, les polluants ont un comportement spécifique dans le milieu. Ce comportement est influencé par les caractéristiques du milieu ainsi que par les propriétés physico-chimiques du composé lui-même. On peut observer principalement des phénomènes tels que la géochimie (dégradation, synthèse cellulaire), la physique (diffusion, évaporation, filtration) ou le transport de germes.

✓ **Capacité dispersives et épuratoires des sols** : En présence d'un polluant spécifique, les sols possèdent des propriétés épuratoires plus ou moins développées et spécifiques de ce polluant.

✓ **Intrusions marines** : En cas de présence d'un biseau salé en équilibre avec une nappe. La salinisation de la nappe peut être causée par une surexploitation, est une éventualité.

✓ **Qualité du réseau hydrographique** : Si les eaux souterraines sont approvisionnées, et en fonction de leur étendue, de leur vulnérabilité et de la qualité de ces eaux. Le réseau hydrographique peut revêtir la forme d'un écosystème naturel (forêt) ou agricole (culture, élevage) ou urbain (habitat, tissu industriel, etc....).

✓ **Points sensibles** : La vulnérabilité de la nappe augmente de manière significative sur certains sites en raison de l'activité à risque qu'ils pratiquent. Il s'agit des terres agricoles, des décharges (aux normes ou non), des rejets des établissements classés et des voies de circulation.

### II.5.3 Cartographie d'estimation de la vulnérabilité des nappes

Diverses méthodes ont été mises au point pour évaluer la vulnérabilité des eaux souterraines à l'échelle mondiale, Englobant des modèles qui intègrent les processus physiques, chimiques et biologiques dans la zone saturée, de la plus simple à la plus complexe, À des méthodes de pondération basées sur différents critères qui influencent la vulnérabilité (Gogu et al., 1998).

#### II.5.3.1 Principes des classes de choix d'un modèle

La classification des méthodes pour estimer et cartographier la vulnérabilité des eaux souterraines peut être effectuée de différentes manières :

- Du type de vulnérabilité étudiée : intrinsèque ou spécifique ;
- De l'objet étudié : source ou ressource ;
- Du contexte géologique : poreux, karstique, fissuré ou d'autre ;
- Du contexte géographique : pays, environnement naturel, climat ;

- Du résultat souhaité : carte de vulnérabilité générale, zones de protection d'une source ou estimation de vulnérabilité en un point donné ;
- Du type de concept et technique utilisées : méthodes empiriques utilisant des paramètres et indices superposables, méthodes mathématiques, numériques par modélisation ou méthodes prévisionnelles par analyse statistique

### ✓ **Les méthodes de cartographies à index**

En utilisant la combinaison des cartes de divers paramètres d'une région (critères de vulnérabilité) et en attribuant un index numérique ou une valeur à chaque paramètre. La combinaison des cartes est réalisée en utilisant des logiciels de traitement multicritères (SIG, par exemple). On peut distinguer deux types d'approche: les systèmes hiérarchisés et les systèmes paramétrés (Schnebelen et al., 2002).

- **La méthode des systèmes hiérarchisés** : est fondée sur la comparaison d'une zone spécifique avec les critères définissant les conditions de vulnérabilité d'autres zones (autres bassins ou autres systèmes aquifères). On l'utilise fréquemment pour évaluer la vulnérabilité de divers contextes hydrogéologiques, qu'ils soient de petit ou de grande échelle (régionale ou nationale)

- **La méthode des systèmes paramétrés** : implique de choisir des paramètres (ou critères) considérés comme représentatifs pour évaluer la vulnérabilité d'une eau souterraine. Chaque critère est caractérisé par une gamme de variation naturelle définie, divisée en intervalles discrétisés et classés. Un index est attribué à chaque intervalle, ce qui reflète le degré de sensibilité par rapport à une contamination. Les systèmes paramétrés peuvent être répartis en trois principaux groupes :

1. Systèmes matriciels.
2. Systèmes indexés.
3. Méthodes de pondération et d'indexation des paramètres.

Chacun est adapté à un objectif différent: respectivement, petite échelle d'étude, échelle moyenne d'étude.

✓ **Les méthodes statistiques**

Elles sont établies en fonction de la concentration en contaminant ou de la probabilité de contamination. Les caractéristiques de ces méthodes indiquent les probabilités de contamination dans la zone d'étude (Vrba et al., 1994).

✓ **Les modèles de simulation**

Leur objectif est de résoudre numériquement des équations mathématiques qui décrivent le déplacement des particules polluantes (Schnebelen et al., 2001).

✓ **Les méthodes de cartographie à index avec pondération des critères**

Elles sont les plus appropriées par rapport aux réalités du terrain, car elles prennent en considération l'importance relative de chaque critère. À l'heure actuelle, elles sont également très appréciées et utilisées (Gogu et al., 2000 ; Zaporozec et al., 1994).

On peut tirer des conclusions du diagramme triangulaire de la figure II. A 1 (*C.f annexes*). Vrba et al. (1994) mentionne que les modèles analytiques complexes peuvent être utilisés à grande échelle allant du 1/25 000 au 1/1100 000. Ils requièrent une densité importante d'informations. Il arrive parfois qu'une échelle telle que le 1/100 000 soit insuffisante pour les études de vulnérabilité régionales. En termes de densité de points moyenne, il est préférable d'utiliser une méthode de cotation numérique. En cas de quantité d'information réduite, L'échelle utilisée sera plus petite, allant jusqu'au 1/500 000 et la méthode recommandée sera de type cartographique, ce qui diminuera les coûts (Murat., 2000).

## **II.6 Méthodes et matériels utilisés**

Les premières cartes de vulnérabilité furent élaborées par des chercheurs français au début des années 70 (Albinet et al., 1970). Elles ont ensuite été testées dans d'autres pays à travers le monde. Leur élaboration a été basée sur la synthèse de quelques paramètres qui ont un impact majeur sur la vulnérabilité des aquifères. Depuis une vingtaine d'années, plusieurs méthodes ont été suggérées et testées pour parvenir à une caractérisation simple et précise pour cette estimation spatiale de la vulnérabilité.

### **II.6.1 La méthode DRASRIC**

La méthode DRASTIC, ainsi que la carte de vulnérabilité DRASTIC, a été sélectionnée comme références pour notre thèse. Cette méthode DRASTIC est utilisée pour évaluer la

vulnérabilité d'une eau souterraine à la pollution. Elle peut également servir également à estimer la vulnérabilité aux pesticides, avec des indices utilisés différemment (Aller et al., 1987).

### II.6.1.1 Théorieque

La méthode DRASTIC a été mise au point par l'association NWWA (National Water Well Association) pour le compte de l'USEPA (U.S. Environmental Protection Agency). Élaborée entre 1983 et 1987 dans le but d'établir une base pour l'évolution du potentiel des eaux souterraines, cette méthode a été expérimentée et mise en œuvre dans douze régions hydrogéologiques (Fréchette, 1987).

Elle fonctionne à l'aide d'un système de cotation numérique et facilite la création des cartes de vulnérabilité, qui synthétisent les connaissances lithologiques, pédologiques et hydrogéologiques d'une région (Fatih, 2009). Toutefois, il est nécessaire de vérifier certaines conditions d'application pour son application (Murat et al., 2003) :

- les sources de contamination potentielles se trouvent à la surface du sol ;
- les contaminants potentiels atteignent l'aquifère par le mécanisme d'infiltration efficace ;
- le contaminant a la même mobilité que l'eau souterraine ;
- l'unité hydrogéologique en question a une superficie supérieure à 0,4 Km<sup>2</sup>.

### II.6.1.2 Principes de la méthode DRASTIC

La méthode DRASTIC permet d'estimer la vulnérabilité verticale intrinsèque à la pollution des eaux souterraines. Elle prend en considération sept paramètres (7). Le nom de cette méthode est déterminé par chaque première lettre d'un paramètre. Chaque paramètre a un facteur multiplicatif (Dp) qui lui est attribué. Les valeurs peuvent varier de 1 à 5 (Aller et al., 1987), en fonction de l'importance du paramètre estimant la vulnérabilité. Chaque paramètre a son propre poids qui varie en fonction de l'utilisation de DRASTIC (**Tableau II.2**). On attribue à chaque paramètre une côte qui varie entre 1 et 10, définie en fonction d'intervalles des valeurs (Aller et al., 1987) (**Tableau II.3**).

**Tableau II. 2.** Évaluation des sept paramètres DRASTIC en termes de classe et de poids  
(Aller et al., 1987).

Symbole	Paramètres	Poids DRASTIC	Poids pesticide
D	Profondeur de l'eau	5	5
R	Recharge efficace	4	4
A	Milieu aquifère	3	3
S	Type de sol	2	5
T	Topographie	1	3
I	Impact de la zone vadose	5	4
C	Conductivité hydraulique	3	2

**Tableau II. 3.** Évaluation des sept paramètres DRASTIC par termes de classe et de côtes  
(Drias et al., 2015).

D : Profondeur de la nappe (m)		R : Recharge naturelle (mm)	
Valeurs (m)	Côte	Valeurs (mm)	Côte
0-1.5	10	25.5	9
1.5-4.5	9	17.5-25.5	8
4.5-9	7	10-17.5	6
9-15	5	5-10	3
15-22	3	0-5	1
22.5-30	2		
>30	1		
A : Nature de la zone saturée		S : Nature du sol	
Calcaire karstique	10	Mince ou absent	10
Sable et gravier	8	Sables	9
Crès massif	6	Limons sableux	6
Métamorphique altéré	4	Limons	4
Métamorphique	3	Limons silteux	3
Massive sable	2	Argiles	1
T : Topographie (pente)		I : lithologie de la couche vadose	
Valeurs (°)	Côte	Calcaire Karstique	10
0-1	10	Sable et gravier	9
1-3.5	9	Sable et gravier avec silt et argile	8
3.5-7	5	Grès	6
7-10	3	Calcaire	6
>10	1	Silt et argile	1
C : Perméabilité			
Valeurs (m/s)	Côte		
$>9.4 \cdot 10^{-4}$	10		
$4,7 \cdot 10^{-4}$ à $9,4 \cdot 10^{-4}$	8		
$32,9 \cdot 10^{-5}$ à $4,7 \cdot 10^{-4}$	6		
$14,7 \cdot 10^{-5}$ à $32,9 \cdot 10^{-5}$	4		
$4,7 \cdot 10^{-5}$ à $14,7 \cdot 10^{-5}$	2		
$4,7 \cdot 10^{-7}$ à $4,7 \cdot 10^{-5}$	1		

Pour évaluer le degré de protection des aquifères, il est important de prendre en compte sept (7) paramètres qui sont :

- ✓ *D*: Profondeur à la nappe (Depth to groundwater table) ;
- ✓ *R*: Recharge efficace de l'aquifère (Net Recharge) ;
- ✓ *A*: Nature de la zone saturée (Aquifer media) ;
- ✓ *S*: Le type de Sol (Soil media) ;
- ✓ *T*: Topographie ou la pente (Topography) ;
- ✓ *I*: Nature de la zone non saturée (impact of the vadose zone).
- ✓ *C*: Perméabilité ou la Conductivité hydraulique de l'aquifère (conductivity).

La formule permet de calculer les valeurs de l'indice de la vulnérabilité hydrogéologique de l'aquifère en multipliant les produits des côtes par les poids des paramètres correspondants (Osborne et *al.*, 1998) :

$$ID = (D_C \times D_P) + (R_C \times R_P) + (A_P \times A_C) + (S_C \times S_P) + (T_C \times T_P) + (C_C \times C_P) \quad (\text{II. 6. 1})$$

Où :

- *ID* : l'indice de vulnérabilité DRASTIC ;
- *p* : le poids du paramètre ;
- *c* : la côte associée.

L'interprétation de l'indice DRACTIC est un indicateur d'évolution du niveau de risque de contamination d'une formation aquifère. Ce risque augmente avec la valeur de l'indice (Bentekhici et al. 2018).

Les valeurs de vulnérabilité pour DRASTIC se situent entre 101 et 200. Ensuite, l'indice DRASTIC est divisé en cinq catégories de degrés de vulnérabilité (**Tableau II.4**). L'estimation de la vulnérabilité aux pesticides peut être réalisée en utilisant la méthode DRASTIC. Néanmoins, les indices utilisés diffèrent (Murat., 2000).

**Tableau II.4.** L'intervalles des catégories de l'indice de la vulnérabilité - méthode DRASTIC (Engel et al., 1996).

L'indice de vulnérabilité DRASTIC	Degré de vulnérabilité
< 101	Faible
101 - 140	Moyen
140 - 200	Elevé
> 200	Très élevé

### II.6.1.3 Paramètres utilisés par la méthode DRASTIC

Les données utilisées pour représenter chaque paramètre sont essentiellement:

- *La profondeur de la nappe* : inventaire de la Direction des Ressources en Eau de la Wilaya de Mascara (les données de niveau d'eau), la carte topographie de terrain d'étude.
- *La recharge* : Office national de la météorologie (les données météorologiques), cartes des sols.
- *La nature d'aquifère* : les formations des logs du forage (acquise par la Direction des Ressources en Eau de la Wilaya de Mascara). Selon Sourisseau (1974), le rapport étude hydrogéologique de la nappe de Mascara et la carte géologique.
- *Le type de sol* : Carte des sols d'Algérie, INC, N.I.31-NO (1927-1938).
- *La topographie* : le modèle numérique de terrain (MNT).
- *L'impact de la zone vadose* : Carte géologique de Mostaganem usagée par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, NI-31-XIX, et les descriptions de forages.
- *La conductivité hydraulique* : les résultats d'essais de pompage et la carte de transmissivité.

### II.6.2 La méthode GOD

La méthode GOD montre la capacité de l'aquifère à être vulnérable à la percolation verticale des polluants à travers la zone non saturée et ne traite pas de l'écoulement latéral des polluants dans la zone saturée (Mardhel et al., 2005 in Charikh., 2015).

#### II.6.2.1 Approche théorique

En 1987, Foster a réalisé le développement du système GOD en Angleterre. Il est important de mentionner que les composantes nécessaires à l'évaluation de la vulnérabilité sont souvent obtenues par cette méthode à partir de la combinaison de divers éléments (**Tableau II.5**). Les informations concernant ces éléments ne sont pas toujours accessibles. Il est donc impératif de réduire et de simplifier les paramètres (Murat, 2000).

**Tableau II.5.** Les principaux éléments la vulnérabilité des aquifères à la pollution (Murat, 2000).

Composantes de vulnérabilité des aquifère à la pollution	Information hydrogéologique	
	Idéalement requis	Généralement disponible
Inaccessibilité hydraulique	- degré de confinement de l'aquifère - profondeur du niveau d'eau ou direction d'écoulement - teneur en eau de la zone non sature - conductivité hydraulique verticale de l'aquitard	- type de contaminant des eaux souterraines - profondeur de l'eau souterraine
Capacité d'atténuation	- distance de la taille des grains et des fissures de l'aquiperme ou l'aquitard - minéralogie de la matrice ou aquitard	- degré de consolidation/ fissuration de l'aquitard - caractéristiques lithologiques de l'aquitard

L'objectif de cette méthode est de réaliser une évaluation rapide de la sensibilité intrinsèque d'un aquifère. Selon Murat (2000), quatre paramètres (4) sont à la base de l'établissement de cette méthode :

- 1) La vulnérabilité des aquifères est logiquement une fonction de l'inaccessibilité de la zone saturée, au sens hydraulique de pénétration du polluant ; la capacité d'atténuation de la couche supérieure de la zone saturée comme résultat de la rétention physique et des réactions chimiques avec les contaminants.
- 2) Les deux propriétés énoncées ci-dessus interagissent avec celles correspondant à la mise en place des contaminants près de la surface, c'est-à-dire le mode de répartition d'un contaminant proche de la surface, et en particulier la magnitude de la charge hydraulique associée ; la classe du contaminant en termes de mobilité et de persistance.
- 3) Il est plus réaliste d'évaluer la vulnérabilité par contaminant, classe de contaminant ou par groupe d'activités polluantes plutôt que de parler globalement de vulnérabilité.
- 4) Les cartes de vulnérabilités sont représentatives sous forme de cartes, mais la conclusion logique d'une telle étude est une série de cartes spécifiques compilées sous forme d'atlas.

### II.6.2.2 Principe de la méthode GOD

L'abréviation de la méthode est l'acronyme suivant :

- ✓ *G* : Groundwater occurrence (type d'aquifère) ;
- ✓ *O* : Overall aquifer class (caractéristiques de l'aquifère en terme de lithologie et porosité);
- ✓ *D* : Depth to water table (profondeur à la nappe).

Selon cette méthode, les éléments requis pour la protection des eaux souterraines et la classification de la vulnérabilité des aquifères sont : le type de sol, les formations géologiques de la zone non saturée et la profondeur de la nappe. Contrairement à la méthode DRASTIC, les paramètres GOD ne sont pas pondérés.

En 1987, Foster a suggéré une méthodologie empirique qui comprend plusieurs étapes pour réaliser la carte (**Figure II.6**) :

- a) Déterminer le type d'aquifère à l'aide d'une cote allant de 0 à 1.
- b) Caractériser les couches en dessous de l'aquifère permettant de déterminer la présence ou non de perméabilité de fissure lithologiques et donc indirectement la porosité relative, de perméabilité de la zone non saturée. Les côtes vont de 0.4 à 1.0. Si la fissuration ou la capacité d'atténuation est faible, l'abréviation "F" ou "FF" est utilisé.
- c) La profondeur de la nappe peut être différente selon qu'il s'agit d'un aquifère non confiné ou confiné.

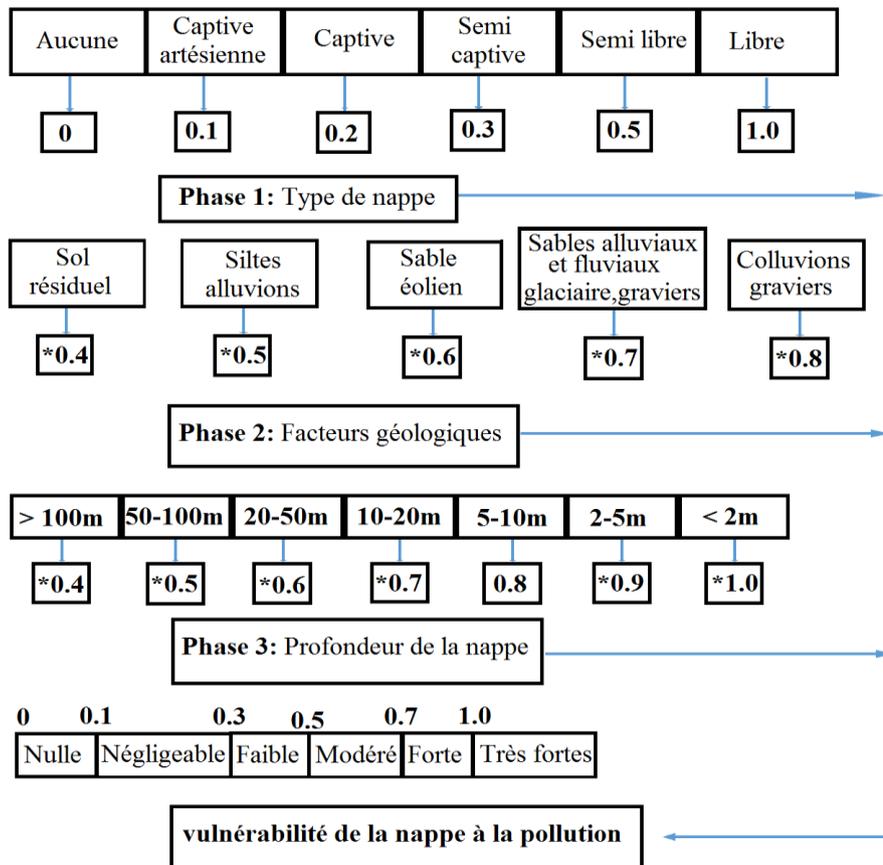
On obtient l'indice de vulnérabilité GOD (Murat et al., 2003) en multipliant les indices de chaque paramètre, suivant l'équation :

$$IG = C_a \times C_l \times C_d \quad (\text{II. 6. 2})$$

Où :

- ✓ *IG*: l'indice de vulnérabilité GOD ;
- ✓ *C<sub>a</sub>*: cote du type d'aquifère ;
- ✓ *C<sub>l</sub>*: cote de la lithologie ;
- ✓ *C<sub>d</sub>*: cote de la profondeur de la nappe.

La vulnérabilité augmente en fonction de l'indice. La classification en 5 classes est basée sur ces indices, à celle indiquée dans le schéma de droite de la **Figure II.6**.



**Figure II. 6.** Estimation de la vulnérabilité d'un aquifère par la méthode de GOD ( Foster,1987 in Bouchahm et al., 2009).

### II.6.2.3 Matériels utiles par méthode GOD

Les données utilisées pour réaliser ces paramètres ainsi que la carte de vulnérabilité GOD ont été extraites des cartes et des informations utilisées pour la méthode DRASTIC.

- *Le type d'aquifère* : La même carte des unités hydrogéologiques utilisée pour la méthode DRASTIC (carte géologique de Mostaganem, NI-31-XIX), qui contient la détermination du type d'aquifère (libre, captive, etc....).
- *Lithologie de la zone non saturée* : la carte géologique de Mostaganem, NI-31-XIX, elle a aussi servi de base à la réalisation de cette carte.
- *Profondeur de la nappe* : la méthode DRASTIC a utilisé la carte de profondeur à la nappe comme référence pour la réalisation de la carte, ce qui est essentiel pour l'élaboration de la carte. Le découpage de ce paramètre selon DRASTIC peut être modifié pour la méthode GOD.

### II.6.3 La méthode SI (Susceptibility Index)

La méthode SI, ou méthode d'Indice de Susceptibilité est une méthode spécifique pour estimer la vulnérabilité verticale à la pollution d'eau souterraine (Hafedh, et al., 2007). Elle suit la percolation verticale des polluants à travers la zone non saturée jusqu'à la contamination des aquifères.

#### II.6.3.1 Théorique

Méthode SI développée au Portugal par Ribeiro (2000) pour prendre en compte le comportement des polluants agricoles (Gabriel E.A et al, 2010), en particulier les nitrates (Mansour, 2014). Cette méthode est basée sur un système de cotation numérique et simplifie la réalisation des cartes de vulnérabilité par suite de pollution anthropique, qui collectent des informations concernant l'hydrogéologie et la couverture du terrestre.

#### II.6.3.2 Principe de la méthode SI

L'application de la méthode SI prend en compte cinq paramètres (5). Les quatre (4) premiers paramètres sont identiques aux quatre paramètres déjà pris en considération dans la méthode DRASTIC, notamment la profondeur de la nappe, la recharge efficace, la lithologie de la zone saturée et la pente ou topographie du terrain. Le cinquième paramètre a été intégré, il concerne l'occupation des sols.

Les côtes attribuées aux différentes classes de ces paramètres dans la méthode DRASTIC ont été conservées. D'autre part, Corine Land Cover (1993) classe le facteur d'occupation des sols. Le facteur d'occupation des sols (LU) présente dans côtes varient de 0 à 100 (**C.f annexe H**). Pour obtenir la propre cote, on va multiplier chaque valeur obtenue par 10. Chaque paramètre de LA méthode SI est affecté à un poids spécifique. Les poids ont été influencés par la méthode de Corine Land Cover (1993), qui permet d'attribuer une pondération allant de 0 à 1. (**C.f annexe H**).

L'évaluation de la vulnérabilité spécifique de la méthode SI se fait sur la base du calcul de l'indice de vulnérabilité (SI). Selon Jourda et al. (2007), elle est expliquée en détail par les deux formules successives comme suit :

$$SI = (D_C \times D_P) + (R_C \times R_P) + (A_P \times A_C) + (T_C \times T_P) + (OS_C \times OS_P) \quad (\text{II. 6. 3})$$

Où :

- ✓ SI : Indice de vulnérabilité SI.
- ✓ D : le paramètre de profondeur de la nappe.

- ✓  $R$  : le paramètre de recharge efficace.
- ✓  $A$  : le paramètre de lithologie de l'aquifère.
- ✓  $T$  : le paramètre de la pente.
- ✓  $OS$  : le paramètre de l'occupation des sols.

Avec  $p$  : poids attribué ;  $c$  : cote attribuée.

La formule permet de calculer l'indice de vulnérabilité SI en pourcentage (II.6.4).

$$SI = \frac{SI_i - SI_{\min}}{SI_{\max} - SI_{\min}} \times 100 \quad (\text{II. 6. 4})$$

Avec :

- $SI_i$  : indice SI.
- $SI_{\min}$  : indice SI minimum.
- $SI_{\max}$  : indice SI maximum.

La méthode SI présente cinq (5) degrés de vulnérabilité selon les valeurs des indices de vulnérabilité (Tableau.II.6).

**Tableau II.6.** Indices SI en pourcentage et degré vulnérabilité (Jourda et al., 2007).

Indices SI en %	Degré de vulnérabilité
0 – 30	Très Faible
30 – 45	Faible
45 – 60	Moyenne
60 – 75	Elevée
75 – 100	Très Elevée

### II.6.3.3 Matériels utilisés par la méthode SI

Les données utilisées pour établir les quatre paramètres de la méthode SI sont les mêmes que celles de la méthode DRASTIC. Sauf que le cinquième paramètre d'occupation des sols est obtenu par image satellitaire, qui est traitée par le CNTS (Centre des Techniques Spatial) d'Arzew.

### II.6.4 Méthode DRASTIC-GOS

La méthode DRASTIC-GOS est le résultat d'une fusion entre les trois modèles (DRASTIC, GOD et SI) conçue et développée par nous-même (Khelfi M. et al. 2024). Il permet évalué la sensibilité des nappes d'eau souterraine, ils se basent sur un contrôle de la propagation des substances polluantes à travers la zone non saturée jusqu'à ce qu'elles affectent les aquifères.

### II.6.4.1 Théorique

Le choix de méthode d'estimation de la vulnérabilité est lié directement par l'activité anthropique à ce lieu d'étude. Il est basée sur un diagnostic physiographique et hydrogéologique qui contourne l'aquifère de la zone d'étude. Elle permet réstimation la vulnérabilité verticale à du a pollution des nappes d'eau souterraines d'origine agricole.

### II.6.4.2 Principe de la méthode DRASTIC-GOS

Par l'autre de cette thèse, DRASTIC-GOS est le résultat d'une fusion entre les trois modèles (DRASTIC, GOD et SI). Le schéma d'application de la méthode se base sur sept (7). En plus des sept (7) paramètres DRASTIC c'ajoute deux (2) paramètres supplémentaires le premier concerne paramètre de la méthode GOD (G) et au dernier paramètre concerne de la méthode SI (OS). Chaque abréviation de cette méthode indiquée par un paramètre, qui est représenté comme suit :

- ✓ *D* : Profondeur à la nappe ;
- ✓ *R* : Recharge efficace de l'aquifère ;
- ✓ *A* : Nature de la zone saturée ;
- ✓ *S* : Le type de Sol ou la pédologie du sol ;
- ✓ *T* : Topographie ou la pente ;
- ✓ *I* : Nature de la zone non saturée ;
- ✓ *C* : Perméabilité ou la Conductivité hydraulique de l'aquifère ;
- ✓ *G* : Type ou nature d'aquifère) ;
- ✓ *OS* : Occupation des sols.

Le modèle DRASTIC-GOS conserve les côtes qui se trouvent dans les modèles universels précédents. Par contre, le classement de poids aux deux paramètres est conditionné par l'influence de chaque paramètre à savoir la percolation des substances polluantes et contamination de la surface piézométrique. Pour l'évaluation du poids de ce paramètre nous avons retenus la valeur (3) pour le paramètre de type d'aquifère et (5) Pour le d'occupation des sols,

Pour calculer l'indice de vulnérabilité DRASTIC-GOS, on utilise l'équation (II.6.5) qui est la somme des poids et des cotes de chaque paramètre. On utilise les catégories des indices de la vulnérabilité DRASTIC par Engel et al., 1996. Pour le classement des indices de vulnérabilité DRASTIC-GOS.

$$IV = (D_C \times D_P) + (R_C \times R_P) + (A_P \times A_C) + (S_C \times S_P) + (T_C \times T_P) + (I_C \times I_P) + (C_C \times C_P) + (G_C \times G_P) + (OS_C \times OS_P) \quad (\text{II. 6. 5})$$

Où :

- ✓  $p$  : poids attribué ;
- ✓  $c$  : côte associée.

### II.6.4.3 Matériels utilisés par la méthode DRASTIC-GOS

Les matériels utilisés pour déterminer les neuf (9) paramètres de la méthode DRASTIC-GOS sont les mêmes que ceux développés précédemment dans les modèles DRASTIC, GOD et SI.

## II.7 Etude statistique

### II.7.1 Test de conformité

L'estimation de la vulnérabilité est un outil important et nécessaire pour la détermination de la qualité de l'information obtenue à partir des cartes thématiques. En effet, le recours aux méthodes géostatistiques permet une analyse rigoureuse de l'information et l'utilisation à bon escient des résultats obtenus. Il existe trois autres façons de connaître la dépendance absolue entre les méthodes (Murat., 2000) :

- a. L'analyse de fréquence effectuée grâce au test de Kappa ;
- b. La comparaison de polygones de même niveau ;
- c. La comparaison de surfaces.

Dans cette étude, quatre méthodes ont été appliquées, chacune a exigé un certain nombre d'informations et de visualisations. Dans cette section, nous décrivons les étapes établies lors de la mise en œuvre de chaque méthode, ainsi que les données utilisées.

### II.7.2 Fondement théorique

Le coefficient de Kappa, développé par Cohen en 1960 (Bernard, 1993 in Murat., 2000), peut être interprété comme la proportion d'accord entre les observateurs, attribuable à la reproductibilité des classifications plutôt qu'au hasard. La reproductibilité est définie comme l'écart entre les résultats obtenus avec la même méthode sur une matière identique soumise à l'essai, mais dans des conditions différentes (Bernard, 1993).

### II.7.3 Principes du Test de conformité

Le coefficient de Kappa (K) représente l'indice qui mesure le degré de concordance ou d'accord d'une mesure entre deux ou plusieurs observateurs ayant à juger le même phénomène (Figure II.7). La formule (II.7.1) permet de calculer l'indice de Kappa.

My \ Mx	C1	C2	C3	Total	
C1	0	20	0	20	Y1
C2	0	0	20	20	Y2
C3	20	0	0	20	Y3
Total	20	20	20	60	
	X1	X2	X3		

Association parfaite sans accord

My \ Mx	C1	C2	C3	Total	
C1	10	0	0	10	Y1
C2	0	20	0	20	Y2
C3	0	0	30	30	Y3
Total	10	20	30	60	
	X1	X2	X3		

Association et accord parfaits

Figure II. 7. Schématisation du test de Kappa (Bernard, 1993).

$$K = \frac{H_0 - H_C}{1 - H_C} \quad (\text{II.7.1})$$

Avec :

- $M_x$  et  $M_y$  sont tour à tour les méthodes utiles ;
  - $C_i$  : représente les catégories ou classifications possibles ;
  - $X_i$  : représente la somme des éléments classés dans la catégorie  $i$  par l'observateur  $M_x$  ;
  - $Y_i$  : représente la somme des éléments classés dans la catégorie  $i$  par l'observateur  $M_y$ .
- ✓ Probabilité que les observateurs soient en accord :  $H_0 = C11 + C22 + C33$
- ✓ Probabilité que les observateurs soient en accord sous l'hypothèse de non-association entre leurs classifications :  $H_C = X_i \times Y_i$ .

Les valeurs du coefficient de Kappa varient de « -1 » à « 1 ». Elles sont d'autant plus élevées que la valeur du coefficient K est proche de 1 (C.f annexe I) (Allechy et al., 2016). L'interprétation des résultats donnés par le coefficient de Kappa peut être réalisée grâce à l'échelle d'interprétation de Kappa mise au point par Landis et al., (1977) qui détermine le taux d'accord en fonction de la valeur observée.

### II.7.4 Matériels utilisés

Le test de conformité permet de vérifier la concordance des classes de vulnérabilité évaluées par les quatre (4) méthodes utilisés (GOD, DRASTIC, SI et DRASTIC-GOS). Cette concordance a été établie pour calcul coefficient de Kappa en prenant comme référence la méthode GOD et SI.

## II.8 Conclusion

Au terme de ce chapitre relatif aux les méthodes et matériels utilisés pour l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines, prises individuellement ; les trois modèles classiques (DRASTIC, SI et GOD) ils s'avèrent insuffisants à l'évaluation de la vulnérabilité d'une manière précise et efficace.

Notre contribution s'est soldée par un couplage des trois modèles, donnant naissance à une méthode combinée, dite DRASTIC-GOS, permettant de combler les insuffisances constatées, particulièrement par la maîtrise de diversité de la pollution de l'eau physique, chimique, biologique ou bactériologique, causée par l'homme et ses activités au niveau de cette zone d'étude.

Le choix d'un modèle d'estimation de la vulnérabilité de l'aquifère Plio-Quaternaire Ghriss mérite d'être détaillé d'avantage pour une meilleure surveillance de la percolation des polluants à partir de la surface du sol jusqu'à la contamination de première surface piézométrique de l'eau souterraine ainsi que l'identification des mesures de contrôle y afférente. C'est l'objet du chapitre III de notre étude.

**CHAPITRE III:**

***Apport des SIG & Cartes thématiques***

**CHAPITRE III : APPORT DES SIG & CARTES THÉMATIQUES****III.1 Introduction**

L'étude de la sensibilité des nappes à la pollution des eaux souterraines a besoin d'un apport de bases de données cartographiques multi-sources, tels que les cartes géologiques, hydrogéologiques, pédologiques et des données climatiques.

Le traitement de ces données se fait à l'aide de systèmes d'information géographique (SIG), qui assure la sélection des zones plus ou moins vulnérables à la pollution des eaux souterraines. L'objectif de ce chapitre est de faire une description générale du système d'information géographique, qui assure la création d'une base de données spatiale des différentes cartes thématiques.

Ainsi, pour chaque paramètre, nous allons décrire les étapes de réalisation de ces cartes thématiques en fonction des paramètres du poids, de la côte et des répartitions superficielles. D'autre part, les SIG permettent la répartition spatiale de la pollution diffuse, particulièrement la teneur des nitrates.

**III.2 Notion de cartographie**

Selon Njike (2019), la cartographie est "l'art de dresser des cartes géographiques, ou autres, en vue de permettre une représentation géométrique, simplifiée et conventionnelle sur un plan, des phénomènes concrets ou abstraits définis en fonction du but ou des besoins visés". De ce fait, elle contient une importante quantité d'informations. Selon la nature des données cartographiées on parlera de cartes topographiques, thématiques, descriptives, de traitement, de synthèse, etc. (Njike, 2019).

**III.3 Notion de Système d'Information Géographique****III.3.1 Notions générales**

Un système d'information géographique est un système informatique de matériels, de logiciels et de processus, conçu pour permettre la collecte, la gestion, la manipulation et l'affichage de données à référence spatiale en vue de résoudre des problèmes d'aménagement et de gestion (Hammoun et al., 2010).

On désigne par données de référence spatiale, toute information qui peut être localisée de manière directe (une parcelle, un puits, un forage, une route...) ou indirecte (une adresse, un propriétaire...) à la surface de la terre.

### III.3.2 Théorie sur les SIG

#### III.3.2.1 La genèse du SIG

Les systèmes d'information géographique (SIG) ont été créés aux États-Unis dans les années 1970 et ont rapidement étendu leur portée à l'échelle mondiale. Le terme générique de « géomatique » désigne un ensemble d'approches, de méthodes et d'outils en constante évolution. Un néologisme qui se compose du préfixe "géo" (géographique) et défini par la contraction du suffixe "matique" (informatique).

La géomatique est définie comme *l'Ensemble des méthodes et techniques de l'informatique appliquée aux moyens d'acquisition, de traitement et de représentation visuelle des données géoréférencées, c'est-à-dire, reliées à une localisation sur la Terre dans un système de référence* (Françoise, 2013).

En général, les premiers SIG opérationnels sont apparus dans les années 1960 au Canada et aux États-Unis. Le pionnier est indiscutablement le Canadian Geographic Information System (1964) qui rassemble des informations relatives à l'usage du sol, et des données concernant l'environnement, sur une grande partie du territoire canadien.

Deux autres réalisations précoces méritent d'être signalées : le New York Land Use Information System (1967) et le Minnesota Information System (1969). Depuis cette époque, les coûts et les difficultés techniques ont considérablement diminué (Chakroun, 2014).

#### III.3.2.2 Les éléments constitutifs d'un SIG

Un SIG est principalement composé de 5 éléments :

##### III.3.2.2.1 Éléments matériels

Actuellement, les SIG sont utilisés sur une grande variété d'ordinateurs, des serveurs de données ou des ordinateurs de bureau connectés en réseau ou exécutés de manière autonome. Les périphériques connectés aux ordinateurs permettent d'effectuer diverses fonctions et deviennent de plus en plus nécessaires (Hidaoui, 2020).

- Matériel d'acquisition des données : scanner, table à digitaliser...
- Matériel de stockage des données : disques durs, CD ROM, disquettes, DVD...
- Matériel de visualisation des données : écrans traditionnels, écrans plats, ...
- Matériel d'impression des données : imprimantes, traceurs.

### III.3.2.2.2 Eléments logiciels

Les logiciels SIG offrent une variété d'outils et de fonctionnalités qui facilitent le stockage, l'analyse et la visualisation de données géographiques. Le Tableau III.1 résume les différentes classes de logiciels de SIG.

**Tableau III. 1.** Les différentes catégorie de logiciels de S.I.G (Reido et al., 2002).

Catégorie	Solutions	Caractéristiques
Serveur de données	Oracle Spatial, Spatial Data Engine, SpatialWare, Bentley Continuum Server, Geotask Server	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gestion des données spatiales dans un SGBD</li> <li>▪ Application de grande envergure</li> <li>▪ Gestion de la sécurité des accès</li> <li>▪ Gestion d'accès concurrents</li> <li>▪ Langages de manipulation de données pour le spatial</li> <li>▪ Accès aux données par différents types de logiciels SIG</li> </ul>
Outil SIG professionnel ou SIG de type boîte à outils	ArcInfo, Integrgraph MGE, Vision, Geomedia Professional, Apic, SmallWord, Imagine, Lampro, Spans, etc.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Structuration de la base de données</li> <li>▪ Outils d'acquisition, de gestion et d'analyse</li> <li>▪ Contrôles de qualité et corrections des données</li> <li>▪ Gestion d'accès multi-utilisateurs</li> <li>▪ Applications spécialisées</li> <li>▪ Analyses complexes</li> <li>▪ Gestion de volumes de données importants</li> <li>▪ Gestion de la topologie</li> <li>▪ Prix élevé</li> <li>▪ Complexes à maîtriser</li> </ul>
SIG de bureau	MapInfo, ArcView, AtlasGis, Geomedia, Manifold, Idrisi, Vertical MapPoint, etc.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Analyses et traitements simples</li> <li>▪ Cartographie thématique</li> <li>▪ Systèmes flexibles et conviviaux</li> <li>▪ Application à budget limité</li> <li>▪ Structure de données simple (pas de topologie)</li> <li>▪ Analyse rapide</li> <li>▪ Aide à la prise de décision</li> <li>▪ Intégration à des logiciels de bureautique</li> </ul>
Composant SIG	MapObjet, Mapx, GeoObjects, Geoconcept Explorer, AtlasMap	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Outils de développement</li> <li>▪ Conception d'application personnalisée</li> <li>▪ Cartographie thématique simple</li> <li>▪ Traitements simples</li> <li>▪ Intégration de fonctions SIG dans des applications</li> </ul>
Outil de consultation	ArcExplorer, GeoExplorer, MapSXite, MapObjects IMS, ApicWeb, ArcIMSviewer, MapGUIDE, etc.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Visualisation</li> <li>▪ Localisation</li> <li>▪ Information sur un objet</li> <li>▪ Solutions internet</li> <li>▪ Client léger</li> </ul>

### III.3.2.2.3 Données d'un SIG

D'après Adiba et al., 1992 in Pornon. (1992), une base de données est un ensemble structuré de données enregistrées sur un support accessible par l'ordinateur pour satisfaire simultanément plusieurs utilisateurs de façon sélective et en temps réel. La base de données incarne la mémoire du système en enregistrant, en stockant et en structurant les informations.

Ces informations peuvent provenir de différentes sources, mais doivent être représentées de manière numérique. Elles se distinguent par des données thématiques et géoréférencées. Ces données représentent respectivement la base descriptive des propriétés thématiques et spatiales du système.

Les données géoréférencées permettent donc de décrire et de caractériser le comportement du phénomène étudié. Les phénomènes et les propriétés sont prospectivement nommés « entités » et « attributs » dans le contexte des SIG (Poulit., 1999 in Abdelbaki., 2017). L'ensemble des informations qui constitue cette base de données est inter-reliée et exploité par des applications via un logiciel du type Système de Gestion de Base des Données (SGBD). Ses informations sont classées sous forme de fichiers et consultées à partir de critère précis (Abdelbaki., 2017).

### III.3.3 Modes d'acquisition de données

Une fois que nous avons déterminé les informations requises pour nos besoins, il reste à décider du mode d'acquisition des données. Kouba (2018) propose les principales méthodes d'acquisition de données, figurées ci-dessous.

#### III.3.3.1 Import de fichiers

Les S.I.G offrent généralement trois types de moyens d'importer les données :

- Importer une base de données structurée dans un format interne à un SIG. Ce moyen convient entre les SIG d'un système type, mais plus délicat entre des SIG de types ou de versions différentes.
- Importer un fichier à plat, simple. Néanmoins, un important travail de structuration des données est nécessaire pour coïncider avec la structure interne du SIG.
- Passer par une des normes d'échange disponibles sur le marché. Ce troisième moyen est le plus économique à long terme.

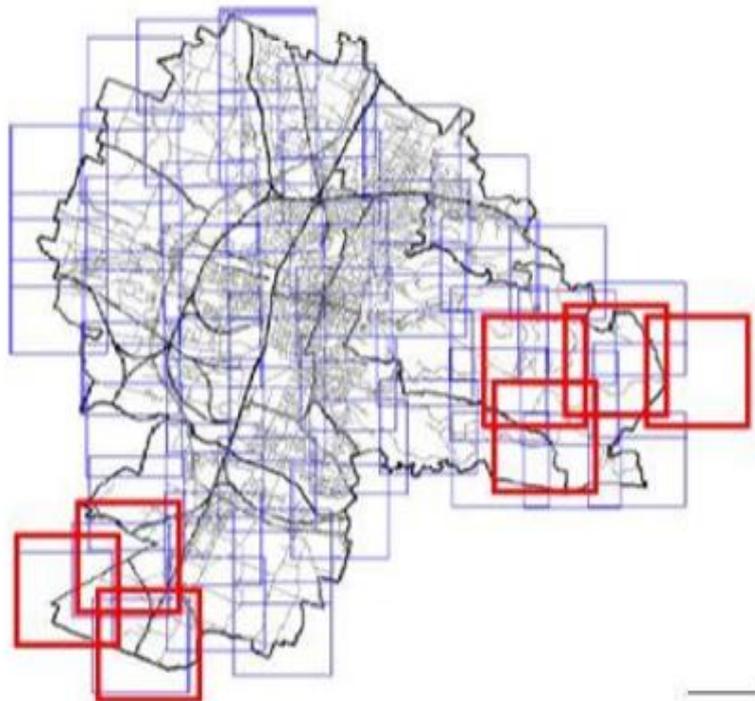
### III.3.3.2 Levé topographique

Un théodolite est un instrument de géodésie qui est associé à un instrument d'optique pour mesurer les angles dans les deux plans horizontaux et verticaux, dans le but de déterminer une direction. Il sert à effectuer les mesures d'une triangulation (mesure des angles d'un triangle).

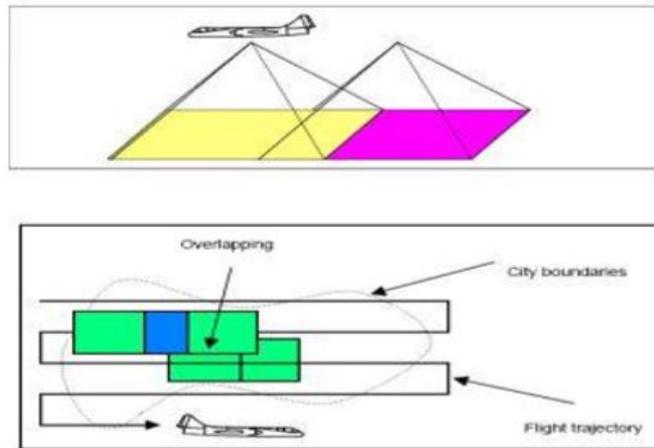
Cet appareil permet de suivre le tracé de proche en proche à partir d'un point de référence. Sur le terrain, les géomètres utilisent la lunette visée pour évaluer les distances et les angles horizontaux et verticaux. L'appareil a la faculté d'enregistrer un code en plus de la position d'un point. Le code facilite l'identification du point relevé, ce qui rend le travail de dessin à l'ordinateur plus facile. Chaque objet a son propre code. (Coins, portes de bâtiments, trottoirs, tampons, fossés, etc.).

### III.3.3.3 Photos aériennes

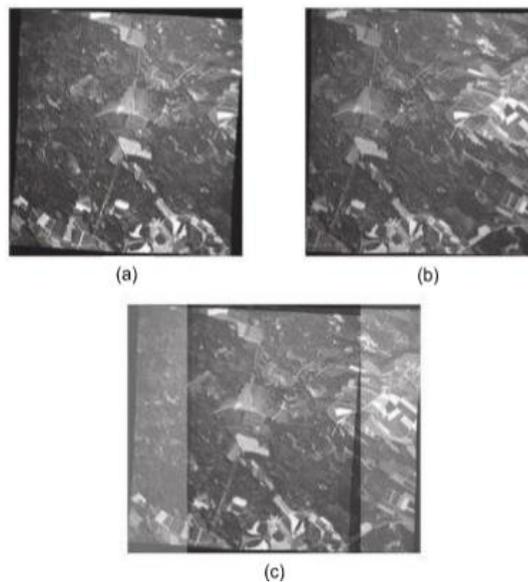
La fusion de tous les clichés permet d'obtenir une image complète d'une zone (**Figure III.1**, **Figure III.2** et **Figure III.3**). En se basant sur les clichés photographiques, nous pouvons déterminer les coordonnées et l'altimétrie des points.



**Figure III. 1.** Ensemble de clichés effectués à plusieurs kilomètres d'altitude (Kouba, 2018).



**Figure III. 2.** Exemple de canevas de photos aériennes (Kouba, 2018).



**Figure III. 3.** Couple de stéréoscopique et leur zone de recouvrement: (a) cliché; (b) cliché 2; (c) zone de recouvrement des cliché 1 et 2 (Kouba, 2018).

#### III.3.3.4 Images satellites

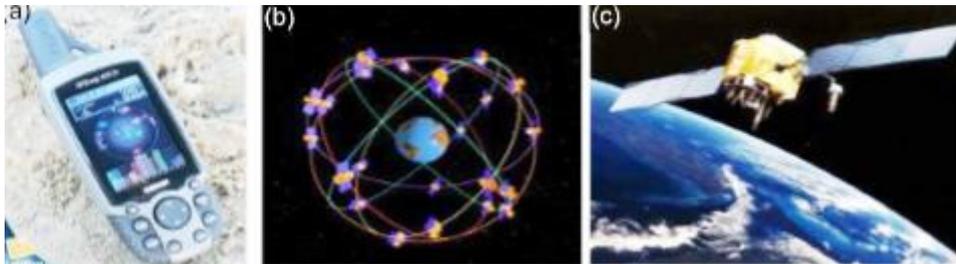
Les satellites de surveillance de la Terre transmettent des données sous forme d'images numériques en mode raster (**Figure III.4**). Avant de les intégrer dans un SIG, il faut effectuer des rectifications sur les données.



**Figure III.4.** Image satellite prise par le satellite IKONOS (Kouba, 2018).

### III.3.3.5 Système de positionnement global (GPS)

Le système GPS (Figure III.5 (a)) permet le calcul à l'aide des satellites (Figure III.5 (b, c)) de la position (coordonnées avec une précision de quelques centimètres, voire même quelques millimètres).



**Figure III.5.** (a) Système de localisation par satellite (GPS) et satellite (b et c) (Kouba, 2018).

### III.3.3.6 Digitalisation

La digitalisation (Figure III.6) est adaptée à la représentation vectorielle. Ce mode de saisie permet de conserver la précision des informations présentes dans le document de base. Un traitement préalable sur les documents de base peut s'avérer nécessaire si ceux-ci sont trop chargés.



**Figure III.6.** Une table de digitalisation (Kouba, 2018).

### III.3.3.7 Scannage de plans

Convient parfaitement à la représentation raster (**Figure III.7**). Ce mode de saisie est rapide et peu coûteux. L'inconvénient de cette méthode est la retranscription des erreurs dues au support d'origine (déformation du papier, épaisseur du trait, etc.). Si la donnée est scannée et géoréférencée, c'est de la données « raster ».



**Figure III. 7.** Scanner automatique, utilisé pour le scannage de plans (Kouba, 2018).

## III.3.4 Types de données dans un SIG

Les systèmes d'information géographique permettent de traiter les données spatiales et associées (Boukli et al., 2017).

### III.3.4.1 Données spatiales

Elles définissent les caractéristiques spatiales d'un territoire où sont situés et identifiés tous les éléments graphiques :

- La localisation : coordonnée par rapport à une échelle graphique de référence.

- La forme : point, ligne, surface.
- La taille : longueur, périmètre, surface.

### III.3.4.2 Données associées

Tout élément de l'espace reçoit un code d'identification, qu'il soit numérique ou littéral. Ce code est une sorte d'étiquette qui décrit le point, la ligne ou le polygone. Parmi ces données, il est important de distinguer :

#### ➤ Données de classification

Ces données sont utilisées pour classer le point isolé, la ligne ouverte ou la ligne fermée dans une catégorie : limite administrative, contour de parcelle, bordure de trottoir, conduite de réseau d'eau... Souvent, ces différences seront prises en considération par l'organisation même du travail de saisie.

#### ➤ Données d'identification

Chaque objet figurant sur le plan est individualisé grâce à ces données : nom propre de l'objet, Par exemple, le nom de la wilaya ou numéro permettant de l'identifier : le numéro de commune, le numéro de de parcelle...

#### ➤ Données attributaires

Ces données viennent apporter une information supplémentaire, propre à chaque objet identifié : le propriétaire de la parcelle, le diamètre de la conduite d'eau...

Habituellement, ces données sont déjà disponibles sur des fichiers informatiques, où elles sont associées à l'identifiant de chaque objet. En règle générale, la classe d'objet est principalement déterminée par le processus de digitalisation : les identifiants sont souvent introduits en bloc à la fin.

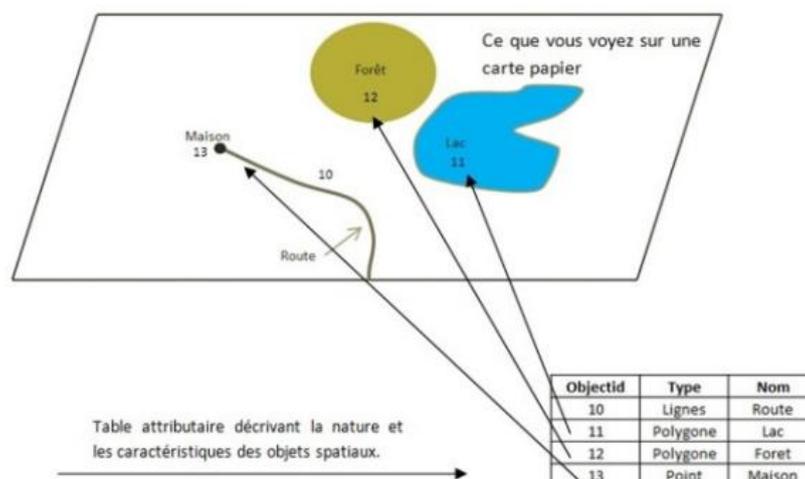


Figure III.8. Données associées (<http://www.corse.fr/infogeo/>).

### **III.3.5 Format de données dans les SIG**

Les SIG proposent deux méthodes de projection des données géographiques :

#### **III.3.5.1 Format vecteur**

Les données vectrices se composent d'un ensemble d'objets spatiaux représentés par les éléments suivants : point, ligne et polygone. Les coordonnées des objets géométriques sont spécifiées dans un système de projection.

#### **III.3.5.2 Format raster**

Les données raster sont visualisées en images et composées d'un ensemble de pixels (Picture élément) organisés en grille en ligne/colonne.

### **III.3.6 Système de gestion de base de données**

Les SIG ont leurs propres SGBD géographiques qui s'appuient à la fois sur un module de gestion de bases de données relationnelles et sur un système de fichiers pour les données spatiales. La correspondance entre les deux est assurée par un identifiant unique.

Les SIG ont également leur propre outil de visualisation. Il permet de représenter les données sous forme de carte, de graphiques ou autres types d'images (Abdelbaki, 2017).

#### **III.3.6.1 Modèle Numérique de Terrain (MNT)**

##### **III.3.6.1.1 Définition**

Le MNT (modèle numérique de terrain) est une représentation numérique et mathématique de l'altitude d'un point quelconque de la surface terrestre d'une zone géographique, dans un système référentiel bien défini. Même si le MNT représenté sous forme de triangles irréguliers présente certains avantages (Peucker et al., 2014).

##### **III.3.6.1.2 Application du MNT dans la vulnérabilité des nappes**

Les chercheurs utilisent les MNT pour différentes études. Ils peuvent étudier la pente du relief, l'exposition, le réseau hydrographique, déterminer le champ de visibilité du poste de vigie, les directions d'écoulement des eaux, le risque de contamination des aquifères et les altitudes. Ces paramètres sont régulièrement utilisés comme outils de décision dans la gestion de l'environnement (Ouédraogo et al., 2014).

### III.3.6.2 Télédétection

#### III.3.6.2.1 Définition

D'après CCT (2008) une définition plus exacte et plus pratique pour nous est celle-ci : « *La télédétection est l'ensemble des techniques qui permettent, par l'acquisition d'images, d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre (y compris l'atmosphère et océans), sans contact direct avec celle-ci. La télédétection englobe tout le processus qui consiste à capter et enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et analyser l'information qu'il représente, pour ensuite mettre en application cette information* ».

#### III.3.6.2.2 Application de la télédétection dans la vulnérabilité des nappes

La télédétection est la discipline scientifique qui regroupe l'ensemble des connaissances et des techniques utilisées pour l'observation, l'analyse, l'interprétation et la gestion de l'environnement à partir de mesures et d'images obtenues à l'aide de plates-formes aéroportées, spatiales, terrestres ou maritimes.

Comme son nom l'indique, elle suppose l'acquisition d'informations à distance, sans contact direct avec l'objet détecté (Bonn et al., 1992). En cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines, les données de télédétection peuvent intervenir lors du calcul de différents paramètres, mais elles sont réduites à donner de l'information que sur les paramètres de surface. En ce qui concerne les paramètres traités par la télédétection, un résumé est établi ci-après (Tableau III.2).

**Tableau III. 2.** Paramètres hydrogéologiques obtenus à l'aide de la télédétection (Doris, 1998).

Type de satellite	Information	Paramètre à extraire	Période de l'année
LANDSAT TM	Utilisation du sol	Calcul de la recharge par le ruissellement	Printemps été automne
LANDSAT TM	Type de sol	Type de sol (pour l'infiltration)	Printemps (sur sol nu)
ERS-1 LANDSAT TM RADARS AT	Linéaments	Présence potentielle d'eau souterraine dans les fractures	Période où le sol est dégelé
AVHRR de NOAA	Évapotranspiration réelle (obtenue indirectement)	Calcul de la recharge (pour l'infiltration)	Printemps Été Automne
RADARSAT	Relief	Pente	Toute l'année
SPOT	Relief	Pente	Printemps Été Automne
SPOT LANDSAT TM	Réseau hydrographique	Réseau hydrographique	Été Automne
RADARSAT	Formes (structure)	Géologie	Été

### \* *Répartition spatiale des cartes thématiques*

La plaine de Ghriss représente des ressources en eaux souterraines d'importance stratégique non négligeable, étant donné qu'elle est une source d'irrigation et d'alimentation en eau dans le bassin versant de l'oued Fekan. La protection est donc notre principale préoccupation.

Néanmoins, avec l'urbanisation rapide et la forte croissance de la population ainsi que la largeur de la période sèche, cette ressource naturelle exerce une pression considérable. En outre, l'utilisation de fertilisants et la faible efficacité de traitement des eaux usées sont des principaux facteurs de pollution de l'eau souterraine.

Dans la zone d'étude, nous avons choisi la méthode cartographique pour l'établissement des cartes de risque de vulnérabilité des nappes à la pollution d'origine agricole. La méthode repose sur la superposition de plusieurs couches de facteurs et de différents paramètres dans une zone.

#### **III.3.7 Établissement de la carte de la sensibilité des nappes**

L'application des modèles d'estimation de la vulnérabilité dans le cadre d'études, nécessite une combinaison des données exogènes, qui est formée des données géographiques et des données spatiales représentées par des données satellites relativement par des outils informatiques (**Figure III. A1 ; C.f. annexes**).

##### **III.3.7.1 Spatialisation d'informations pour la carte des risques de pollution**

Nous avons utilisé différentes techniques de traitement pour traiter chaque donnée. Les divers traitements ont abouti à la création de couches d'information. La superposition de ces informations a permis la création d'une carte de sensibilité à la pollution.

La démarche appliquée dans le domaine de SIG : les données spatiales peuvent être représentées soit en mode raster (image), soit en mode vecteur (objet). Dans ce travail, nous avons utilisé une représentation de données en mode vecteur. Les cartes sont obtenues soit par digitalisation des cartes existantes soit par interpolation de données ponctuelles.

L'interpolation est la méthode utilisée pour estimer la valeur d'une variable dans un endroit déterminé, en utilisant un certain nombre de points de mesure, pour la calculer dans chaque point de la zone étudiée.

Plusieurs méthodes d'interpolation, déterministes et géostatistiques, sont utilisées pour la spatialisation des données ponctuelles telles que la méthode IDWA (Inverse Distance Weighted Averaging), la méthode spline (splining), la méthode de Thiessen, le krigeage et la méthode de triangulation.

Dans ce travail on a utilisé la méthode IDWA, la triangulation et la méthode de Thiessen. La méthode IDWA est une estimation par combinaison linéaire des valeurs des points connus. Elle est utilisée pour interpoler certains paramètres tels que la profondeur de la nappe, les précipitations, et la conductivité hydraulique, à partir des données de puits et de forages. La méthode de Thiessen consiste à construire des polygones autour des points cibles.

Chaque point représente le centre de gravité du polygone qui l'englobe. Elle est utilisée pour élaborer un maillage qui servira comme support de travail. La triangulation consiste à définir un maillage triangulaire, dont les points de mesure représentent les nœuds des triangles. Cette méthode est utilisée dans ce travail pour l'élaboration des modèles numériques de terrain (MNT) de la topographie, de la pente, de la profondeur de la nappe et de la carte de vulnérabilité finale.

Une partie des données thématiques est obtenue par digitalisation de cartes existantes telles que la carte géologique et le type de sol. C'est une étape très importante ; en utilisant une SIG, nous pouvons identifier les zones les plus vulnérables à la pollution. Le tableau III.3 présente le mode d'acquisition de chaque catégorie de données.

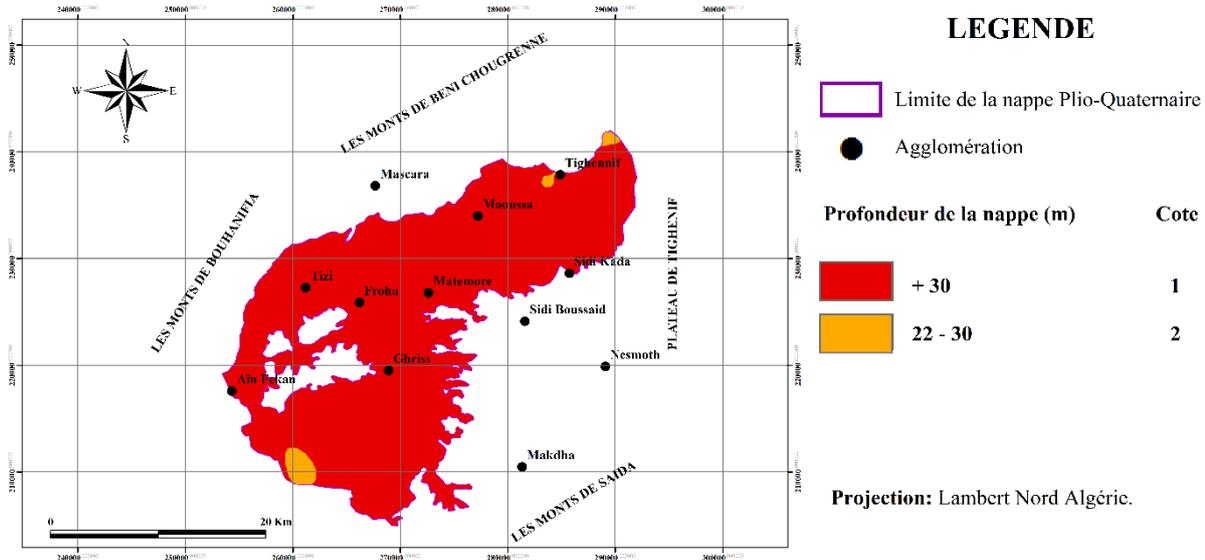
**Tableau III.3.** Mode d'acquisition de données.

Type de données	Mode d'acquisition	Format	Utilisée pour produire
Données des puits (profondeur de la nappe et nitrates)	Interpolation	Raster	D et sources de pollution
Précipitations	Interpolation	Raster	R
Données de forages	Interpolation	Raster	C et A
Type de sol	Digitalisation	Raster	S
Topographie (10 m d'équidistance)	Digitalisation	Raster	T
Géologie de surface	Digitalisation	Raster	I
Réseau hydrographique	Digitalisation	Raster	Zones d'infiltration
Occupation du sol	Digitalisation	Raster	Source de pollution

### III.3.7.2 Carte de profondeur de la nappe

Ce paramètre est important car le transport des polluants et leur évolution dans sol et le sous-sol sont déterminés en connaissant en premier lieu la profondeur de la nappe (Chaffi et al., 2006).

La profondeur de l'aquifère se fait à l'aide de la formule  $D=Z-E$ . La répartition des classes de profondeur d'eau (**Figure III.9**) permet de sortir deux classes variant entre 22 à 30 m et plus.



**Figure III. 9.** Carte de la profondeur de l'eau de l'aquifère alluviale de Ghriss.

La quasi-totalité de l'aquifère Plio-Quaternaire de Ghriss dispose d'une profondeur d'eau souterraine supérieure de 30.0 m, avec toutefois, une exception pour la partie centrale, représentée par l'espace compris entre Matmore, Ghriss et Maoussa. Selon la méthode usagée, le poids attribué à ce paramètre est de 0.186 à 5. Le système de cotation affecté à ce paramètre est représenté dans le Tableau III.4.

**Tableau III. 4.** Cotation de la profondeur d'eau de l'aquifère Plio-Quaternaire de Ghriss.

Profondeur de l'eau (m)	Côte	Poids (SI)	Poids (DRASTIC & DRASTIC-GOS)	Superficie (%)
+ 30	1	0.186	5	98
22 - 30	2			2

### III.3.7.3 Carte de la recharge nette

L'infiltration efficace joue un rôle essentiel dans l'alimentation de la nappe, ce qui favorise d'avantage le transport des polluants vers l'aquifère. L'observation de la carte de la recharge (**Figure III.10**) montre que l'infiltration efficace est supérieure à 25.5 mm. Cela s'explique par l'effet associé de plusieurs facteurs, entre autres la morphologie plane, la pluviométrie favorable et la forte activité d'irrigation sur l'ensemble de ce terroir.

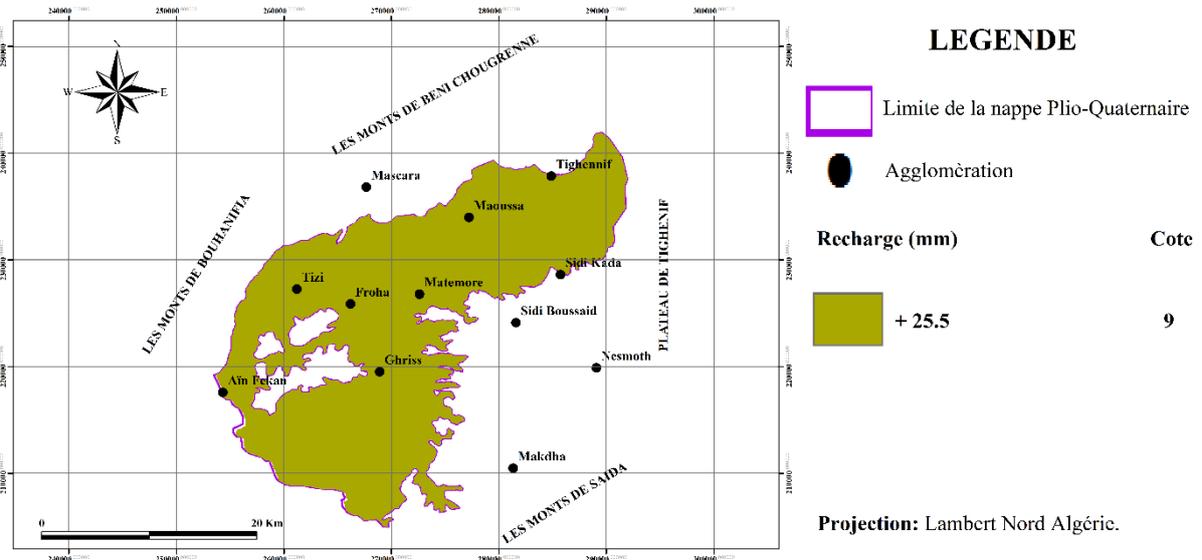


Figure III. 10. Carte de la recharge efficace de l’aquifère Plio-Quaternaire de Ghriss.

Le poids attribué à la recharge de la nappe varie entre 0.212 (pour la méthode SI) et 4 (pour la méthode DRASTIC-GOS). Ainsi, le système de cotation affecté à ce paramètre est représenté dans le Tableau III.5.

Tableau III.5. Cotation de la recharge efficace d’aquifère Plio-Quaternaire de Ghriss.

Recharge net (mm)	Cote	Poids (SI)	Poids (DRASTIC & DRASTIC-GOS)	Superficie (%)
+ 25.5	9	0,212	4	100

### III.3.7.4 Carte de lithologie de la zone saturée

Ce paramètre s'accorde avec la composante granulométrique in-situ. Plus cette dernière est fine, plus le piégeage du polluant est grand (Figure III.11). Composée par la domination d’alluvions actuelles et récentes (sable, graviers et argile) à 81% de la superficie d’aquifère Plio-Quaternaire de Ghriss, et environ de 16 % par la structure d’argile, conglomérat et calcaire lacustre.

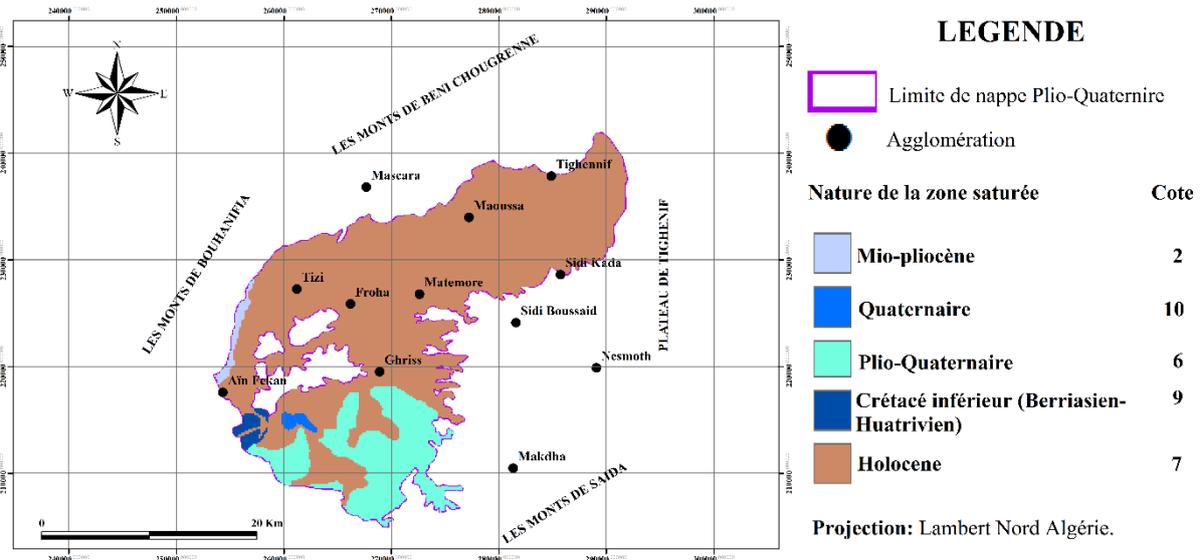


Figure III. 11. Carte de la lithologie de la zone saturée de l'aquifère Plio-Quaternaire.

La présence de petits niveaux Quaternaire et crétacé inférieur (calcaire dolomites et marnes) au Sud et Moi-Pliocène (argile, conglomérat, calcaire lacustre) à l'Ouest de la plaine de Ghriss. Les matériaux de la zone saturée, constituent un facteur d'absorption des métaux lourds toxiques. L'usage de poids attribué à ce paramètre est de 0.259 et 3. Ainsi, le système de cotation affecté à ce paramètre représenté dans le Tableau III.6.

Tableau III. 6. Cotation des matériaux d'aquifère Plio-Quaternaire de Ghriss.

Nature d'aquifère	cote	Poids (SI)	Poids (DRASTIC & DRASTIC-GOS)	Superficie (%)
Moi-Pliocène	2	0.259	3	1
Quaternaire	10			1
Plio-Quaternaire	6			16
Crétacé inférieur	9			1
Holocène	7			81

### III.3.7.5 Carte de la pédologie du sol

La structure pédologique du sol est responsable de la migration des différentes substances chimiques vers le sous-sol. De par son imperméabilité, un sol argileux dispose d'une capacité de protection des eaux souterraines plus significative. La carte pédologique de Ghriss (Figure III.12) fait ressortir des sols alluviaux entourés de sols calcaires.

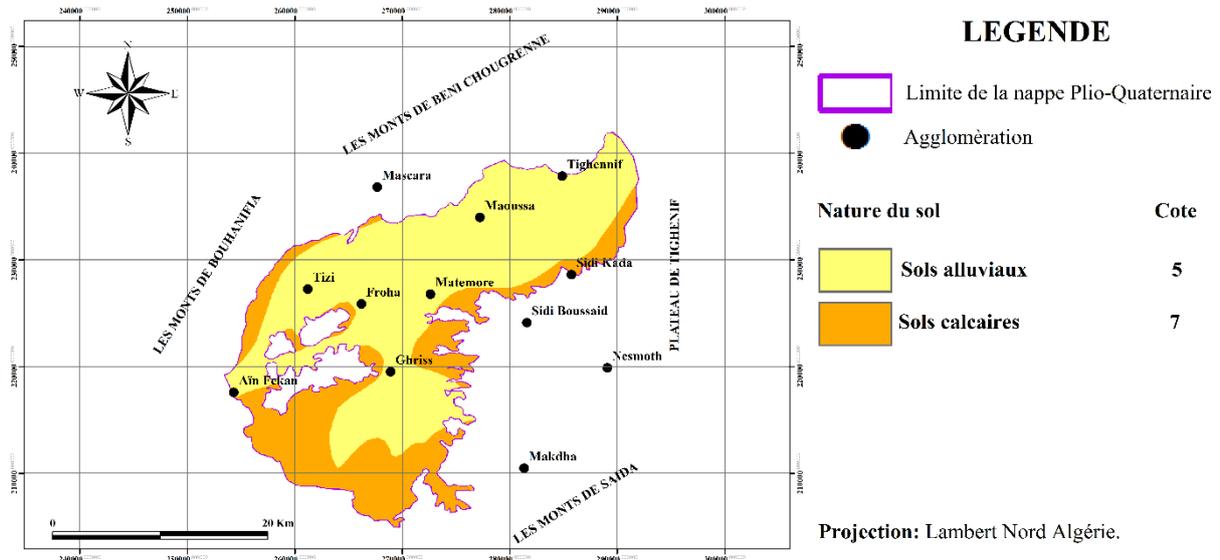


Figure III. 12. Carte pédologie de l'aquifère Plio-Quaternaire de Ghriss.

De ce fait, le poids attribué à ce paramètre est évalué à 2. Ainsi, le système de cotation affecté à ce paramètre est représenté dans le Tableau III.7.

Tableau III.7. Cotation de la nature du sol d'aquifère Plio-Quaternaire de Ghriss.

Nature du sol	Cote	Poids (DRASTIC & DRASTIC-GOS)	Superficie (%)
Sols alluviaux	5	2	68
Sols calcaires	7		32

### III.3.7.6 Carte des pentes

L'infiltration efficace et la propagation des polluants dans la surface du sol sont en relation directe avec la pente des terrains, favorisant l'accélération ou le freinage de la contamination des eaux souterraines. La carte topographique de la plaine présente cinq types de classes (Figure III.13) variant de 0 à 10 et plus. Le poids attribué à ce paramètre est de 0.221 à 1. Ainsi, le système de cotation affecté à ce paramètre est représenté dans le Tableau III.8.

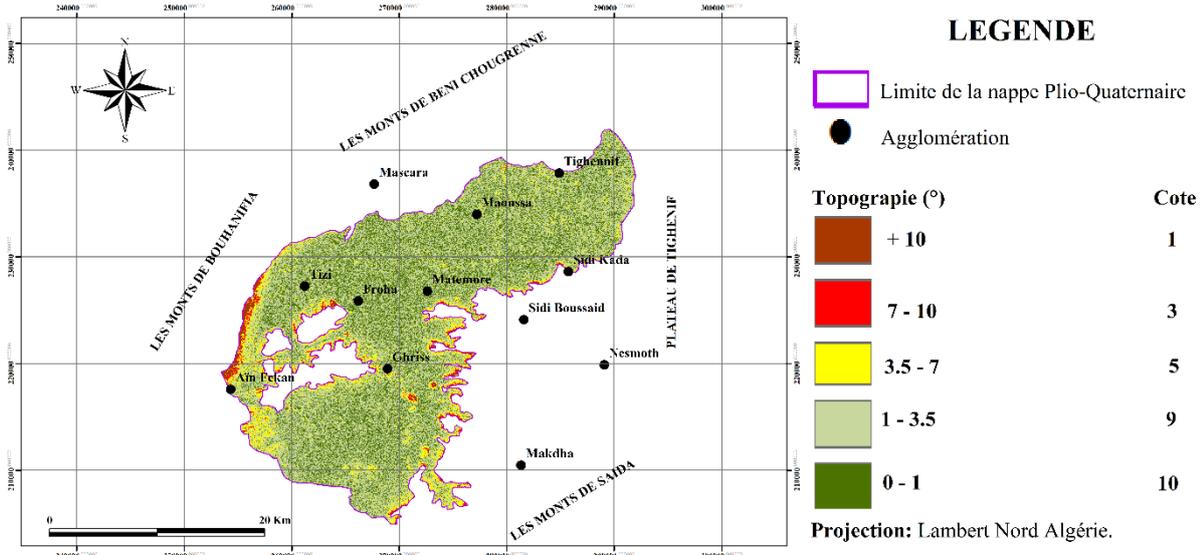


Figure III. 13. Carte de la pente du terrain de l’aquifère Plio-Quaternaire de Ghriss.

Tableau III.8. Cotation de la topographie du terrain d’aquifère Plio-Quaternaire de Ghriss.

Topographie (°)	cote	Poids (SI)	Poids (DRASTIC & DRASTIC-GOS)	Superficie (%)
+10	1	0.121	1	1
7 - 10	3			1
3.5 – 7	5			11
1 – 3.5	9			56
0 - 1	10			31

### III.3.7.7 Carte de l’impact de la zone non saturée

Cette zone est déterminée par le niveau piézométrique de la nappe et la texture du sol qui influe sur le transport des polluants. Plus la texture est fine, plus la percolation de la contamination dans la nappe est grande.

La carte de la zone non saturée d’aquifère Plio-Quaternaire de la plaine de Ghriss (Figure III.14) fait ressortir cinq formations lithologiques avec des alluvions actuelles et récentes au centre et au cercle de Nord vers le NNE, à savoir :

- Croûte calcaire, cailloutis calcaire dolomites et marnes au Sud de la zone d’étude.
- Argiles, conglomérats et calcaires lacustres à l’Ouest.

Le poids attribué à ce paramètre est évalué à 5. Ainsi, le système de cotation affecté à ce paramètre représenté dans le Tableau III.9.

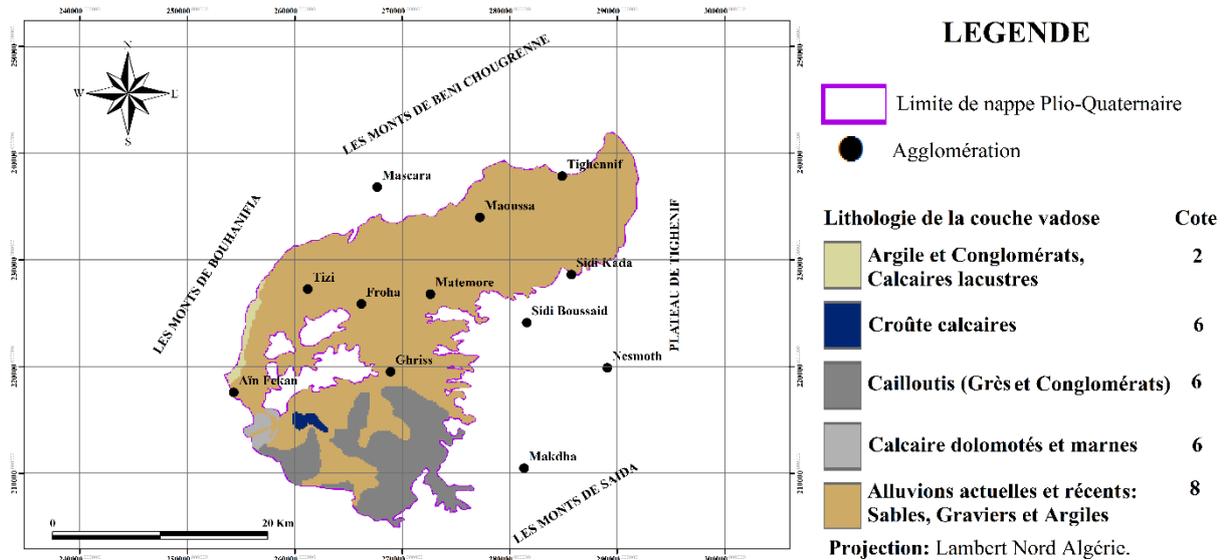


Figure III. 14. Carte de l’impact de la zone non saturée de l’aquifère Plio-Quaternaire de la plaine de Ghriiss.

Tableau III.9. Cotation de lithologie de zone vadose de l’aquifère Plio-Quaternaire de Ghriiss

Lithologie de la zone vadose	cote	Poids
Argile et Conglomérats, Calcaire lacustres	2	5
Croûte calcaires	6	
Cailloutis (Grès et conglomérats)	6	
Calcaire dolomites et marnes	6	
Alluvions actuelles et récentes : sable graviers et argile	8	

### III.3.7.8 Carte de la perméabilité d’aquifère

Déterminée par les indices de conductivités hydrauliques, la perméabilité de l'aquifère se fait à l'aide de la formule  $k = T/e$ , où T est la transmissivité, obtenue à partir des essais de pompage et de l’élaboration des logs des forages. La perméabilité de terrain de la zone d'étude a été identifiée en six classes (Figure III.15) variant de 0.00000074 à 0.00049 et plus. Un poids de 3 a été attribué à ce paramètre. Ainsi, le système de cotation affecté à ce paramètre est représenté dans le Tableau III.10.

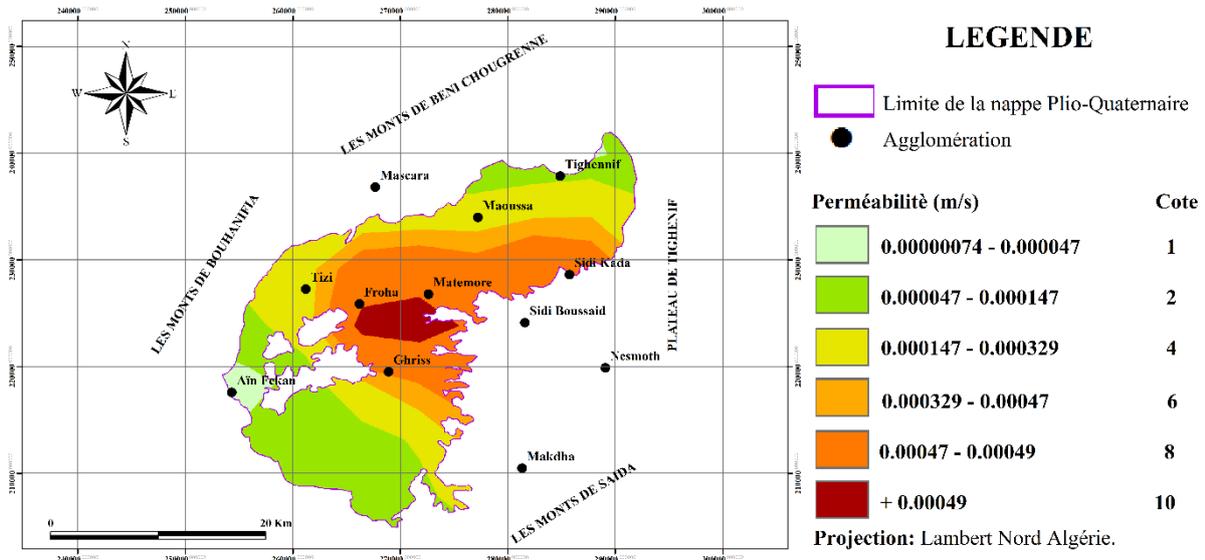


Figure III.15. Carte de perméabilité de l’aquifère Plio-Quaternaire de Ghriss.

Tableau III. 10. Cotation de la perméabilité d’aquifère Plio-Quaternaire de Ghriss.

Perméabilité (m/s)	cote	Poids	Superficie (%)
0.00000074 – 0.000047	1	3	2
0.000047 – 0.000147	2		28
0.000147 – 0.000329	4		27
0.000329 – 0.00047	6		12
0.00047 – 0.00049	8		27
+ 0.00049	10		4

### III.3.7.9 Carte d’occupation du sol

La carte d’occupation du sol fournit les informations sur l’activité humaine sur la zone d’étude. Elle donne des idées sur les sources de pollution. Les poids et leurs cotes attribuent à de ce paramètres assuré l’importance sur la migration des polluants à partir de la surface du sol jusqu’à la contamination des aquifères d’eau souterraine, par exemple les forêts favorisé un nul filtrage des substances polluant dans le sous-sol.

La carte d’occupation du sol (Figure III.16) fait ressortir neuf classes du sol. Là-où les cotes varient entre 0 et 100 en gradient du plus important au transport des polluants. A partir de la méthode utile, Un poids a été attribué à ce paramètre compris entre 0.222 et 5. La classe des cultures agricoles couvre 69.91% de la surface totale de la plaine de Ghriss (Tableau III.11).

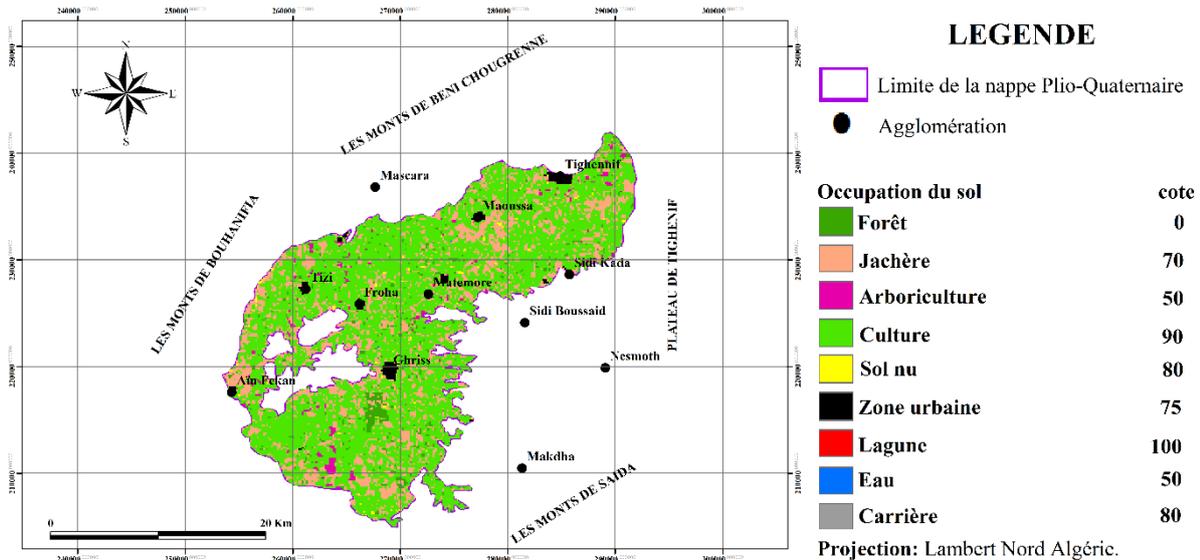


Figure III. 16. Carte d’occupation du sol de l’aquifère Plio-Quaternaire de Ghriss.

Tableau III. 11. Cotation d’occupation du sol d’aquifère Plio-Quaternaire de Ghriss.

Classe du sol	cote	Poids (SI)	Poids (DRASTIC-GOS)	Superficie (%)
Forêt	0	0.222	5	3.23
Jachère	70			23.44
Arboriculture	50			1.46
Culture	90			69.91
Sol nu	80			0.61
Zone urbaine	75			1.32
Lagune	100			0.01
Eau	50			0.01
Carrière	80			0.01

### III.3.7.10 Carte du type d’aquifère

La sensibilité des nappes à la pollution des eaux souterraines s’accorde directement avec la nature de l’aquifère. Les nappes libres ou semi-captives sont classées comme un tamis par rapport aux nappes captives. A cet effet, les nappes captives sont plus protégées que les autres nappes.

Ainsi, la plaine de Ghriss renferme une superposition des trois (3) nappes successives. L’aquifère Plio-Quaternaire favoriserait la protection des deux autres nappes restantes (Figure III.17).

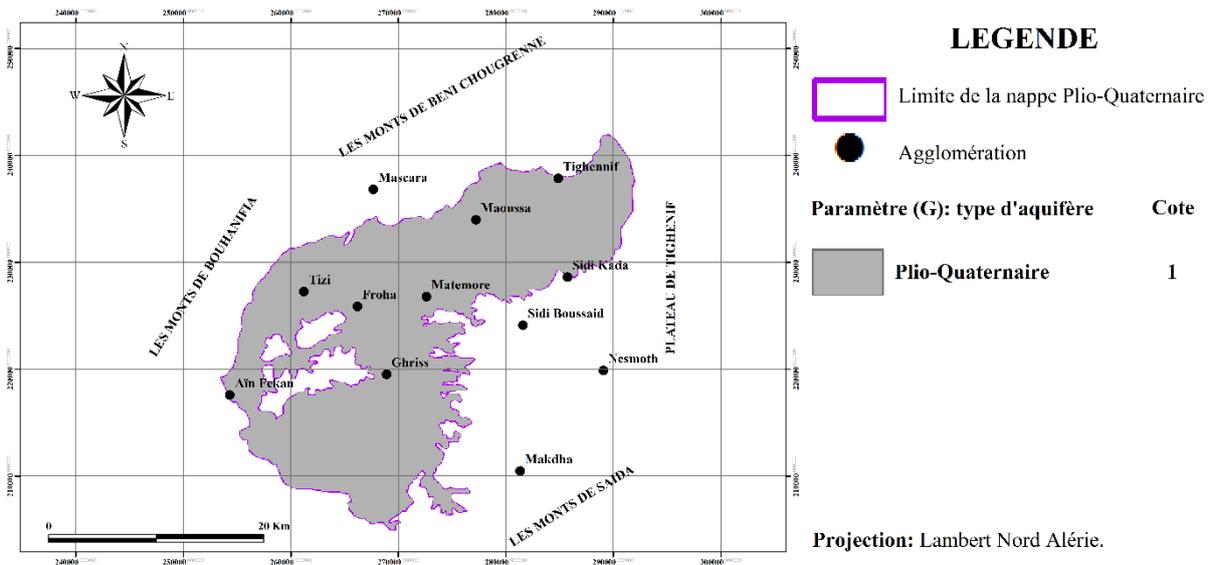


Figure III. 17. Carte d’aquifère Plio-Quaternaire de la plaine de Ghriss.

Un poids évalué à 3 a été attribué à ce paramètre (DRASTIC-GOS). Le système de cotation affecté à ce paramètre représenté dans le Tableau III.12.

Tableau III. 12. Cotation d’ d’aquifère Plio-Quaternaire de la plaine de Ghriss.

Type d’aquifère	Cote	Poids (DRASTIC-GOS)	Superficie (%)
Plio-Quaternaire	1	3	100

### III.3.7.11 Carte de lithologie de la zone vadose

La répartition spatiale de la structure lithologique de la zone non saturée a été identifiée en huit (8) classes (Figure III.18), couverte par des formations d’alluvions récents (sable, graviers et argile), soit 79.23% de la totalité de la zone d’étude. La côte attribuée à ce paramètre est comprise entre 0.1 à 1 (Tableau III.13).

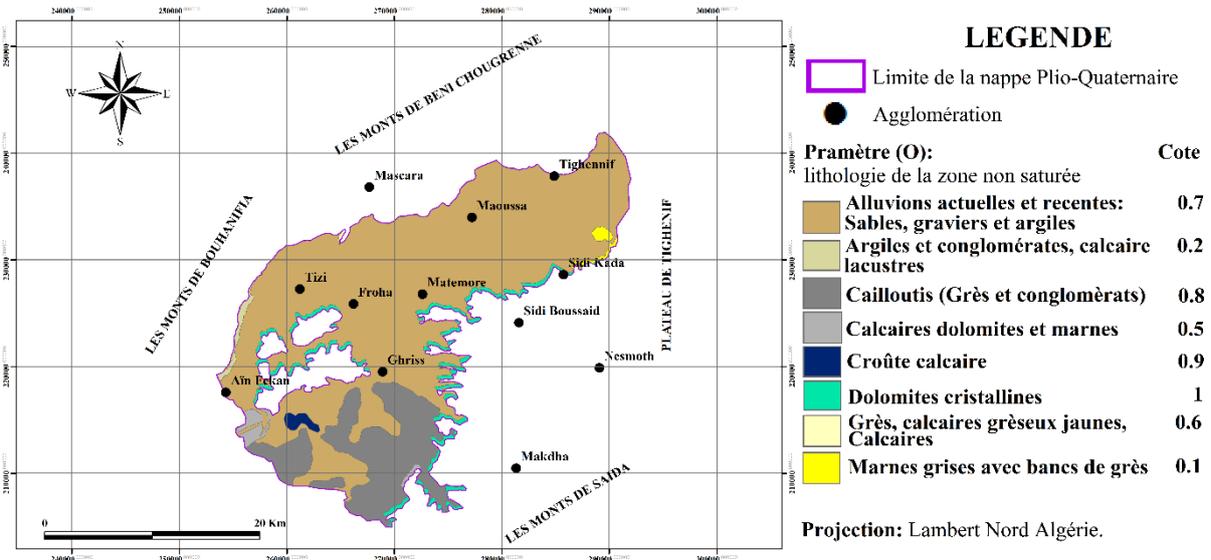


Figure III. 18. Carte lithologie de la zone vadose d’aquifère Plio-Quaternaire de Ghriss.

Tableau III. 13. Cotation de la lithologie de l’aquifère Plio-Quaternaire de

Structure lithologie	Ghriss	cote	Superficie (%)
Alluvions actuelles et récentes : sable, graviers et argiles		0.7	79.23
Argiles et conglomérats, calcaire lacustre		0.2	0.5
Cailloutis (Grès et conglomérats)		0.8	16.7
Calcaires dolomites et marnes		0.5	1
Croûte calcaire		0.9	0.7
Dolomites cristallines		1	1.24
Grès, calcaires gréseux jaunes, calcaires		0.6	0.03
Marnes grises avec bancs de grès		0.1	0.6

#### III.4.7.12 Carte de profondeur de la zone vadose

Le temps de diffusion des particules de contaminants dans le sous-sol est directement lié à la hauteur de la zone non saturée. Les données de ce paramètre requises par mesure direct des niveaux statiques se font à l’aide de la sonde électrique à travers des différents points d’eau sélectionnés.

La répartition des classes de profondeur de la zone vadose (Figure III.19) présente sept (7) classes comprises entre 0 à 100 m. La catégorie des faibles profondeurs est observée au Sud des agglomérations de Matmore et de Ghriss.

La classe des autres profondeurs (moyen à grand) se trouve localisée en alternance dans l’ensemble de la zone d’étude (Tableau III. 14).

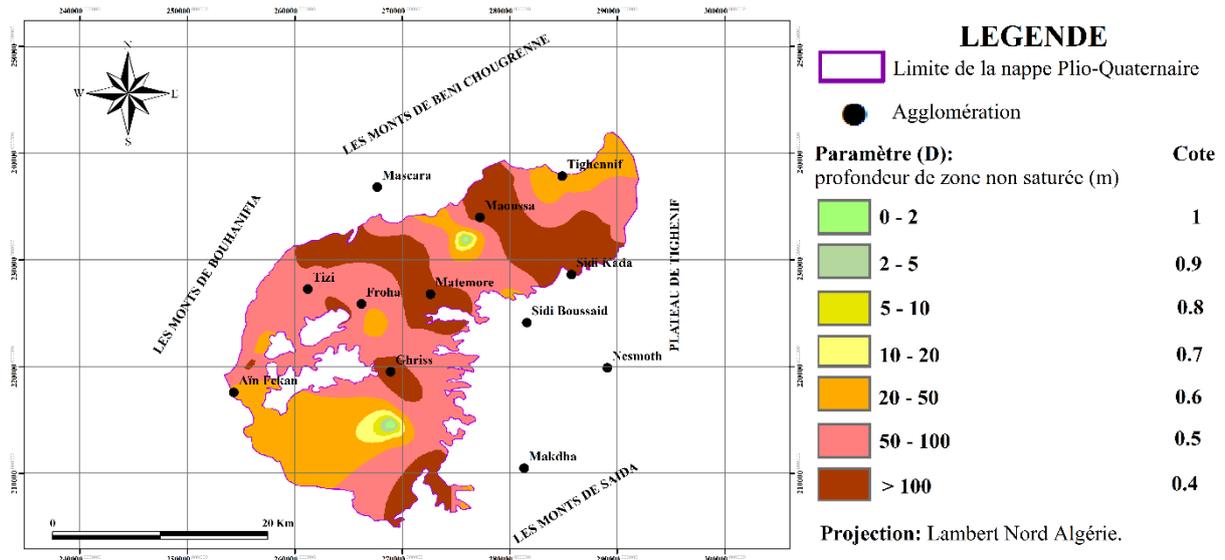


Figure III. 19. Carte de profondeur de la zone vadose de Ghriss.

Tableau III. 14. Cotation de la profondeur de la zone vadose

Profondeur (m)	Cote	Superficie (%)
0 - 2	1	0.14
2 - 5	0.9	0.26
5 - 10	0.8	0.5
10 - 20	0.7	1.4
20 - 50	0.6	22.5
50 - 100	0.5	47.47
>100	0.4	27.73

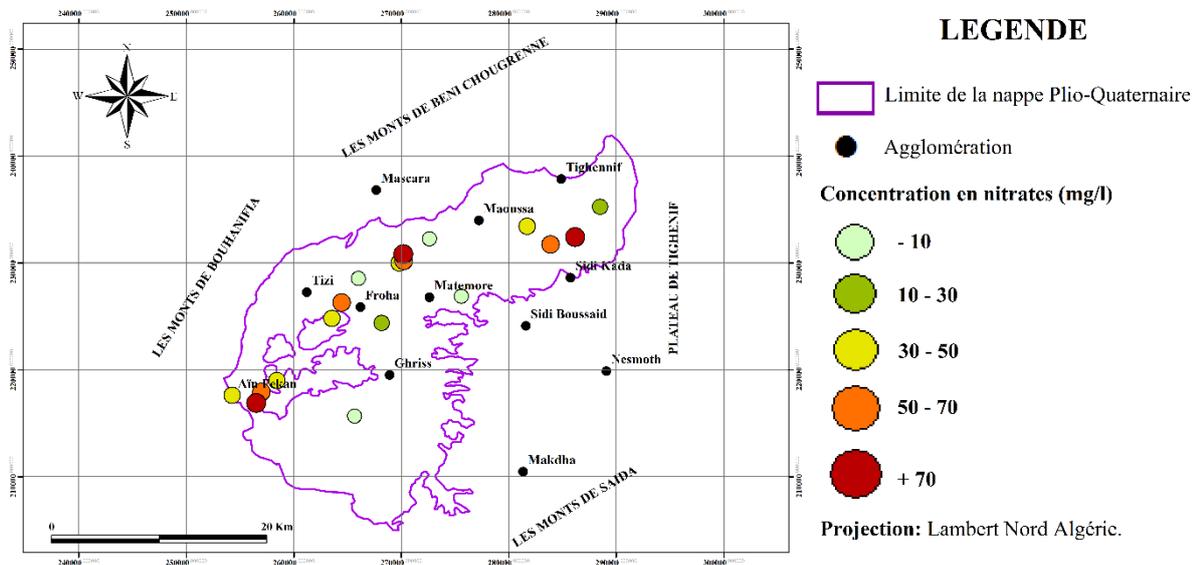
### III.3.7.13 Carte de teneur en nitrate

Le nitrate est un minéral chimique que l'on trouve dans les eaux souterraines dans des proportions variables. Sa présence est due à plusieurs motifs, dont celui de l'utilisation excessive des engrais azotés en agriculture. Pour l'accroissement des rendements.

Une fois infiltré, cela entraîne une détérioration de la qualité des eaux souterraines. Les limites de son utilisation sont régies par voies réglementaires et des directives de l'OMS (Organisation Mondiale de la santé). Pour l'eau potable le seuil est limité à une valeur maximale de 50 mg/l.

La répartition spatiale de la teneur en nitrates dans la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss varie entre 10 à 70 mg/l. Les fortes concentrations sont observées à l'Est et au Centre de la plaine,

induisant une densification des activités agricoles. Au sud de la plaine on observe une concentration en nitrates faible à moyenne (**Figure III.20**).



**Figure III. 20.** Carte de concentration en nitrate à travers l'aquifère Plio-Quaternaire de Ghriss.

## Conclusion

Ce chapitre a mis en évidence le rôle et les fonctions essentielles des Systèmes d'Information Géographique (SIG) dans l'établissement des cartes thématiques sur la base des indices de cotations et du poids alloué à chaque paramètre.

La classification de ces côtes se fait sur la base de l'importance à chaque intervalle de paramètre plutôt que sur l'origine de paramètre à la percolation du polluant à travers la zone non saturée de l'aquifère.

Ces cartes thématiques favorisent l'établissement des cartes de vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine.

Enfin, l'application des SIG s'est avéré une démarche performante et efficace pour faciliter la prise de décision par les gestionnaires en vue d'assurer une meilleure protection des ressources en eau, notamment pour l'aquifère Plio-Quaternaire de notre zone d'étude.

**CHAPITRE IV:**

***RÉSULTATS ET DISCUSSIONS***

**RÉSULTATS ET DISCUSSIONS****IV.1 Introduction**

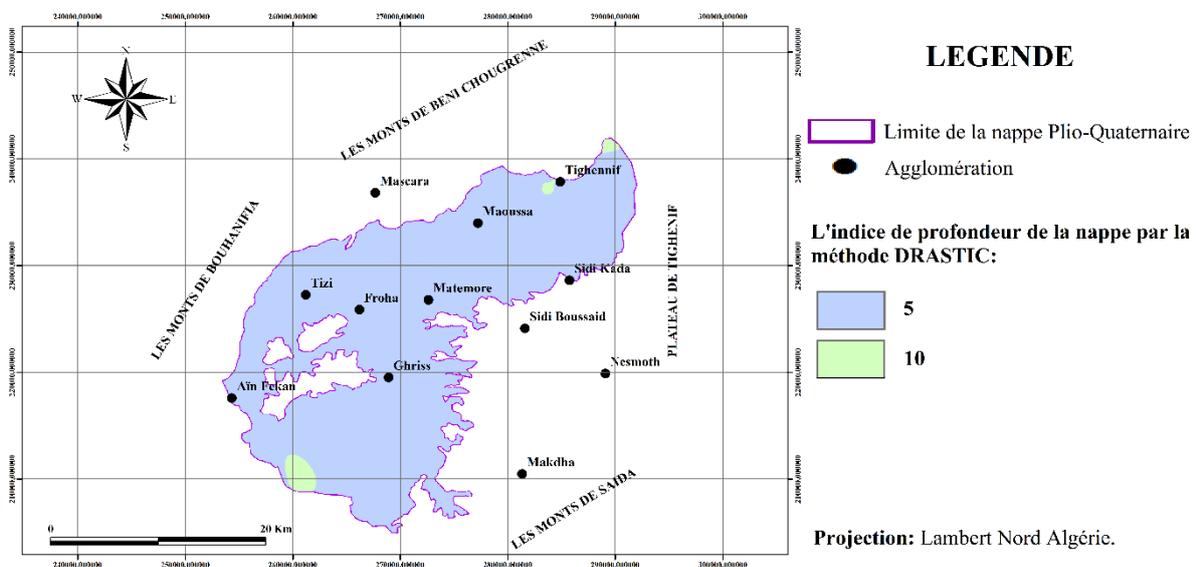
Dans ce chapitre, nous présentons des cartes thématiques de sortie des indices et les résultats obtenus après croisement relatif à chacune des méthodes appliquées. Les valeurs concernent la distribution de l'indice de vulnérabilité et les caractéristiques spécifiques des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité.

Dans la discussion, on met en relation les différentes évaluations obtenues par chaque méthode et on argumente la nécessité de la validation des classes de sensibilité de la zone d'étude par la répartition des concentrations des nitrates vis-à-vis du test de répartition des surfaces et de l'analyse statistique.

**IV.2 Discussion des cartes thématiques****IV.2.1 Cartes thématique des indices****IV.2.1.1 Carte d'indice de la profondeur de la nappe**

Après le calcul de l'indice de paramètre de profondeur de la nappe, les résultats obtenus permettent de faire sortir deux classes par la méthode DARSTIC. On observe que la majorité du surface de la zone d'étude est concernée par l'indice le plus faible évalué à 5.

Par contre les zones, où l'indice est élevé, se situent dans la haute terrasse aux alentours de Tighennif et au Sud de Ghriss (**Figure IV.1**). D'autre part, on remarque deux classes par la méthode SI, soit de 0.186 et 0.372. La répartition des indices sur la carte d'aquifère alluvial de la zone d'étude est présentée dans la figure IV.2.



**Figure IV. 1.** Carte de l'indice de profondeur de la nappe par la méthode DRASTIC.

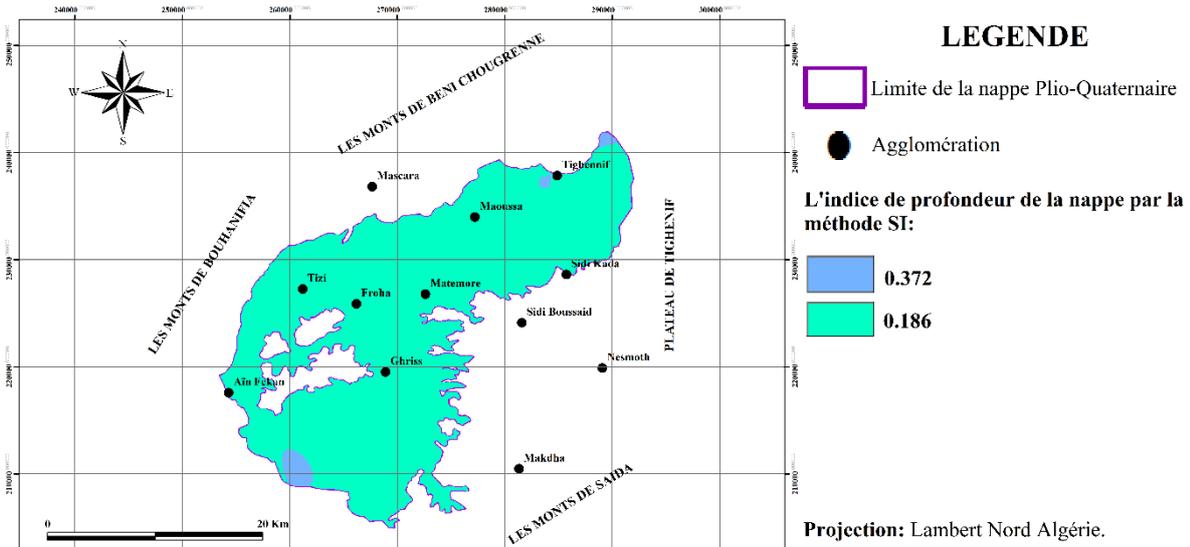


Figure IV.2. Carte de l'indice de profondeur de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss par la méthode SI.

IV.2.1.2 Carte d'indice de recharge

L'application des méthodes intrinsèques et spécifiques permet d'estimer des indices du paramètre de la recharge nette. Dans la totalité de l'aquifère Plio-Quaternaire de Ghriss, on observe qu'une seule classe s'accorde pour chaque modèle usagé (Figure IV.3 et IV.4).

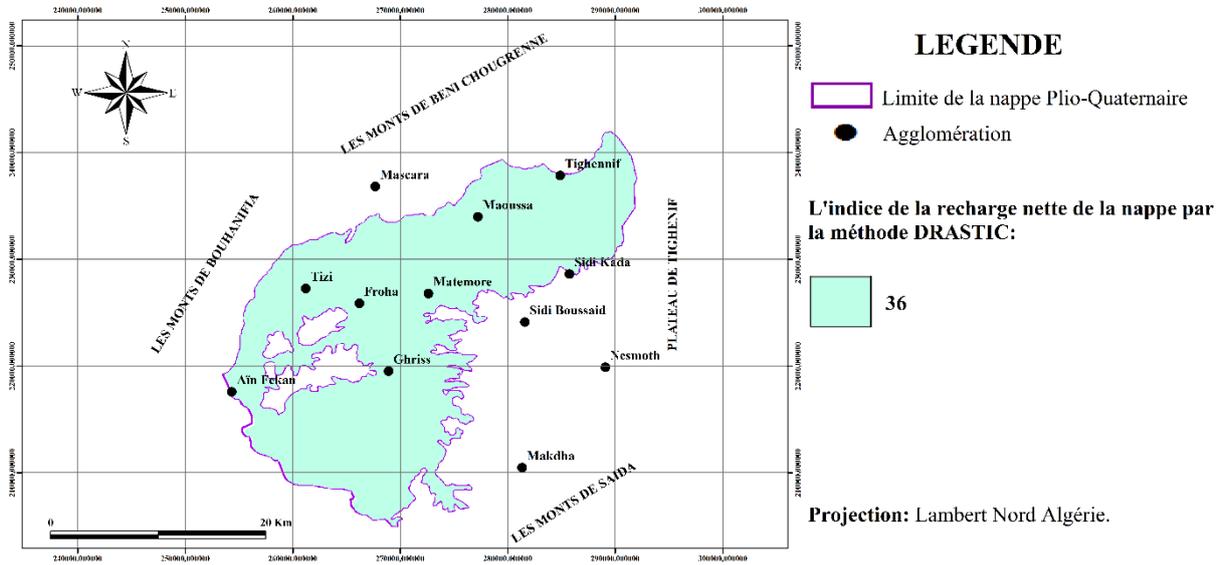


Figure IV.3. Carte de l'indice de la recharge de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss par la méthode DRASTIC.

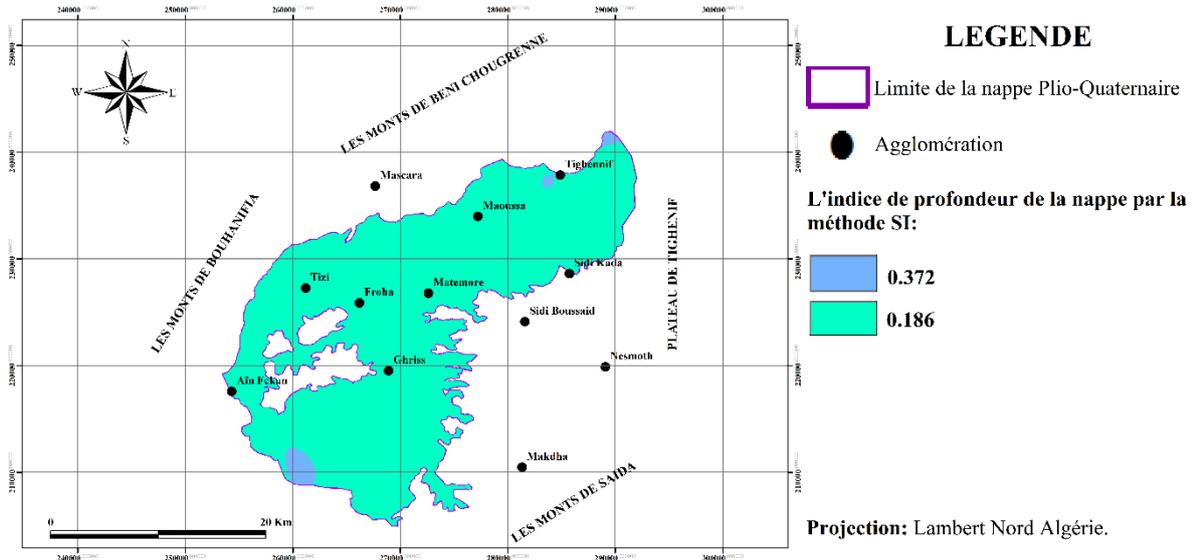


Figure IV.4. Carte de l'indice de la recharge de la nappe Plio-Quaternaire de la plaine de Ghriiss par la méthode SI.

IV.2.1.3 Carte d'indice de lithologie de l'aquifère

Les indices calculés permettent de dresser la carte correspondante à l'indice lithologique de l'aquifère (Figure IV.5 et IV.6). Les valeurs varient entre 6 à 30 par la méthode DRASTIC; par contre elles varient entre 0.52 et 2.52 par la méthode SI. Les valeurs moyennes sont localisées au NNE, le NNO et au Centre de la plaine, alors que les forts indices se trouvent au Sud d'Ain Fekkan.

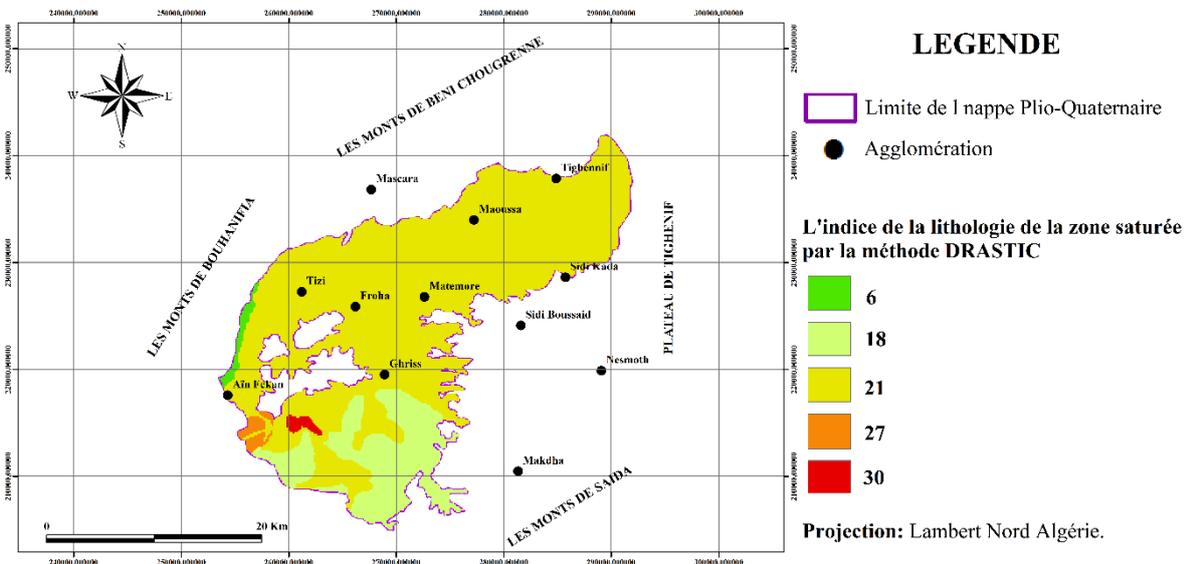


Figure IV. 5. Carte de l'indice de la lithologie de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriiss par la méthode DRASTIC

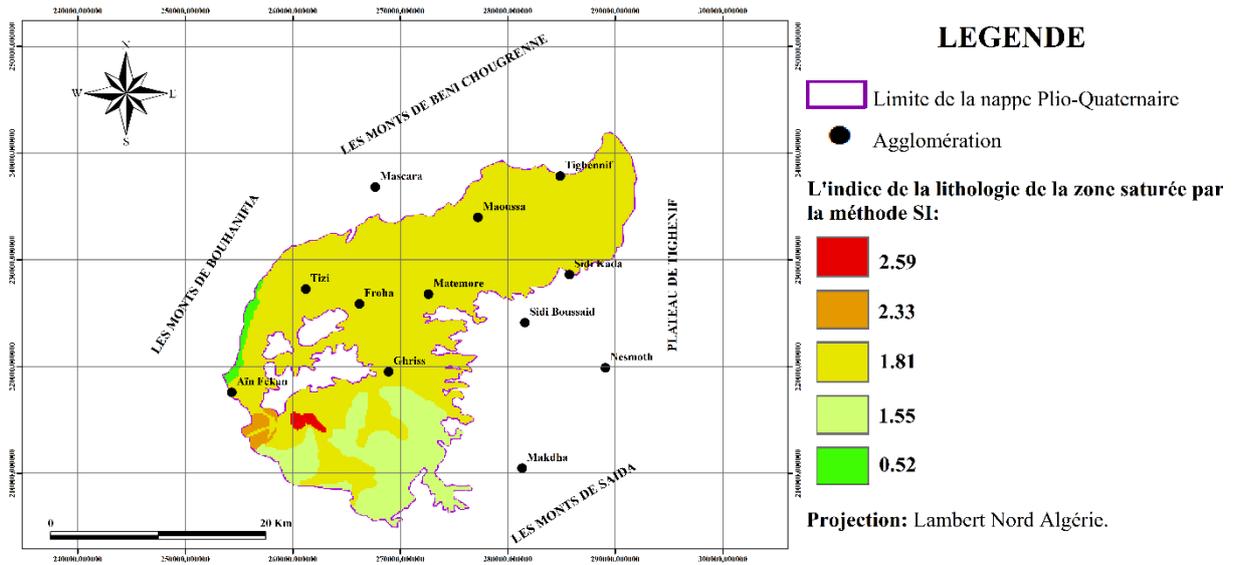


Figure IV. 6. Carte de l’indice de la lithologie de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss par la méthode SI

IV.2.1.4 Carte d’indice de la pédologie du sol

La répartition de l’indice du paramètre pédologique du sol sur la carte d’aquifère Plio-Quaternaire de Ghriss montre que la grande superficie est concernée par la faible valeur de l’indice pédologique. Les indices les plus élevés sont observés dans la direction NNE vers SSO et à l’Ouest de la zone d’étude (Figure IV.7).

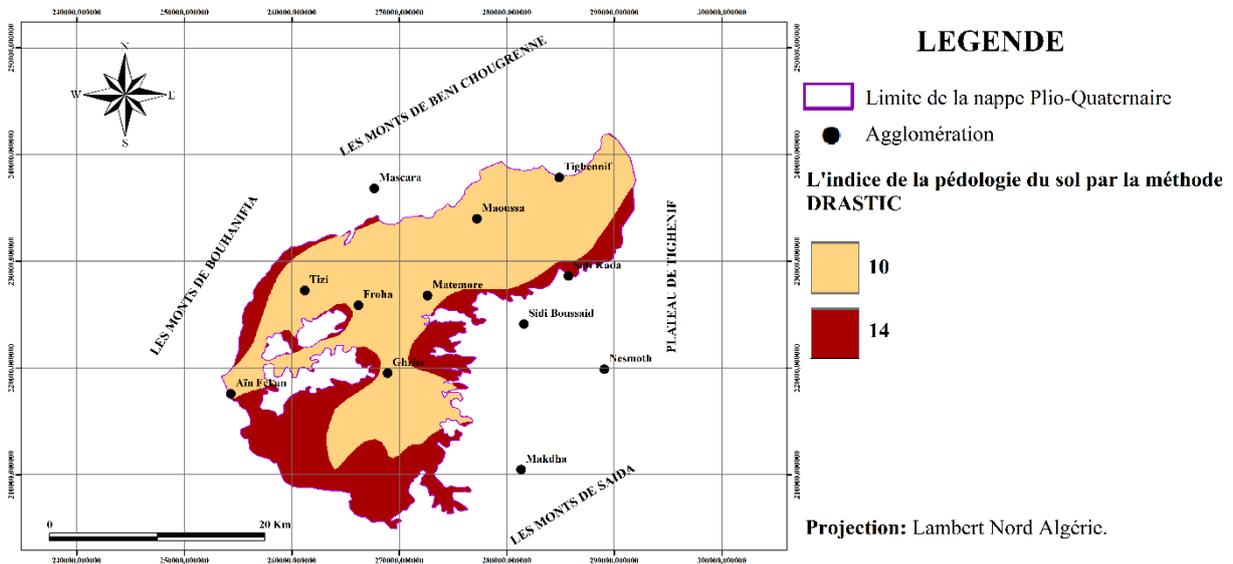


Figure IV.7. Carte de l’indice de la pédologie de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss par la méthode DRASTIC.

IV.2.1.5 Carte d’indice des pentes

La classification des indices des pentes permet de faire ressortir cinq (05) classes pour chaque méthode appliquée. Les valeurs varient entre 1 et 10 pour la méthode DRASTIC (Figure IV.8).

D'autre part, l'indice des pentes par la méthode SI donne aussi l'organisation des cinq classes comprises entre 0.12 et 1.21 (Figure IV.9). Selon les deux cartes, les fortes classes se localisent à l'ouest de la zone d'étud; alors que les moyennes classes se trouvent à travers la totalité de l'aquifère Plio-Quaternaire de la plaine de Ghriss.

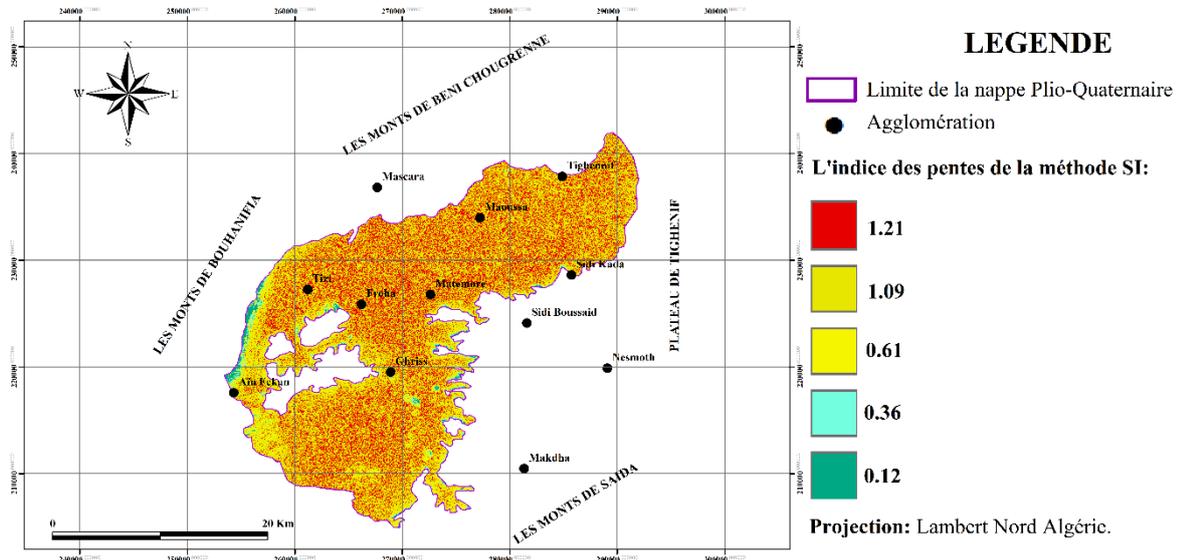


Figure IV. 9. Carte de l'indice des pentes de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss par la méthode SI.

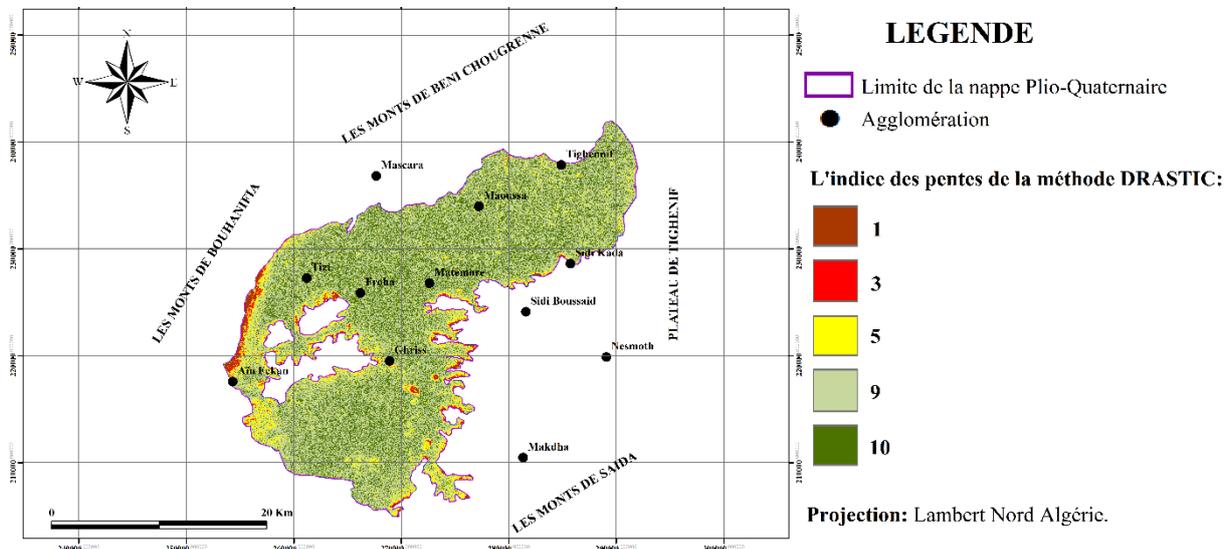
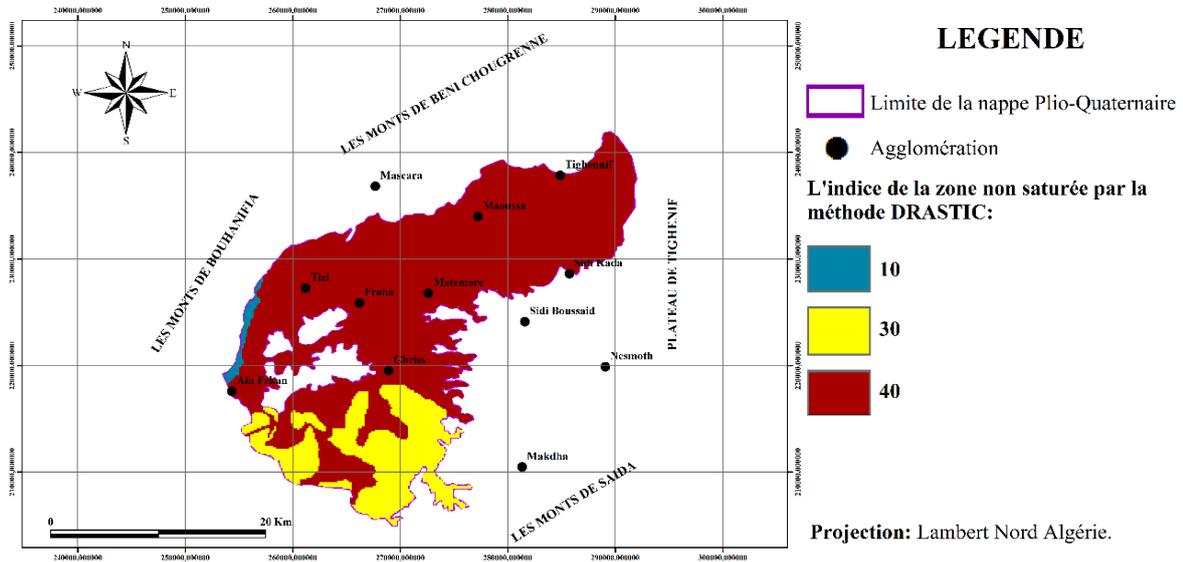


Figure IV. 8. Carte de l'indice des pentes de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss par la méthode DRASTIC.

IV.2.1.6 Carte d'indice de l'impact de la zone non saturée

L'indice de paramètre de l'impact de la zone non saturée présenté à la figure IV.10. La répartition des trois classes sur l'aquifère Plio-Quaternaire de Ghriss est organisée comme suit :

L'indice moyen se trouve au Sud et le faible indice est localisé à l'ouest; alors que les fortes valeurs de l'indice couvrent la grande superficie à la direction du cercle de NNE vers NNO, soit du Centre et du Sud de l'aquifère de la zone d'étude.



**Figure IV. 10.** Carte de l'indice de la zone non saturée de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss par la méthode DRASTIC.

#### IV.2.1.7 Carte d'indice de la perméabilité d'aquifère

Le calcul des valeurs de l'indice de perméabilité de l'aquifère Plio-Quaternaire de Ghriss sort six (06) classes des indices localisées comme suit (**Voir la figure IV.11**):

Au centre de la zone d'étude, on observe l'indice le plus élevé à proximité des villes de Matmore Froha et de Ghriss, soit de 30. La faible valeur de l'indice se trouve au sud de l'aquifère Plio-Quaternaire de Ghriss et aux environs de la ville d'Ain Fekan. Les autres classes s'organisent par positionnement successif à travers la totalité de la zone d'étude entre 6 et 24.

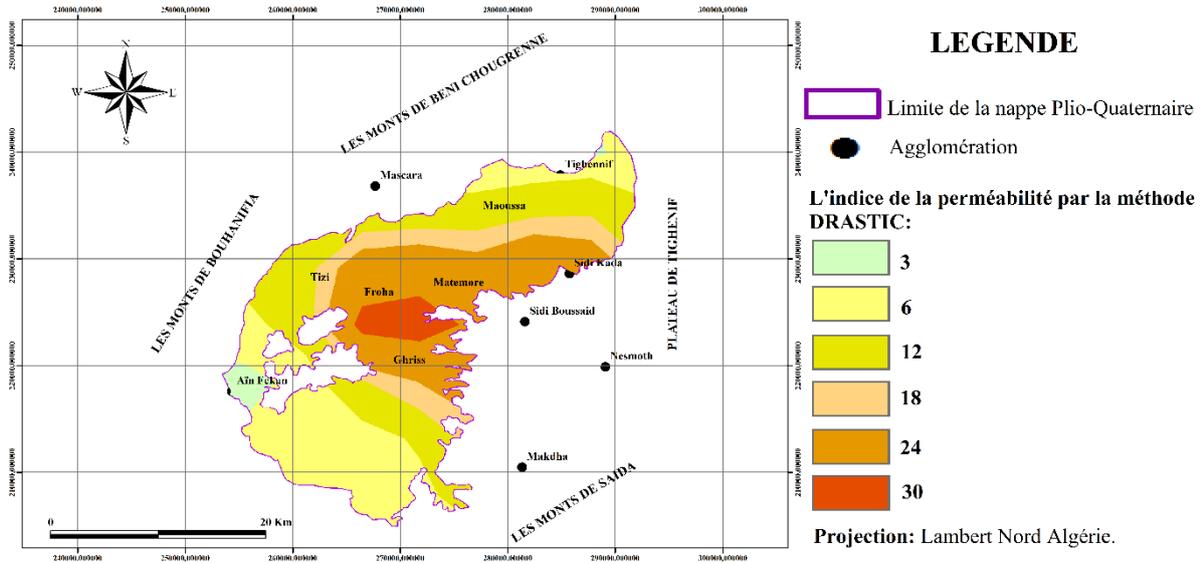


Figure IV. 11. Carte de l'indice de perméabilité la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss par la méthode DRASTIC.

IV.2.1.8 Carte d'indice d'occupation des sols

L'évaluation d'indice d'occupation des sols permet de sortir des valeurs qui varient entre 0 et 500 pour la méthode DRASTIC et entre 0 et 22.20 pour la méthode SI. Le fort indice se trouve dans la majorité des surfaces à travers la totalité de l'aquifère Plio-Quaternaire de Ghriss. Les valeurs faibles à moyennes se localisent à quelques parcelles sur la zone d'étude (Voir la figure IV.12 et IV.13).

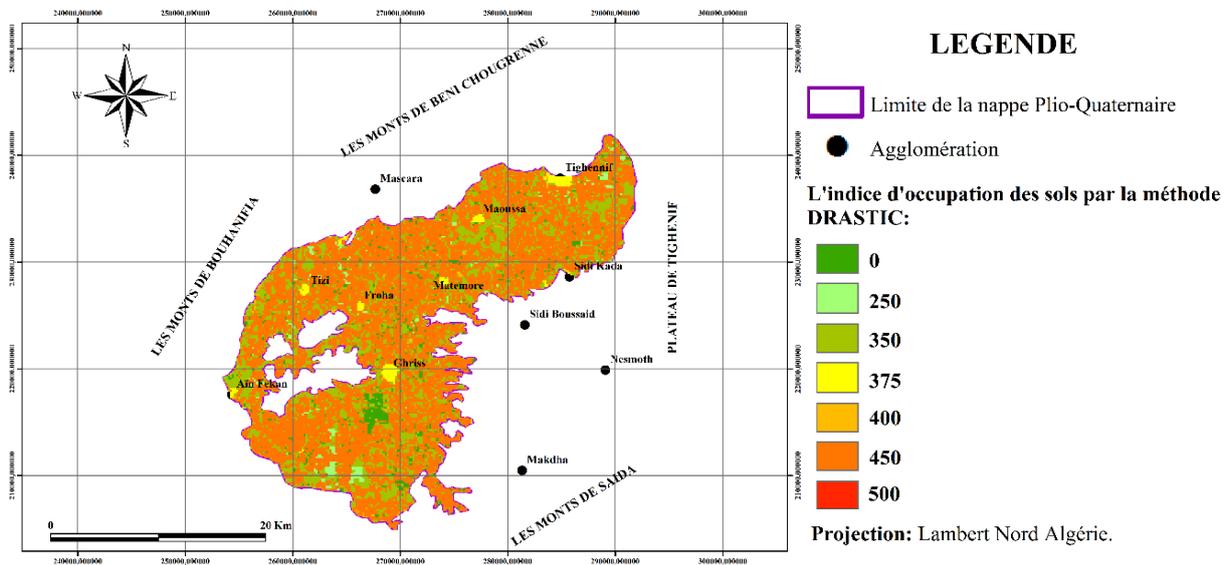


Figure IV. 12. Carte de l'indice d'occupation des sols de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss par la méthode DRASTIC.

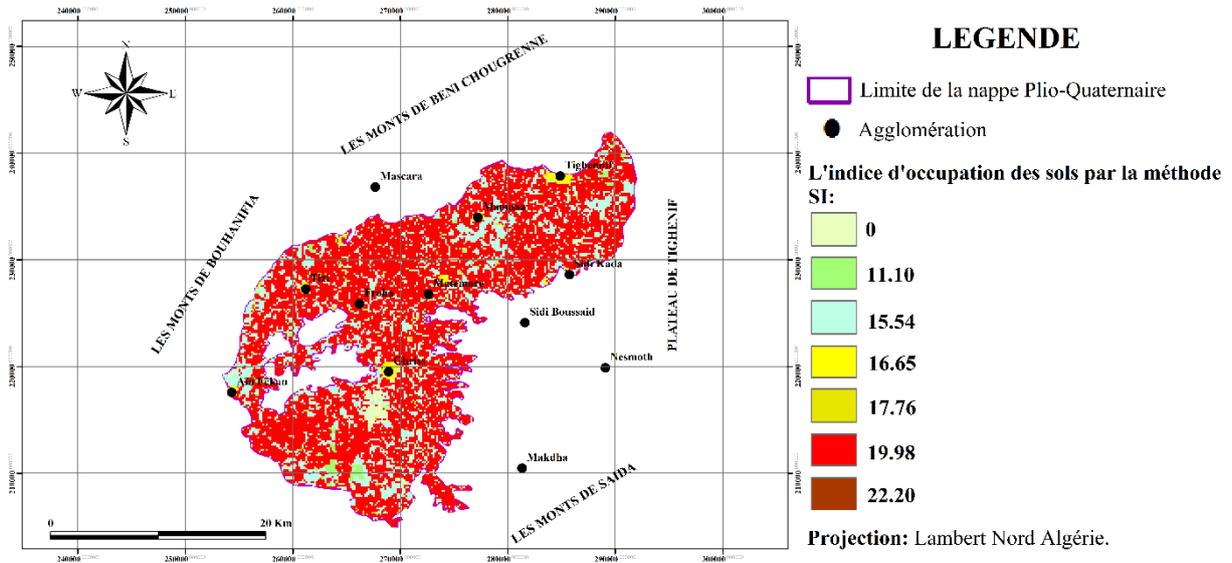


Figure IV. 13. Carte de l'indice d'occupation des sols de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss par la méthode SI.

### IV.2.2 Croisement des cartographiques thématiques

#### IV.2.2.1 Application de la méthode DRASTIC

A partir des indices obtenus, on dresse la carte de vulnérabilité pour la nappe Plio-Quaternaire. Partant de cette classification proposée par Engel et al. (1987), la détermination des indices DRASTIC permet d'obtenir des valeurs comprises entre 71 et 156. Pour notre cas d'étude, on peut observer aisément les trois (3) classes de sensibilité, réparties comme suit (Figures IV.14 et IV.15).

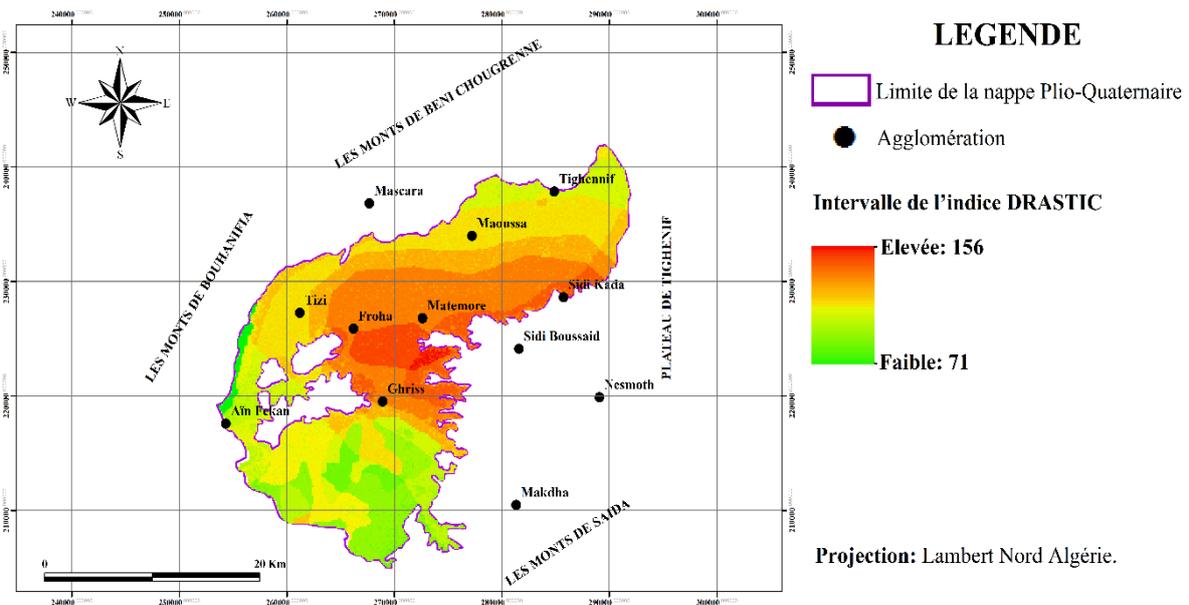


Figure IV. 14. Carte de l'intervalle d'indice DRASTIC dans la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss.

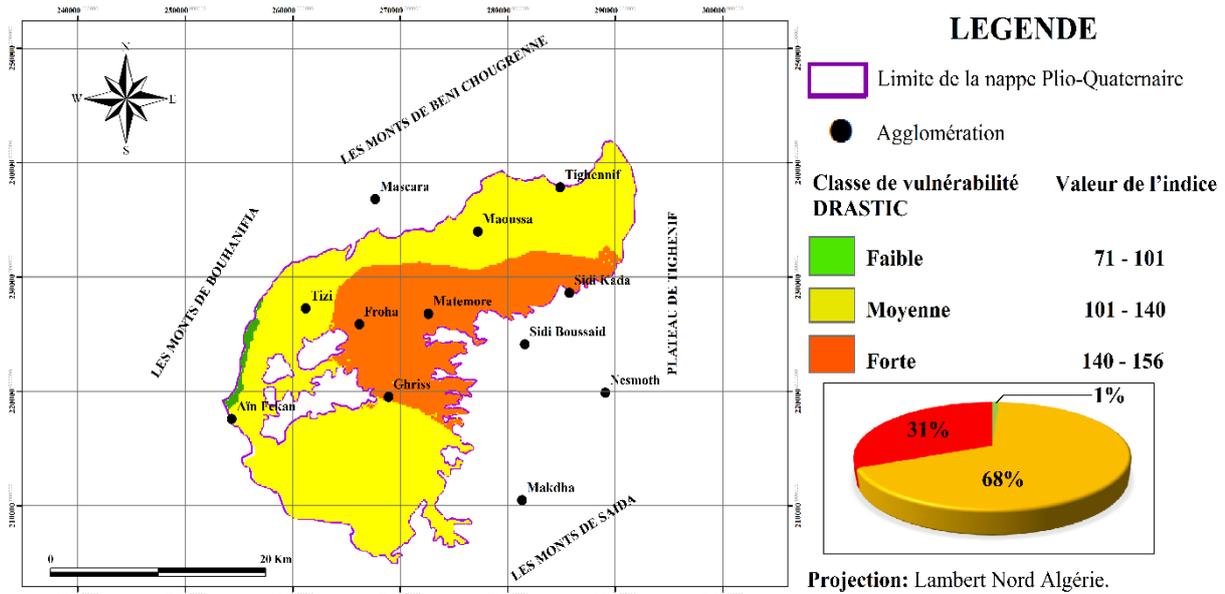


Figure IV. 15. Carte de la vulnérabilité DRASTIC de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss.

- Classe de vulnérabilité "*faible*" sur 1 % de l'aquifère alluvial de la plaine. Les valeurs d'indice varient entre 71 et 101, au sud de la nappe Plio-Quaternaire, soit au nord de la ville d'Ain Fekan.
- Classe de vulnérabilité "*modérée*", occupant 68 % de l'aquifère alluvial de la plaine, avec des valeurs d'indice variant entre 101 et 140. Cette classe se concentre dans la plus grande partie la surface d'aquifère de la plaine, au cercle de direction NNE vers NNS.
- Classe de vulnérabilité "*forte*", s'étendant sur le 31 % de l'aquifère alluviale de la plaine, où les valeurs de ces indices varient entre 140 et 156. Cette classe se trouve aux alentours de la zone centrale de l'aquifère Plio-Quaternaire de la plaine de Ghriss (Matemore, Froha, Ghriss), et au nord de Sidi Kada.

#### IV.2.2.2 Application de la méthode DRASTIC- GOS

Les résultats des indices DRASTIC-GOS s'accordent pour la carte de vulnérabilité dans la zone d'étude en comparaison avec la classification dressée par Engel et al. (1987). Les valeurs obtenues par la méthode DRASTIC-GOS proposée varient entre 74 et 636. Dans la nappe Plio-Quaternaire, on peut trouver quatre (4) classes de vulnérabilité, localisées comme suit : (Figures IV.16 et IV.17)

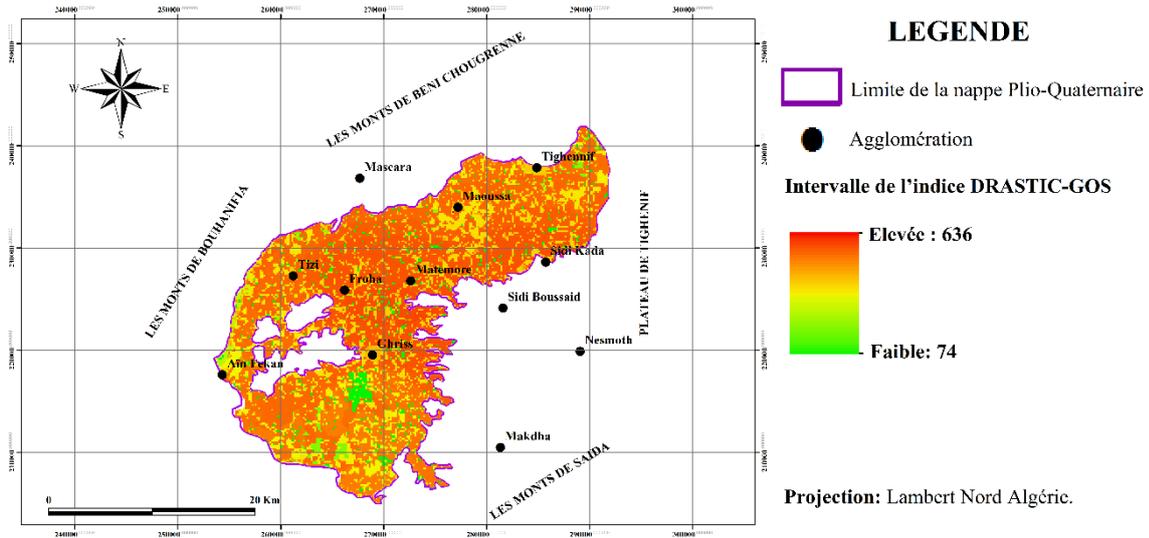


Figure IV. 17. Carte de l'intervalle de l'indice DRASTIC-GOS de la nappe Plio-Quaternaire de la plaine de Ghriss.

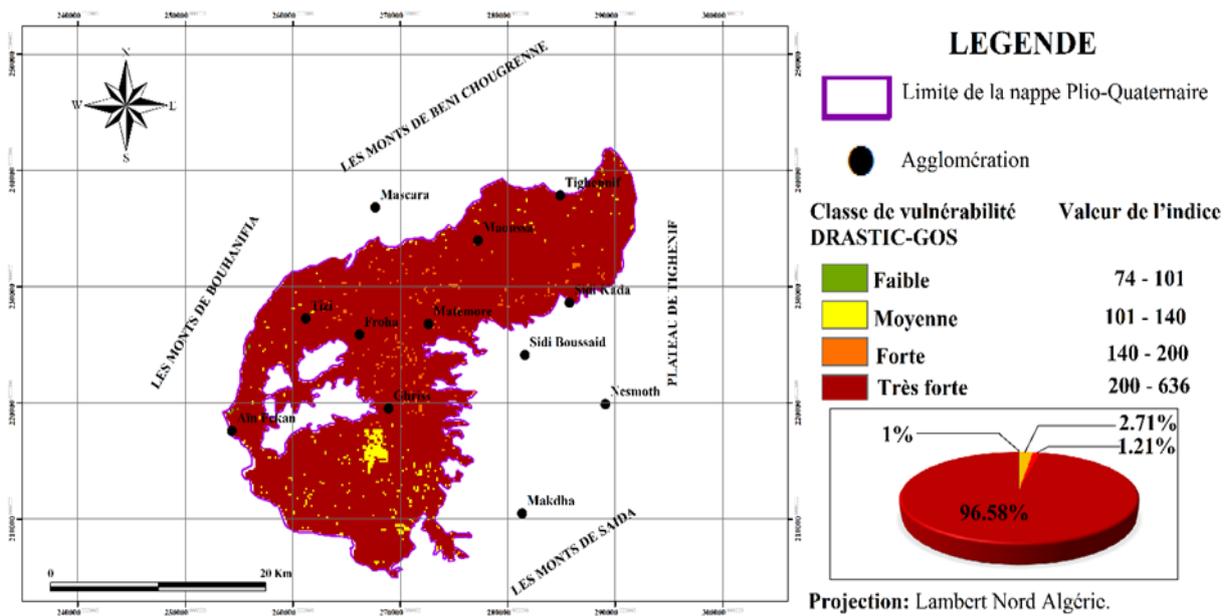


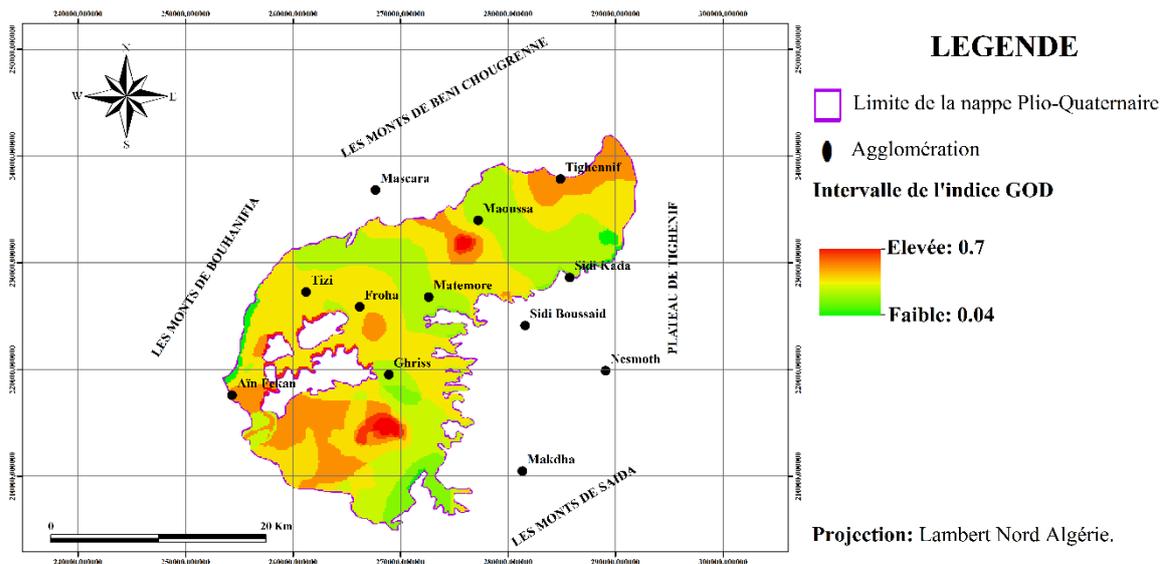
Figure IV. 16. Carte de la vulnérabilité DRASTIC-GOS de la nappe Plio-Quaternaire de la plaine de Ghriss.

- Classe de vulnérabilité "**Faible**", soit de 0.04% de la nappe Plio-Quaternaire de la plaine de Ghriss. Les valeurs de l'indice varient entre 74 et 101. Cette classe est localisée dans quelques parcelles au sud de zone d'étude.
- Classe de vulnérabilité "**Modérée**", couvrant 2.17% de l'aquifère de la plaine de Ghriss. Les valeurs de l'indice compris entre 101 et 140, où cette classe couvre quelques segments de direction NNE et NNO, soit à l'est de la ville Tighennif et au Nord de la ville de Maoussa, aussi qu'au Sud de la zone d'étude.

- Classe de vulnérabilité "**Forte**", couvrant 1.21% de la nappe Plio-Quaternaire de la plaine de Ghriss, où les valeurs de l'indice varient entre 140 et 200. Cette classe se trouve au niveau de certaines parcelles centrales de la zone d'étude et à l'Est de la ville de Sidi Kada.
- Classe de vulnérabilité "**Très forte**" sur 96.58% de la nappe Plio-Quaternaire de la nappe de Ghriss. Les indices de cette classe varient entre 200 et 636. On observe que la totalité de surface d'aquifère Plio-Quaternaire de la plaine de Ghriss est concernée par cette classe de vulnérabilité.

#### IV.2.2.3 Application de la méthode GOD

La méthode GOD estime l'indice de vulnérabilité intrinsèque à la percolation verticale des polluants à travers la zone non saturée. La superposition des trois cartes thématiques permet de sortir des indices environ entre 0.04 et 0,7. La répartition des indices est remarquée dans la carte de sensibilité de la nappe Plio-Quaternaire de la plaine de Ghriss (**Figure IV.18 et IV.19**).



**Figure IV. 18.** Carte de l'intervalle de l'indice GOD de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss.

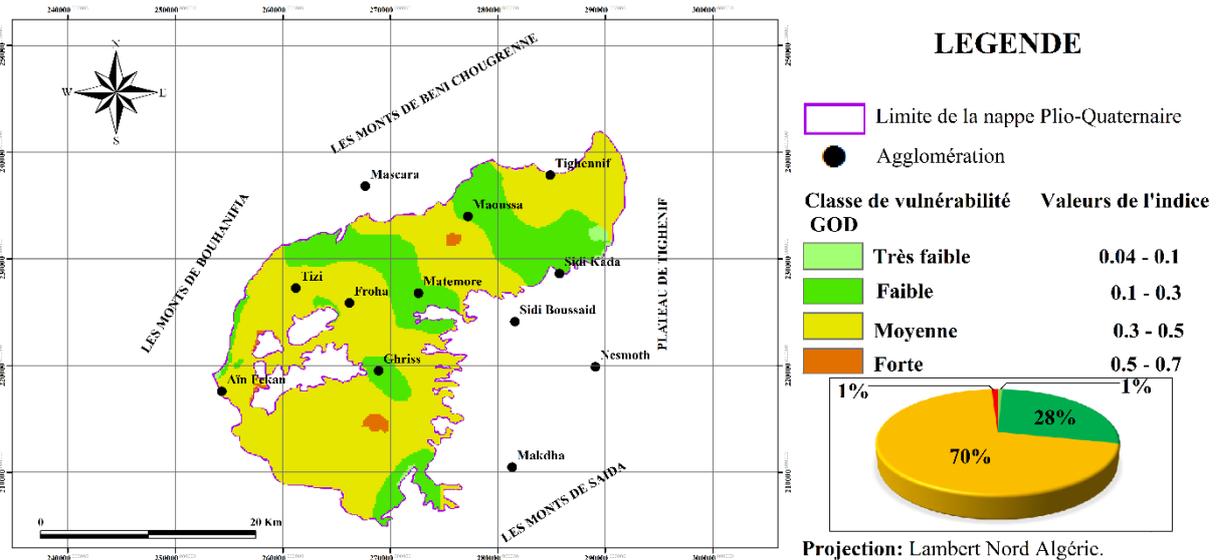


Figure IV. 19. Carte de la vulnérabilité GOD de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss.

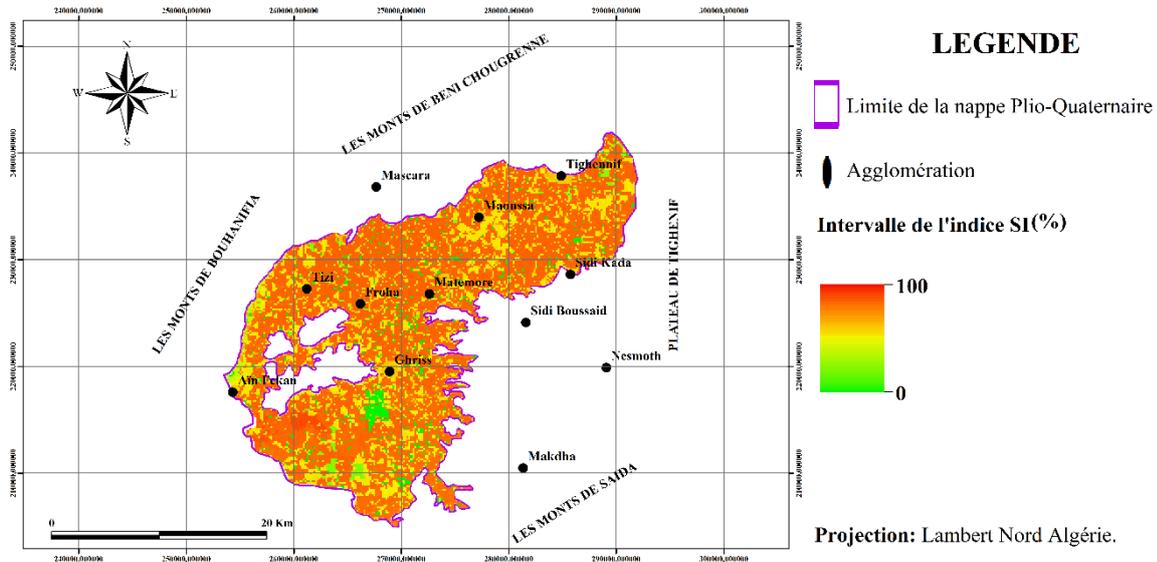
Selon la classification par Bouselsal et al., 2015, on peut observer quatre classes de sensibilité de la nappe Plio-Quaternaire de la plaine de Ghriss localisent comme suit :

- Classe de vulnérabilité très faible. La plantation de cette classe en NNS, soit au Nord des villes de Sidi Kada et Ain Fekan. Occupent 1% de la surface de l'aquifère alluvial de la plaine de Ghriss. Les valeurs d'indice comprises entre 0.04 à 0,1.
- Classe de vulnérabilité faible. Localisé aux alentours de la ville de Ghriss et au Nord vers Est à travers des villes de Maoussa et Matmore. Ainsi qu'au Sud et à l'Ouest de la zone d'étude. Couvrent 28% de la terrasse d'aquifère Plio-Quaternaire. Les valeurs d'indice comprises entre 0,1 et 0.3.
- Classe de vulnérabilité moyenne. Présenté 70% de la totalité de la nappe Plio-Quaternaire de la plaine de Ghriss. La position géographique de cette classe à la direction Nord vers Nord Est, soit de centre de la zone d'étude vers le Sud et l'Ouest. Les valeurs d'indice comprises entre 0,3 à 0,5.
- Classe de vulnérabilité forte à 1% de la surface totale de la nappe phréatique de plaine de Ghriss. Se trouve aux deux points, soit de sud de la ville de Maoussa et sud de la zone d'étude. Les valeurs d'indice comprises entre 0,5 à 0,7.

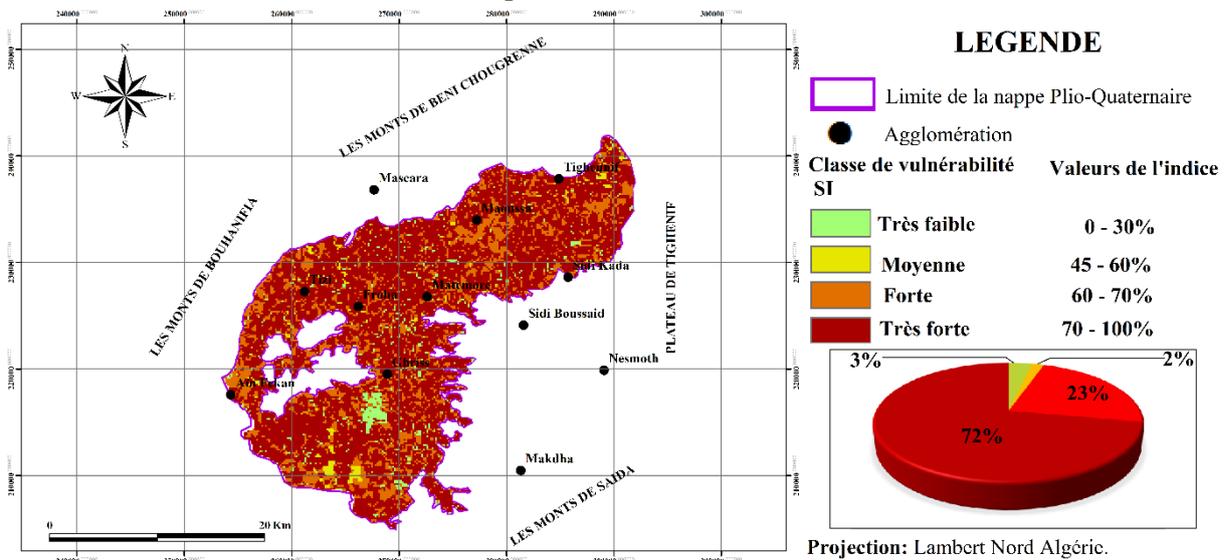
**IV.2.2.4 Application de la méthode SI**

La méthode SI estime le degré de vulnérabilité spécifique verticale à la pollution des eaux Souterraines. La classification des indices SI en pourcentage (Jourda et al., 2007) permet de Sortir des valeurs comprises entre 0 à 100%. Selon des indices présents dans la carte de

Vulnérabilité de la nappe Plio-Quaternaire de la plaine de Ghriss (**Figure IV.20 et IV.21**).



**Figure IV. 20.** Carte de l'intervalle de vulnérabilité de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss par la méthode SI.



**Figure IV. 21.** Carte des classes de vulnérabilité SI de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss.

On peut remarquer facilement quatre (4) classes de vulnérabilité, organisées comme suit :

- Classe de vulnérabilité très faible à 3 % de la surface totale de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss. Les valeurs d'indice varient entre 0 et 30 % et se trouvent beaucoup au Sud de la ville de Ghriss et aux quelques parcelles dans cette direction NNE-NNS de la ville Maoussa.
- Classe de vulnérabilité moyenne sur 2 % de la surface de l'aquifère alluviale de plaine. Les valeurs d'indice varient entre 45 et 60%, de direction NNE, NNO et au Sud de la nappe plio-quaternaire de la plaine de Ghriss.

- Classe de vulnérabilité élevée avec 23% de la surface de la zone d'étude. Cette classe prend des valeurs d'indice comprise entre 60 et 75%, dans la plus grande partie du terrain de la zone d'étude.
- Classe de vulnérabilité très élevée, couvrant 72% de la totalité de l'aquifère Plio-Quaternaire de Ghriss. Les valeurs d'indice varient entre 75% et 100%.

### IV.2.3 Validation des résultats obtenus

#### IV.2.3.1 Cas de la méthode DARSTIC-GOS

La confirmation des cartes de vulnérabilité intrinsèque par la méthode DRASTIC et DRASTIC-GOS dans l'aquifère Plio-Quaternaire de la zone d'étude se fait sur la base des analyses des eaux souterraines, dont les résultats sont superposés sur les cartes de vulnérabilité en vue de confronter avec la réalité du terrain. Pour la validation de la cartographie de la vulnérabilité à la pollution, nous avons opté pour le suivi de la présence des nitrates dans les eaux de la nappe alluviale, sachant que les sources de cette pollution sont essentiellement d'origine anthropique, notamment agricole.

Sur les 36 échantillons d'eau prélevés de puits et forages à travers la plaine de Ghriss, 80.6 % des prélèvements indiquent une concentration des nitrates dans les eaux souterraines comprise entre 10 à 50 mg/l. Ces résultats confirment la vulnérabilité faible à moyenne par rapport aux normes admises de 50 mg/l (JORADP, 2012). Par contre, on remarque que 19.4% des échantillons prélevés présentent des valeurs dépassent le seuil admissible en termes de teneur en nitrates, soit des concentrations compris entre 50 à 70 mg/l. Ces valeurs sont observées dans la zone de forte à très forte vulnérabilité (**Figures IV.22 et IV.23**).

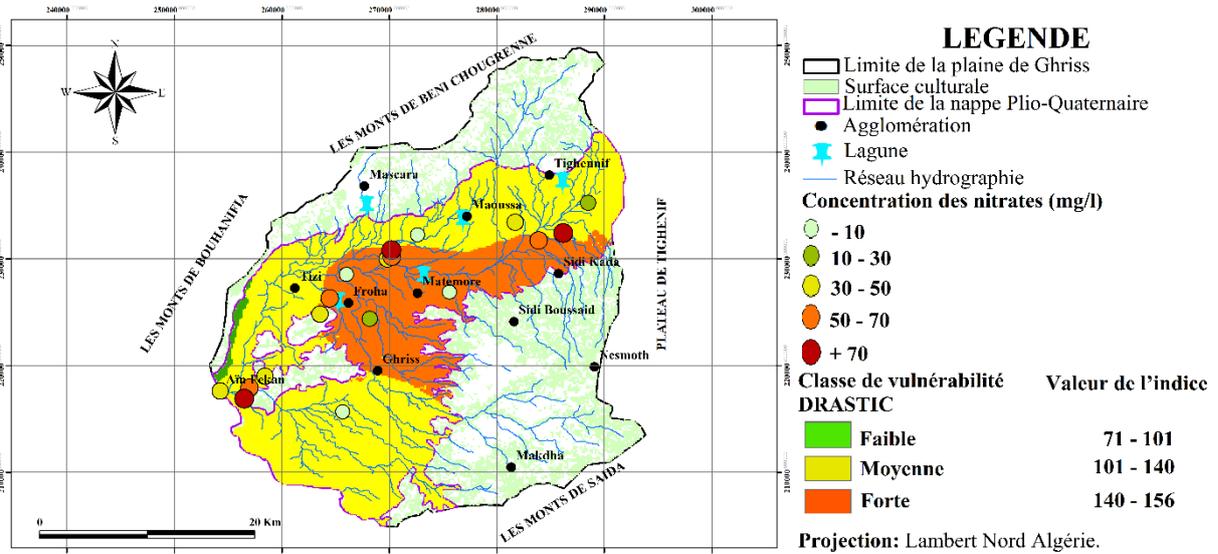


Figure IV. 23. Confirmation des cartes de vulnérabilité intrinsèque de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriiss par la méthode DRASTIC

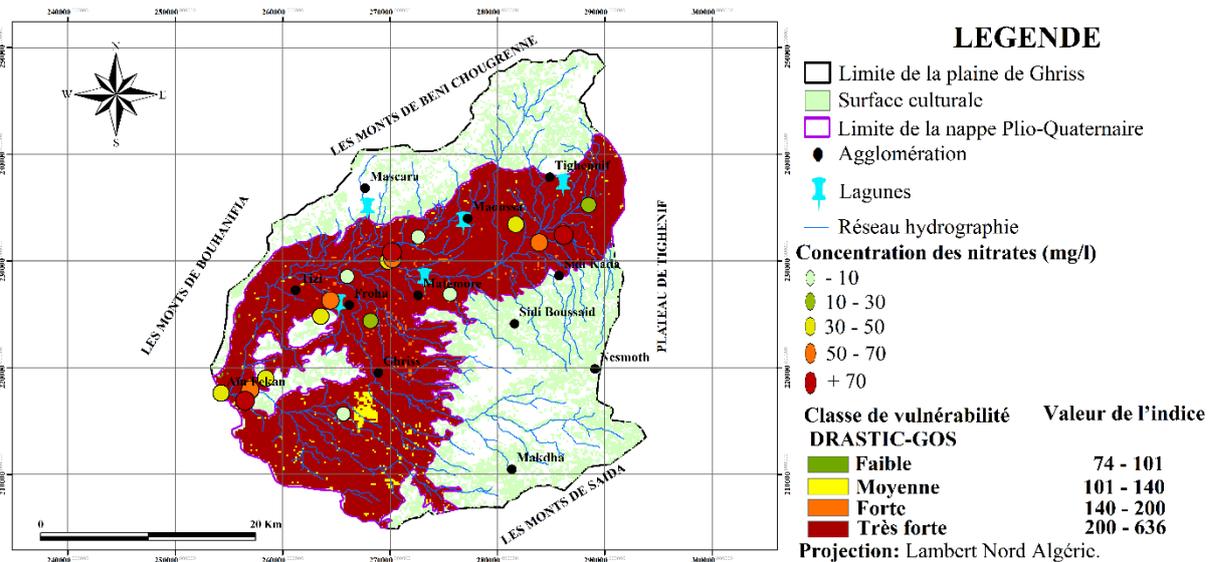


Figure IV. 22. Confirmation des cartes de vulnérabilité intrinsèque de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriiss par la méthode DRASTIC-GOS

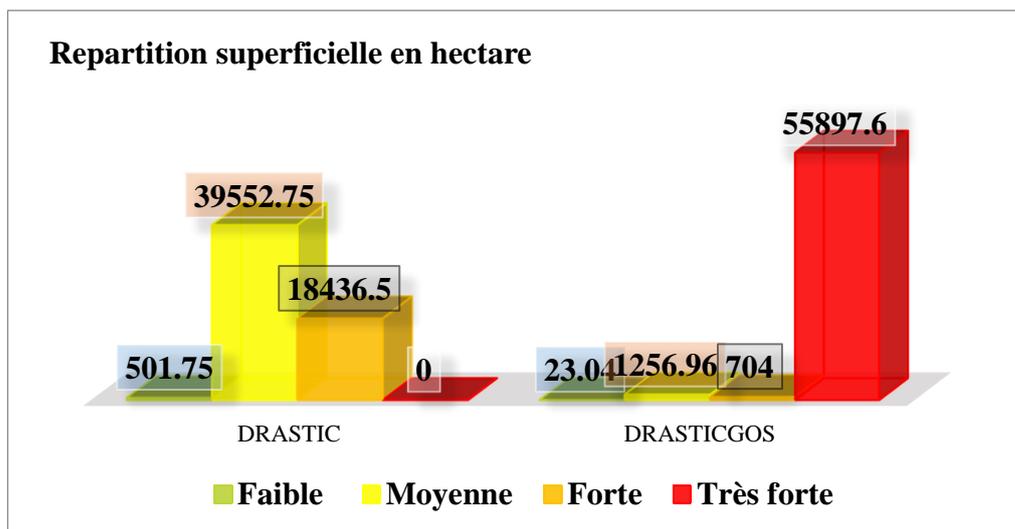
Ainsi, la classification cartographique de la vulnérabilité DRASTIC par superposition aux concentrations d'échantillons met en évidence une telle prédominance des risques de contamination des eaux de consommation humaine, qui se localisent là où la vulnérabilité est élevée, soit au NNE, au NNO et aux alentours de la zone centrale (Froha, Ghriss) de l'aire d'étude.

D'autre part, la répartition cartographique de la vulnérabilité DRASTIC-GOS par le croisement des résultats aux nitrates d'échantillons permet de montrer des risques de dégradation de la

qualité des eaux souterraines l'aquifère Plio-Quaternaire de la plaine de Ghriss, qui sont concernées par les zones à vulnérabilité très élevée.

Cela confirme l'intérêt du recours au couplage de la cartographie aux outils d'analyse des données géospatiales tels que les systèmes d'information géographique (SIG). Cette performance est mise en évidence par la confrontation aux analyses de l'eau à travers un échantillonnage représentatif de l'ensemble de la nappe Plio-Quaternaire de la plaine de Ghriss et des activités polluantes, notamment par les nitrates, considérés comme un véritable danger pour les consommateurs.

Enfin, et compte tenu des résultats d'analyse des eaux des points d'eau, notamment la concentration des nitrates, la comparaison entre les deux méthodes révèle la performance du modèle DRASTIC-GOS, plus proche de la réalité du terrain (**Figure IV.24**).



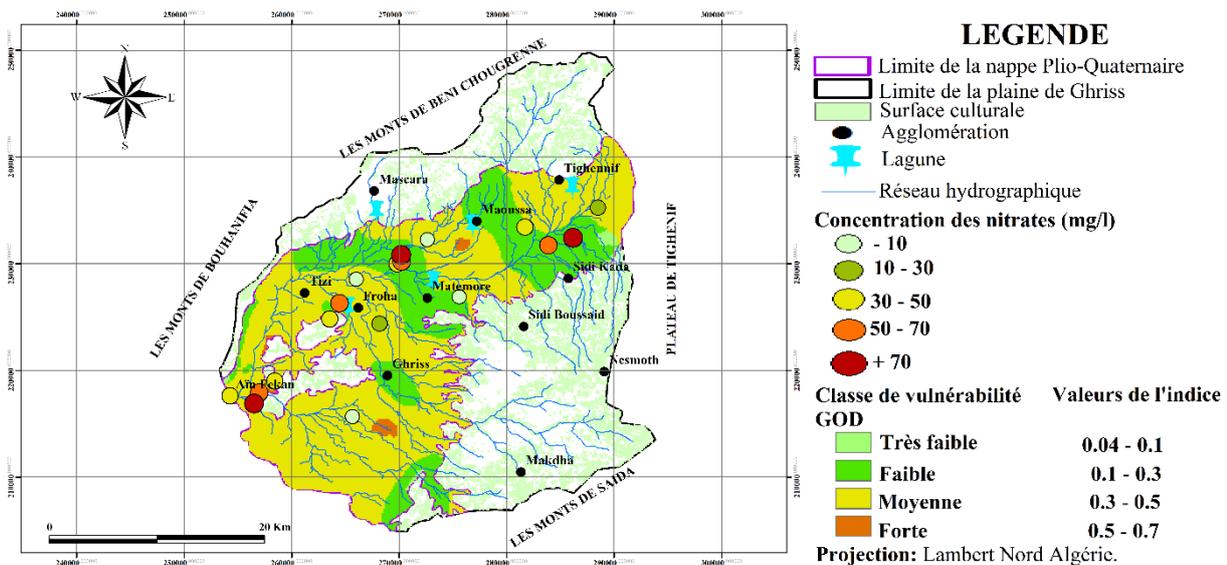
**Figure IV. 24.** Répartition superficielle des différentes classes de vulnérabilité DRASTIC et DRASTIC-GOS

#### IV.2.3.2 Cas de la méthode GOD et SI

Selon la confirmation de la carte de sensibilité d'aquifère Plio-Quaternaire de la plaine de Ghriss par la méthode GOD a réalisé à base de suivre des concentrations en nitrates des eaux souterraines. La répartition des résultats de 32 points d'échantillons dans l'aquifère Plio-Quaternaire de la plaine de Ghriss. La concentration en nitrates des eaux souterraines est dans l'intervalle de 10 à 50 mg/l, soit de 93,75%. Ces points d'eau occupent les classes de vulnérabilité très faible à moyenne et conforme aux normes de 50 mg/l (JORADP, 2012).

Par contre, les points d’eaux concernent les résultats des nitrates supérieurs au seuil des normes. 6,25% des échantillons prélevés sont attribuable à la concentration, qui se situe entre 50 et 70 mg/l. Ces échantillons sont classés à vulnérabilité forte (**Figure IV.25**).

D’autre part, la méthode SI où la validation de la carte de vulnérabilité spécifique verticale de l’aquifère Plio-Quaternaire de la plaine de Ghriss se fait à l’aide des analyses des eaux souterraines. Le croisement des résultats obtenus avec la carte de sensibilité à la pollution, pour comparer avec la réalité du terrain.



**Figure IV.25.** Validation de la vulnérabilité de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss par la méthode GOD.

Dans ce cas, nous validons la cartographie de l’aquifère Plio-Quaternaire de la zone d’étude par la surveillance de la présence des sources de pollution agricole dans les eaux souterraines de la plaine de Ghriss, spécialement aux nitrates. Selon les résultats trouvés sur 32 points d'eau (puits et forages) dans la plaine de Ghriss.

La teneur en nitrates des eaux souterraines est variée entre 10 et 50 mg/l soit de 93,75%. Ces valeurs trouvent une vulnérabilité très faible à moyenne et sont adaptées aux normes de 50 mg/l (JORADP, 2012).

En parallèle, on observe les résultats des nitrates à quelques points d’eau dépassent la limite des normes. La concentration des échantillons comprise entre 50 et 70 mg/l, soit de 6,25% de la totalité des prélèvements. Ces résultats sont remarqués dans les zones de la vulnérabilité forte à très forte (**Figure IV.26**).

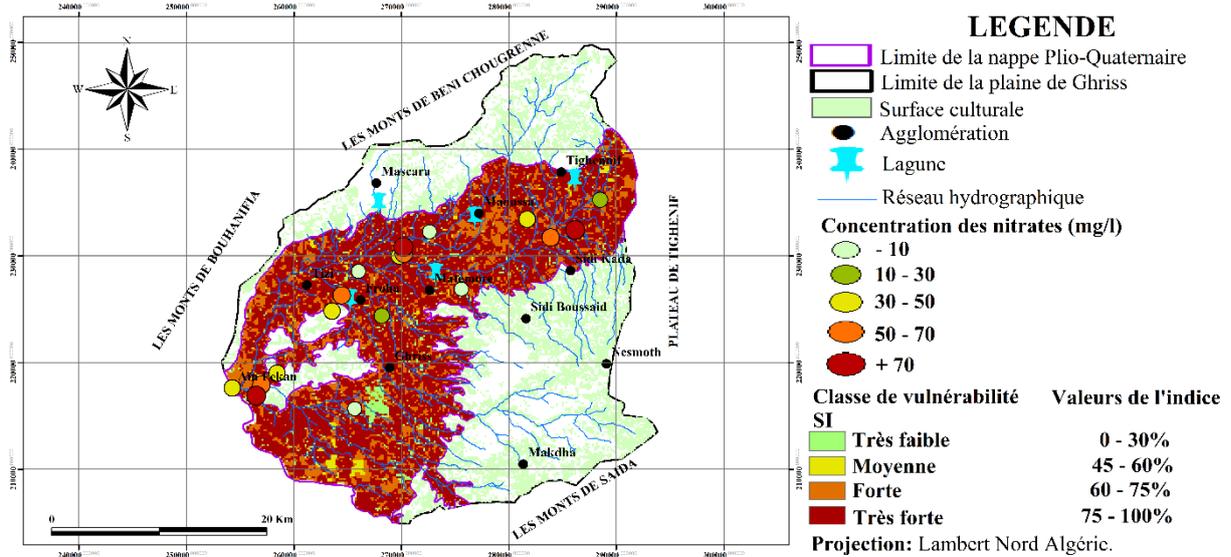


Figure IV. 26. Validation de la vulnérabilité de la nappe Plio-Quaternaire de la plaine de Ghriiss par la méthode SI

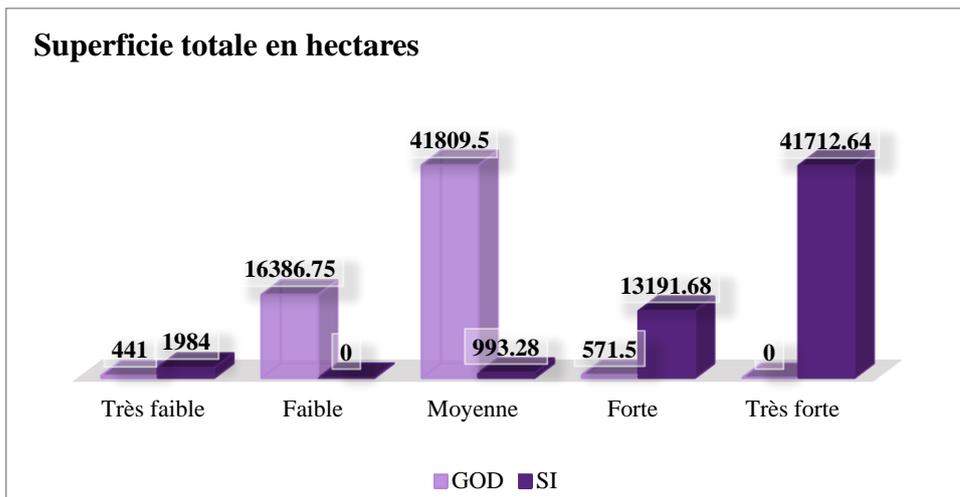


Figure IV. 27. Distribution superficielle entre les différentes catégories de vulnérabilité par les deux méthodes GOD et SI.

Ainsi, la méthode GOD est basée sur trois paramètres, ce qui nous a permis d'avoir une première idée de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines, soit de 98% représentée globalement par les catégories faibles à moyenne de la vulnérabilité d'aquifère Plio-Quaternaire de la plaine de Ghriiss. La carte dressée par la méthode GOD ne représente qu'une partie de la répartition des concentrations d'ions nitrate mesurées dans les points eaux souterraines en 2023.

Quant à La méthode d'indice susceptibilité (SI), qui prend aussi en compte l'occupation du sol, attribue à la zone d'étude une forte dispersion verticale à la pollution des eaux souterraines à travers l'aquifère Plio-Quaternaire de la plaine de Ghriiss, où le degré est fort à très fort, soit de

95% de la nappe Plio-Quaternaire de la plaine. La carte établie par la méthode SI correspond en partie seulement à la répartition des concentrations des ions nitrate mesurées dans les eaux des forages et puits en 2023.

Ainsi, la comparaison des deux méthodes de cartographie de la vulnérabilité (GOD et SI) indique que la méthode GOD s'applique seulement pour déterminer pollution qui atteint éventuellement la zone non saturée de la nappe Plio-Quaternaire, alors que la méthode SI donne une image des phénomènes de pollution susceptible de se produire pour telle ou telle occupation du sol, d'où son intérêt pour une estimation plus précise des zones vulnérables à la pollution des nappes d'eaux souterraines par les nitrates.

L'étude de la variabilité pluviométrique sur le bassin d'Oued Fekan durant les dernières décennies a illustré une tendance à la baisse de la pluviométrie depuis les années 70/80, qui s'est sévèrement aggravée depuis 1981. Cette diminution des moyennes pluviométriques annuelles se poursuit jusqu'en 2004. Ce constat rejoint celui établi par de nombreux auteurs qui ont décelé une rupture dans le régime pluviométrique du Nord-Ouest algérien depuis 1972.

Le modèle réalisé est un outil exploitable par les gestionnaires de la ressource en eau afin d'estimer un débit d'exploitation durable de la nappe Plio-Quaternaire. Enfin, les eaux souterraines de la plaine de Ghriss doivent, par conséquent, être gérées de manière à éviter toute surexploitation.

### IV.3 Résultats du test de conformité

Le calcul du coefficient de Kappa (K) montre que le test est fiable, car la valeur de Kappa est positive entre (GOD & DRASTIC) et (SI & DRASTIC-GOS), donc interprétable.

D'après l'application de test de Kappa sur les classes indices de vulnérabilité par les méthodes GOD et DRASTIC. Le coefficient K est compris entre 0,00 et 0,20 en se référant à l'échelle d'interprétation de Kappa (Bernard, 1993). Il correspond à un " Faible accord ", tandis que l'accord est faible avec  $H_0$  qui est égal à 0,42. Cet accord confirme la différence d'indice observée au niveau des cartes de vulnérabilité (**C.f annexe J**).

D'autre part, l'application de test de Kappa sur les classes indices de vulnérabilité par les méthodes SI et DRASTIC-GOS. Le coefficient K est compris entre 0,00 et 0,20 en se référant à l'échelle d'interprétation de Kappa (Bernard, 1993 in Murat., 2000). Il correspond à un " Faible accord ", tandis que l'accord est faible avec  $H_0$  qui est égal à 0,25. Cet accord confirme la différence d'indice observée au niveau des cartes de vulnérabilité (**C.f. annexe K**).

## IV.4 Analyse comparative des méthodes

L'annexe (C.f annexe L) associe la répartition des valeurs de teneurs en nitrates en fonction de la méthode. À partir de ce tableau, la répartition des concentrations en nitrates est la suivante :

### IV.4.1 Méthode DRASTIC

D'après les résultats de la méthode de vulnérabilité intrinsèque DRASTIC, on se rend compte que cinq (5) valeurs ont une teneur en nitrate à (-10 mg/l), dont 3 (soit 60% de ces valeurs) corrént avec des zones de vulnérabilité moyenne et 2 (soit 40 % de ces valeurs) avec les zones de vulnérabilité forte.

Quatorze (14) valeurs de concentration sont comprises entre 10 et 30 mg/l par 11 (soit 78.57% de ses valeurs) qui coïncident par les zones de vulnérabilité moyenne et 3 (soit 21.43% de ces valeurs) qui coïncident des zones de vulnérabilité forte. Huit (08) valeurs ont des concentrations environ entre (30 à 50 mg/l), dont 6 (75% soit de ces valeurs) corrént les zones de vulnérabilité moyenne et 2 (25% soit de ces valeurs) corrént les zones de vulnérabilité forte.

Trois (03) valeurs oscillant entre 50 et 70 mg/l, avec 1 (33.3%) de ces valeurs associée les zones de vulnérabilité moyenne et 2 (66.7%) de ces valeurs associées les zones de vulnérabilité.

Enfin, quatre (04) valeurs concernent les teneurs en nitrate à 70 mg/l et plus. Là où 3(57% soit de ces valeurs) coïncident, les zones de vulnérabilités moyenne, et 1 (25% soit de ces valeurs) coïncide, les zones de vulnérabilités fortes.

### IV.4.2 Méthode DRASTIC-GOS

Les résultats par la méthode de vulnérabilité intrinsèque DRASTIC-GOS, montrent que cinq (5) valeurs ont une teneur en nitrate à (-10 mg/l), dont 1 (20 % de ces valeurs) corréle avec des zones de vulnérabilité moyenne et 2 (40 % de ces valeurs) avec les zones de vulnérabilité forte et 2 (40 % des valeurs) avec les zones de vulnérabilité très forte.

Quatorze (14) valeurs de concentration sont comprises entre 10 et 30 mg/l pour 3 (21.43% des valeurs), coïncidant avec les zones de vulnérabilité moyenne, 1 (7.14% des valeurs) coïncide des zones de vulnérabilité forte et 10 (71.43 % des valeurs) avec les zones de vulnérabilité très forte.

Huit (08) valeurs ont des concentrations d'intervalle environ entre (30 à 50 mg/l), dont 1 (12.5% des valeurs) qui corrèle avec les zones de vulnérabilité moyenne et 7 (87.5% des valeurs) corrént avec les zones de vulnérabilité très forte.

Trois (03) valeurs oscillant dans l'intervalle (50 et 70 mg/l) de nitrate, soit un taux de corrélation de 100%, associé aux zones de vulnérabilité très forte.

Quatre (04) valeurs concernent les teneurs en nitrate à 70 mg/l et plus. Là où 1 (25% des valeurs) coïncident les zones de vulnérabilité moyenne, 2 (50% des valeurs) coïncident avec les zones de vulnérabilités fortes et 1 (25% des valeurs) coïncident avec les zones de vulnérabilité très forte.

#### **IV.4.3 Méthode SI**

Selon les résultats de la méthode de vulnérabilité spécifique SI, on se rend compte que cinq (5) valeurs ont teneur en nitrate à (-10 mg/l), dont 1 (soit 20 % de ces valeurs) corrèle avec des zones de vulnérabilité très faible et 3 (60% des valeurs) avec les zones de vulnérabilité forte, en plus de 1 (soit 20 % des valeurs) avec les zones de vulnérabilité très forte.

Quatorze (14) valeurs de concentration sont comprises entre 10 et 30 mg/l par 2 (soit 14.29% des valeurs) qui coïncident par les zones de vulnérabilité très faible, 1 (7.14 des valeurs) coïncident avec des zones de vulnérabilité moyenne, 6 (42.86% des valeurs) coïncident des zones de vulnérabilité forte et 5 (35.71 % des valeurs) coïncident avec les zones de vulnérabilité très forte.

Huit (08) valeurs ont des concentrations d'intervalle environ entre (30 à 50 mg/l), dont 1 (12.5% des valeurs) corrèle les zones de vulnérabilité très faible et forte et 6 (75% des valeurs) corrént les zones de vulnérabilité très forte.

Trois (03) valeurs oscillant ente (50 et 70 mg/l) avec 1 (33.33% soit de ces valeurs) associée les zones de vulnérabilité forte et 2 (66.67% soit de ces valeurs) associée les zones de vulnérabilité très forte. Quatre (04) valeurs concernent les teneurs en nitrate à 70 mg/l et plus. Là où 2 (50% de ces valeurs) coïncident les zones de vulnérabilité forte et très forte.

#### **IV.4.4 Méthode GOD**

Selon la méthode de vulnérabilité spécifique GOD, on se rend compte que cinq (5) valeurs ont une teneur en nitrate à (-10 mg/l), dont 2 (soit 40% de ces valeurs) corrént avec des zones de vulnérabilité faible et 3 (soit de 60% de ces valeurs) avec les zones de vulnérabilité moyenne.

Quatorze (14) valeurs de concentration sont comprises entre 10 et 30 mg/l (1, soit 7.14% de ces valeurs) qui coïncident par les zones de vulnérabilité très faible à forte ; 3 (soit 21.43% de ces valeurs) qui corrélerent avec des zones de vulnérabilité faible ; 9 (soit 64.29% de ces valeurs) qui coïncident des zones de vulnérabilité moyenne.

Huit (08) valeurs ont des concentrations environ entre (30 à 50 mg/l), dont 1 (75% soit de ces valeurs) qui corrélerent les zones de vulnérabilité moyenne et 2 (25% soit de ces valeurs) corrélerent les zones de vulnérabilité forte.

Trois (03) valeurs oscillant entre 50 et 70 mg/l, avec 1 (33.3%) de ces valeurs associées aux zones de vulnérabilité moyenne et 2 (66.7%) de ces valeurs associées aux zones de vulnérabilité.

Quatre (04) valeurs concernent les teneurs en nitrate à 70 mg/l et plus. Là où 3(57% soit de ces valeurs) coïncident les zones de vulnérabilités sont moyennes, et 1 (25% de ces valeurs) coïncident, les zones de vulnérabilités sont fortes.

#### IV.4.5 Éléments de comparaison

En scrutant de près les taux de coïncidence globaux, on observe que la méthode de vulnérabilité DRASTIC révèle un taux de coïncidence de 73.53% (25 valeurs sur 34), présente comme suit : Un taux de correspondance de 60 % se produit entre les concentrations de nitrates à (-10 mg/l) et les zones à vulnérabilité moyenne, un taux de coïncidence de 78,57 % entre les niveaux de nitrates de 10 à 30 mg/l et les zones à moyenne vulnérabilité.

Une corrélation de 75% ente les teneurs en nitrate d'intervalle variant entre 30 à 50mg/l et les zones de vulnérabilité moyenne, d'autre corrélation de 66.67% ente les concentrations de nitrate variant entre 50 et 70mg/l et les zones de vulnérabilité forte ; et finalement, un taux de corrélation de 75% entre les concentrations de nitrates de plus de 70mg/l et les zones de sensibilité moyenne.

La méthode de vulnérabilité DRASTIC-GOS montre un taux de coïncidence de 70.59% (24 valeurs sur 34), réparti comme suit : un taux de corrélation de 40% entre les concentrations de nitrate à (-10 mg/l) et les zones de vulnérabilité forte à très forte, une coïncidence de 71.43% entre les concentrations de nitrates comprises entre (10 - 30 mg/l).

Les zones à vulnérabilité très forte présentent une coïncidence de 87.5 % entre les concentrations de nitrates varient entre 30 et 50 mg/l et les zones de vulnérabilité très forte; une

d'autre coïncidence de 100% entre les concentrations de nitrates comprises entre 50 et 70 mg/l et les zones de vulnérabilité très forte ; et enfin un taux de coïncidence de 50% entre les concentrations de nitrates de plus de 70 mg/l et les zones de vulnérabilité forte.

La méthode de vulnérabilité SI indique quant à elle un taux de corrélation de 55.88% (19 valeurs sur 34) présenté comme suit : un taux de coïncidence de 60% entre les teneurs en nitrate à (-10 mg/l) et les zone de vulnérabilité forte, un taux de coïncidence de 42,86% entre les niveaux de nitrates de 10 à 30 mg/l et les zones à forte vulnérabilité.

Une corrélation de 75% ente les teneurs en nitrate d'intervalle variant entre 30 à 50 mg/l et les zone de vulnérabilité très forte ; d'autres corrélation de 66.67% ente les concentrations de nitrate varient entre 50 et 70mg/l et les zones de vulnérabilité très forte ; et dernièrement, un taux de corrélation de 50% entre les concentrations de nitrates de plus que 70mg/l et les zones de sensibilité forte à très forte.

La méthode GOD révèle un taux de coïncidence de 61.76% (21 valeurs sur 34), présente comme suit : Un taux de correspondance de 60 % se produit entre les concentrations de nitrates à (-10 mg/l) et les zones à vulnérabilité moyenne, un taux de coïncidence de 64.28 % entre les niveaux de nitrates de 10 à 30 mg/l et les zones à vulnérabilité moyenne.

Une corrélation de 62.5% ente les teneurs en nitrate d'intervalle varie entre 30 à 50mg/l et les zone de vulnérabilité moyenne, d'autre corrélation de 66.67% ente les concentrations de nitrate varient entre 50 et 70mg/l et les zones de vulnérabilité moyenne ; et enfin, un taux de corrélation de 50% entre les concentrations de nitrates plus de 70mg/l et les zones de sensibilité faible à moyenne.

La méthode DRASTIC-GOS présente un taux de coïncidence très élevé en raison de sa sensibilité intrinsèque à la pollution agricole. Il a été conçu en tenant compte des propriétés chimiques du nitrate, ainsi que des relations qui existent entre ce polluant et les différents composants qui affectent de manière significative la vulnérabilité spécifique et intrinsèque.

La méthode DRASTIC présente un taux élevé de coïncidence mais moindre que la méthode DRASTIC-GOS, Car Elle est une méthode de vulnérabilité intrinsèque des aquifère à la propagation verticale de la pollution et ne prend pas en considération la nature des polluants, où les facteurs régissant la vulnérabilité spécifique, comme l'occupation des sols ainsi que des paramètres physiques tel que le type d'aquifère.

La méthode SI contient un taux faible de corrélation, ce qui peut s'expliquer par le fait que cette méthode est spécifique du suivi des pollutions d'origine agricole. Elle, est une méthode de vulnérabilité spécifique qui ne tient compte, ni des facteurs globaux à nature physique d'aquifère.

La méthode GOD présente un taux très faible de corrélation parce qu'elle suit le transport des polluant à travers la zone non saturé. Ce dernier se classe comme une méthode de vulnérabilité spécifique qui ne concerne pas tous les composants de la vulnérabilité intrinsèque et spécifique.

Néanmoins, les taux de coïncidence sont convenables pour les deux méthodes usagées, avec au moins 75% et prouvent leur efficacité à cartographier la vulnérabilité à la pollution. Cependant, la méthode DRASTICGOS permet une évaluation plus précise de la vulnérabilité causée par les nitrates.

#### **IV.5 Conclusion**

Les cartes fournies par la méthode DRASTIC (Engel et al., 1996) indiquent la possibilité d'une forte pollution au niveau de la partie centrale de la nappe Plio-Quaternaire de la plaine de Ghriss, là où un forçage des pompages est exercé par les irrigants.

L'application des sept (7) cartes thématiques, confrontées aux cartes des indices DRASTIC reflète une forte proportion des classes à vulnérabilité "modérée" (68%), située dans la direction du NNE vers le NNS.

La classe à vulnérabilité "forte" (31%) correspond à la zone Est et la zone Centrale de la plaine aux alentours de Froha, Ghriss, Matmore et au nord de Sidi Kada. Enfin celle à vulnérabilité "faible" (1%), se trouve dans le sud de la nappe Plio-Quaternaire et traverse le nord de la ville d'Ain Fekan.

Quant aux cartes obtenues par l'application de la nouvelle méthode proposée "DRASTIC-GOS", les risques de vulnérabilité à la pollution concernent la quasi-totalité de l'aquifère alluvial plio-quaternaire de la plaine de Ghriss, là où les cultures extensives sont pratiquées par les irrigants à partir d'un forçage exercé sur les eaux souterraines.

En effet, le croisement des neufs (9) cartes thématiques, selon les indices d'Engel et al. (1996) reflète un important pourcentage des classes présentant une vulnérabilité "très élevée" (96.58%), localisé sur la majeure partie de la nappe alluviale de la zone d'étude.

La classe à vulnérabilité "modérée " (2.17%) correspond à quelques parcelles à travers les sous-zones NNE, NNO et Sud de la plaine. La classe à vulnérabilité "faible" (0.04%), se situe au niveau de quelques segments au Sud de la plaine.

Enfin, la proportion négligeable par des classes à vulnérabilité "forte" (0.04%), se trouve au centre de la zone d'étude. Cette pollution est d'origine assez diverse, mais en premier lieu ce sont essentiellement les activités agricoles de par leurs modes d'intensification et les conséquences de la sur-utilisation des produits azotés, lessivés et drainés vers la nappe.

En second lieu, les faibles technologies épuratoires des eaux usées conduisent à une forte exposition des aquifères à la pollution hydrique, comme le confirment les performances épuratoires de la majorité des stations d'épuration existantes à travers la plaine de Ghriss.

La validation par l'analyse des eaux souterraines, à travers les concentrations du paramètre nitrate de certains puits, a permis de mettre en évidence les cartes de vulnérabilité par la méthode DRASTIC et plus particulièrement la méthode DRASTIC-GOS.

En effet, les résultats obtenus s'accordent à ce que la concentration de la teneur des nitrates soit conforme aux normes d'irrigation, mais pas à celle des eaux potables. D'où l'intérêt de la démarche de la cartographie de la vulnérabilité DRASTIC-GOS, beaucoup plus pertinente. Toutefois, cette dernière nécessite des données multi-sources sur d'importantes étendues géospatiales aboutissant à des résultats performants.

Comme recommandations, il est impératif de procéder à une gestion efficiente et intégrée des ressources en eau souterraines en vue d'assurer une protection contre les effets indésirables, particulièrement contre les menaces d'une pollution irréversible par les nitrates.

En effet, face à l'encouragement tout azimut d'une agriculture intensive, largement soutenue par les pouvoirs publics, il est vivement recommandé d'instaurer un contrôle rigoureux de l'utilisation des engrais azotés.

De même, après le prétraitement, le traitement primaire et le traitement secondaire, il est suggéré d'introduire un traitement tertiaire pour améliorer la qualité de l'eau traitée, notamment par l'application des techniques des rayons UV et des filtres à tambour, et ce, dans la perspective d'une meilleure élimination des polluants non biodégradables, tels que les nitrates.

Enfin, il est envisagé dans un avenir proche d'élargir cette vulnérabilité de la nappe de Ghriss à la pollution des nitrates par une gamme de polluants plus large et complète, tout en veillant à l'augmentation des points de contrôles dans la mesure où les gestionnaires de la nappe le permettent.

# **CONCLUSION GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE

La plaine de Ghriss couvre une superficie très importante du bassin versant de la Macta, soit de 605 Km<sup>2</sup>, renfermant différentes structures géologiques. Le cadre hydrogéologique de la zone d'étude est caractérisé par la réserve d'eau souterraine selon la formule des nappes superposés et assermenté, dont le plus exposé à la pollution est bien l'aquifère Plio-Quaternaire, occupant la partie active de la plaine.

Cette dernière est basée sur l'irrigation d'un agrosystème riche et varié par le recours à l'exploitation des ressources en eaux souterraines des différentes nappes adjacentes.

L'usage excessif des engrais chimiques et autres produits chimiques de fertilisation causent une dégradation des eaux souterraines suite à la percolation des polluants à travers la zone non saturée.

A cette activité hydro-agricole s'ajoute une démographie remarquable dans des petites et moyennes villes, aux rejets d'eau usée non traitées. Par ailleurs, le faible niveau de recharge naturelle des nappes et le forçage des nappes génèrent un rabattement du niveau piézométrique à travers des différents types d'aquifères de la plaine.

Face à cette problématique multicritère notre travail dans cette étude a consisté dans un premier temps à acquérir une base de données liées aux paramètres géologiques, hydrogéologiques et naturels, tels que les données climatiques et l'occupation du sol de cet agrosystème de Ghriss.

Le but recherché s'articule sur la détermination du niveau de vulnérabilité de la nappe Plio-Quaternaire, ce qui nous a prévalu la nécessité du recours à l'application des modèles hydrogéologique ayant montré leurs preuves, tels que DRASTIC, GOD et SI. A ce titre, nous avons utilisé une série de couplage deux à deux ainsi qu'une combinaison avec l'outil de cartographie numérique (SIG).

A titre de résultat, le croisement des cartes thématiques spatiales a donné des classes de vulnérabilité variables les unes par rapport aux autres. Par le recours au modèle universelle DRASTIC on a fait ressortir trois catégories de vulnérabilité (faible, moyenne et forte).

D'autre part, le couplage entre la méthode GOD et SI a permis de mettre en évidence l'émergence des classes de vulnérabilité de la pollution des eaux souterraines (très forte, forte, moyenne, faible et très faible).

Par contre, le modèle proposé DRASTIC-GOS nous a permis d'obtenir quatre (4) classes de sensibilité (faible, moyenne, forte et très forte).

La validation des cartes de vulnérabilité, basée sur les recherches des sources des pollutions a mis en évidence la validation des quatre modèles utilisés. A titre indicatif le modèle DRASTIC, indique une forte vulnérabilité, soit de 31% de la totalité de la plaine alors que les catégories faibles à moyenne couvrent 68 à 1 % de l'aquifère plio-quadernaire de la plaine de Ghriss.

Quant à la validation des résultats obtenus par le modèle GOD indique que les classes fortes, très faible à faible ont recouvert 1 à 28% de l'aquifère Plio-Quadernaire de la plaine de Ghriss et 70% pour les zones à catégorie moyenne.

La méthode spécifique (SI) à la pollution agricole des eaux souterraines a classé 72% de la surface totale par le degré très élevé. En d'autres termes, l'étude de vérification donne une aide sur la confirmation des cartes de vulnérabilité telles que le test conformité.

Par contre, la méthode proposée par l'application du modèle DRASTIC-GOS indique quatre classes distinctes : faible (0.04%), modéré (2.17%), forte (1.21%) et très forte (96.58%), ce qui nous laissent prédire que désormais ce dernier constitue un outil performant et efficace pour la cartographie de la vulnérabilité dans le cas de notre région d'étude.

En termes de perspectives, et compte tenu de la confirmation par corrélation entre les classes des différents résultats obtenus par ces modèles hydrogéologiques, il est vivement souhaité de se pencher d'avantage sur le développement de ce modèle DRASTIC-GOS répondant parfaitement à la problématique de cette thèse afin réduire, voire d'éradiquer le risque de la pollution d'origine agricole à travers cet agrosystème régionale de la plaine de Ghriss.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

Abdelbaki, C., 2017. Dossier d'inscription en vue de l'habilitation universitaire, option Hydraulique, université Abou Bakr Belkaid de Telemcen. Page 18.

Agence Internationale de l'Énergie Atomique., 2023. Gestion des ressources en eau. P.1.

Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH)., 2016. Données piézométriques, de la plaine de Ghriss wilaya de Mascara. Rapport de la Direction Régionale Ouest d'Oran. Algérie.

Albinet, M et Margat, J., 1970. Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraines. Bulletin de BRGM (deuxième série), section III, No 4, page 13-22

Allechy,B., Lasm,T., Youan,T., Yao Kouadio, A.F., Kouakou,O.S., Oka Koua A.R., Baka Derving., De Lasm, O. Z., 2016. Cartographie De La Vulnérabilité À La Pollution Des Aquifères Du Socle Précambrien : Cas De La Région D'oumé (Centre-Ouest De La Côte D'ivoire), European Scientific Journal, vol.12, No.20, doi: 10.19044/esj.2016.v12, n.20, page 374-393.

Aller, L., Bennett, T., Lehr, J.H., Petty, R et Hackett, G., 1987. DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. EPA/600 2-87035, page 1-641.

Baali, F., 2007. Contribution à l'étude hydrogéologique, hydrochimique et Vulnérabilité d'un système aquifère karstique en zone semi -aride. Cas du plateau de Chéria N. E. Algérien, thèse

Babiker IS, Mohamed MAA, Hiyama T, Kato K. Assessment of groundwater contamination by nitrate leaching from intensive vegetable cultivation using geographical information system. Environment International 2004 ; 29 : 1009-17.

Batchi M., Al Karkouri, J., Fenjiro, I., et El Maaqili, M., 2017. Étude comparative de deux modèles (DRASTIC et SI) pour l'évaluation de la sensibilité de la nappe phréatique de Mnasra (Maroc nord-occidental) à la pollution d'origine agricole, volume 11, journal de Physio Geo , page 43-64. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.5213>

Bekkoussa B.S., 2009. Modélisation du transfert et de la propagation des nitrates dans les eaux souterraines de la plaine de Ghriss. Thèse de doctorat. Université des Sciences et de Technologie d'Oran, page 1-162.

Bekkoussa S.M., 2020. Approche Hydrogéologie et Hydrochimique des Echanges entre Aquifères Profonds Superficiels du Bassin d'Oued Fekan. Thèse doctorat. Université de Mostapha Stambouli-Mascara, page 1-146.

Benblidia M. 2010. Gestion des ressources en eau : les limites d'une politique de l'offre,» Les Notes d'analyse du CIHEAM.

Benfetta, H., Achour, B., Bemini, B., 2011. Problématique de surexploration des eaux souterraines dans les zones arides : Cas de la plaine de Ghriss Mascara-Algérie. Courrier du Savoir. N°11, page 81-86.

Bentekhici N., Benkesmia, Y., Berrichi, F., Bellal, S. A. 2018. Évaluation des risques de la pollution des eaux et vulnérabilité de la nappe alluviale à l'aide des données spatiales. Cas de la plaine de Sidi Bel Abbès (nord-ouest algérien). Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, 31(1), page 43–59. <https://doi.org/10.7202/1047052ar>

Bernard, P., 1993. Théorie et application du coefficient de Kappa. Thèse de doctorat, Université Laval, ISBN: 0-315-85514-2.

Bézélgues, S., Des Garets, E., Mardhel .V et Dorfliger, N., novembre 2002 : Cartographie de la vulnérabilité des nappes de la grand terre de la marie-Glande(Guadeloupe) ; phase-1- ; BRGM/RP-51783-FR ; page 09,12.

Bonn, F et Rochon, G., 1992. Précis de télédétection. Presses de l'Université du Québec, vol.1, page 495.

Bordet J., 2007. L'eau dans son environnement rural : Hydraulique et cycle de l'eau, l'alimentation en eau potable, l'assainissement des agglomérations. Édition Johanet, p. 1-317.

Bouarfa, B. F., 2018. Gestion des ressources en eau dans les zones arides : défis et perspectives. Revue des Sciences de l'Eau, vol. 31, n° 12, pp. 123-135.

Boucenna. F., 2009. Cartographie par les différentes méthodes de vulnérabilité à la pollution d'une nappe côtière cas de la plaine alluviale de l'oued Djendjen (Jijel, Nord-Est Algérien). Thèse de magister, option : hydrogéologie environnemental et modélisation, Univ-badji mokhtar-ANNABA, page 75.

Bouchahm, N., Slimani, R., Chaib, W., Rezeg, A., Benaouda, L., Djabri., 2009. Détermination de la vulnérabilité des eaux a la pollution par différentes méthodes : application à la nappe phréatique de Biskra sud algérien, Journal Algérien des Régions Arides, N° 08, page 38.

Boucheseiche C., Cremille E., Pelte T., Pojer K., 2002. Pollution toxique et écotoxique : notions de base, guide technique N°7, SDAG, Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, Page 17.

Boukli, H. C et Rabah F. A., 2017. Systèmes d'Information Géographique : cours et travaux pratiques, Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen –, page 10-13.

Bouselsal B., Zeddouri A., Belksier M.S et Fenazi B., 2015. Contribution de la méthode de vulnérabilité intrinsèque GOD à l'étude de la pollution de la nappe libre d'Ouargla (S.E Algérie). International Journal for Environment & Global Climate Change. ISSN 2310-6743. Vol 3, Issue 4, 2015, p94.

Castany G., 1982. Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Edition Dunod. Paris, page 1-238.

Centre Canadien de Télédétection., 2008. Notions fondamentales de télédétection URL : <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca>, page 05.

Chakroun, H., 2014. Introduction aux SIG et Télédétection en génie civil, école nationale d'ingénieurs de Tunis (ENIT), page 4.

Charikh, M., 2015. Estimation et cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines en milieu aride: application à la cuvette de Ouargla, thèse de Magister, Université Kasdi Merbah Ouargla, page 32. Doctorat en sciences, université BADJI MOKHTAR-Annaba, page .05.

Corine land cover. 1993. European Community, Guide technique. Office des publications des Communautés Européennes. Série environnement, sécurité nucléaire et protection civile, Bruxelles

Dahmani, A., 2010. Impact des changements climatiques sur les ressources en eau dans le bassin versant d'oued Fekan Wilaya de Mascara. Thèse Doctorat ES-Sciences. Université des Sciences de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, page 72.

Doris, D., 1998. Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution (par l'intégration d'un SIG, de la télédétection et d'un modèle mathématique), Mémoire du grade de Maître ès science (M. Sc.), Université du Québec, INRS-Eau, Page 08.

Drias, T et Toubal A.C, 2015. Cartographie de la vulnérabilité à la pollution de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott (bassin versant d'Oued Ksob), extrême Est algérienne. Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°22, 2015, page35-48.

Drouiche A., 2012. Contribution à l'étude de la vulnérabilité spécifique à la pollution par les éléments en traces métalliques et les hydrocarbures : cas de la nappe d'eau souterraine de la Mitidja-Est. Thèse de Magister. Université des Sciences et de la Technologie. Houari Boumediene. N° 70/2012-M/ST. Page 92.

- Engel B.A., Navulur K.C.S., Cooper B.S and Hahn L., 1996. Estimating groundwater vulnerability to non-point source pollution from nitrates and pesticides on a regional scale, International Association of Hydrological Sciences, 521-535.
- Entreprise nationale des études hydrauliques (ENHYD), 2010. Etude d'Aménagement Hydro-Agricole de la Plaine de Ghriss (W. Mascara). Mission II.A– Allocation des Eaux et Délimitation des Zones à Irriguer. Page 1-89
- Fatih, B., 2009. Cartographie par les différentes méthodes de vulnérabilité a la pollution d'une nappe côtière cas de la plaine alluviale de l'oued djendjen (Jijel, nord-est algérien). Thèse de Magister, univ-Badji Mokhtar-Annaba, page 78.
- Fellah H.S., 2012. La cartographie de vulnérabilité du risque de pollution des eaux souterraines dans le groupement urbain de Tlemcen. Université de Tlemcen. Mémoire de Master en Hydraulique, page 12-17.
- Foster, S. et Hirata, R., 1991. Groundwater pollution risk assessment, a methodology using available data. CEPIS Rapport technique, Lima, Perou, 2nd édition, page 73.
- Francois Renard, 2015 : cours d'hydrogéologie ; licence professionnelle, page 3-4.
- Françoise G., 2013. La contribution des SIG à la connaissance et à la gestion de l'environnement littoral, volume 3. HAL Id: tel-00321106. URL : <https://theses.hal.science/tel-00321106v1>, page 18.
- Fréchette, R. 1987. Étude comparative des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines, face au risque de contamination engendré par l'usage des pesticides Caractérisation d'aquifères situés au Québec. Mémoire de maîtrise ès sciences (eau), Université du Québec, INRS-Eau. 112 p.
- Gabriel E. AKE H., Kouadio B., Dongo K., Brou D., Koffi K., et Bem J., 2010. Application des méthodes DRASTIC et SI pour l'étude de la vulnérabilité à la pollution par les nitrates (N03-) de la nappe de Bonoua (Côte d'Ivoire). Journal Sciences biologie, chimie, 4 (5). ISSN 1991-8631, page 1684-1678.
- Gogu R and Dassargues A (2000). Current Trends and Future Challenges in Aquifer Vulnerability Assessment Using overlay and Index Methods. Environmental Geology, volume39, Page 549-559. <https://doi.org/10.1007/s002540050466>
- Gogu R et Dassargues A (1998). A short review on groundwater vulnerability assessment. Basic statements for use in the framework of the cost 620 action. Workshop, 18-20 mai, Université de Neuchâtel, Suisse, page. 1-19.
- Guillaume., Mai 2012. Estimation de la vulnérabilité de l'aquifère au roc de la zone bécancour (centre-du-Québec), université du Québec à MONTEAL, page 04
- Hafdeh, H.M., Added, A., Francés, A., Rodriguez, R., 2007. Validité de l'application des méthodes de vulnérabilité DRASTIC, SINTACS et SI à l'étude de le pollution par les nitrates dans la nappe phréatique de Metline-Ras Jebel-Raf Raf (Nord –Est Tunisien), journal de Comptes Rendus Géosciences, volume339, No.7, Page 493-505.
- Hammoun, H., Bouzida, R., Septembre 2010. Pratique des Système d'Information Géographique, Pages bleues Internationales, page 16.
- Hidaoui, H., 2020. Système d'information géographique pour l'aide à la décision pour la gestion des Forest, mémoire de master, Univ- Ahmed Draia – Adrar, page 21.
- Jourda JP, Kouame KJ, Adja MG, Deh SK, Anani AT, Effini AT, Biemi J. 2007. Evaluation du degré de protection des eaux souterraines : vulnérabilité à la pollution de la nappe de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire) par la méthode DRASTIC. Actes de la Conférence Francophone.SIG2007/10au11Octobre2007, Versailles-France, page 11.
- Journal Officiel de la République Algériennes Démocratique et Populaire (JORADP), 2012. N°41 du 15 juillet 2012, fixant les spécifications des eaux usées épurées utilisées à des fins d'irrigation.

Kellouche A., 2025. Réalisation d'un tableau de bord pour l'optimisation du fonctionnement des stations d'épuration à boues activées en Algérie. Thèse de doctorat, soutenue. pp.109.

Kevin L.L., 2012. Les eaux souterraines : captage, exploitation et gestion, université de Kinshasa –Graduat, page 1.

Khelfi M. et al. 2024. Mapping intrinsic groundwater pollution by applying the DRASTICGOS

Koller E., 2004. Traitement des pollutions industrielles : eau air déchets sol boues. 2 Edition Dunod, page 1-432.

Kouba, Y., 2018. Cours de système d'information géographique, HAL open science.URL : <http://hal.science/cel-01878296v1>, Page 12-17.

Lallemand B.A et Roux, J.C., 1999. Périmètre de protection des captages d'eau souterraine destinée à la consommation humaine, 2 Édition BRGM.

Landis, J. R., Koch, G.G., 1977. The measurement of observer for categorical data, *Biometrics*, pp. 159-179.

Mardhel, V., Pinson, S., Gravier, A., Décembre 2005. Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines en région Nord-Pas-de-Calais (BRGM/RP – 54238 - FR).

Michel D., Jean A., 1993. Le forage d'eau : réalisation, entretien, réhabilitation. Ingénierie de l'environnement. Masson Paris Milan Barcelone Bonn. Page 10-12.

model using geospatial data: the case of the Ghriiss plain (NORTHWESTERN ALGERIA). *GeoScience Engineering journal*. Vol. 70, No. 2, ISSN 1802-5420, pp. 71–88.

Morgan., et Alexis G., 2013. État des lieux du secteur de l'eau en Algérie. Secteur de l'eau en Algérie. Institut de prospective économique de monde méditerranéen. Page2

Murat, V., 2000. Etude comparative des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères à la pollution : Application aux aquifères granulaires du piémont laurentien. Mémoire de maître ès sciences. Université du Québec. INRS- Géoresources. Québec, Volume 3, page 5- 291.

Murat, V., Paradis, D., Savard, M.M., Nastev, M., Bourque, É., Hamel, A., Lefebvre, R. et Martel, R., 2003. Vulnérabilité à la nappe des aquifères fracturés du sud-ouest du Québec : évaluation par les méthodes DRASTIC et GOD ; Commission géologique du Canada, Recherches en cours 2003-D3, page 14.

NJIKE, N. S., 2019. Cartographie et SIG : théorie et pratique, Academia. Url : [https://www.academia.edu/38417422/Cartographie\\_SIG](https://www.academia.edu/38417422/Cartographie_SIG), page 10, Consulté : 24/11/2024 à 19:44.

Osborn, N. B. I., Eckenstein, E., Koon, K. Q., 1998. Vulnerability Assessment of Twelve Major Aquifers in Oklahoma (Oklahoma Water Resources Board Technical Report 98-5, page 1-34.

Ouédraogo, M.M., Degré, A et Debouche Ch., 2014. Synthèse bibliographique : le modèle numérique de terrain de haute résolution, ses erreurs et leur propagation, *journal de Biotechnol. Agron. Soc. Environ*, 18(3), page 407-421.

P. Lafrance, O. Banton, P.G.C Campbell, J.P. Villeneuve, 'réseau 1989. Des pesticides dans l'eau souterraine : généralité sur l'état de la contamination aux pesticides au Québec et explication de l'intérêt de la modélisation du transport de ces pesticides par un logiciel de

Peucker, T.K., Fowler, R.J., Little, J.J et Mark, D.M., 1978. The triangulated irregular network. In: *Proceedings of the Digital Terrain Models Symposium*, 9-11 May 1978, St. Louis, Missouri. Bethesda, MD, USA: American Society of Photogrammetry/American Congress on Surveying and Mapping, 516-540.

Pornon, H., 1992. Les SIG mise en œuvre et application, Edition Hermes, 160.

Rahman, A., 2008. A GIS based DRASTIC mode) for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Aligarh, India. *Applied Geography*, 28(1), page 32-53. DOI : [10.1016/j.apgeog.2007.07.008](https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2007.07.008)

Reido, M et Mottier V., 2002. Les langages orientés développement, in langages pour les SIG. Conception, développement, IHM. Sous la direction de Michel Mainguenaud, Editor. Hermes Science : Paris. Page 71-89.

RIBEIRO, L., 2000. Desenvolvimento de um índice para avaliar a susceptibilidade de dos aquíferos à contaminação. Note interne, ERSHA-CVRM, Lisbonne, Portugal, page8.

Schnebelen, N, Platel JP, Lenindre Y, Baudry D (2001). Gestion des eaux souterraines en Aquitaine Année 5. Opération sectorielle. Protection de la nappe de l'oligocène en région bordelaise. Cartographie de la vulnérabilité à la pollution. Bureau de recherches géologiques et minières, RP-51178-FR, France, page 75.

Souikni, N et Seghiour, N., 2006. Contribution à l'étude de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines dans le grand Tlemcen (Tlemcen-Mansourah-Chetouane). D.E.U.A. Université Tlemcen.

Sourisseau B., 1974. Etude hydrogéologique de la nappe de Mascara. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (A.N.R.H), Sous-direction des ressources en eaux. Algérie, pp 14-16.

Thévenot, D., 2007. L'eau de pluie en ville : de la mesure à la gestion durable de la chimie aux sciences aux sciences humaines. Université Paris 12 Val de Marne, ENPC, ENGREF (UMR-A 102), page7.

Véronique, M, Vernoux J.F., mai 2000. Les risques pesant sur les nappes d'eau souterraines d'Ile-de-France, annales des mines, BRGM, page32.

Vrba J et Zaporozec A.,1994. Guidebook on mapping groundwater vulnerability. International Contributions to Hydrogeology, volume 16. Heise (Hanovre): International Association of Hydrogeologists, page 1-164.

Zaporozec, A et Vrba, J., 1994. Guidebook on mapping groundwater vulnerability. AIH, vol.16, Page 131.

Page Web :

- [1] Beauchamp J., D.E.S.S. Qualité et gestion de l'eau pollution et dépollution des nappes d'eau souterraines ; Université Picardie Jules Verne de France. Le Site : <http://www.u-picardie.fr/beauchamp/cours.qge/pol-sout/pol-sout.html>  
Consulté le : 27/03/2012.
- [2] Association Santé Environnement France (ASEF). Pollution de l'eau origines et impacts. Europôle de l'Arbois. Avenue Louis Philibert 13857 Aix-en-Provence Cedex3 Page 7. Le site : [www.asef-asso.fr](http://www.asef-asso.fr)  
Consulté le : 09/11/2024 à 19 :23.

# **ANNEXES**

**ANNEXES****Annexe A : Représentation des paramètres utiles en test statistique de Wilcoxon.**

X	Y	Rang	XUY	Origine	Rang	XUY	Origine
206.6	174.7	1	174.7	Y	10	250.5	X
230.2	189.3	2	189.3	Y	11	250.7	X
233.2	191	3	191	Y	12	265.3	Y
250.5	215.3	4	206.6	X	13	265.6	Y
250.7	229.3	5	215.3	Y	14	276.7	Y
286.7	240	6	229.3	Y	15	276.8	Y
320.5	265.3	7	230.2	X	16	285.4	Y
326.3	265.6	8	233.2	X	17	286.7	X
377.6	276.7	9	240	Y	18	291.4	Y
	276.8				19	301.7	Y
	285.4				20	302	Y
	291.4				21	306.4	Y
	301.7				22	311.3	Y
	302				23	320.5	X
	306.4				24	326.3	X
	311.3				25	342.8	Y
	342.8				26	345.8	Y

**Annexe B : Les valeurs des précipitations durant 24ans (1985-2005) de la station de Matmore.**

Mois/année	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
1985	11.7	3.1	36.5	26.5	40.6	8.3	70.9	19.2	33.9	0	0	0
1986	68.2	21	16.1	48	78.6	66.7	50	18.5	2.5	5	0	3
1987	83.7	17.6	36.5	25.9	38.5	72.5	13	1.8	11.5	0	25.3	0
1988	5.5	6.3	37.2	6.5	69.6	10.5	16.7	36.1	35.1	6.7	0	0
1989	11.3	2	14.3	23.5	5	20.4	62.5	27.1	3.8	15.5	4	17.2
1990	12	26	49.2	29.6	61.5	0	16	35.5	28.5	9	18.5	0.9
1991	10.6	8.6	45.4	14.5	25.9	42.6	143.7	3.5	3.9	15	2.5	4.3
1992	10.5	18	25	15.1	18.5	12.4	57.3	37.8	36.9	19	0	0
1993	14	53.5	30.9	10.8	0.9	25.2	11.2	50.7	34	0	0	2
1994	19.7	55.4	40.5	10.7	27.6	50.3	0	18.7	3.3	0	0	3.1
1995	12.9	25.3	22.8	98.3	32.7	18.8	62.2	13.2	0	4.6	0	0.6
1996	14.1	6.9	10.7	30.8	54.9	70.6	33.1	54.1	23.4	4.4	5	3.3
1997	31.5	23.7	58.9	32.6	49.6	1.5	0	70.3	8.1	0	0	25.8
1998	1	8.3	8	36.8	8	29.3	9.6	25.4	43.6	0	0	4.7
1999	42.5	23.1	38.5	39.8	27.4	33.8	53.7	0	4.6	0	0	1.9
2000	39.6	40.8	84.1	13.9	0	0	1.6	9	18.3	0	0	8
2001	27.4	17.2	83.7	17.3	52	29.1	3	15.4	30.6	1	0	0
2002	0	16.4	61.1	5.9	0.3	0	20.5	34	37.7	0	0	13.4
2003	2.7	28.2	28.5	48.9	52.3	46.9	13.9	23.8	13.2	4.1	2.4	0.7
2004	4.4	45.7	56.8	69.3	21.1	36.9	10.5	12.1	73.2	9	0.4	3.4
2005	4.5	23.3	84	9.4	23	26.2	14.2	1.4	0	2.5	2.5	0
2006	6.3	1.9	9.5	71	105.7	29.4	11.7	8.6	33.3	2.8	1.5	3.7
2007	30.4	74.6	27.1	8.6	34.8	31.4	46	42.7	5.7	0	0	0.4
2008	40.4	29.2	43.9	72.6	19.5	13.3	18.4	7.2	45.4	7.6	8.9	0

**Annexe C : Les calculs des indices thermiques.**

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
P (mm)	21.037	24.004	39.55	31.929	35.333	28.171	30.821	23.587	22.104	4.425	2.958	4.017
T (°C)	23.316	18.816	12.1	9.383	9.016	12.316	12.216	14.476	18.166	23.65	27.233	27.5
EP	10.5602	7.1326	3.1795	1.996	1.8558	3.2841	3.235	4.4142	6.6882	10.8387	14.0311	14.2838
ETP (cm)	10.877	6.9186	2.7662	1.6966	1.6145	2.7915	3.332	4.8115	8.0925	13.1148	17.2582	16.5692
ETP (mm)	108.77	69.186	27.662	16.966	16.145	27.915	33.320	48.115	80.925	131.148	172.582	165.692
RU	00.00	00.00	11.888	26.851	46.039	46.295	43.796	19.268	00.00	00.00	00.00	00.00
DRU	00.00	00.00	11.888	14.963	19.188	0.256	-2.499	-24.528	-19.268	00.00	00.00	00.00
ETR	21.037	24.004	27.662	16.966	16.145	27.915	33.32	48.115	41.372	4.425	2.958	4.017
RFU	00.00	00.00	11.888	14.963	19.188	0.256	-2.499	-24.528	-19.268	00.00	00.00	00.00
DA	87.293	45.182	00.00	00.00	00.00	00.00	2.499	00.00	00.00	126.723	169.624	161.675
EC	00.00	00.00	00.00	00.00	00.00	00.00	00.00	00.00	00.00	00.00	00.00	00.00

**Annexe D : Classification des indices d'aridité de DE-Martonne.**

I	Type de climat
0 - 5	Hyper climat
5 - 10	Aride
10 - 20	Semi-aride
20 - 30	Semi-humide
30 - 40	Humide
40 - 55	Hyper humide

**Annexe E : L'intervalle de l'indice d'aridité de FAO.**

Indice de FAO	Climat
$I < 0.03$	Hyper aride
$0.03 < I < 0.2$	Aride ou désertique
$0.2 < I < 0.5$	Semi-aride ou sahélien
$0.5 < I < 0.75$	Subhumide

**Annexe F : Facteur de correction.**

Mois/année	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
20°	1.02	1	0.93	0.94	0.95	0.9	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11
25°	1.02	0.99	0.91	0.91	0.93	0.89	1.03	1.06	1.15	1.14	1.17	1.12
26°	1.02	0.99	0.91	0.91	0.92	0.88	1.03	1.06	1.15	1.15	1.17	1.12
27°	1.02	0.99	0.91	0.9	0.92	0.88	1.03	1.07	1.16	1.15	1.18	1.13
28°	1.02	0.98	0.9	0.9	0.91	0.88	1.03	1.07	1.16	1.16	1.18	1.13
29°	1.03	0.98	0.9	0.89	0.91	0.87	1.03	1.07	1.17	1.16	1.19	1.14
30°	1.03	0.98	0.9	0.88	0.9	0.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.2	1.14
31°	1.03	0.98	0.9	0.88	0.9	0.87	1.03	1.08	1.18	1.18	1.2	1.15
32°	1.03	0.98	0.9	0.87	0.89	0.86	1.03	1.08	1.19	1.19	1.2	1.15
33°	1.03	0.97	0.89	0.86	0.88	0.86	1.03	1.09	1.19	1.2	1.22	1.15
34°	1.03	0.97	0.89	0.86	0.88	0.85	1.03	1.09	1.2	1.2	1.22	1.16
35°	1.03	0.97	0.87	0.85	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16
36°	1.03	0.97	0.86	0.84	0.87	0.85	1.03	1.1	1.21	1.21	1.24	1.16
37°	1.03	0.97	0.85	0.83	0.87	0.84	1.03	1.1	1.22	1.22	1.25	1.17
38°	1.04	0.96	0.84	0.83	0.86	0.84	1.03	1.1	1.23	1.23	1.25	1.17
39°	1.04	0.96	0.84	0.82	0.85	0.84	1.03	1.11	1.23	1.24	1.26	1.18
40°	1.04	0.96	0.83	0.81	0.85	0.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18

**Annexe G : Tableau récapitulatif des résultats de la lame d'eau ruisselée.**

Méthode de calcul	Résultat
Méthode de TIXERONT-BERCALOFF	98.614mm
Méthode de SOGREAH	114.653mm
Méthode de COUTAGNE	70.66mm

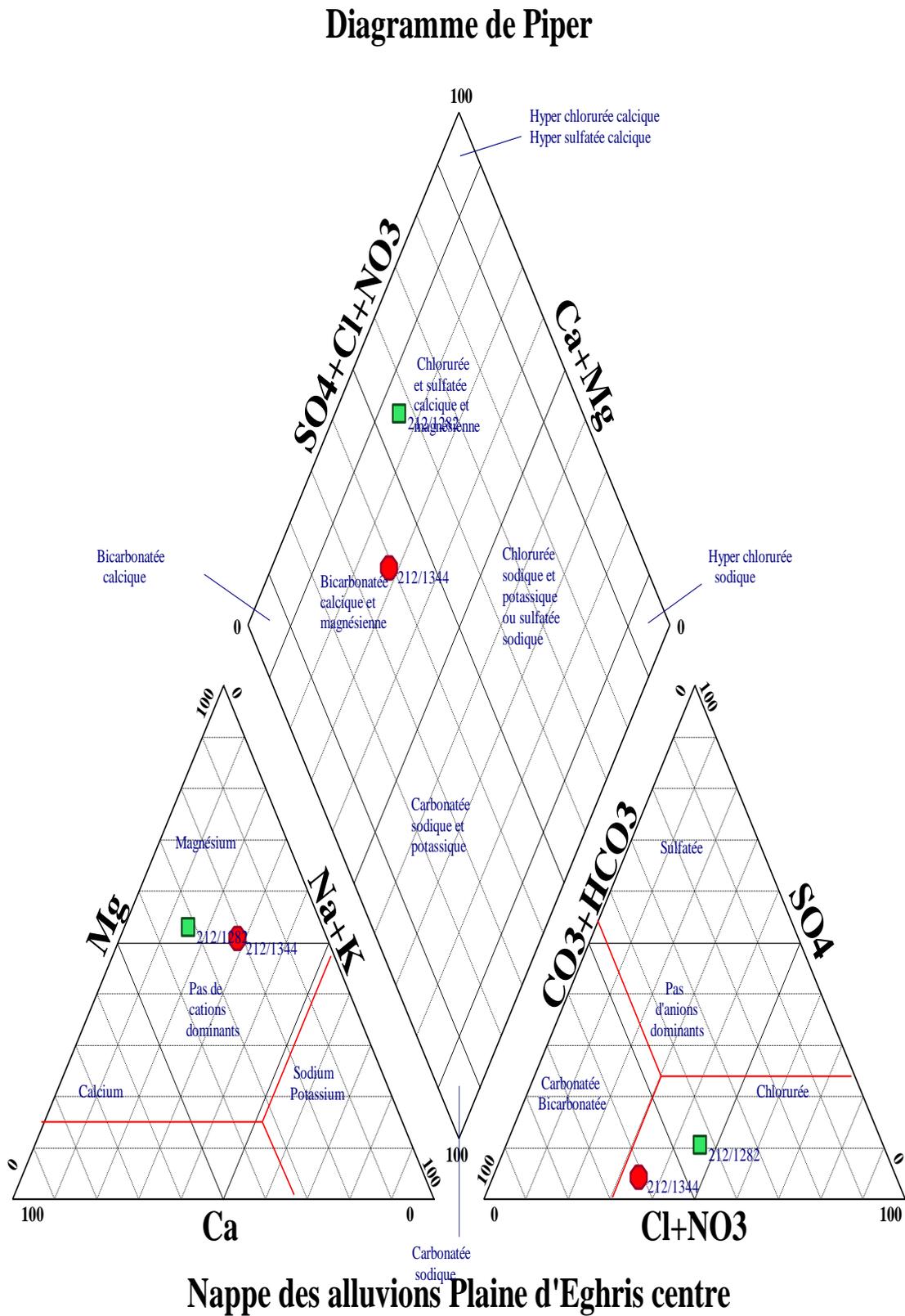
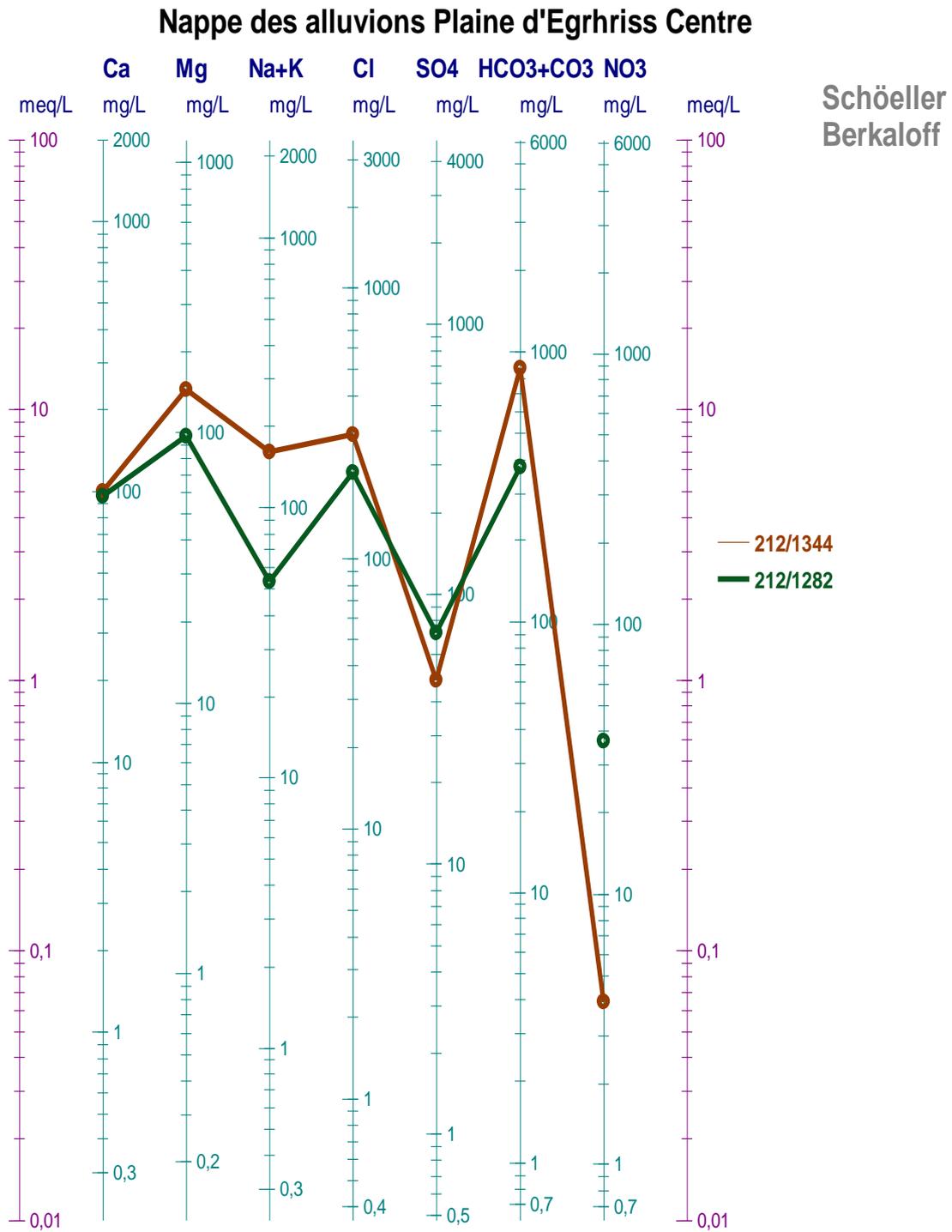


Figure I. A 1. Diagramme de Piper de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss- centre.



**Figure I. A 2.** Diagramme de Schöeller Berkaloff de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss – Centre (ENHYD, 2010)..

## Diagramme de Piper

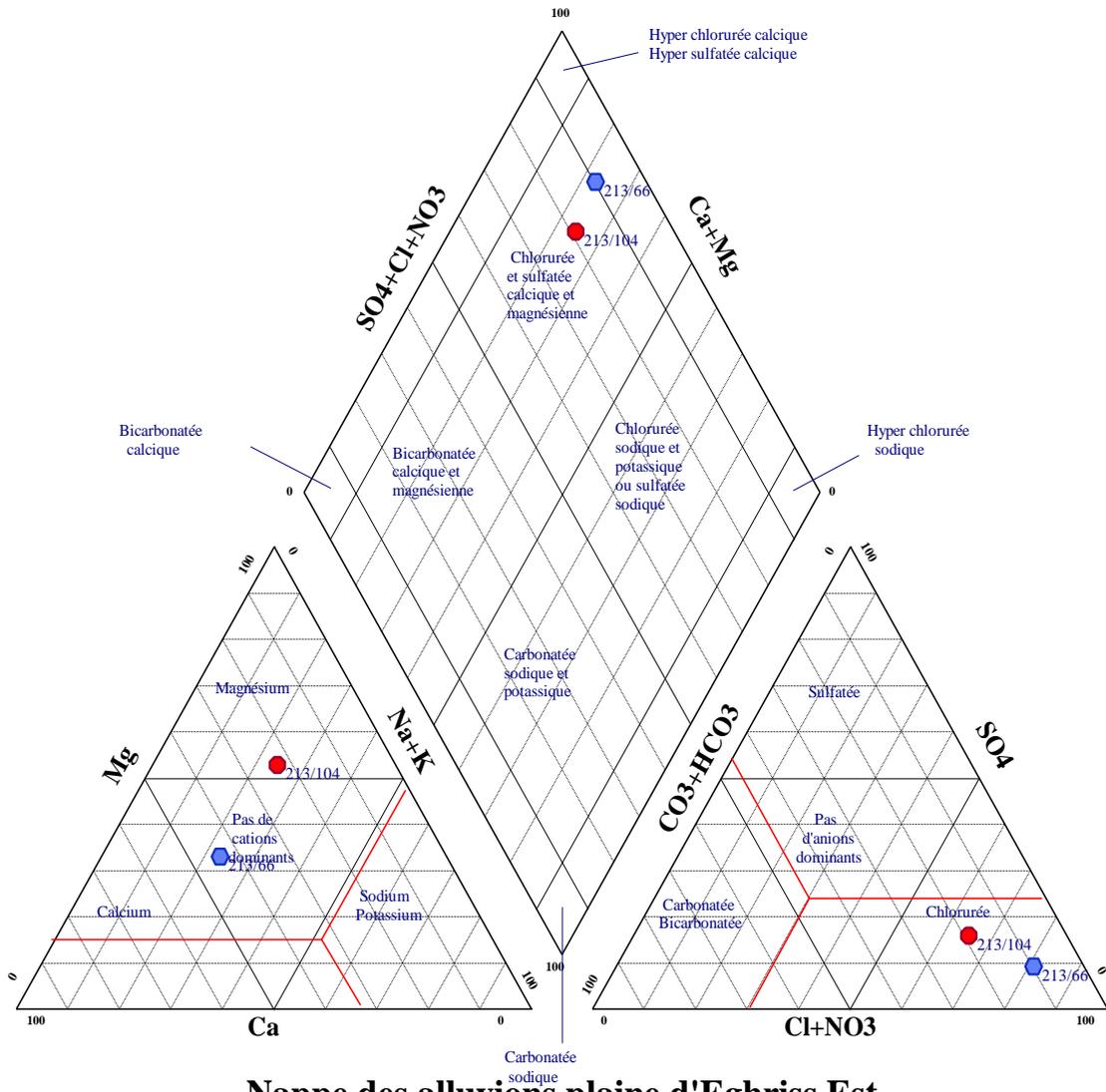


Figure I. A 3. Diagramme de Piper de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss- Est (ENHYD, 2010)..

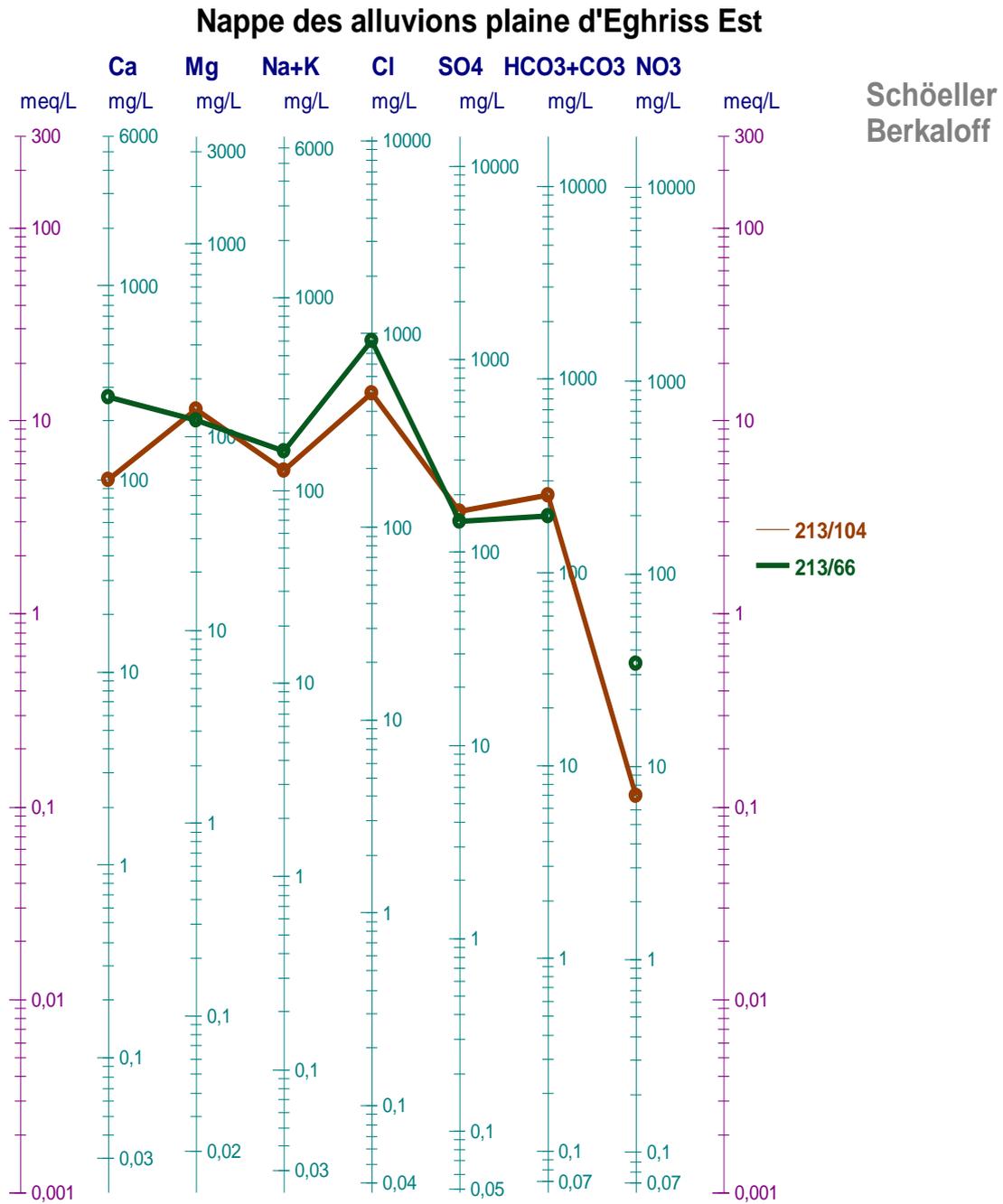
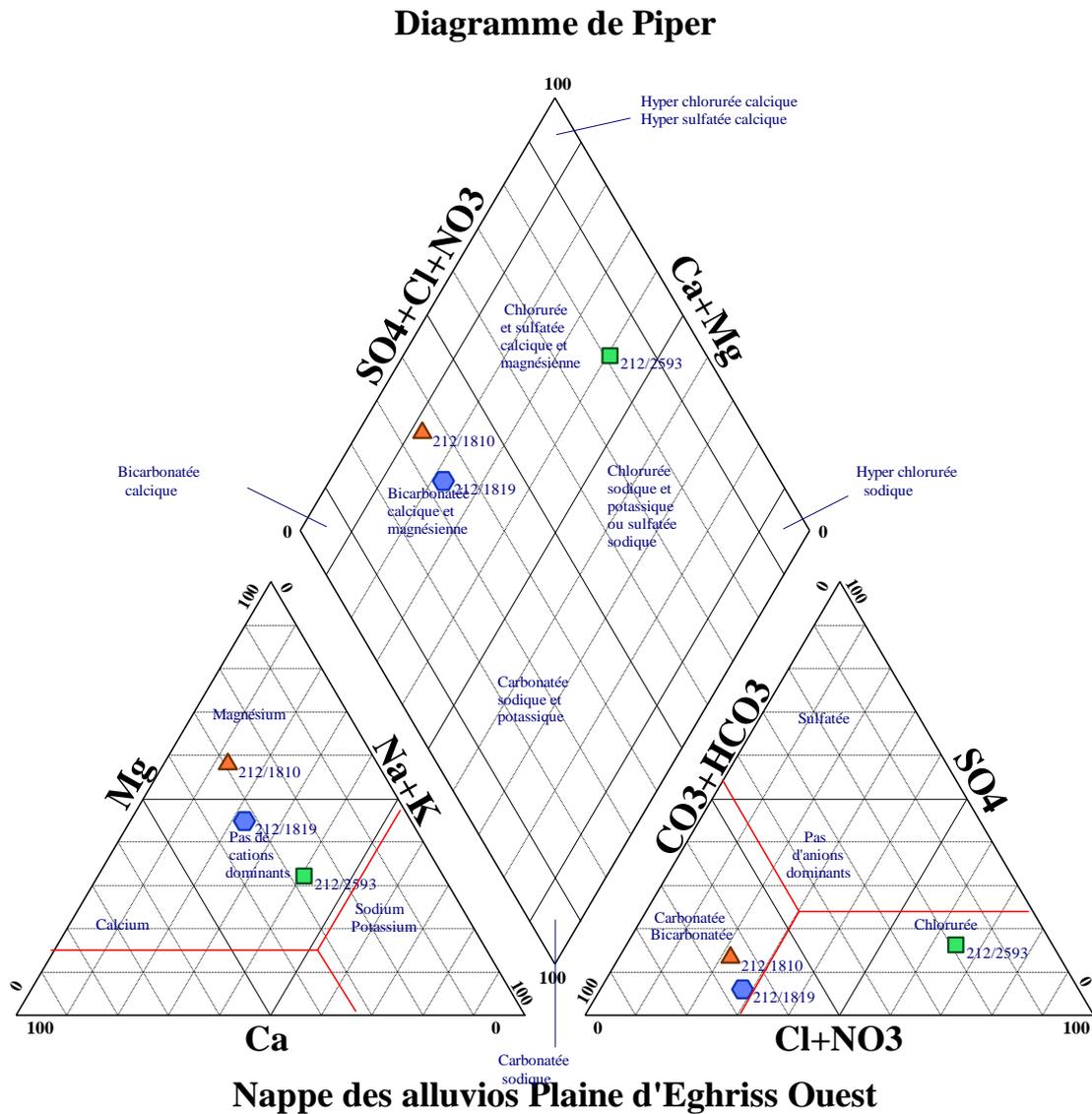
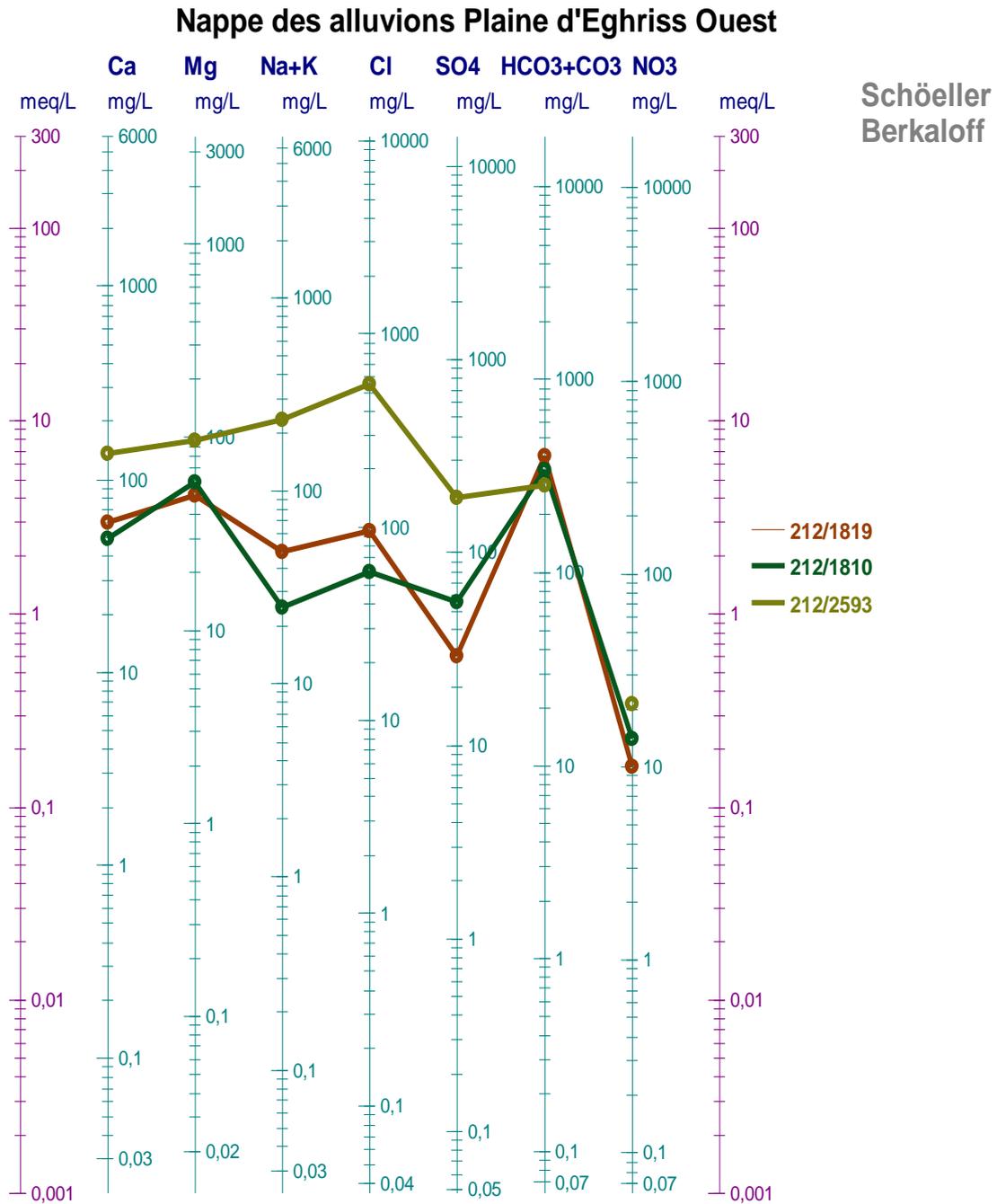


Figure I. A 4 . Diagramme de Schöeller Berkaloff de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss – Est (ENHYD, 2010)..



**Figure I. A 5.** Diagramme de Piper de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss – Ouest (ENHYD, 2010).



**Figure I. A 6.** Diagramme de Schöeller Berkaloff de la nappe Plio-Quaternaire de Ghriss – Ouest (ENHYD, 2010)..

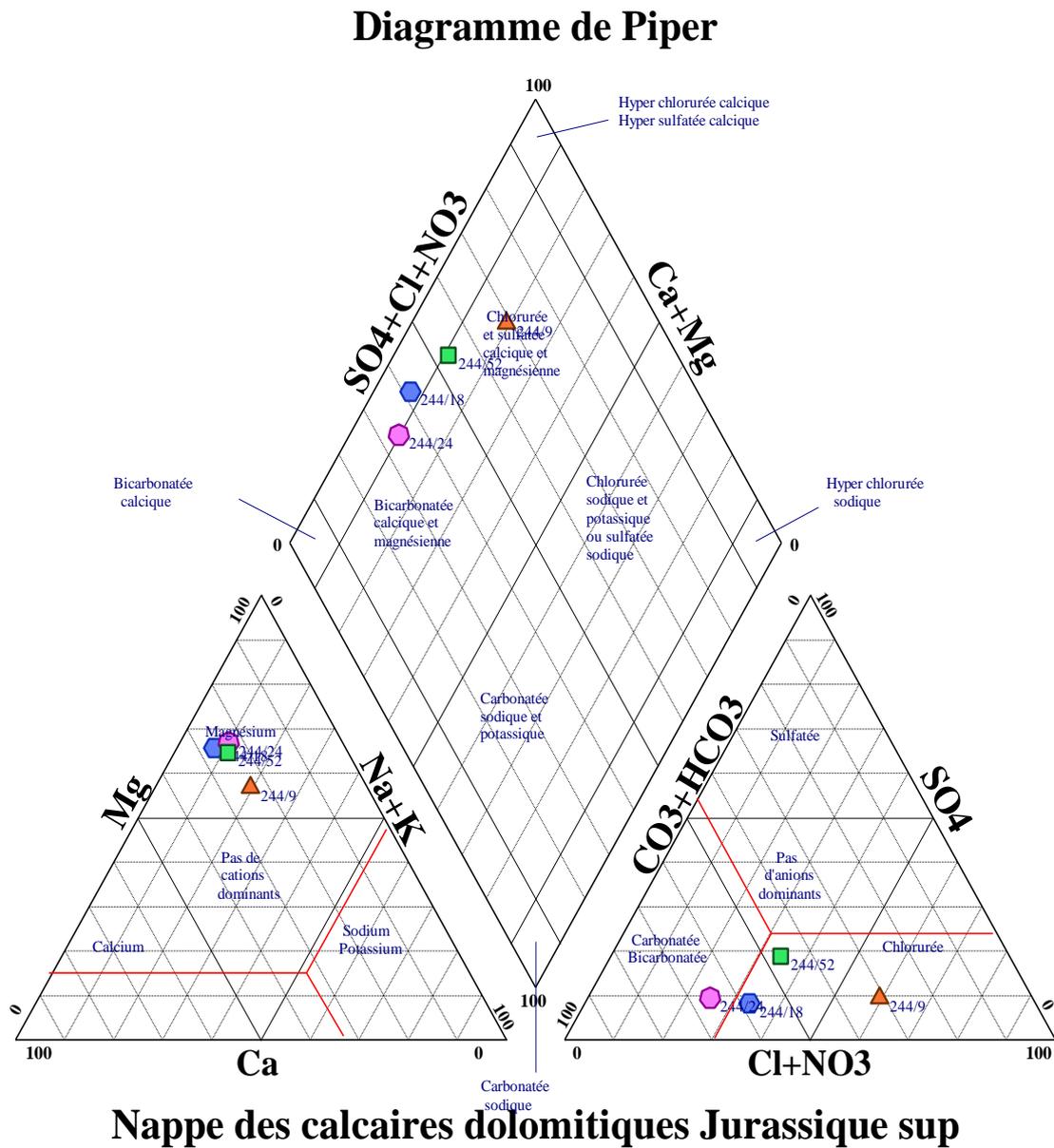


Figure I. A 7. Diagramme de Piper de la nappe des calcaires dolomitiques de jurassique supérieur de Ghriss (ENHYD, 2010).

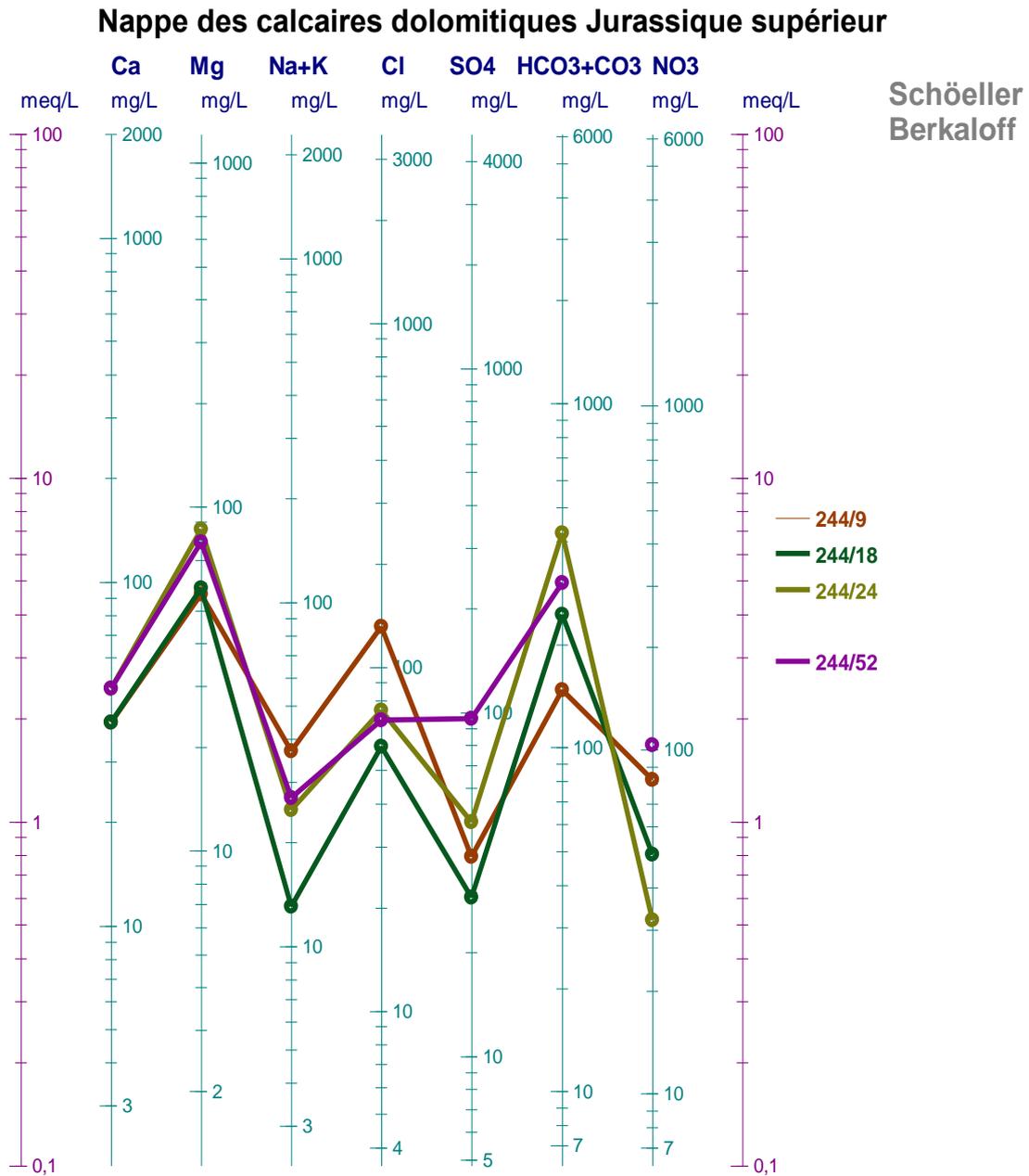
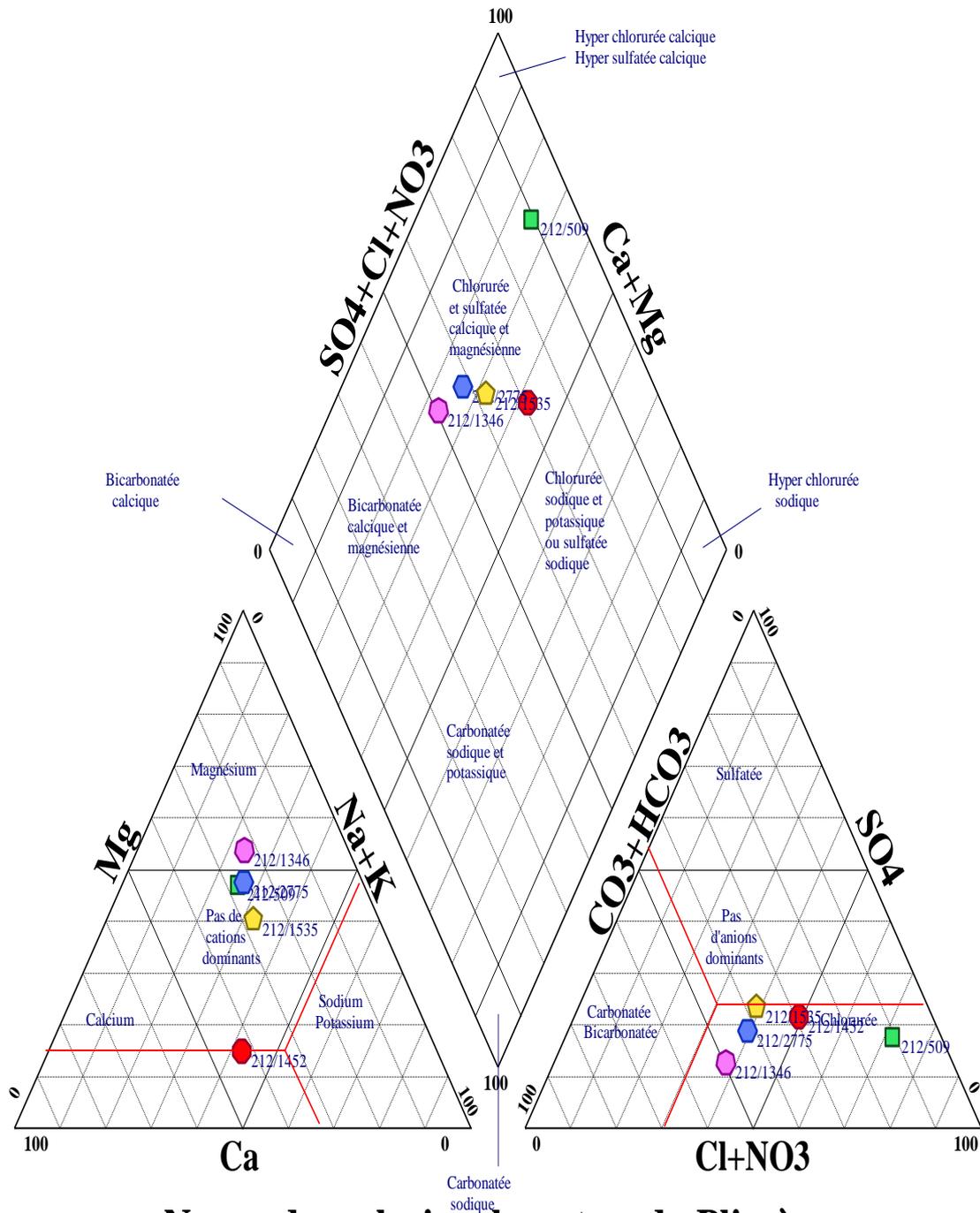


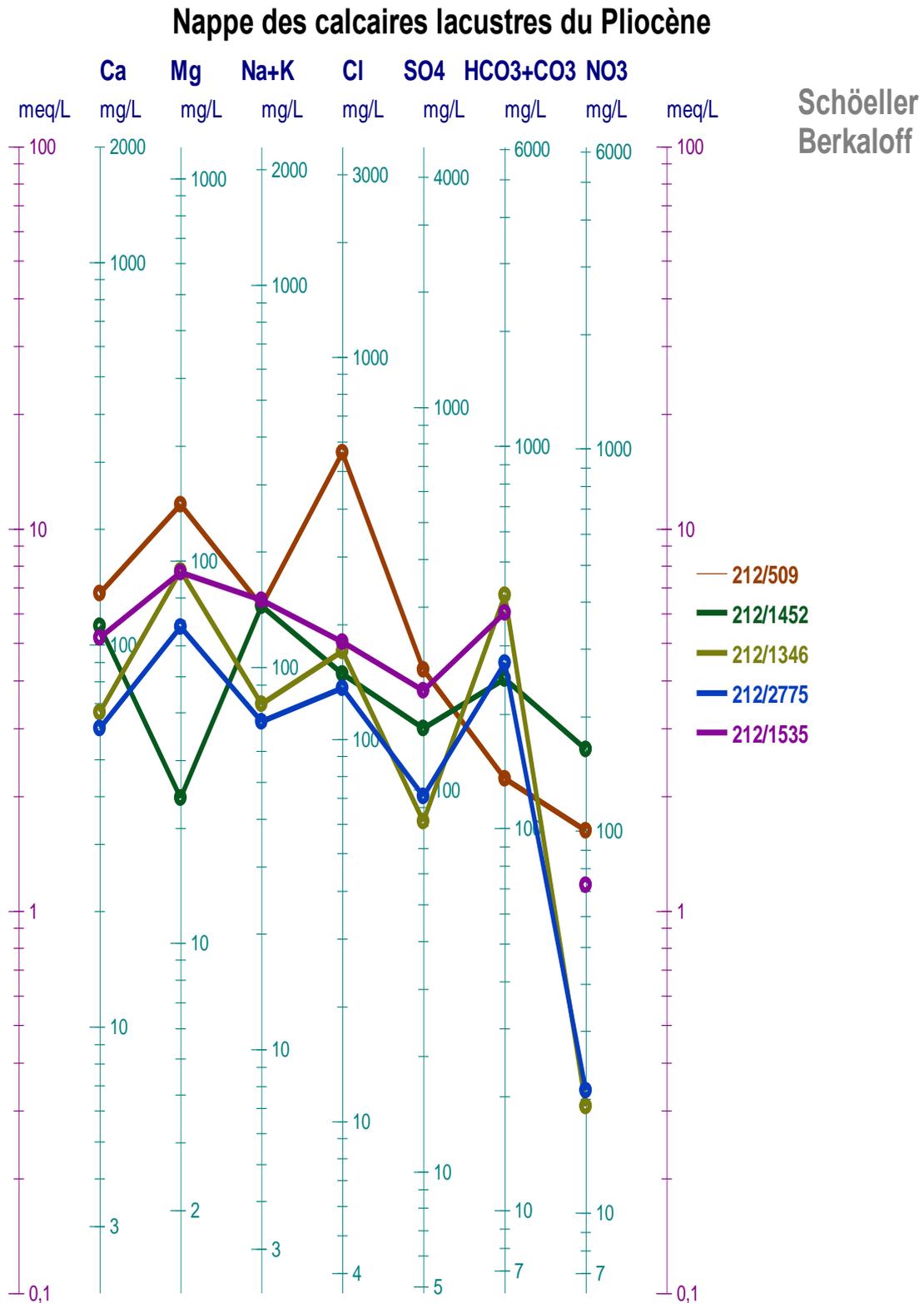
Figure I. A 8 . Diagramme de Schöeller Berkaloff de la nappe des calcaires dolomitiques de jurassique supérieur de Ghriss (ENHYD, 2010).

## Diagramme de Piper



## Nappe des calcaires lacustres du Pliocène

Figure I. A.9. Diagramme de Piper de la nappe des calcaires lacustres du Pliocène de Ghriss (ENHYD, 2010).



**Figure I. A 10.** Diagramme de Schöeller Berkaloff de la nappe des calcaires lacustre du Pliocène de Ghriss (ENHYD, 2010).

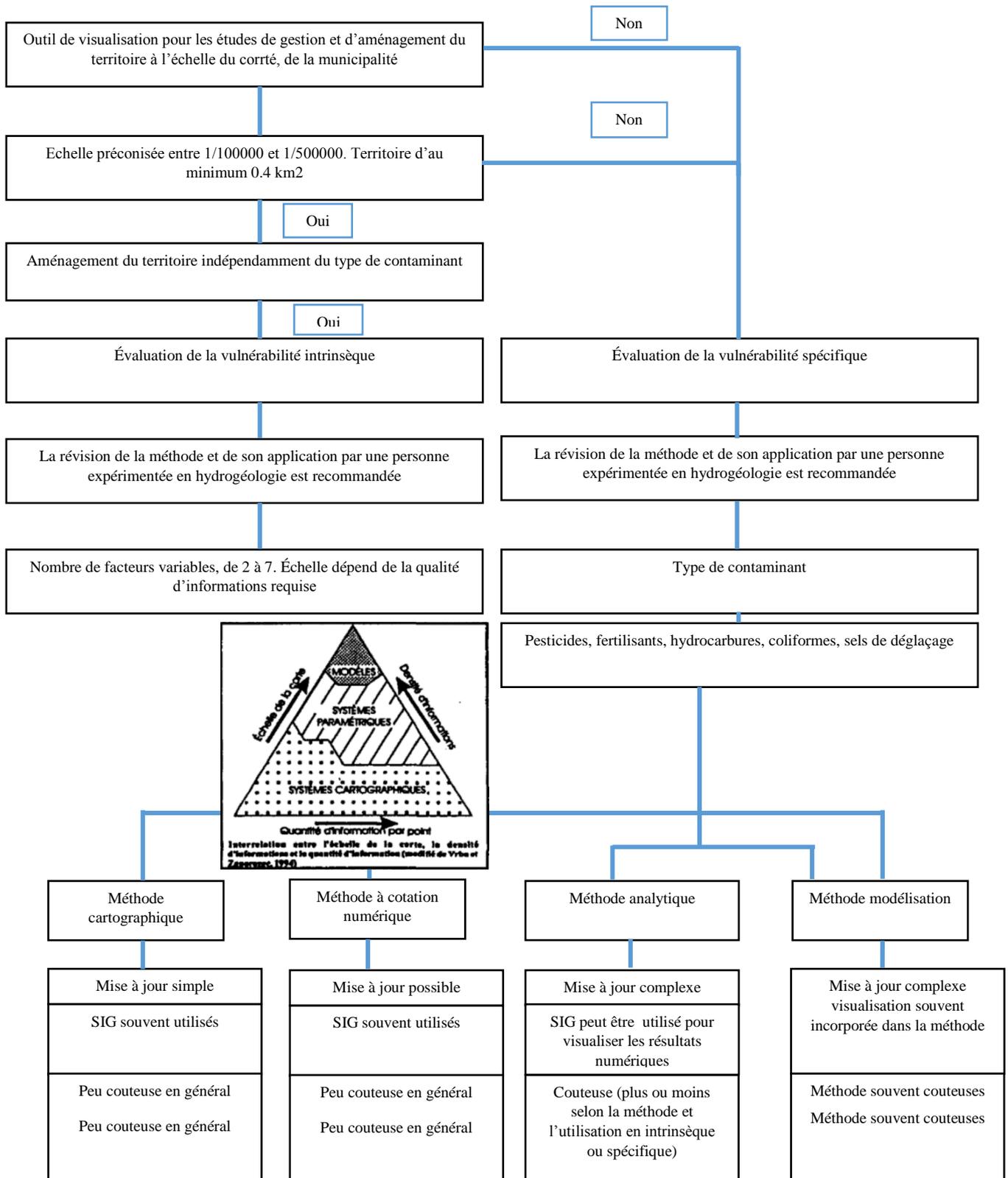


Figure II. A 1. Organigramme pour l'aboutissement à une méthode d'évaluation de la vulnérabilité.

**Annexe H: Les catégories d'occupation des sols et le poids SI (Corine land Cover, 1993).**

Classes d'occupation des sols	Valeur du facteur (LU)	Paramètres	Poids
Décharge d'ordures, mines, carrières	100	D	0,186
Périmètres irrigués	90	R	0,212
Carrière, chantier naval	80	A	0,259
Zones vertes continues	75	T	0,121
Cultures permanentes (vignes, olivier, etc...)	70	OS	0,222
Décharge d'ordures, mines, carrières	100		
Périmètres irrigués	90		
Zones urbaines	70		
Zones de pâturages	50		
Milieus aquatiques (marais, salines, etc.)	50		
Forêts et zones semi-naturelles	0		

**Annexe I: Norme d'interprétation de Kappa (K) (Landis et al., 1977 in Allechy, F.B et al., 2016)**

Valeurs observées de Kappa	Valeurs observées de Kappa
< 0	Accord quasi-inexistant
0 – 0.20	Faible accord
0.21 – 0.40	Accord passable
0.41 – 0.60	Accord modéré
0.61 – 0.80	Accord important
0.81 – 1.00	Accord presque parfait

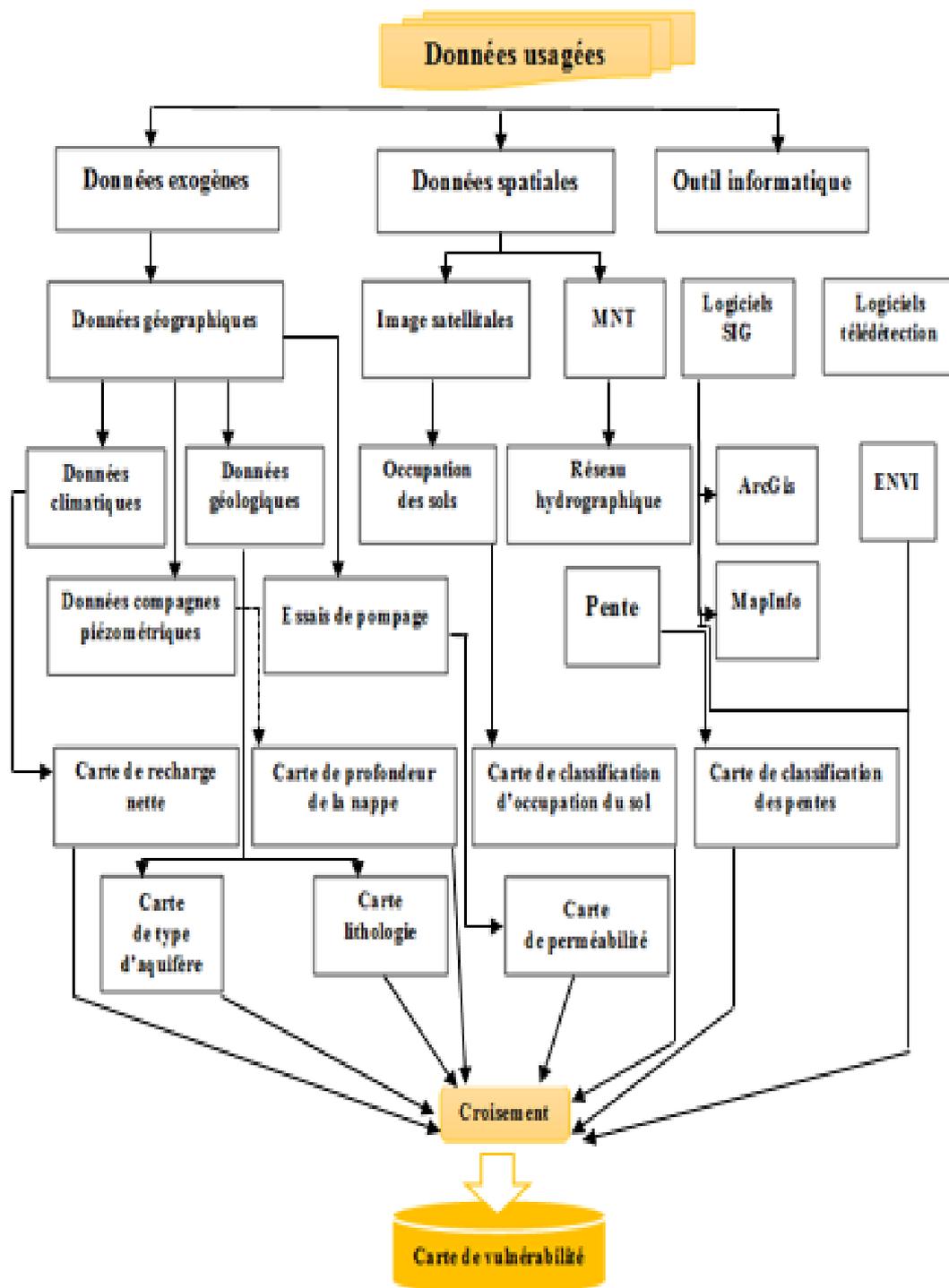


Figure III. A 1. Organigramme de réalisation d'une carte de vulnérabilité.

**Annexe J : Répartition des résultats de test de Kappa entre les méthodes GOD et DARSTIC.**

Classe de vulnérabilité	Faible	Moyenne	Forte	Total	U.Précision	Kappa
Faible	10	12	08	30	0.333333	0
Moyenne	0	28	2	30	0.93333333	0
Forte	0	30	0	30	0	0
Total	10	70	10	90	0	0
Précision	1	0.4	0	0	0.422222	0
Kappa	0	0	0	0	0	0.133333

**Annexe K : Répartition des résultats de test de Kappa entre les méthodes SI et DARSTIC-GOS.**

Classe de vulnérabilité	Faible	Moyenne	Forte	Très forte	Total	U.Précision	Kappa
Faible	1	25	4	0	30	0.033333	0
Moyenne	0	0	0	30	30	0	0
Forte	0	0	0	30	30	0	0
Très forte	0	0	0	30	30	1	0
Total	1	25	4	90	120	0	0
Précision	1	0	0	0	0	0.258333	0
Kappa	0	0	0	0	0	0	0.11111

**Annexe L: Corrélation entre les niveaux de nitrates et les diverses catégories de vulnérabilité des méthodes utiles.**

Méthode	Classe de vulnérabilité	Teneur en nitrates (mg/l)				
		- 10	10 - 30	30 - 50	50 - 70	+70
DRASTIC	Faible	0	0	0	0	0
	Moyenne	3	11	6	1	3
	Forte	2	3	2	2	1
Total		5	14	8	3	4
DRASTIC-GOS	Faible	0	0	0	0	0
	Moyenne	1	3	1	0	1
	Forte	2	1	0	0	2
	Très forte	2	10	7	3	1
Total		5	14	8	3	4
SI	Très faible	1	2	1	0	0
	Moyenne	0	1	0	0	0
	Forte	3	6	1	1	2
	Très forte	1	5	6	2	2
Total		5	14	8	3	4
GOD	Très faible	0	1	1	0	0
	Faible	2	3	1	1	2
	Moyenne	3	9	5	2	2
	Forte	0	1	1	0	0
Total		5	14	8	3	4